

การศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมชุดเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงาน
ชุบเคลือบโดยใช้พลังงานต่ำ

STUDY AND DEVELOPMENT THE CONTROL SYSTEM OF HEAT
INDUCTION FOR COATING USING LOW ENERGY

ภควัตร คำสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมชุดเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงาน
ชุบเคลือบโดยใช้พลังงานต่ำ

ภควัฒร์ คำสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมชุดเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบเคลือบโดยใช้พลังงานต่ำ
ชื่อ-นามสกุล	นายภควัฒน์ คำสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จกกรี ศรีนนท์ฉัตร, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

เนื่องจากงานวิจัยทางด้านการใช้หม้อแปลงเหนี่ยวนำความถี่สูงเป็นโหลดตัวเหนี่ยวนำสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงนั้นมีข้อเสียอยู่คือระบบดังกล่าวมีการสูญเสียพลังงานภายในแกนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมชุดเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบเคลือบโดยใช้พลังงานต่ำ โดยการใช้โหลดตัวเหนี่ยวนำแบบต่อตรงกับวงจรจ่ายกระแสแบบฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ การต่อโหลดตัวเหนี่ยวนำโดยตรงตามเทคนิคดังกล่าวจะไม่ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานภายในหม้อแปลง

การทดสอบระบบใช้การปรับจูนค่าการผลิตความถี่จากไมโครคอนโทรลเลอร์ การปรับความถี่นี้จะเป็นการค้นหาความถี่ที่เหมาะสมที่สุดกับการใช้งานของงานวิจัยนั้นคือที่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้งนี้ระบบจะถูกควบคุมโดยวิธีการควบคุมระบบเปิด/ปิด และเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดี โดยสัญญาณจากระบบควบคุมจะถูกแปลงจากสัญญาณแอนะล็อก ไปเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อเข้าสู่หน่วยประมวลผล ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการตั้งค่าสำหรับการชุบแข็งที่เหมาะสมต่อไป

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานชุบเคลือบแข็งของวัสดุ ซึ่งวัสดุเป็นเหล็กสกรูขนาด 6 มิลลิเมตรและยาว 25 มิลลิเมตร นำมาให้ความร้อนโดยใช้เงื่อนไขการควบคุมกระแสที่ผ่านโหลดวงจรเรโซแนนซ์ที่ 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำชิ้นงานไปลดอุณหภูมิในน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วินาที แล้วทดสอบหาความแข็งพบว่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เดิมมีความแข็ง 287.6 – 288.9 เมกกะปาสกาล เป็น 322.5 – 330.8 เมกกะปาสกาล และมีกำลังงานที่ใช้ไปในระบบอยู่ระหว่าง 100-200 วัตต์ ซึ่งระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานชุบเคลือบขนาดเล็กหรืองานวิจัยได้ต่อไป

คำสำคัญ: ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรเรโซแนนซ์

Thesis Title	Study and Development The Control System of Heat Induction for Coating Using Low Energy
Name-Surname	Mr.Pakawat Chamsuk
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Jakkree Srinonchat, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

In order to, the research of a high frequency induction transformer to generate high intensity magnetic field still have got a disadvantage, in the term of high energy loss in primary coil and secondary coil of system. To solve the above problem, this thesis studies and develops the control system of heat induction for coating to consume energy less using the inductor load directly connect to a half bridge inverter circuit. This technique does not effected to the energy consume in transformer.

In the experiment, the system has been tested by tuning the frequency from micro controller. This turning is reached the best and suitable frequency for this system which is 47 kHz. This system is also controlled by on/off controller and PID controller. Both controller systems are compared. The control signal was directly convert from analog to digital signals and then pass it to a processor. The results will be used to find the best level of metal harden-coating in future experiments.

In the term of apply to material harden-coating research, this system is tested with the metal screw which is a 25 mm long, 6 mm diameter. The object was heated through current control at 3 A for 1 minute with the same resonance frequency. The object was then put in the constant 27°C water for 15 seconds to reduce the temperature. Then the object was determined the hardness. It was found that the object hardness was increased from between 287.6–288.9 MPa to 322.5–330.8 MPa, and power consumption of the system was 100–200 W. As a result, this system can be applied to a mini coating or further research.

Keywords: heat induction, half bridge converter, resonance circuit.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้นเพราะข้าพเจ้าได้รับการดูแลเอาใจใส่จากบุคคลต่างๆ ดังนี้ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำชี้แนะและแนะนำแนวทางการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ท่านอื่นๆ ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำมาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ที่ส่งเสริมข้าพเจ้าทุกเรื่อง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ รวมถึงน้องๆ ในสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมทุกท่าน ที่คอยประสานงานต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ คุณวิษณุ สมัครมิ่ง ซึ่งให้แนวคิดในการเริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์รวมทั้งให้คำปรึกษามาด้วยดีตลอด รวมทั้งท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้เขียนชื่อไว้ ที่ให้ความร่วมมือร่วมใจช่วยเหลือกันมาตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ากราบขอพระคุณพ่อคำตัน คำสุข และแม่เสงี่ยม คำสุข ที่ได้เสียสละสิ่งหลายอย่างที่ผ่านมาเพื่อข้าพเจ้าและขอบคุณพี่ชายส่งเสริมให้ได้มีวิชาความรู้ติดตัว มีความเจริญก้าวหน้าในการทำงานและชีวิต ขอขอบคุณสมาชิกครอบครัวสราภิรมย์ทุกท่านที่คอยเอาใจใส่และให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่กำลังศึกษา จนกระทั่งได้เห็นข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทฉบับนี้ในครั้งนี้

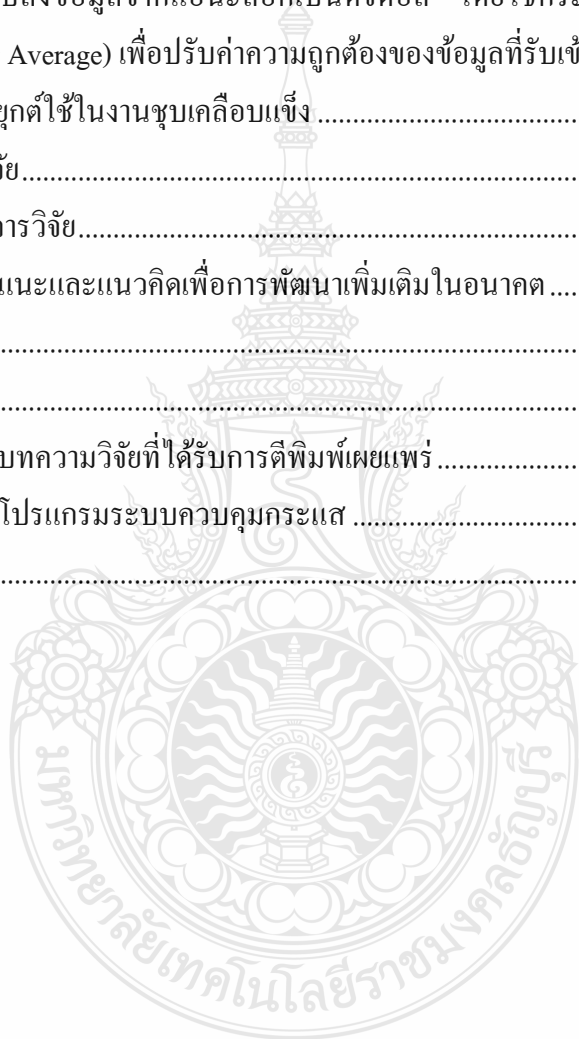
ภควัตร คำสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	13
1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	14
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 คำนำ.....	15
2.2 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	15
2.3 ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect).....	18
2.4 ผลของอุณหภูมิ (Temperature Effect).....	18
2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน (Work – coil and work - piece).....	20
2.6 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor, Q).....	24
2.7 วงจรผลิตความถี่.....	25
2.8 ภาษาที่ใช้ในการพัฒนาบนไมโครคอนโทรลเลอร์.....	28
2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit).....	30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 ปัญหาที่พบ.....	34
3.2 แนวคิดการแก้ปัญหา.....	34

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการศึกษา	36
3.4 การออกแบบระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย	49
4.1 ผลการแปลงข้อมูลจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โดยใช้กระบวนการเส้นค่าเฉลี่ย (Moving Average) เพื่อปรับค่าความถูกต้องของข้อมูลที่รับเข้ามา.....	49
4.2 การประยุกต์ใช้ในงานชุดเคลื่อนที่.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวคิดเพื่อการพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต.....	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	81
ภาคผนวก ข โปรแกรมระบบควบคุมกระแส	101
ประวัติผู้เขียน.....	143



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่ กระแส 4 แอมแปร์.....	50
ตารางที่ 4.2 ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำที่ กระแส 3 แอมแปร์.....	56
ตารางที่ 4.3 ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำที่ กระแส 2 แอมแปร์.....	61
ตารางที่ 4.4 ทดลองเปรียบเทียบค่า Cpk และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่ได้รับ จากกระบวนการวัดเปรียบเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณ ที่กระแส 4 แอมแปร์	67
ตารางที่ 4.5 การแทนค่าแบบ John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols	68
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 นาที และลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่ 27 องศาเซลเซียสโดยใช้กระแส 2 แอมแปร์.....	71
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 นาที และลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่ 27 องศาเซลเซียสโดยใช้กระแส 3 แอมแปร์.....	72
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 นาที และลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่ 27 องศาเซลเซียสโดยใช้กระแส 4 แอมแปร์.....	73
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการทดสอบความแข็งหลังชุบแข็งที่ควบคุมกระแสที่ 2 3 และ 4 แอมแปร์ตามลำดับ	74
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยก่อนและหลังชุบเคลือบแข็ง	76

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน[2]	15
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน[2]	16
รูปที่ 2.3 กราฟกระจายความหนาแน่นของกระแสกับความลึกผิว[2]	17
รูปที่ 2.4 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	17
รูปที่ 2.5 กราฟความจุความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ[1].....	19
รูปที่ 2.6 กราฟของความต้านทานจำเพาะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ[2]	19
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกผิวและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่และ ระยะเวลาในการให้ความร้อน[2]	20
รูปที่ 2.8 กราฟผลการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ ความต้านทานกับอุณหภูมิ[2]	21
รูปที่ 2.9 การกระจายความร้อนของชิ้นงานที่ไม่อยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางขดลวดเหนี่ยวนำ[2]	22
รูปที่ 2.10 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับค่าอินดักแตนซ์[2].....	23
รูปที่ 2.11 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบต่างๆ.....	24
รูปที่ 2.12 ตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์	25
รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรม AVR (ATmega16).....	26
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
รูปที่ 3.2 สมมติฐานของการทำงานของหม้อแปลงเหนี่ยวนำ	34
รูปที่ 3.3 สมมติฐานของการแก้ปัญหาที่คาดคิดไว้.....	35
รูปที่ 3.4 สมมติฐานการควบคุมกำลังงาน	36
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมชุดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	36
รูปที่ 3.6 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	38
รูปที่ 3.7 การต่อชุดโพลดวงจรเรโซแนนซ์.....	40
รูปที่ 3.8 วงจรผลิตความถี่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์	41
รูปที่ 3.9 วงจรผลิตความถี่และควบคุมกระแสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	41
รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมวงจรภายในไอซี FOD3120	42
รูปที่ 3.11 วงจรขับเคลื่อนแบบฮาล์ฟบริดจ์.....	42
รูปที่ 3.12 วงจรขับเคลื่อนแบบฮาล์ฟบริดจ์และวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์	43
รูปที่ 3.13 การต่อเซ็นเซอร์กระแส (Hall-element)	43

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 วงจรตรวจวัดกระแส.....	45
รูปที่ 3.15 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์.....	46
รูปที่ 3.16 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์.....	46
รูปที่ 3.17 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์.....	47
รูปที่ 3.18 รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 47 กิโลเฮิรตซ์.....	47
รูปที่ 3.19 รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตวงจรขับขาเกต.....	48
รูปที่ 4.1 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบ 8 10 12 และ 15 รอบ ที่การทำเส้น ค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์.....	52
รูปที่ 4.2 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์.....	53
รูปที่ 4.3 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์.....	54
รูปที่ 4.4 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์.....	54
รูปที่ 4.5 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์.....	55
รูปที่ 4.6 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบ 8 10 12 และ 15 รอบ ที่การทำเส้น ค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์.....	58
รูปที่ 4.7 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์.....	59
รูปที่ 4.8 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์.....	59
รูปที่ 4.9 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์.....	60
รูปที่ 4.10 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบ 8 10 12 และ 15 รอบ ที่การทำเส้น ค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์	63
รูปที่ 4.12 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์	64
รูปที่ 4.13 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์	65
รูปที่ 4.14 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์	65
รูปที่ 4.15 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์	66
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่า Cpk และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้รับจากกระบวนการวัด เปรียบเทียบจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณที่กระแส 4 แอมแปร์	67
รูปที่ 4.17 กราฟกระแสที่ควบคุมที่ 3 แอมแปร์ โดยกำหนดค่า Kp Ki และ Kd จากกระบวนการ Ziegler–Nichols, $K_d = (K_p \times P_u) / 8$, $K_d = (129 \times 8) / 8$, $K_d = 129$	69
รูปที่ 4.18 กราฟกระแสที่ควบคุมที่ 3 แอมแปร์ โดยกำหนดค่า Kp Ki และ Kd ร่วมกับ กระบวนการปรับค่าแบบ Ziegler–Nichols ร่วมกับกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ย 12 รอบ .	69
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างก่อนชุบเคลือบกับหลังชุบเคลือบ โดย ใช้กระแส 2 แอมแปร์	71
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างก่อนชุบเคลือบกับหลังชุบเคลือบโดยใช้ กระแส 3 แอมแปร์	72
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างก่อนชุบเคลือบกับหลังชุบเคลือบ โดย ใช้กระแส 4 แอมแปร์	73
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างกระแส 2 3 และ 4 แอมแปร์	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหลอมหรือชุบแข็งวัสดุในงานอุตสาหกรรม มีการหลอมหรือชุบวัสดุด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมากขึ้น จากเดิมที่มีการใช้เตาหลอมแบบใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆเช่น ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติมาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนกับเตาหลอมเป็นต้น การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้นเป็นการสร้างความร้อนจากภายในตัวชิ้นงานออกมา โดยมีการควบคุมความลึกจากผิวชิ้นงาน ด้วยวิธีการให้แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆกัน ทำให้มีความสะอาดทั้งเรื่องฝุ่น ควัน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้เชื้อเพลิงแบบถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติ[1] การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสิ่งที่เกี่ยวข้องเป็นหลักคือ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage source inverter) และแบบจ่ายกระแส (Current source inverter) อีกส่วนที่มีความสำคัญก็คือขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแสมีข้อดีที่สามารถใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำสามารถควบคุมการทำงานง่าย

งานวิจัยหลายงานวิจัยมีการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก โดยชุดขดลวดดังกล่าวมีการต่อกับตัวเก็บประจุเป็นวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant) ทั้งแบบอนุกรมและขนาน และหลายงานวิจัยใช้การต่อวงจรเรโซแนนซ์แบบใช้หม้อแปลงต่อกับขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แทนการต่อตรง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในหม้อแปลงทำให้ต้องใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีกำลังสูงในการจ่ายกระแสให้กับโหลดเรโซแนนซ์ชนิดดังกล่าว และเมื่อต้องการกระแสที่สูงขนาดของหม้อแปลงจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ตามขึ้นมา ชุดโหลดวงจรเรโซแนนซ์มีการต่ออีกหนึ่งแบบคือการต่อชุดโหลดเรโซแนนซ์โดยตรงกับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยไม่ผ่านหม้อแปลง ซึ่งการต่อแบบต่อตรงมีข้อดีคือการสูญเสียกำลังในหม้อแปลงไม่มี รวมไปถึงขนาดของวงจรเล็กกว่าแบบแรกเมื่อเทียบกับกำลังงานที่ใช้งานเท่ากัน ส่งผลให้ขนาดของวงจรโดยรวมมีขนาดเล็กกว่า

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงขอนำเสนอการสร้างชุดเหนี่ยวนำความร้อนแบบแหล่งจ่ายกระแสชนิดฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Half-Bridge inverter) โดยใช้การต่อชุดโหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมต่อตรงกับขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยอาศัยหลักการสวิตช์ความถี่ที่ใช้งานให้เหมาะสมกับชุดโหลดวงจรเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม มีการควบคุมกระแสที่ไหลในวงจรเรโซแนนซ์โดยการปรับ

ค่าดีวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ของวงจรรีเลย์เพื่อป้องกันกระแสเกินที่วงจรจะจ่ายให้กับโหลดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ สำหรับใช้ในวงจรให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบและทดลองสร้างชุดเหนี่ยวนำความร้อน โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสแบบฮาล์ฟบริดจ์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ปรับแต่งชุดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานหลอมหรือชุบแข็ง โลหะให้มีพิกัดไม่เกิน 500 วัตต์ (W)

1.3.2 สร้างชุดควบคุมการทำงานของวงจรผลิตความถี่ โดยวิธีการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความถี่การทำงาน 47 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ด้วยการโปรแกรมควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

1.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการควบคุมกระแสระหว่างการควบคุมแบบพีไอดี (PID control) และการควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับวิธีการแบบเส้นค่าเฉลี่ย (Moving average)

1.3.4 ศึกษาอัตราการใช้กำลังงานของชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบต่อตรง

1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย

1.4.1 ชุดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ หมายถึงวงจรที่ประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น วงจรควบคุมและผลิตความถี่ที่ใช้งาน วงจรรีเลย์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ชุดโหลดวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม วงจรวัดกระแสที่ไหลในชุดโหลดวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

1.4.2 ชุดโหลดวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม หมายถึงการต่อตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุแบบอนุกรม สำหรับใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับงานหลอมหรือชุบแข็งโลหะ ใช้สำหรับต่อตรงกับขาออกของวงจรรีเลย์แบบฮาล์ฟบริดจ์

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการศึกษาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำพบว่าในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำส่วนที่สำคัญหลักมีสองส่วนคือ ส่วนแรกคือวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วนที่สองคือชุดโพลดวงจรเรโซแนนซ์ ในส่วนแรกวงจรจะประกอบไปด้วยวงจรสร้างความถี่และวงจรฮาร์โมนิกอินเวอร์เตอร์ โดยมีหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงสำหรับจ่ายกระแสให้กับชุดโพลดวงจรเรโซแนนซ์สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กต่อไป ในการทำงานของส่วนแรกเมื่อต่อชุดโพลเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเข้าไปโดยตรง จะมีการไหลของกระแสที่สูงปัญหาที่พบคืออุปกรณ์ที่ใช้สวิตช์เกิดการเสียหายเนื่องจากกระแสเกินหรือการไม่เข้ากันระหว่างชุดโพลเรโซแนนซ์กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้ในงานวิจัยหลายงานวิจัยเลือกการต่อแบบใช้หม้อแปลงเข้ามาช่วย แต่ในงานวิจัยบางส่วนยังมีการใช้การต่อโพลเรโซแนนซ์โดยตรงอยู่เพื่อต้องการขนาดที่เล็กลงหรือกำลังงานที่ต่ำลง แต่ยังสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับแบบการใช้หม้อแปลงต่ออยู่กับส่วนของชุดโพลดวงจรเรโซแนนซ์ ส่วนที่สองที่พบมีการต่อแบบสองแบบ คือแบบอนุกรมและแบบขนาน ชุดโพลเรโซแนนซ์เมื่อทำงานจะเกิดความร้อนสะสมบนขดลวดเหนี่ยวนำทำให้ในการออกแบบต้องมีการระบายความร้อนโดยใช้น้ำหรือสารหล่อเย็นอื่นๆ สำหรับในงานวิจัยนี้มีการใช้ชุดโพลดวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่อตรงกับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยมีการระบายความร้อนด้วยอากาศ เพื่อต้องการลดขนาดของระบบรวมถึงการใช้กำลังงานที่ต่ำ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 เครื่องต้นแบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดแหล่งจ่ายกระแส
- 1.6.2 เครื่องต้นแบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้กำลังงานต่ำ
- 1.6.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมหรือในการเรียนการสอน

บทที่ 2

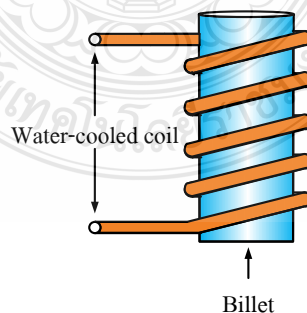
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะประกอบจากองค์ความรู้ในด้านต่างๆที่หลากหลายเช่น ทฤษฎีทางด้านไฟฟ้า ทฤษฎีทางด้านสนามแม่เหล็ก ทฤษฎีการออกแบบวงจร เทคนิคการเขียนโปรแกรมและทฤษฎีต่างๆอีกหลากหลายด้านประกอบกัน การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้พลังงานต่ำโดยการใช้เทคนิคการต่อโพลเดเรโซแนนซ์แบบไม่ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงก็ได้จากการใช้ทฤษฎีต่างๆเหล่านี้มาประกอบกัน โดยทฤษฎีต่างๆจะเป็นส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพื่อประกอบเป็นทฤษฎีสำหรับงานวิจัยนี้

2.2 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านไปมาบนชิ้นงาน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนบนตัวชิ้นงาน และเกิดความร้อนจากตัวชิ้นงาน โดยตัวอย่างโครงสร้างทางกายภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่แผ่สนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก และส่วนใหญ่นำมาจกขดลวดทองแดงกลวง เพื่อสามารถระบายความร้อนด้วยน้ำ(Water-cooled coil) ให้กับขดลวดได้ เนื่องจากความร้อนจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียของตัวขดลวดทองแดงเอง และความร้อนจะแผ่มาจากชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยอีกทางโดยตัวอย่างของขดลวดเหนี่ยวนำแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน [2]

โดยความร้อนที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลวนและความต้านทานของชิ้นงาน และความร้อนจะลงไปลึกเท่าไรนั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.1 [2]

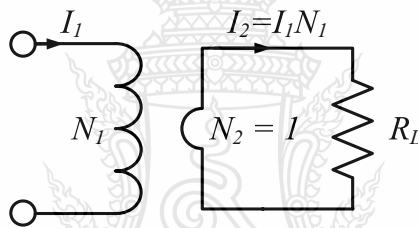
$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \quad (2.1)$$

μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน

f = ค่าความถี่ที่ใช้งาน

ρ = ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน

σ = ความลึกของพื้นผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน [2]

หลักการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำสามารถจำลองด้วยวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์การไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ กับกระแสที่ไหลบนชิ้นงานดังสมการที่ 2.2

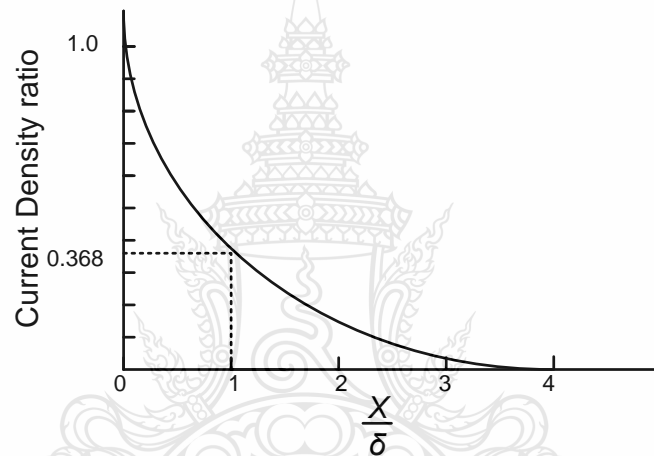
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_2 = I_1 \times \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

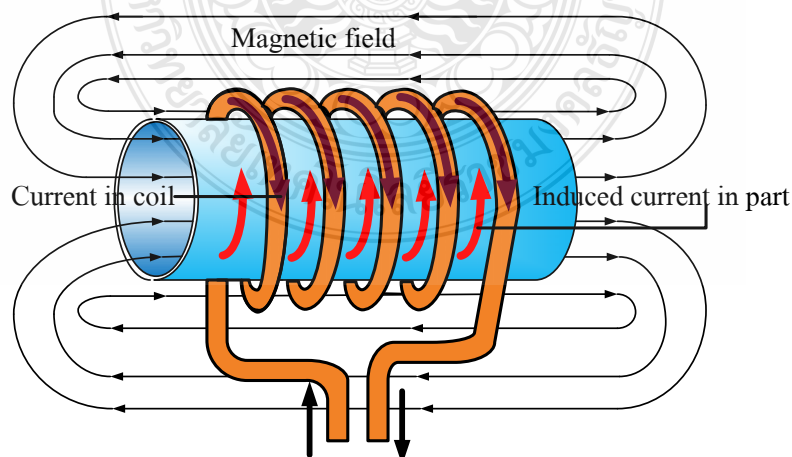
เมื่อผิวของชิ้นงานเสมือนเป็นขดลวดทุติยภูมิ (N_2) มีจำนวนรอบเท่ากับหนึ่งรอบจึงสามารถเขียนสมการที่ 2.2 ได้ใหม่ดังสมการที่ 2.3

$$I_2 = I_1 \times N_1 \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 กระแสที่ไหลในชิ้นงานมีค่าแปรตามกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (I_2) และจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ (N_2) แต่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนผิวชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับระยะห่างของผิวชิ้นงานในลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากปรากฏการณ์ผิว (Skin effect) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยระดับความลึกผิว (δ) มีค่าความหนาแน่นของกระแสประมาณ 0.368 เท่าของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ผิวชิ้นงานจึงประมาณว่ากระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะไหลอยู่ในระดับความลึกนี้หากพิจารณาระยะความลึกเทียบกับผิวชิ้นงานที่มากขึ้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าบนผิวชิ้นงานจะลดลง จนถึงระยะความลึกค่าๆหนึ่งความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะเท่ากับศูนย์หรือไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในระดับความลึกที่ระดับนั้นเลย



รูปที่ 2.3 กราฟกระจายความหนาแน่นของกระแสกับความลึกผิว [2]



รูปที่ 2.4 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

2.3 ปปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) [1]

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงจะทำให้กระแสเหนี่ยวนำที่ชิ้นงานมีความเข้มข้นที่บริเวณผิวของชิ้นงานดังรูปที่ 2.4 และลดลงตามความลึกจากผิวของชิ้นงานตามสมการที่ 2.1 โดยหลักการดังกล่าวจะมีกระแสไหลวนมากที่สุดที่บริเวณผิวชิ้นงาน และลดลงเป็นประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นของกระแสที่ผิวชิ้นงาน ที่ค่าความลึกผิวคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 [1]

$$i_x = i_0 e^{-x/\delta} \quad (2.4)$$

i_x : ความหนาแน่นจากกระแสที่ลึกจากผิวเข้ามา (A)

i_0 : ความหนาแน่นของกระแสที่ผิว (A)

δ : ความลึกของผิว (Skin effect) (m)

α : ระยะลึกเข้ามาเนื้อผิว (m)

2.4 ผลของอุณหภูมิ (Temperature Effect) [1]

ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนกับชิ้นงานพลังงานความร้อนที่ให้กับชิ้นงานแต่ละชนิดที่อุณหภูมิเดียวกันจะไม่เท่ากันเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงานแต่ละชนิดที่นำมาให้ความร้อนไม่เท่ากันนอกจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปยังส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปเช่น ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าของเหล็ก ส่งผลให้การให้พลังงานเพื่อให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากัน การให้พลังงานแก่ลูมิเนียมจะมากกว่าเป็นต้น

2.4.1 ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)

เมื่อต้องการทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิตามต้องการจะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักของชิ้นงานโดยพลังงานที่ใช้สามารถคำนวณจากความร้อนจำเพาะของชิ้นงานแต่ในปัจจุบันจะคำนวณจากความจุความร้อน (Heat content) หน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน (Kilowatt-hours per ton) [1] ซึ่งกราฟความจุความร้อนของโลหะชนิดต่างๆแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5

2.4.2 ความต้านทานจำเพาะ (Resistivity)

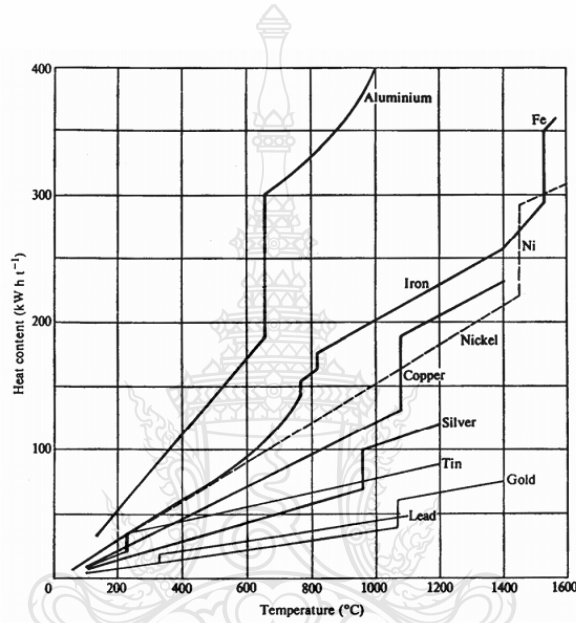
ความต้านทานจำเพาะของโลหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิโดยส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้นดังสมการที่ 2.5 เป็นสมการการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป [1] ทั้งนี้กราฟของความต้านทานจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.6

$$\rho_{\theta} = \rho_1[1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.5)$$

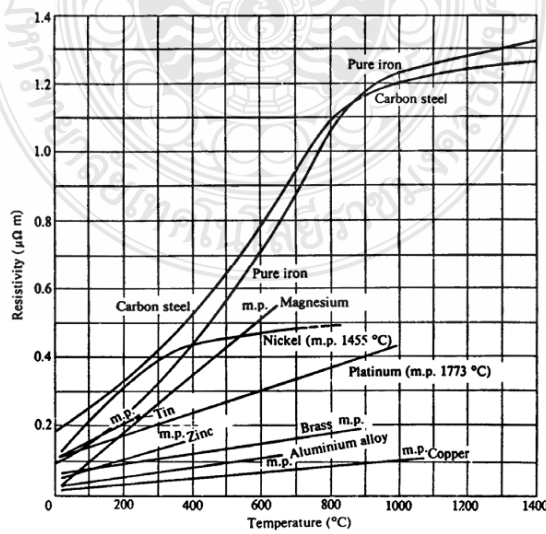
ρ_{θ} = ค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ ใดๆ (Ω/ft)

ρ_1 = ค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_1 (Ω/ft)

α = สัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิ θ



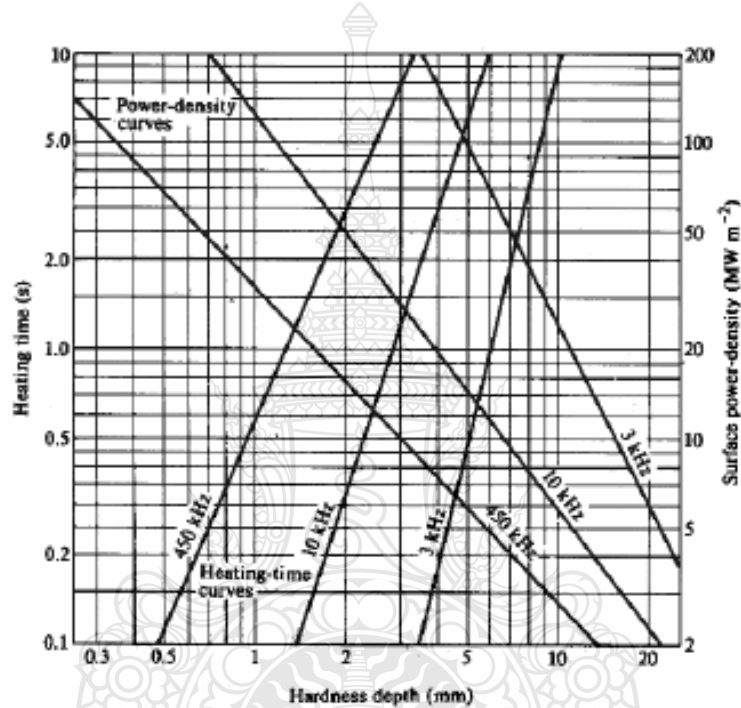
รูปที่ 2.5 กราฟความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ [1]



รูปที่ 2.6 กราฟของความต้านทานจำเพาะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ [2]

2.4.3 การเลือกใช้ความถี่ในการเหนี่ยวนำความร้อน [2]

การเลือกใช้ความถี่ที่ใช้เหนี่ยวนำความร้อนส่งผลโดยตรงกับความลึกของผิวชั้นงาน แต่ถ้าให้ความที่เหนี่ยวนำคงที่ ความลึกของความร้อนจะแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน แต่ความลึกของผิวชั้นงานจะแปรผกผันตามกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ การแปรผกผันกับความถี่แสดงจากรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกผิวและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่และระยะเวลาในการให้ความร้อนโดยมีความถี่เป็นพารามิเตอร์ [2]

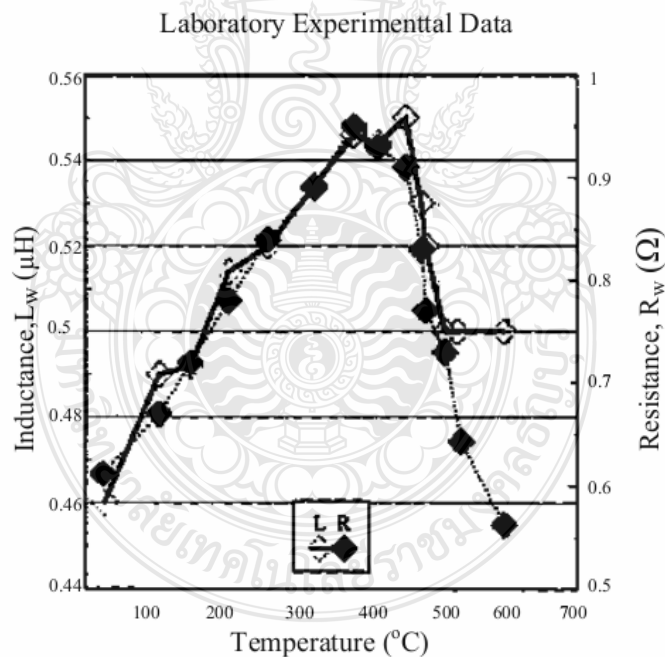


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกผิวและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่และระยะเวลาในการให้ความร้อน [2]

2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน (Work-Coil and Work-Piece) [3]

โดยทั่วไปจะแทนที่ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมร่วมกับตัวต้านทานขณะให้ความร้อนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นตามเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดคูรี (Curie point) ตามรูปที่ 2.8 ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานจะลดลงอย่างมากแบบทันทีทันใดซึ่งมีค่าต่ำกว่าขณะที่มีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ_r) สูงมากประมาณ 5,000-15,000 [3] ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานแต่เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงถึงจุดคูรี

ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ของชิ้นงานลดลงเหลือเพียงหนึ่ง หมายถึงค่าความซึมซาบของชิ้นงานจะเท่ากับอากาศนั่นเองส่งผลให้ค่าความเหนียวนำ และความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็วค่าความเหนียวนำของขดลวดเหนียวนำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ขนาดของขดลวดนำเหนียวนำรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานคุณสมบัติของชิ้นงานอุณหภูมิ และความเข้มสนามแม่เหล็กที่กล่าวมาไม่สามารถแสดงด้วยสมการแบบง่ายๆ ในปัจจุบันนักออกแบบขดลวดเหนียวนำเพื่อให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานจะวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element) ซึ่งเป็นโปรแกรมการศึกษาพฤติกรรมของไหลระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเนื่องจากสนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนียวนำที่คล้องผ่านชิ้นงานจะมีจำนวนลดลงลงเป็นฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล (Exponential function) ตามความลึกของผิวมีผลให้กระแสไหลวนมีมากบริเวณพื้นผิวงานและจะลดลงเมื่อลึกลงในเนื้อผิวงานคล้ายกับสนามแม่เหล็กวัตถุประสงคของการให้ความร้อนแบบเหนียวนำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะแตกต่างกันในเรื่องของกระแสไหลวนซึ่งไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในหม้อแปลงแต่กลับเป็นความต้องการในการให้ความร้อนแบบเหนียวนำ [1]



รูปที่ 2.8 กราฟผลการทดลองวัดค่าความเหนียวนำ ความต้านทานกับอุณหภูมิ [2]

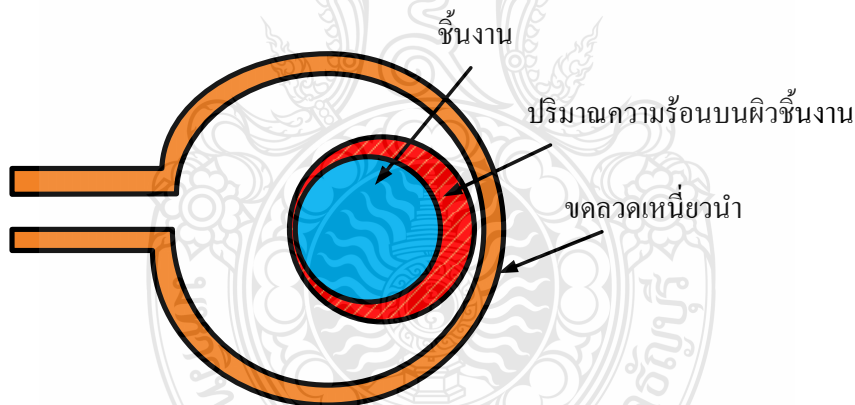
ในการออกแบบขดลวดเหนียวนำเพื่อนำมาใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาด รูปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขดลวดเหนียวนำและชิ้นงาน ตลอดจนความถี่ไฟฟ้า

กระแสน้ำที่ใช้ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นการออกแบบรูปร่าง ขนาด หรือจำนวนรอบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังกล่าว โดยหลักการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

1. ขดลวดเหนี่ยวนำต้องอยู่ใกล้ชิ้นงานมากที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานสูงสุด อธิบายได้โดยจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านชิ้นงานจะมีมากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ

2. หากขดลวดเหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นขดลวดโซลินอยด์ จะพบว่าเมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมากที่สุด การวางชิ้นงานไว้ภายในขดลวดเหนี่ยวนำจะได้ผลดีกว่าการวางชิ้นงานไว้ด้านนอกขดลวดเหนี่ยวนำ

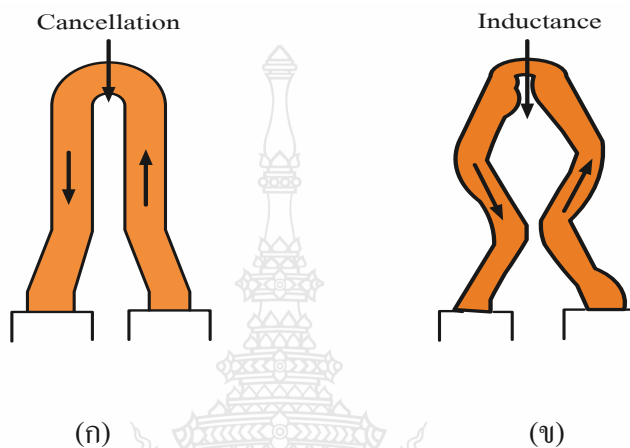
3. ตำแหน่งศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเส้นแรงแม่เหล็กน้อยที่สุด เพราะเส้นแรงแม่เหล็กมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้ขดลวดและจะลดลงเมื่อระยะห่างจากขดลวดเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากชิ้นงานไม่ถูกวางอยู่ตรงกลางขดลวดเหนี่ยวนำพื้นที่ของชิ้นงานที่อยู่ใกล้ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีความร้อนมากกว่าพื้นที่ของชิ้นงานที่อยู่ไกลจากขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้ชิ้นงานไม่ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั้งชิ้นงานดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระจายความร้อนของชิ้นงานที่ไม่อยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางขดลวดเหนี่ยวนำ [2]

4. บริเวณจุดต่อของเส้นลวดตัวนำกับขดลวดเหนี่ยวนำ จะมีสนามแม่เหล็กน้อยมาก ดังนั้นศูนย์กลางของขดลวดไม่จำเป็นต้องเป็นศูนย์กลางทางเรขาคณิต จึงมีผลอย่างมากสำหรับขดลวดเหนี่ยวนำที่มีรอบเดียว หากมีจำนวนรอบมากขึ้นสภาวะนี้จะมีผลน้อยลง ในทางปฏิบัติแล้วการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบดังกล่าวจะมีการจับชิ้นงานหมุนไปด้วยขณะที่มีการให้ความร้อน เพื่อให้ได้ความร้อนสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน [2]

5. การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำต้องไม่ทำให้เกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 2.10 (ก) แสดงตัวอย่างการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ไม่มีค่าอินดักแตนซ์ เพราะด้านตรงข้ามขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ใกล้กันมากเกินไป ในส่วนรูปที่ 2.10 (ข) มีการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่มีวงรอบในขดลวดเหนี่ยวนำ ส่งผลให้มีค่าอินดักแตนซ์เพิ่มขึ้น [2]

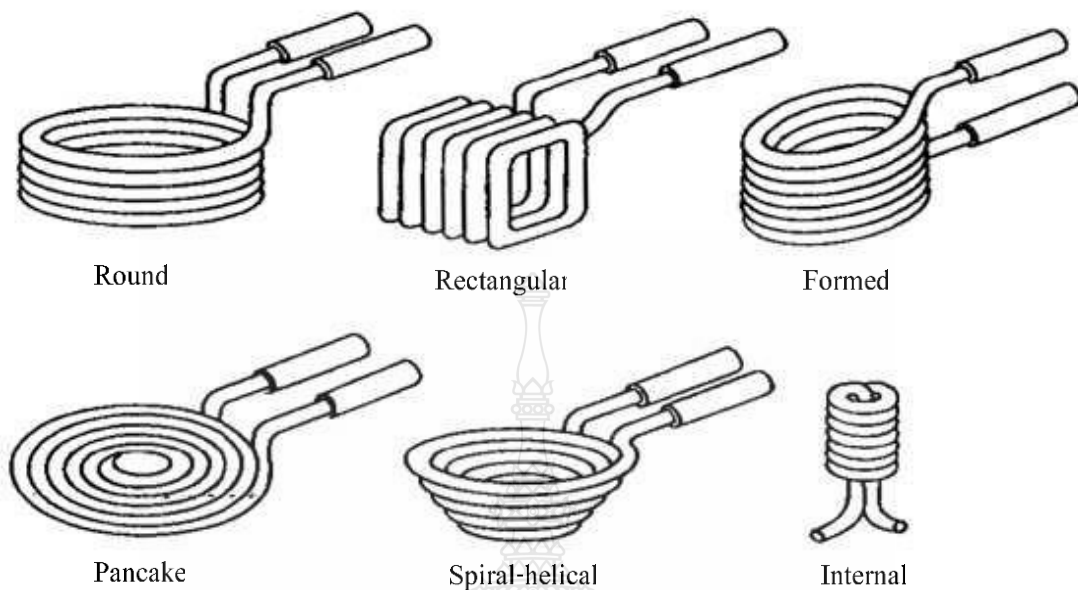


รูปที่ 2.10 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับค่าอินดักแตนซ์ [2]

จากเหตุผลข้างต้น แสดงว่าขดลวดเหนี่ยวนำสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านผิวชิ้นงานให้มาก เพื่อให้เกิดความร้อนได้เร็ว โดยตัวอย่างขดลวดเหนี่ยวนำมีดังนี้

1. A Helical solenoid เป็นขดลวดที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายในขดลวดความร้อน
2. Pancake coil เป็นขดลวดที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเฉพาะบริเวณผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นงาน
3. A Internal coil เป็นขดลวดที่ให้ความร้อนบริเวณรอบนอกของขดลวดเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปขดลวดเหนี่ยวนำจำนวนมากทำมาจากทองแดงกลวง เพราะทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมีกำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำต่ำ มีผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่าสูง จึงส่งผลให้เกิดความร้อนจากความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจะมีการใช้ท่อทองแดงกลวงเพื่อให้สามารถระบายความร้อนด้วยของเหลว เช่นการผ่านน้ำเข้าท่อ หรือการใช้ลมในการระบายความร้อนในกรณีที่ใช้ขดลวดธรรมดา และปัจจัยหลักในการออกแบบรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำจะถูกบังคับด้วยรูปร่างของชิ้นงานด้วย ซึ่งตัวอย่างขดลวดเหนี่ยวนำที่มีใช้งานในทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบต่างๆ [2]

2.6 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor, Q) [4]

ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำส่วนมากจะใช้ย่านของโหลด (Load range) เป็นค่าในย่านของตัวประกอบคุณภาพตั้งสมการที่ 2.6 [1,4]

$$Q_1 = \frac{\omega_s L_w}{R_w} \quad (2.6)$$

Q_1 = ค่าตัวประกอบคุณภาพของโหลด

ω_s = ความถี่สวิตช์ (Hz)

ความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะใช้ความถี่ที่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance, ω_0) โดยการนำค่าตัวเก็บประจุมาต่อร่วมกับขดลวดเหนี่ยวนำและขึ้นงานค่าตัวประกอบคุณภาพในสมการที่ 2.6 นำมาเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.7 ซึ่งโดยทั่วไปค่าตัวประกอบคุณภาพใช้กันอย่างอิสระแต่ค่าของตัวประกอบคุณภาพที่ควรจะใช้กับขึ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กและความถี่สวิตช์

สูงจะใช้ค่าระหว่าง 3-10 ส่วนชิ้นงานที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กจะใช้ค่าประมาณ 10-15 เมื่อใช้ความถี่สวิทซ์ที่เรโซแนนซ์จากสมการที่ 2.7 จะสามารถนำมาเขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$Q_1 = \frac{\omega_s L_w}{R_w} = \frac{\omega_0}{\omega_s} Q_1 \quad (2.7)$$

$$Q_0 = \frac{1}{R_w} \sqrt{\frac{L_w}{C}} \quad (2.8)$$

2.7 วงจรผลิตความถี่

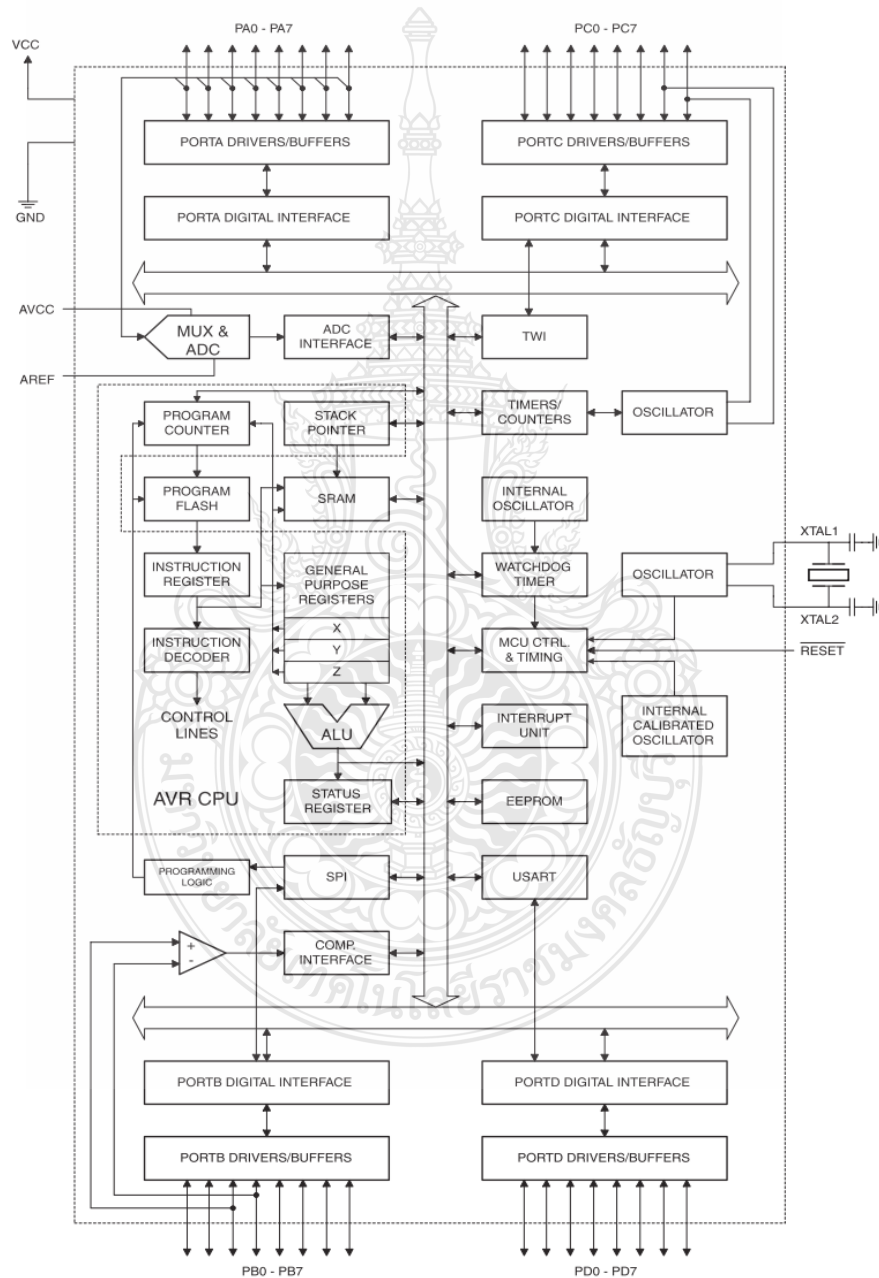
วงจรผลิตความถี่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA16 เป็นวงจรผลิตความถี่รวมถึงควบคุมกระแส โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) AVR

(XCK/T0) PB0	1	40	PA0 (ADC0)
(T1) PB1	2	39	PA1 (ADC1)
(INT2/AIN0) PB2	3	38	PA2 (ADC2)
(OC0/AIN1) PB3	4	37	PA3 (ADC3)
(SS) PB4	5	36	PA4 (ADC4)
(MOSI) PB5	6	35	PA5 (ADC5)
(MISO) PB6	7	34	PA6 (ADC6)
(SCK) PB7	8	33	PA7 (ADC7)
RESET	9	32	AREF
VCC	10	31	GND
GND	11	30	AVCC
XTAL2	12	29	PC7 (TOSC2)
XTAL1	13	28	PC6 (TOSC1)
(RXD) PD0	14	27	PC5 (TDI)
(TXD) PD1	15	26	PC4 (TDO)
(INT0) PD2	16	25	PC3 (TMS)
(INT1) PD3	17	24	PC2 (TCK)
(OC1B) PD4	18	23	PC1 (SDA)
(OC1A) PD5	19	22	PC0 (SCL)
(ICP1) PD6	20	21	PD7 (OC2)

รูปที่ 2.12 ตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL (ผู้นำทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51) AVR จัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่จาก ATMEL มีสถาปัตยกรรมแบบ RISC (Advanced RISC architecture) คือหนึ่งในคำสั่งทำงานใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ลูก (Instructions in a single clock

cycle) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูงแบ่งออกเป็นหลายอนุกรมในแต่ละอนุกรมยังแบ่งออกเป็นหลายเบอร์เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งานในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพที่เท่ากันสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นเบอร์ ATmega16 โดยที่รายละเอียดและคุณสมบัติภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega16 ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรม AVR (ATmega16)

ขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุท (I/O Ports)

ขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุทของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega16 มีจำนวน 40 ขา โดยแบ่งเป็นขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุทอิสระจำนวน 32 ขาประกอบไปด้วย PA PB PC PD ขนาด 8 บิตและขาพอร์ตที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแอนะล็อกจำนวน 2 ขาพอร์ตคือ AREF และ AVCC รายละเอียดของพอร์ตทั้งหมดดังรูปที่ 2.12

โดยที่มีรายละเอียดในแต่ละขาพอร์ตดังนี้

- Port A (PA0..PA7)

เป็นขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุทดิจิทัลกำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ (Internal pull-up register) สามารถใช้งานเป็นพอร์ตอินพุทสัญญาณแอนะล็อก (A/D converter) ได้

- Port B (PB0..PB7)

เป็นขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุทดิจิทัลกำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ และเป็นขาพอร์ตหน้าที่พิเศษอีกด้วยเช่น ขาสำหรับการโปรแกรมชิพและขาป้อนสัญญาณนาฬิกาภายนอก

- Port C (PC0..PC7)

เป็นขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุทดิจิทัลกำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ และเป็นขาพอร์ตหน้าที่พิเศษอีกด้วยเช่น ขาเชื่อมต่อดีบั๊กและโปรแกรมด้วยการเชื่อมต่อแบบ JTAG เป็นต้น

- Port D (PD0..PD7)

เป็นขาพอร์ตอินพุทเอาต์พุทดิจิทัลกำหนดการพูลอัพภายในขาพอร์ตได้ และเป็นขาพอร์ตหน้าที่พิเศษอีกด้วยเช่น ขาเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมและขาอินเตอร์รัปต์เนื่องจากสัญญาณภายนอก

- VCC ขาแรงดันไฟตรง

- GND ขากราวด์

- /RESET ขารีเซตวงจร

- XTAL1 ขาต่อคริสตัลอสซิลเลเตอร์ช่องที่ 1 ด้านอินพุท

- XTAL2 ขาต่อคริสตัลอสซิลเลเตอร์ช่องที่ 2 ด้านเอาต์พุท

- AVCC ขาแรงดันสำหรับพอร์ต A และโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

- AREF ขาแรงดันแอนะล็อกอ้างอิง โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

คุณสมบัติสำคัญของไมโครคอนโทรลเลอร์

- สถาปัตยกรรมภายในเป็นแบบ Advanced RISC (Reduce Instruction Set Computer)

- มีคำสั่งควบคุมการทำงานมากกว่า 100 คำสั่งโดยมีความเร็วในการประมวลผล 1 คำสั่งต่อ 1 สัญญาณนาฬิกา (1 MIP/1 MHz)
 - มีรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิตจำนวน 32 ตัว
 - ความเร็วในการทำงาน 1 MIP ต่อ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และมากถึง 16 MIPS เมื่อใช้ความถี่ที่ 16 เมกะเฮิร์ตซ์ (ความสามารถในการใช้งานความถี่สัญญาณนาฬิกาขึ้นอยู่กับเบอร์ AVR ที่เลือกใช้งาน)
 - หน่วยความจำ ROM แบบ Flash (มีโหมดป้องกันหน่วยความจำ) ขนาด 16 กิโลไบต์ (เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง)
 - หน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM (มีโหมดป้องกันหน่วยความจำ) ขนาด 512 กิโลไบต์ (เขียน/ลบได้ 100,000 ครั้ง)
 - หน่วยความจำข้อมูลแบบ SRAM 1 กิโลไบต์
 - ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ทั้งแบบ 8 บิตและ 16 บิตพร้อมปริสเกลเลอร์
 - มีระบบตรวจสอบความผิดพลาดในการทำงานของซอฟต์แวร์ (Watchdog timer with on-chip oscillator)
 - โมดูลสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulator) มีจำนวน 4 ช่อง
 - มีโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ขนาด 10 บิตมากถึง 8 ช่อง
 - โมดูลเปรียบเทียบแรงดันแอนะล็อก (Analog comparator)
 - การสื่อสารข้อมูลอนุกรมมีทั้งแบบ UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitters) หรือแบบ RS232
 - พอร์ตอินพุตเอาต์พุตขึ้นอยู่กับเบอร์ AVR ที่เลือกใช้งานมีตั้งแต่ 8 ขาจนมากกว่า 100 ขาพอร์ต (ATMega16 มีขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุต 32 ขา)
 - แรงดันไฟเลี้ยงและความเร็วในการทำงานขึ้นอยู่กับเบอร์ AVR ที่เลือกใช้งาน
- โดยคุณสมบัติหลักต่างๆจะที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA16 ที่เลือกใช้งาน ซึ่งจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

2.8 ภาษาที่ใช้ในการพัฒนาบนไมโครคอนโทรลเลอร์

ภาษาซีได้รับการพัฒนามาจากภาษาบีซีพีแอล (BCPL) และบี (B) ซึ่งต่างก็เป็นภาษาโปรแกรมที่รู้จักข้อมูลเพียงรูปแบบเดียวคือเป็นข้อมูลเวิร์ด (Word) ยังไม่สามารถจัดการกับข้อมูลแบบตัวอักษรได้ในขณะเดียวกันผู้เขียนโปรแกรมหรือโปรแกรมเมอร์ต่างก็ยังมีความต้องการภาษา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่โครงสร้างสามารถจัดการกับข้อมูล (Data) และตัวแปร (Variable) ในรูปแบบต่างๆ ได้เพิ่มมากขึ้นทั้งข้อมูลที่เป็นเลขจำนวนเต็ม (Integer) ตัวเลขทศนิยม (Floating-point) หรือตัวอักษร (Character) จึงมีการเพิ่มเติมความสามารถเหล่านี้ลงในภาษาบีและกำหนดชื่อใหม่เป็นภาษาซี

ภาษาซีได้รับการออกแบบมาให้ทำงานกับคอมพิวเตอร์และเขียนโปรแกรมด้วยคำสั่งที่สามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยากจึงจัดโปรแกรมภาษาซีว่าเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับกลางเมื่อนำมาทำงานกับไมโครโปรเซสเซอร์ที่ทำงานด้วยภาษาเครื่องจึงจำเป็นต้องมีตัวแปลภาษาหรือคอมไพเลอร์ (Compiler) เพื่อแปลภาษาซีนั้นเป็นภาษาเครื่อง

ตัวแปลภาษาซีเป็นภาษาเครื่อง

การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีเพื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นในทางปฏิบัติจริงๆ ไม่ใช่เนื้อโค้ดของโปรแกรมภาษาซีที่ถูกนำลงไปบรรจุในหน่วยความจำโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวรหัสข้อมูลที่ใช้งานจริงนั้นได้มาจากการแปลภาษาซีเป็นรหัสภาษาเครื่องหรือแมชชีนโค้ดด้วยซอฟต์แวร์ที่เรียกกันว่า “คอมไพเลอร์”

การพัฒนากระบวนการของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโปรแกรมภาษาซี มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

- 1.เขียนโปรแกรมภาษาซีด้วยเท็กซ์เอดิเตอร์ (Text editor) หรือพื้นที่สำหรับเขียนโปรแกรมในกรณีทีซอฟต์แวร์นั้นจัดมาเป็นชุดในแบบไอดีอี (IDE)
 - 2.คอมไพล์แปลภาษาซีเป็นภาษาแอสเซมบลี (Assembly) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นๆ
 - 3.แอสเซมเบลอร์ (Assembler) จากภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาเครื่องหรือแมชชีนโค้ดในรูปแบบของเลขฐานสิบหก
 - 4.ดาวน์โหลดซอร์สโค้ดที่ได้จากการแอสเซมเบลอร์ลงสู่หน่วยความจำโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์
 - 5.ทดลองและตรวจสอบการทำงานหากไม่สมบูรณ์ให้กลับไปแก้ไขขั้นตอนที่ 1
- อย่างไรก็ตามในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ผู้ใช้งานจะไม่เห็นถึงกระบวนการทำงานเนื่องจากซอฟต์แวร์แปลภาษาหรือคอมไพเลอร์ได้รวมการทำงานใน 2 ขั้นตอนนี้ไว้ด้วยกัน

2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) [5]

วงจรอินเวอร์เตอร์จัดเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้การควบคุมการทำงานของวงจรที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลัง เช่น ไทริสเตอร์ มอสเฟต ไอจีบีที หรืออื่นๆ อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปริมาณทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อีกทั้งยังสามารถควบคุมแอมพลิจูด (Amplitude) และความถี่ของปริมาณไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตได้ตามต้องการ [5,10,11]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของวิเชียร หทัยรัตน์ศิริ [1] ได้นำเสนอเรื่องการออกแบบและสร้างต้นแบบชุดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อทบขึ้นรูปโลหะด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์กระแสเอชบริดจ์ร่วมกับคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์ชนิดทอนแรงดัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดขนาดและน้ำหนักของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองกระแส โดยการเพิ่มความถี่ในการสวิตช์ในวงจรคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์ชนิดทอนแรงดัน ซึ่งทำให้ช่วงเวลาการหยุดนำกระแสของสวิตช์น้อยลงในโหมคของกระแสต่อเนื่อง เป็นผลให้สามารถลดค่าความเหนี่ยวนำของตัวกรองกระแสลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถปรับช่วงของกำลังไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดผ่านอินเวอร์เตอร์ได้ในช่วงกว้างขึ้นเครื่องต้นแบบชุดให้ความร้อน ด้วยหลักการเหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์นี้มีขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยออกแบบใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านชุดไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเข้าสู่วงจรคิซิทูคิซิคอนเวอร์เตอร์ชนิดทอนแรงดัน ซึ่งควบคุมการทำงานแบบพีดีบีเบิลยูเอ็มความถี่สวิตซ์ซึ่งประมาณ 28.5 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้งนี้โดยการอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำกรองกระแสมีค่า 1.9 มิลลิเฮนรี เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ที่มีความถี่สวิตซ์ซึ่งที่ประมาณ 37.0-40.0 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้งนี้การควบคุมการสวิตซ์แบบการควบคุมมุมเฟสคงที่ให้ออกงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ผลการทดสอบแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ โดยชุดต้นแบบนี้สามารถให้ความร้อนกับเหล็กรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร จากอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ถึง 919 องศาเซลเซียส ได้ภายในเวลา 1.5 นาที และมีประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ที่ ร้อยละ 84

งานวิจัยของมงคล บุญยง และคณะ [6] ทำการออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของวงจรควบคุมเลือกใช้เทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ระบบถูกออกแบบเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่นและจัดวงจรเรโซแนนซ์เป็นแบบอนุกรมทางด้านเอาต์พุตโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงโดยระบบสามารถที่จะปรับ

กำลังไฟฟ้าได้ด้วยการปรับความถี่ในการสวิตช์ของวงจรถออินเวอร์เตอร์สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าได้โดยใช้สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยปรับค่าความถี่ได้จาก 20 - 30 กิโลเฮิร์ตซ์

งานวิจัยของศักดิ์ พรหมเหมือน และสมพงษ์ ศรีลัด [7] ได้นำเสนอเรื่องเครื่องหลอมอลูมิเนียมด้วยหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยวงจรถอประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟสลับ 1 เฟส วงจรเรียงกระแสไดโอดแบบบริดจ์และวงจรถออินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบเรโซแนนซ์ชนิด RLC อนุกรม ซึ่งวงจรถอจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 84 กิโลเฮิร์ตซ์ และวัสดุทดสอบเป็นอลูมิเนียมขนาด 100 กรัม ทดสอบ โดยการปรับความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์ในช่วง 86 – 96 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลที่ได้กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง 7.22 – 4.75 แอมแปร์ และเวลาที่ใช้ในการหลอมอยู่ในช่วง 9 – 13 นาที

งานวิจัยของ นายคงศักดิ์ รัตนนิมิต และ นายสำราญ สันทาลุณย์ [8] นำเสนอในหัวข้อการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ศึกษาเกี่ยวกับการใช้วงจรถออินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เพื่อใช้ควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีการ ใช้แรงดันไฟฟ้า 60 โวลต์ โดยมีความถี่อยู่ในช่วง 20-50 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลวนขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานพบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีการส่งผ่านพลังงานมากที่สุดและใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเร็วขึ้น

งานวิจัยของ ไพบุลย์ บุษผา [9] นำเสนอในหัวข้อ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงอย่างง่าย สำหรับเหล็กผสมคาร์บอนทรงกระบอก เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถปรับกำลังไฟฟ้าและปริมาณความร้อนได้ด้วยควบคุมความถี่ ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์กำลังไฟฟ้านำเข้าอยู่ในช่วง 0.5-1.0 กิโลวัตต์ ที่ช่วงความถี่ 20-48 กิโลเฮิร์ตซ์ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานไม่เกินขนาด 0.5-1.5 เซนติเมตร

งานวิจัยของ Hideaki Fujita และ Hirofumi Akagi [12] นำเสนอเรื่อง Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450 kHz, voltage-source inverter for induction melting application ซึ่งงานวิจัยนี้ได้้นำเสนอการควบคุมกำลังงานของวงจรถออินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ควบคุมการทำงานที่ 450 กิโลเฮิร์ตซ์ มีกำลังงานที่ 4 กิโลวัตต์ นำมาประยุกต์ใช้ในงานหลอมแบบเหนี่ยวนำ และมีการควบคุมการทำงานด้วยการปรับ Pulse-Density-Modulated Power (PDM)

งานวิจัยของ Kamli Mokhter Yamamoto Shigehiro และ Abe Minoru [13] นำเสนอเรื่อง A 50 – 15 kHz half – bridge inverter for induction heating applications ในงานวิจัยนี้แนะนำเสนอการทำงานของวงจรถอ ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์โดยใช้ ไอจีบีที (IGBT) ในการทำงานด้วยไฟฟ้า 3 เฟส ให้

กำลังงานสูงสุด 6 กิโลวัตต์ มีความถี่ใช้งาน 50 – 150 กิโลเฮิร์ตซ์ สำหรับงานให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ มีการต่อวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานแบบต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์

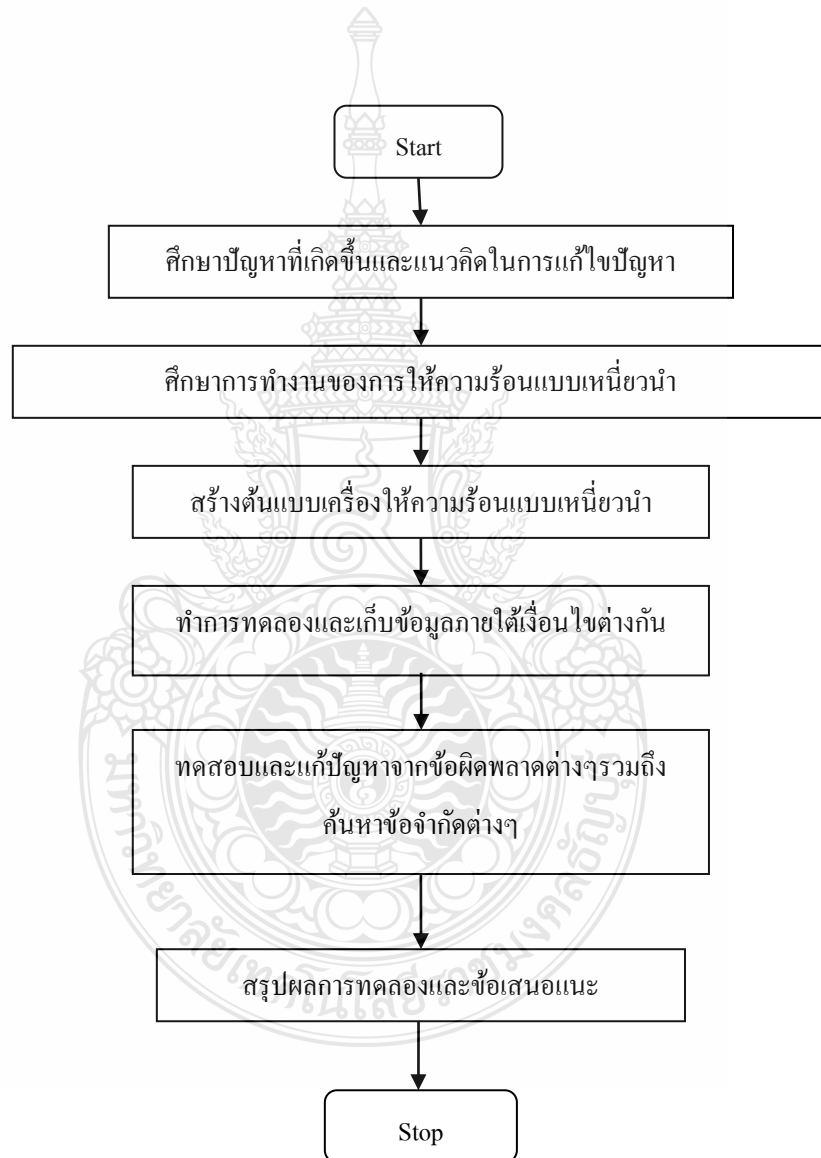
งานวิจัยของ Irshad Khan Jonathan Tapson และ Ian de Vries [3] นำเสนอเรื่อง An induction furnace employ a 100 kHz mosfet full-bridge current-source load-resonant inverter ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส ใช้งานวงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบใช้มอสเฟส มีความถี่ใช้งานที่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์จ่ายกำลังงานสูงสุดที่ 1 กิโลวัตต์ ใช้หลอมวัสดุคือทองและเพลาตินัม มีการต่อโหลดเรโซแนนซ์แบบขนานต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถหลอมวัสดุที่เป็นทองและเพลาตินัมในเวลา 25 วินาที



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยในการพัฒนาระบบควบคุมการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยพลังงาน
ต่ำ ได้ถูกกำหนดผังงานไว้ดังรูปที่ 3.1



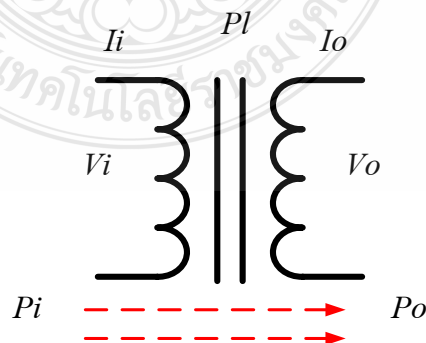
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ปัญหาที่พบ

ปัญหาที่พบในการให้ความร้อนแบบทั่วไปคือการสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนสถานะไอเสียจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงรวมไปถึงการสูญเสียความร้อนออกไปโดยสูญเปล่า อีกประการคือระบบควบคุมที่อยู่ยากในการควบคุมความร้อนเป็นต้น การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นการให้ความร้อนแบบหนึ่งที่สามารถนำมาแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ในการทำงานยังพบปัญหาเช่น กำลังงานความร้อนที่ให้น้อย ความเสถียรของวงจรเหนี่ยวนำ วงจรควบคุมการทำงานเป็นต้น จึงจำเป็นต้องหากระบวนการหรือการปรับปรุงวิธีการให้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นทั้งด้านพลังงานที่ใช้ ความร้อนที่ได้ หรือค่าใช้จ่ายในการสร้างให้ถูกลงแต่ประสิทธิภาพยังคงเดิมหรือดีขึ้นกว่าเดิม งานวิจัยจำเป็นต้องสร้างแนวคิดและวิธีการปรับปรุงวงจรที่เกี่ยวข้องให้มีการสูญเสียกำลังงานในตัวให้น้อยกว่าเดิม รวมถึงการควบคุมการจ่ายกำลังงานโดยวิธีการต่างๆ และผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงการควบคุมรวมถึงสามารถนำระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆได้

3.2 แนวคิดการแก้ปัญหา

ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำระบบที่ได้รับความนิยมระบบหนึ่งคือ ระบบที่มีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบบใช้หม้อแปลงทางด้านเอาต์พุตดังรูปที่ 3.2 เป็นระบบที่มีการทำงานไม่ซับซ้อนและให้กำลังงานความร้อนได้สูงพอสมควร แต่ข้อเสียประการแรกคือระบบข้างต้นส่วนมากมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากเพราะตัวของหม้อแปลงเหนี่ยวนำเอง และอีกประการที่สำคัญคือการเหนี่ยวนำกระแสเพื่อข้ามขดลวดระหว่างขดลวดปฐมภูมิไปยังขดลวดทุติยภูมิ จะมีการสูญเสียกำลังภายในแกนหม้อแปลงทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงาน



รูปที่ 3.2 สมมติฐานของการทำงานของหม้อแปลงเหนี่ยวนำ

โดย

กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต (P_i)

กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (P_o)

กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนหม้อแปลงเหนี่ยวนำ (P_l)

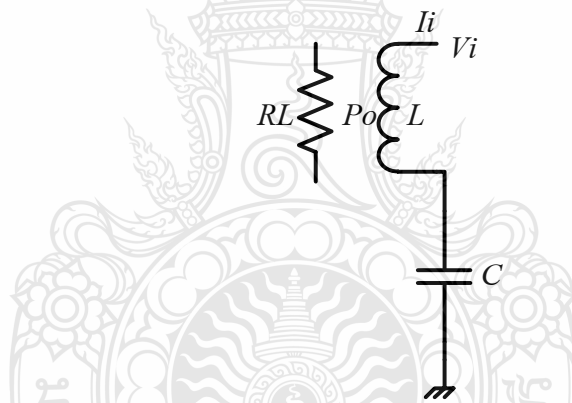
แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต (V_i)

แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (V_o)

กระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต (I_i)

กระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (I_o)

แนวคิดเบื้องต้นคือการเปลี่ยนจากการใช้หม้อแปลงเหนี่ยวนำทางการเอาต์พุตของวงจรมาเป็นแบบต่อตรง โดยใช้การต่อวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมาต่อแทนดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สมมติฐานของการแก้ปัญหาที่คาดการณ์ไว้

โดย

กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (P_o)

แรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต (V_i)

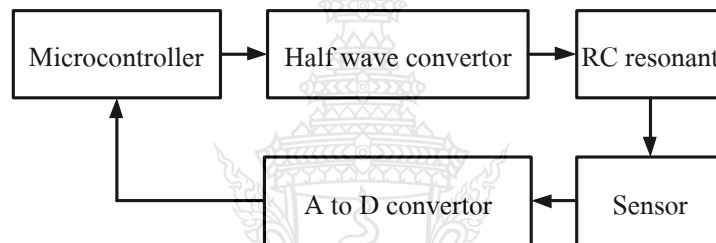
กระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต (I_i)

ขดลวดเหนี่ยวนำ (L)

ตัวเก็บประจุ (C)

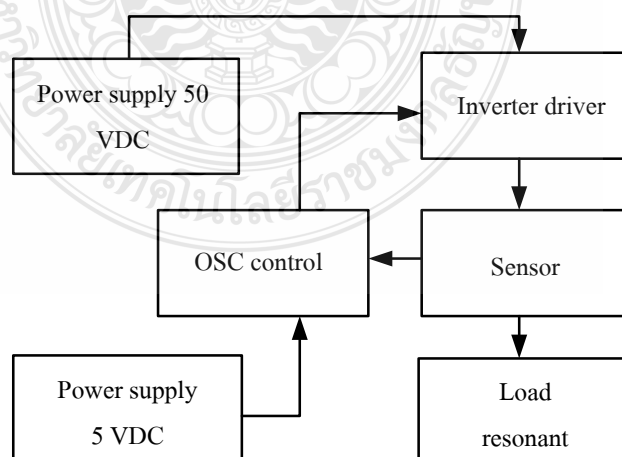
ชิ้นงานที่ได้รับความร้อน (RL)

โดยที่เมื่อใช้โหลดเหนี่ยวนำความร้อนแบบต่อตรงแบบที่ตั้งสมมติฐานไว้ อัตราการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนขดลวดเหนี่ยวนำจะไม่มี กระแสไฟฟ้าจะมาสู่ตัวเหนี่ยวนำเต็มกำลังตามที่วงจรจ่ายกระแสมาให้ จากนั้นจะเหนี่ยวนำตามความถี่เรโซแนนซ์ด้วยกำลังงานสูงสุดไปยังชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อชิ้นงานได้รับกระแสเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนบนชิ้นงานที่เป็นระบบปิด โดยตัวชิ้นงานจะมีความต้านทานบนตัวชิ้นงานอยู่ทำให้เกิดความร้อนในที่สุด อีกส่วนสำคัญที่งานวิจัยมีการตั้งสมมติฐานในการแก้ไข คือการปรับปรุงระบบควบคุมการจ่ายกำลังงานดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมแทนวงจรควบคุมแบบแอนะล็อก โดยสมมติฐานคือการวัดกระแสจากขดลวดเหนี่ยวนำแล้วแปลงจากแอนะล็อกให้กลายเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แปลงสัญญาณที่ได้ไปควบคุมการจ่ายกำลังงานให้กับวงจรจะจ่ายกระแสต่อไป



รูปที่ 3.4 สมมติฐานการควบคุมกำลังงาน

3.3 ขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมชุดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

พิจารณาแนวคิดเบื้องต้นรวมทั้งแนวทางการตั้งสมมติฐานการวิจัย สามารถแสดงเป็นไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 3.5 การทำงานของระบบที่สำคัญได้แก่ชุด OSC control ในชุดนี้ตามสมมติฐานการทำงานคือการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหลักในการทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์มีการโปรแกรมการทำงานให้ผลิตความถี่ อีกหน้าที่ของการทำงานของชุดดังกล่าวคือการควบคุมความถี่ให้คงที่และยังมีหน้าที่ปรับความกว้างของรูปคลื่น เพื่อเป็นการปรับกำลังงานเพื่อไปควบคุมชุดวงจร Inverter driver เพื่อขยายกระแสสำหรับจ่ายให้โพลครีโซแนนซ์ สมมติฐานในการควบคุมกำลังงานที่โพลครีโซแนนซ์มีการใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสที่ผ่านโพลครีโซแนนซ์ ในแนวคิดนี้ใช้การวัดทางด้านอินพุทของโพลครีโซแนนซ์ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับใช้ควบคุมกำลังงานต่อไป ในส่วนของชุดจ่ายไฟสามารถแยกออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือชุดจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับชุดควบคุม และชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์สำหรับชุด Inverter driver ทั้งสองชุดในการออกแบบวงจรสามารถใช้อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสำเร็จรูป หรือออกแบบเพื่อสร้างขึ้นมาเองได้ทั้งสองทาง

3.4 การออกแบบระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ในการทำงานของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้พลังงานต่ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

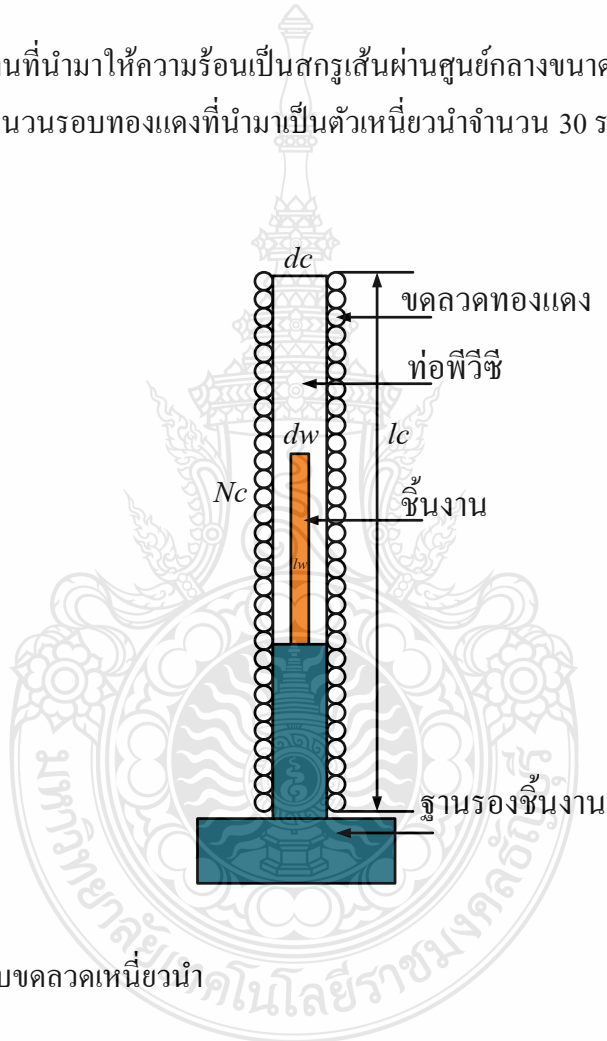
1. ชุดโพลวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม
2. ชุดวงจรและโปรแกรมการทำงานของวงจรผลิตความถี่และควบคุมกระแส

3.4.1 ชุดโพลวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ในการทำงานของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น ส่วนวงจรที่สำคัญส่วนหนึ่งของระบบนอกจากชุดผลิตความถี่และควบคุมกระแสแล้ว โพลวงจรเรโซแนนซ์มีส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง เพราะชุดโพลวงจรเรโซแนนซ์ทำหน้าที่เหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูง เพื่อให้สนามแม่เหล็กดังกล่าวเคลื่อนผ่านชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนบนตัวชิ้นงานขึ้น สำหรับระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่การทำงานประมาณ 47 กิโลเฮิร์ตซ์ ขณะให้ความร้อนสูงสุด 200 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของทองแดงที่หลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ทางฟิวดิงสมการที่ 3.1 โดยเลือกอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส (°C) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความลึกของกระแสในผิวทองแดง} &= \frac{75}{f} & (3.1) \\
 &= \frac{75}{47 \times 10^3} \\
 &= 0.345 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

ชิ้นงานที่นำมาให้ความร้อนเป็นสกรูเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร มีความยาวขนาด 25 มิลลิเมตร จำนวนรอบทองแดงที่นำมาเป็นตัวเหนี่ยวนำจำนวน 30 รอบดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

dc : เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขดทองแดง (m)

dw : เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน (m)

Nc : จำนวนรอบของขดลวด (m)

lw : ชิ้นงาน (m)

lc : ความยาวของชิ้นงาน (m)

3.4.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ

การทำงานของระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทำงานที่ความถี่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์ ขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ลวดทองแดงในหัวข้อ 3.4.1 เมื่อนำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าเหนี่ยวนำ Unit UT602 สามารถวัดค่าเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานขณะมีชิ้นงานและไม่มีชิ้นงาน สามารถคำนวณตัวประกอบคุณภาพดังสมการที่ 3.2 [11]

ขณะมีชิ้นงาน

ความเหนี่ยวนำ (L_{sw}) 33.04 μH

ความต้านทาน (R_{sw}) 12.11 $\text{m}\Omega$

$$\begin{aligned} \text{ตัวประกอบคุณภาพ} &= \frac{\omega L_{sw}}{R_{sw}} \\ &= 128.23 \end{aligned} \quad (3.2)$$

ขณะไม่มีชิ้นงาน

ความเหนี่ยวนำ (L_s) 30.58 μH

ความต้านทาน (R_s) 38.90 $\text{m}\Omega$

$$\begin{aligned} \text{ตัวประกอบคุณภาพ} &= \frac{\omega L_s}{R_s} \\ &= 36.94 \end{aligned}$$

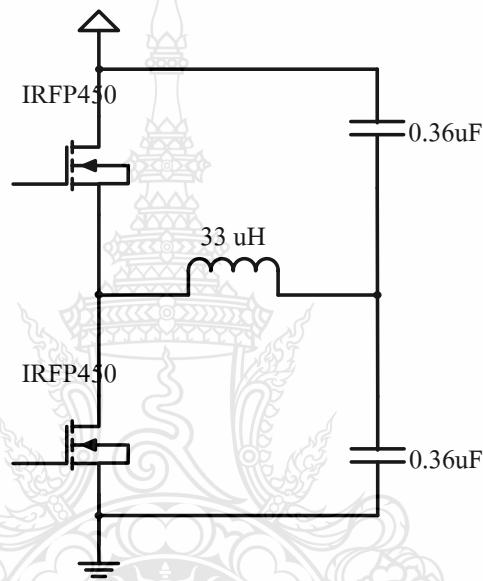
ค่าความเหนี่ยวนำแบบอนุกรมขณะมีชิ้นงานมีค่า 33.04 ไมโครเฮนรี่ กำหนดค่าตัวเก็บประจุที่จัดทำงานที่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังสมการที่ 3.3

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi \times 47 \times 10^3)^2 \times 33.04 \times 10^{-6}}$$

$$C = 0.35 \mu F$$

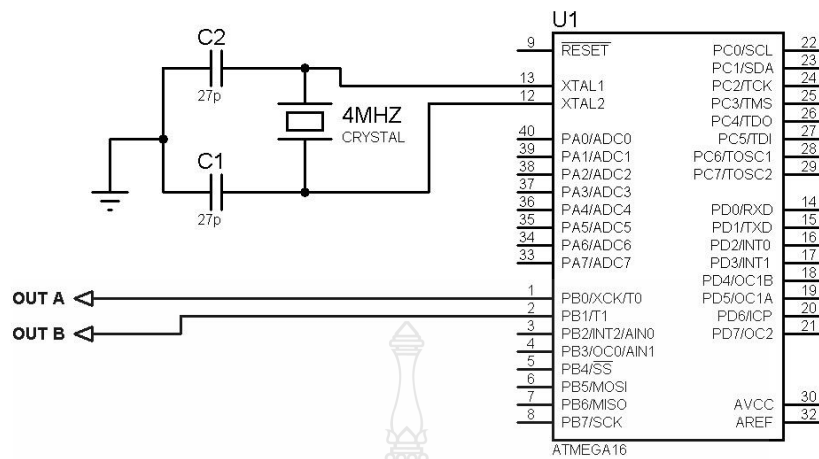
ในการออกแบบใช้ตัวเก็บประจุในวงจรใช้งานจริงใช้ 0.68 ไมโครฟารัดต่ออนุกรมกันโดยใช้จำนวน 2 ตัว 2 ชุดได้ค่าตัวเก็บประจุในวงจร 0.36 ไมโครฟารัด ความถี่เรโซแนนซ์ได้ที่ 46.17 กิโลเฮิร์ตซ์ ความถี่ที่ใช้งานจริงสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย แต่ความหนาของขดลวดทองแดงที่นำมาเป็นขดลวดเหนี่ยวนำยังคงใช้งานได้ เมื่อนำไปต่อในวงจรจะได้ดังรูปที่ 3.7



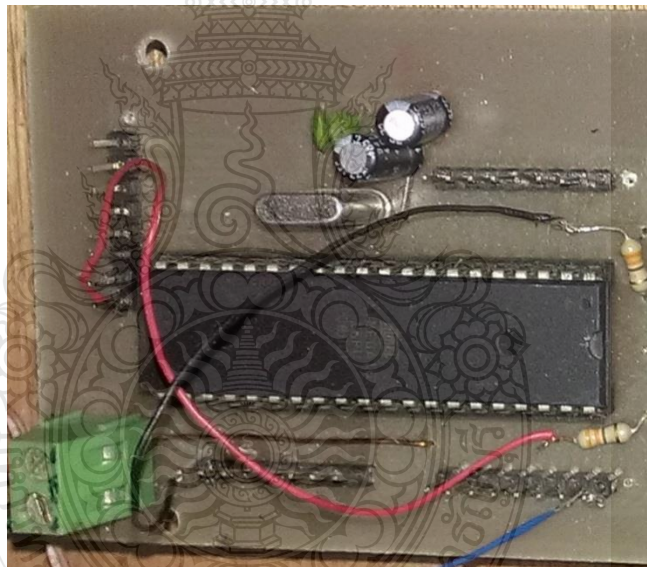
รูปที่ 3.7 การต่อชุดโพลวงจรเรโซแนนซ์

3.4.3 วงจรกำเนิดความถี่

วงจรกำเนิดความถี่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR MEGA16 ถูกโปรแกรมให้ผลิตความถี่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งผังวงจรได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 เพื่อใช้ป้อนกับวงจรขับขาเกดมอสเฟตรวมทั้งสามารถปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมสำหรับควบคุมกระแสได้ และหน้าที่อีกหนึ่งอย่างของไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดกระแส เพื่อนำมาประมวลผลสำหรับใช้ควบคุมกระแสให้คงที่ตามที่ต้องการทำงานไว้ รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นถึงวงจรผลิตความถี่และควบคุมกระแสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.8 วงจรผลิตความถี่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์

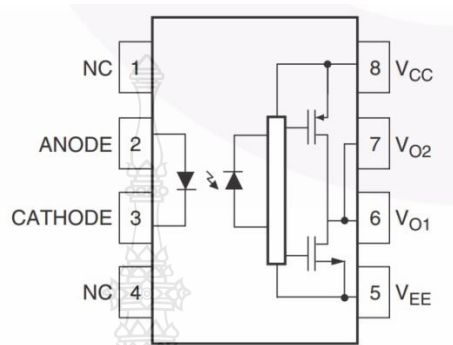


รูปที่ 3.9 วงจรผลิตความถี่และควบคุมกระแสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

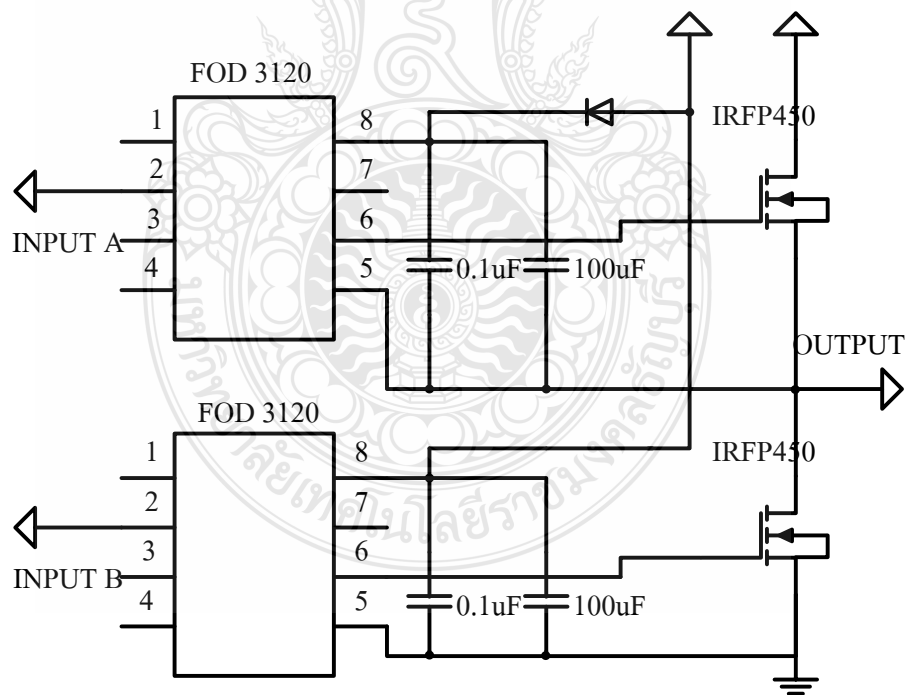
3.4.4 วงจรขับขาเกตแบบฮาล์ฟบริดจ์

วงจรขับเกตมอสเฟตใช้ไอซีสำเร็จรูป FOD3120 ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นไอซี Gate drive optocoupler มีความสามารถต่อเป็นวงจรขับเกตแบบฮาล์ฟบริดจ์ซึ่งทำหน้าที่สวิตช์มอสเฟส ดังรูปที่ 3.11 ในการทำงานของวงจรขับเกตจะมีการสลับการทำงานระหว่างเฟสตัวแรกกับตัวที่สอง โดยจะทำงานครั้งละครึ่งรูปคลื่น ไอซี FOD3120 ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการทำงานที่ 30 โวลต์

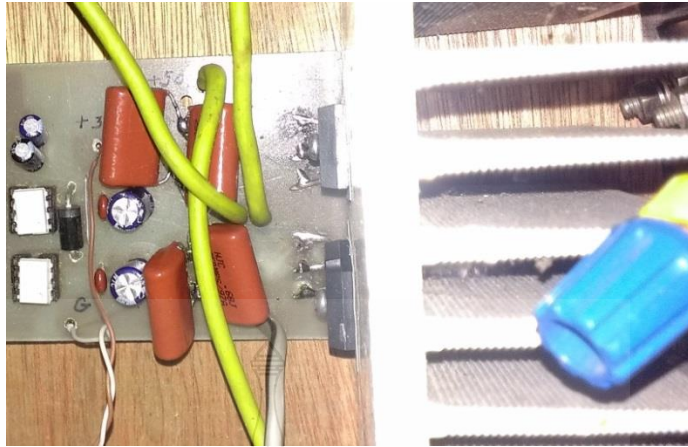
สามารถขยายกระแสสูงสุดได้ 2.5 แอมแปร์ ซึ่งสามารถใช้ขับขาเกิดของมอเตอร์ได้ มอสเฟสสำหรับ
 สวิตช์ของวงจรใช้มอสเฟสเบอร์ IRFP 450 โดยมีพิกัดทนแรงดันได้ 500 โวลต์ และสามารถทน
 กระแสได้ 14 แอมแปร์ รูปที่ 3.11 แสดงวงจรขับขาเกิดแบบฮาล์ฟบริดจ์ และรูปที่ 3.12 แสดงวงจร
 ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.10 ไคโอะแกรมวงจรภายในไอซี FOD3120



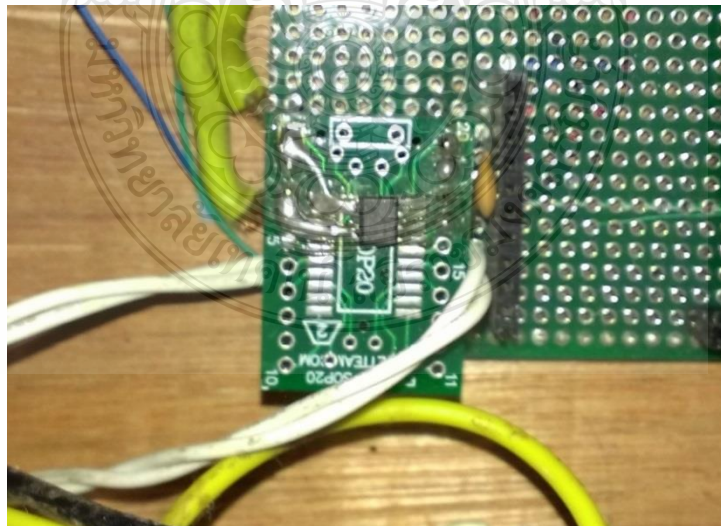
รูปที่ 3.11 วงจรขับขาเกิดแบบฮาล์ฟบริดจ์



รูปที่ 3.12 วงจรจับแรงแบบฮอลล์ฟริดจ์และวงจรฮอลล์ฟริดจ์อินเวอร์เตอร์

3.4.5 วงจรตรวจวัดกระแส

วงจรวัดกระแสใช้ตัววัดกระแสด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดกระแส (Hall-element) ดังรูปที่ 3.13 เบอร์ ACS754LCB-050-PFF เนื่องจากมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและแยกโศดทางไฟฟ้าไปในตัว เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ความต้านทานในการตรวจจับกระแสจะไม่มีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งจะทำให้มีการตั้งระดับกระแสได้แน่นอนกว่า และข้อดีอีกประการหนึ่งคือไม่ต้องใช้ตัวแยกโศดทางแสงซึ่งให้ผลตอบสนองช้าแต่เซ็นเซอร์วัดกระแสมีราคาแพงกว่าการใช้ความต้านทานตรวจจับกระแส



รูปที่ 3.13 การต่อเซ็นเซอร์กระแส (Hall-element)

การตรวจวัดกระแสโดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแส นั้น โดยเซ็นเซอร์วัดกระแสเบอร์ดังกล่าว สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ 50 แอมแปร์ การทำงานเมื่อเซ็นเซอร์สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ 50 แอมแปร์ จะให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับเซ็นเซอร์ และเมื่อเซ็นเซอร์วัดกระแสได้ 0 แอมแปร์เซ็นเซอร์จะให้แรงดันเอาต์พุตครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับเซ็นเซอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้แรงดันไฟฟ้าให้กับเซ็นเซอร์ 5.00 โวลต์ สามารถหาอัตราส่วนกระแสที่วัดได้ต่อแรงดันเอาต์พุตที่ตัวเซ็นเซอร์ให้ออกมาดังนี้

แรงดันไฟฟ้าขณะทีวัดกระแสได้สูงสุด (<i>V_{HC}</i>)	5.00 V
แรงดันไฟฟ้าขณะทีวัดกระแสได้ต่ำสุด (<i>V_{LC}</i>)	2.50 V
กระแสไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์วัดได้สูงสุด (<i>I_{max}</i>)	50 A
กระแสไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์วัดได้เท่ากับ 0 แอมแปร์ (<i>I_{zero}</i>)	0 A

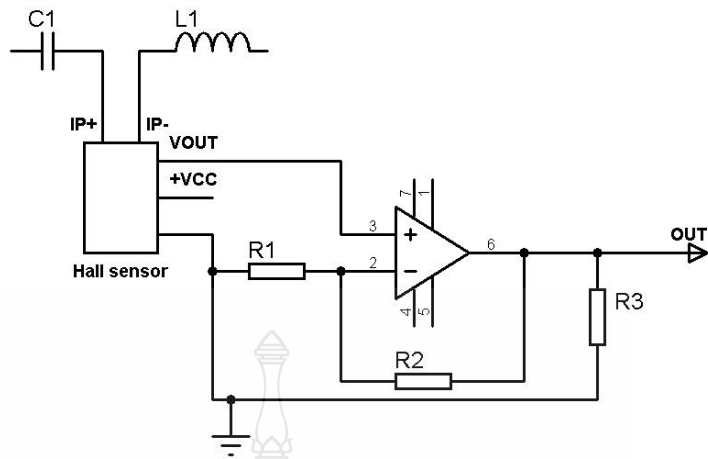
เพราะฉะนั้นจะหาอัตราส่วนกระแสที่วัดได้ต่อแรงดันไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ได้

$$\frac{2.5}{50}$$

$$0.05 V : 1 A$$

อัตราส่วนกระแสที่วัดได้ต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับ 0.05 โวลต์ต่อ 1 แอมแปร์

เมื่อเซ็นเซอร์วัดกระแสสูงสุดได้ 50 แอมแปร์ เซ็นเซอร์จะให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับตัวเซ็นเซอร์คือ 5.00 โวลต์ เมื่อเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าได้ 0 แอมแปร์ เซ็นเซอร์จะให้แรงดันเอาต์พุตที่ 2.50 โวลต์ เมื่อนำมาเทียบอัตราส่วนเพื่อนำมาใช้งานจะได้เท่ากับ 0.05 โวลต์ต่อ 1 แอมแปร์ จากเหตุผลดังกล่าว เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตของเซ็นเซอร์วัดกระแสมาใช้งาน ต้องมีการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายสัญญาณก่อน ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรขยายโดยใช้ออปแอมป์ (Op-Amp) ต่อวงจรที่มีอัตราขยาย 2 เท่า เพราะระบบถูกออกแบบให้มีกระแสสูงสุดไม่เกิน 5 แอมแปร์ เมื่อระบบมีการทำงานเซ็นเซอร์สามารถวัดกระแสได้ระหว่าง 0-5 แอมแปร์ เซ็นเซอร์วัดกระแสจะให้แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2.50 – 2.75 โวลต์ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ 2 เท่า ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ระหว่าง 5.00 – 5.50 โวลต์



รูปที่ 3.14 วงจรตรวจวัดกระแส

การหาค่าตัวต้านทานสำหรับใช้ต่อรวมในวงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้วตามรูปที่ 3.14 ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราขยายของวงจรไว้ที่ 2 เท่าในการคำนวณหาค่าตัวต้านทานในวงจรหาได้จากสมการที่ 3.4

$$AV = \frac{R1+R2}{R1} \tag{3.4}$$

กำหนดให้อัตราขยาย 2 เท่า (AV) 2
 กำหนดให้ตัวต้านทานทางอินพุต (R1) 1KΩ
 ตัวต้านทานทางด้านเอาต์พุต (R2)
 แทนค่าลงในสมการที่ 3.4 จะได้

$$2 = \frac{1K+R2}{1K}$$

$$R2 = (2 \times 1K) - 1K$$

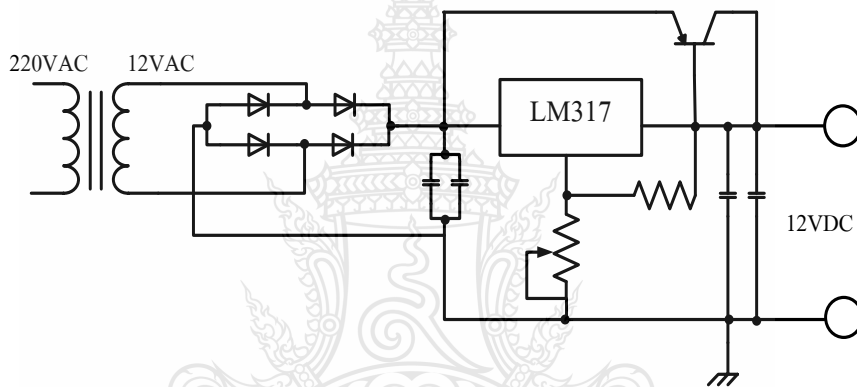
$$R2 = 1K\Omega$$

จากการคำนวณหาค่าตัวต้านทานจากอัตราขยายของวงจรได้ R1 และ R2 มีค่า 1KΩ

3.4.6 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย

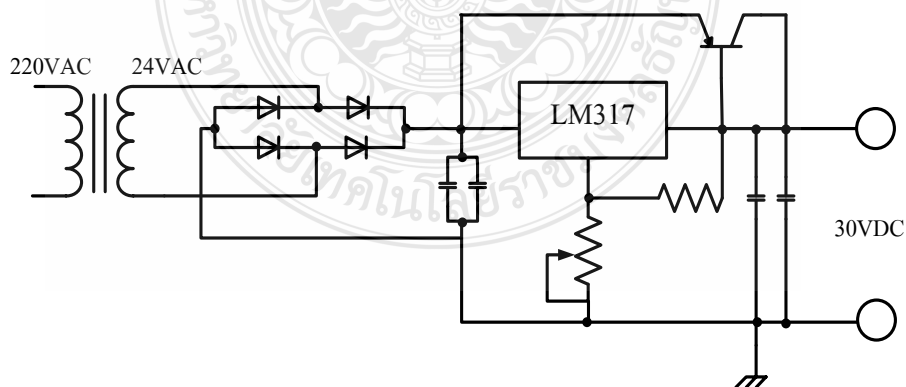
วงจรเพาเวอร์ซัพพลายทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดันไฟฟ้า 12 30 และ 50 โวลต์ตามลำดับโดยแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ใช้สำหรับจ่ายให้กับภาคตรวจวัดกระแส 30 โวลต์ใช้สำหรับภาคขับเคลื่อนมอเตอร์และ 50 โวลต์ใช้สำหรับภาคอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ในวงจรเพาเวอร์ซัพพลาย สำหรับงานวิจัยนี้มีสองวงจรที่ใช้วงจรสำเร็จรูป จากบริษัทฟิวเจอร์คิเคิลส์ คือวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 และ 30 โวลต์ตามลำดับ โดยในการทำงานได้ปรับตั้งแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ 12 และ 30 โวลต์คงที่ตลอดเวลา โดยแต่ละวงจรเพาเวอร์ซัพพลายดังกล่าวมีพิกัดต่างๆแต่ละส่วนดังนี้

วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ดังรูปที่ 3.15 ให้กระแสสูงสุด 2 แอมแปร์



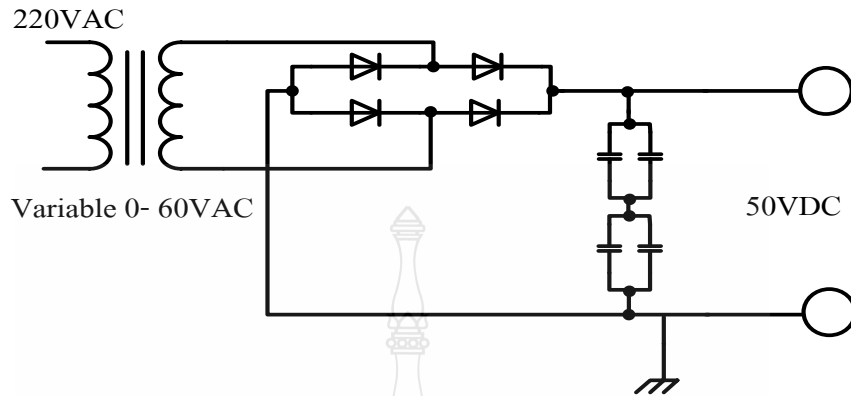
รูปที่ 3.15 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์

วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ดังรูปที่ 3.16 ให้กระแสสูงสุด 5 แอมแปร์



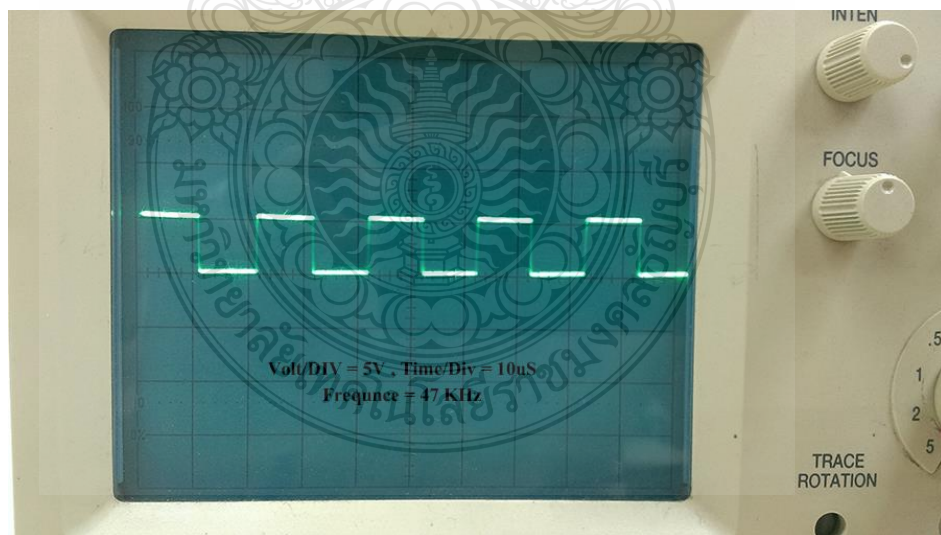
รูปที่ 3.16 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์

วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ดังรูปที่ 3.17 ให้กระแสสูงสุด 10 แอมแปร์



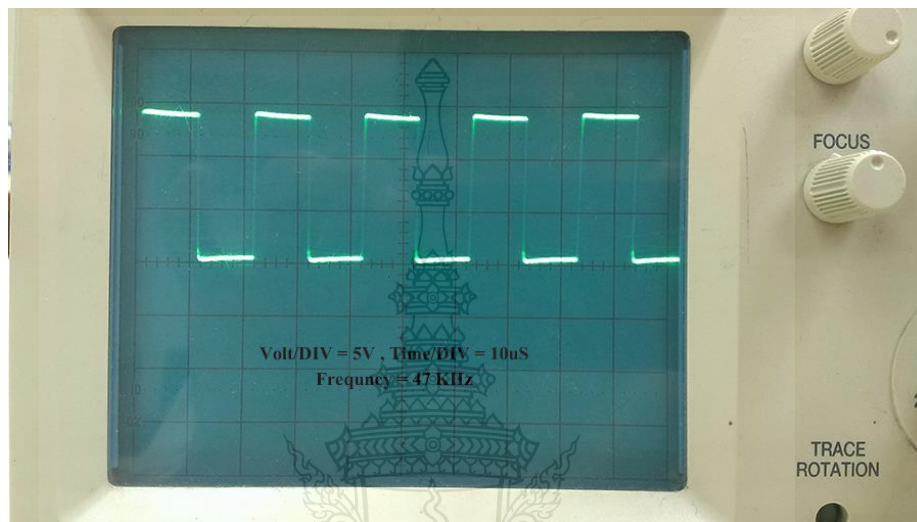
รูปที่ 3.17 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์

เมื่อนำวงจรส่วนต่างๆมาประกอบเป็นระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแล้วนั้น ต้องมีการปรับแต่งจนระบบทำงานได้ และสามารถให้ความร้อนตามที่ออกแบบไว้ โดยในการทดสอบเริ่มจากการทดสอบระบบผลิตความถี่ก่อนซึ่งวงจรสามารถผลิตความถี่ได้ตามโปรแกรมที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.18 แสดงหน้าจอรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 47 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ผลิตความถี่ได้ตามโปรแกรม หลังจากนั้นทดสอบ วงจรขับขาเกตของวงจรฮาล์ฟบริจค์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรโดยรวมสามารถทำงานได้ดี โดยสามารถ วัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรขับขาเกตได้ประมาณ 10 โวลต์ ซึ่งสามารถขับขาเกตของมอสเฟส ได้ ดังรูปที่ 3.19 แสดงหน้าจอรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตวงจรขับขาเกต



รูปที่ 3.19 รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตวงจรขับขาเกต

ส่วนสุดท้ายทดสอบการทำงานของชุด โหลดเรโซแนนซ์ วงจรทำงานได้ตามที่ออกแบบ โดยมีสัญญาณรบกวนเล็กน้อย และสามารถวัดกระแสที่ผ่านชุดโหลดเรโซแนนซ์ได้ 8.2 แอมแปร์ ซึ่ง การทดสอบนี้ยังไม่มีโปรแกรมการคุมกระแสให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเงื่อนไขของการชُبแข็งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการชُبแข็งตามความต้องการของผู้ใช้ โดยทำการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ของการควบคุมกระแสเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้ โดยระบบจะควบคุมโดยวิธีการควบคุมแบบเปิดปิด (On/Off control) และเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) ทำการทดลองผ่านระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดวงจรถวายไฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Half-Bridge inverter) รูปแบบสัญญาณอินพุต (Input) จะถูกแปลงจากสัญญาณแอนะล็อก (Analog) ไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) เพื่อเข้าสู่หน่วยประมวลผล ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการตั้งค่าสำหรับการชُبแข็งที่เหมาะสมต่อไป การทดลองจะทดลองผ่านสกรูขนาดยาว 25 มิลลิเมตร นำมาทำการชُبแข็งโดยกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำใช้วิธีการควบคุมแบบเปิดปิด และเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมการชُبแข็ง ระบบจะทำการควบคุมโดยวิธีการจำกัดกระแสผ่านการปรับค่าดีวี่ไซเคิลของระบบโดยสัญญาณควบคุมได้จากการตรวจจับกระแสด้วยอุปกรณ์เช่นเซอร์กระแส ส่วนการทดลองนำสกรูขนาด 25 มิลลิเมตรมาทำการตรวจสอบค่าความแข็งก่อนและหลังการชُبแข็ง ตรวจสอบผลที่ได้รับเปรียบเทียบกับผลจากการควบคุมเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น และข้อมูลที่ได้รับทั้งหมดผลถูกบันทึกผ่านระบบบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้า (Current data logger) ที่มีความละเอียดในการแปลงสัญญาณระดับ 50 มิลลิแอมป์ต่อครั้ง (mA/step) ประกอบการบันทึกข้อมูล

4.1 ผลการแปลงข้อมูลจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โดยใช้กระบวนการเส้นค่าเฉลี่ย (Moving average) เพื่อปรับค่าความถูกต้องของข้อมูลที่รับเข้ามา

ระบบควบคุมที่ดีจะต้องเกิดจากสัญญาณควบคุมที่ดีจึงจะทำให้ระบบสามารถควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ ในระบบควบคุมแบบดิจิทัล (Digital control system) ระบบการวัดเพื่อการป้อนกลับจะต้องทำการแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลได้อย่างถูกต้อง หลังจากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงจะถูกนำไปใช้งานต่อไป เนื่องจากในระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดวงจรถวายไฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ใช้สัญญาณขับชนิดการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse width modulator) ซึ่งอาจก่อให้เกิดการรบกวนกับระบบการแปลงสัญญาณและระบบการวัดหรือทำให้ข้อมูลที่ได้อาจผิดพลาด จากการทดลองพบว่าข้อมูลของกระแสที่ได้จากการวัดมีการ

กระจายตัวค่อนข้างมากซึ่งอาจเป็นผลให้ระบบเกิดความผิดพลาดได้ งานวิจัยนี้จึงได้นำกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยมาแก้ไขเพื่อให้ค่าที่ได้จากการวัดนั้นถูกต้องมากขึ้นโดยสมการที่ใช้เพื่อประกอบกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยแสดงดังสมการที่ 4.1

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (4.1)$$

โดยที่ผลการทดลองก่อนและหลังแสดงดังตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่กระแส 4 แอมแปร์

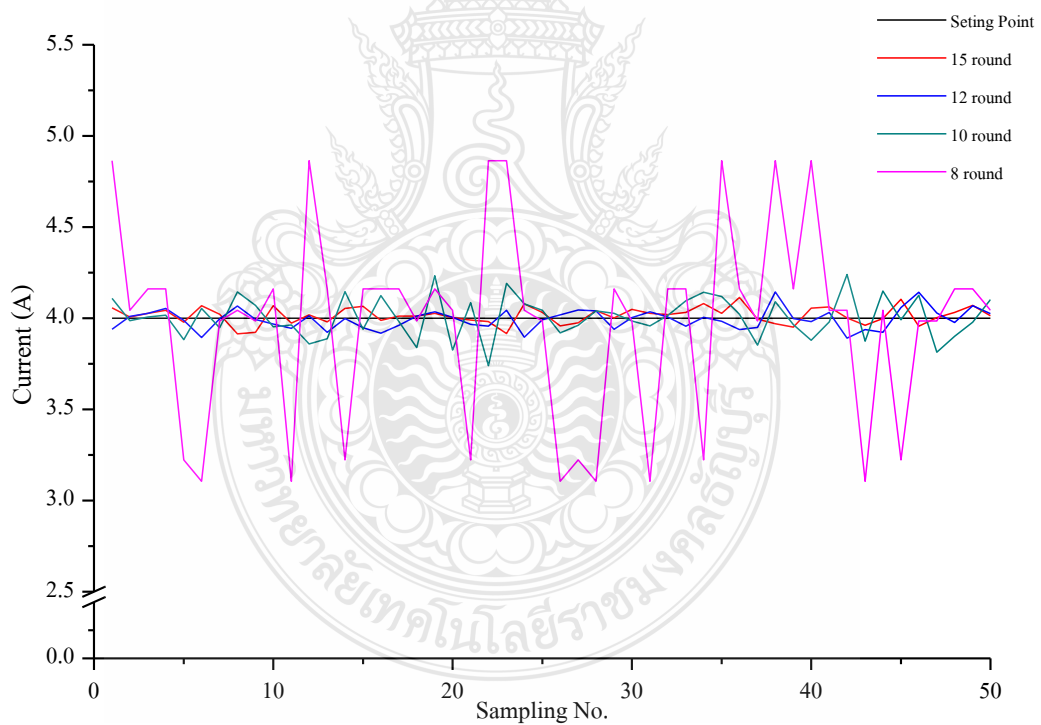
Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
1	4	4.056	3.940	4.109	4.864	4.336	3.611
2	4	4.007	4.011	3.987	4.043	3.985	5.752
3	4	4.026	4.028	4.006	4.161	4.278	3.528
4	4	4.044	4.053	4.016	4.161	4.278	3.544
5	4	3.979	3.988	3.882	3.223	3.223	2.726
6	4	4.070	3.895	4.054	3.106	5.040	3.788
7	4	4.022	3.996	3.948	3.985	4.864	4.524
8	4	3.915	4.068	4.145	4.043	4.864	1.768
9	4	3.923	3.993	4.071	3.985	4.161	4.817
10	4	4.070	3.969	3.953	4.161	4.512	3.626
11	4	3.974	3.944	3.964	3.106	4.336	4.254
12	4	4.018	4.013	3.860	4.864	3.985	3.713
13	4	3.979	3.923	3.887	4.161	5.040	2.594
14	4	4.054	3.998	4.146	3.223	4.512	4.648
15	4	4.066	3.947	3.940	4.161	4.864	3.187
16	4	3.989	3.917	4.125	4.161	3.223	2.568
17	4	4.012	3.962	3.981	4.161	4.336	3.878
18	4	4.011	4.011	3.839	3.985	4.161	4.867

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่
กระแส 4 แอมแปร์

Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
19	4	4.027	4.036	4.233	4.161	5.040	4.250
20	4	4.003	4.006	3.826	4.043	4.278	2.954
21	4	3.991	3.966	4.085	3.223	4.336	4.492
22	4	3.982	3.956	3.739	4.864	5.040	3.001
23	4	3.917	4.043	4.191	4.864	4.864	4.725
24	4	4.078	3.895	4.078	4.043	4.864	4.529
25	4	4.032	3.992	4.044	3.985	3.985	3.373
26	4	3.957	4.018	3.920	3.106	4.336	2.358
27	4	3.974	4.044	3.961	3.223	3.223	3.572
28	4	4.042	4.040	4.040	3.106	5.040	3.471
29	4	4.002	3.939	4.026	4.161	4.278	2.773
30	4	4.049	4.004	3.986	3.985	4.278	4.616
31	4	4.026	4.035	3.959	3.106	4.336	4.287
32	4	4.019	4.008	4.015	4.161	4.336	4.379
33	4	4.033	3.956	4.096	4.161	4.864	3.967
34	4	4.081	4.005	4.142	3.223	4.512	4.135
35	4	4.026	3.984	4.119	4.864	4.864	2.012
36	4	4.113	3.938	4.022	4.161	4.336	4.082
37	4	3.995	3.950	3.852	3.985	3.223	2.576
38	4	3.971	4.145	4.091	4.864	4.864	2.773
39	4	3.952	3.999	3.965	4.161	5.040	3.454
40	4	4.055	3.981	3.879	4.864	5.040	5.218
41	4	4.062	4.032	3.980	4.043	4.512	3.929
42	4	4.001	3.891	4.240	4.043	4.161	4.095
43	4	3.961	3.938	3.874	3.106	3.985	4.071

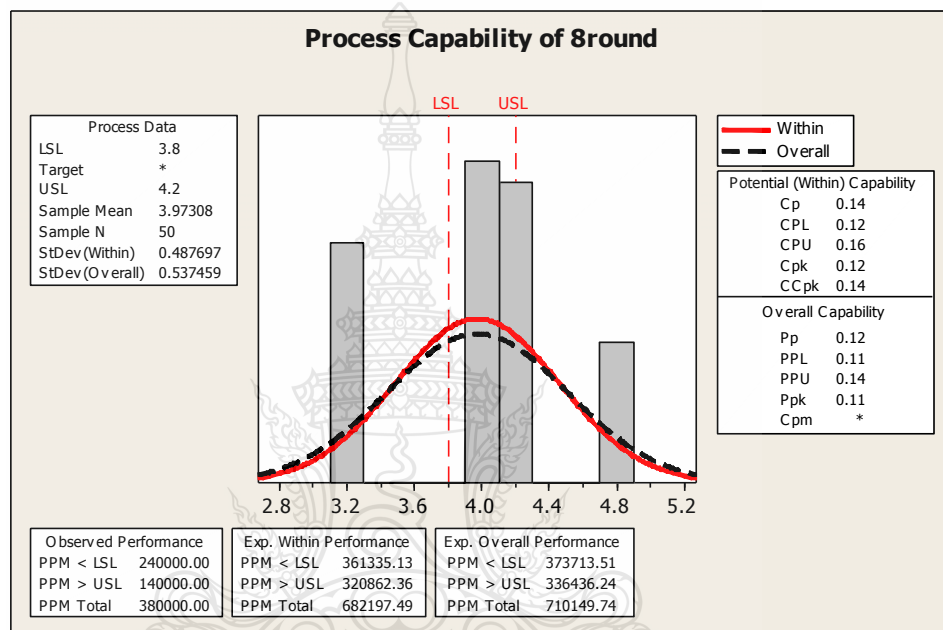
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่
กระแส 4 แอมแปร์

Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
44	4	3.999	3.923	4.149	4.043	4.336	6.231
45	4	4.104	4.059	3.991	3.223	4.336	4.093
46	4	3.956	4.143	4.126	3.985	4.161	4.692
47	4	4.004	4.028	3.814	3.985	4.864	4.802
48	4	4.032	3.977	3.901	4.161	4.278	3.679
49	4	4.070	4.068	3.978	4.161	5.040	3.514
50	4	4.013	4.025	4.102	4.043	4.278	3.251



รูปที่ 4.1 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบ 8 10 12 และ 15 รอบ ที่การทำเส้นค่าเฉลี่ยที่
กระแส 4 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.1 เป็นผลการทดลองการวัดสัญญาณและป้อนกลับจำนวนรอบ 8 ถึง 15 รอบ โดยยิ่งจำนวนรอบการป้อนกลับที่มากขึ้น การวัดสัญญาณมีความแม่นยำในการวัดมาก จากรูปที่ 4.1 มีการวัดสัญญาณที่เป็นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลดหนึ่งขวน้ำที่ 4 แอมแปร์ เมื่อนำผลที่ได้จากจำนวนรอบการป้อนกลับต่าง ๆ มาคำนวณความเป็นไปได้ของความแม่นยำทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab มีการกำหนดเงื่อนไขช่วงการวัดสัญญาณที่ยอมรับได้ที่ 3.8 ถึง 4.2 แอมแปร์ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

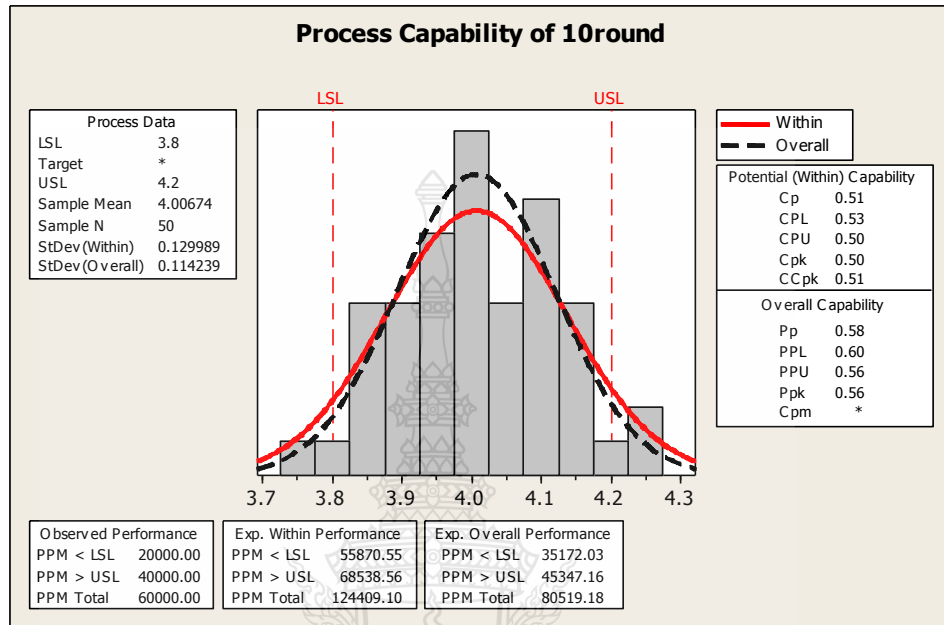


รูปที่ 4.2 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์

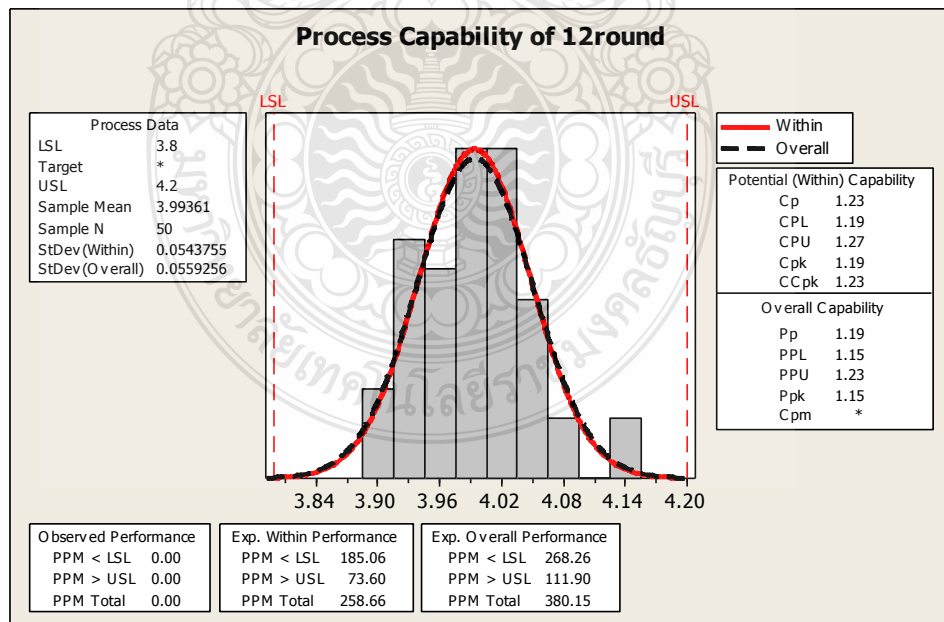
จากรูปที่ 4.2 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งแสดงด้วยค่า Cp เท่ากับ 0.14 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบที่ไม่แม่นยำแสดงด้วยค่า Cpk เท่ากับ 0.12 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด

จากรูปที่ 4.3 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงด้วยค่า Cp เท่ากับ 0.51 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับ

ต่อจำนวน 10 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า Cpk เท่ากับ 0.50 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด

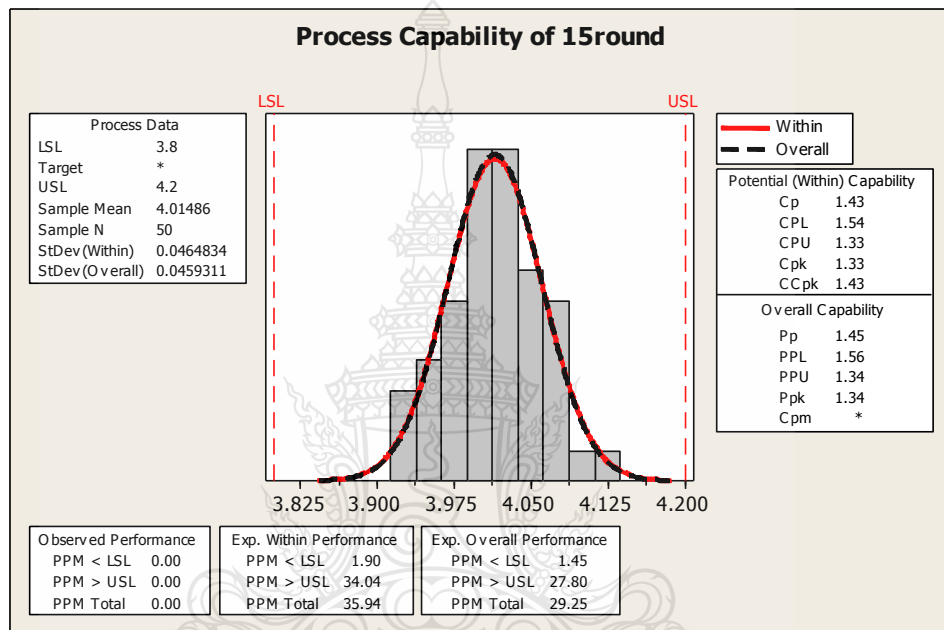


รูปที่ 4.3 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์



รูปที่ 4.4 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.4 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 1.23 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 1.19 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด



รูปที่ 4.5 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 4 แอมแปร์

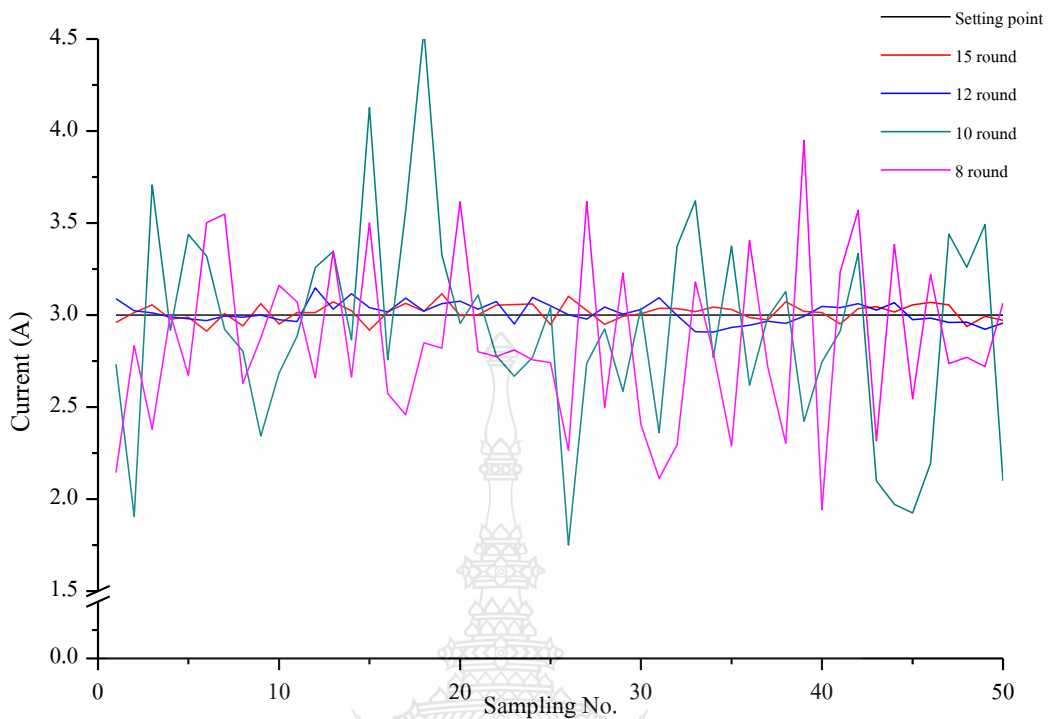
จากรูปที่ 4.5 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 1.43 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 1.33 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด

ตารางที่ 4.2 ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่
กระแส 3 แอมแปร์

Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
1	3	2.960	3.089	2.733	2.143	2.275	4.054
2	3	3.014	3.023	1.906	2.833	3.733	3.814
3	3	3.055	3.012	3.706	2.380	3.146	2.775
4	3	2.978	2.990	2.918	3.003	4.601	3.676
5	3	2.988	2.981	3.439	2.673	4.452	3.702
6	3	2.913	2.969	3.320	3.501	2.596	3.242
7	3	3.008	2.995	2.922	3.549	1.778	2.790
8	3	2.941	2.988	2.804	2.630	2.105	3.769
9	3	3.062	3.001	2.342	2.876	3.618	2.833
10	3	2.952	2.975	2.684	3.162	3.530	2.558
11	3	3.013	2.965	2.884	3.073	2.942	2.306
12	3	3.013	3.148	3.258	2.660	3.912	3.062
13	3	3.072	3.032	3.346	3.348	3.117	2.751
14	3	3.024	3.116	2.866	2.663	1.072	1.043
15	3	2.918	3.041	4.127	3.501	2.349	2.965
16	3	3.017	3.018	2.757	2.573	1.822	3.413
17	3	3.064	3.092	3.566	2.458	2.428	2.812
18	3	3.020	3.022	4.550	2.849	2.845	1.621
19	3	3.116	3.061	3.328	2.821	2.757	2.653
20	3	2.997	3.076	2.955	3.615	2.835	3.845
21	3	3.002	3.032	3.109	2.800	1.899	2.578
22	3	3.054	3.073	2.778	2.774	3.027	3.420
23	3	3.057	2.952	2.667	2.810	3.917	4.185
24	3	3.060	3.096	2.771	2.757	2.761	3.669
25	3	2.948	3.050	3.040	2.741	3.421	2.596

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่
กระแส 3 แอมแปร์

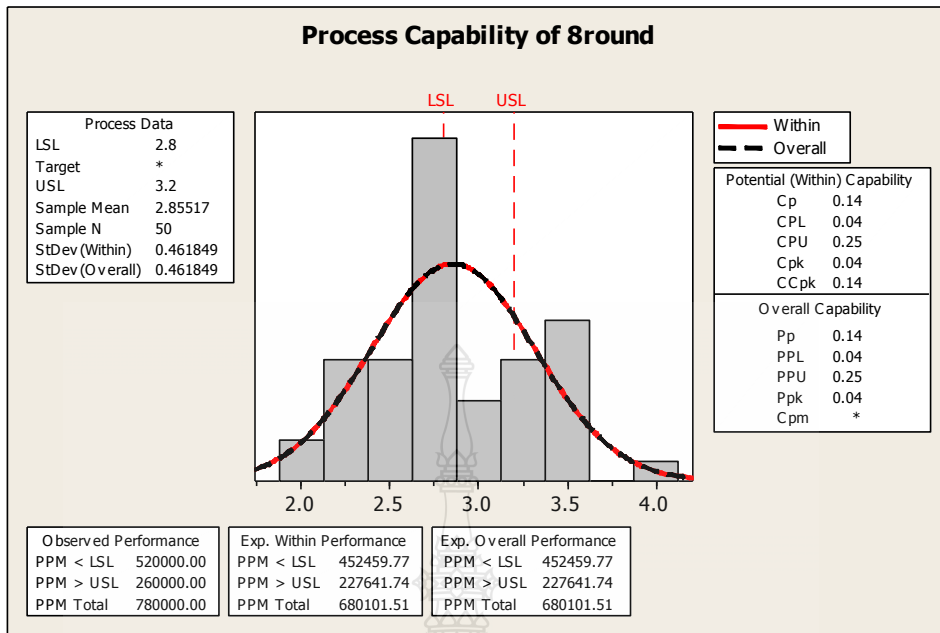
Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
26	3	3.102	3.002	1.750	2.265	1.162	2.811
27	3	3.025	2.979	2.738	3.617	4.053	2.393
28	3	2.950	3.043	2.925	2.498	1.759	2.438
29	3	2.993	3.005	2.585	3.228	4.035	2.527
30	3	3.007	3.030	3.036	2.407	3.432	2.307
31	3	3.037	3.094	2.361	2.113	2.743	2.872
32	3	3.035	2.998	3.374	2.295	2.375	3.113
33	3	3.019	2.910	3.620	3.179	2.818	4.029
34	3	3.043	2.907	2.769	2.795	1.720	1.713
35	3	3.030	2.933	3.375	2.290	3.022	3.326
36	3	2.986	2.944	2.619	3.406	2.936	2.646
37	3	2.973	2.967	2.989	2.718	2.545	2.921
38	3	3.072	2.955	3.128	2.304	3.572	2.166
39	3	3.021	2.993	2.423	3.950	4.052	2.667
40	3	3.014	3.047	2.745	1.943	3.407	1.251
41	3	2.952	3.040	2.913	3.234	1.449	2.875
42	3	3.034	3.062	3.334	3.569	1.178	3.222
43	3	3.045	3.026	2.099	2.317	2.779	2.526
44	3	3.017	3.066	1.971	3.384	3.718	2.296
45	3	3.056	2.974	1.925	2.545	4.705	2.807
46	3	3.068	2.983	2.194	3.219	2.938	2.730
47	3	3.056	2.959	3.440	2.737	3.177	4.063
48	3	2.938	2.962	3.260	2.769	4.255	3.668
49	3	2.994	2.922	3.492	2.719	3.010	2.569
50	3	2.972	2.956	2.100	3.065	3.698	1.894



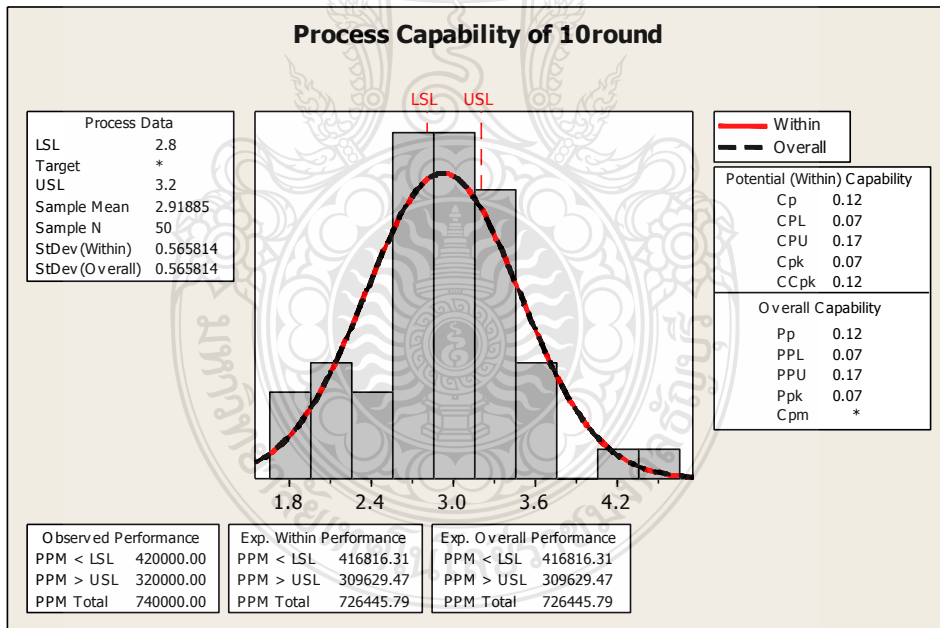
รูปที่ 4.6 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบ 8 10 12 และ 15 รอบ ที่การทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.6 เป็นผลการทดลองการวัดสัญญาณและป้อนกลับจำนวนรอบ 8 ถึง 15 รอบ โดยยิ่งจำนวนรอบการป้อนกลับที่มากขึ้น การวัดสัญญาณมีความแม่นยำในการวัดมาก จากรูปที่ 4.6 มีการวัดสัญญาณที่เป็นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลดเหนี่ยวนำที่ 3 แอมแปร์ เมื่อนำผลที่ได้จากจำนวนรอบการป้อนกลับต่าง ๆ มาคำนวณความเป็นไปได้ของความแม่นยำทางสถิติด้วย โปรแกรม Minitab มีการกำหนดเงื่อนไขช่วงการวัดสัญญาณที่ยอมรับได้ที่ 2.8 ถึง 3.2 แอมแปร์ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

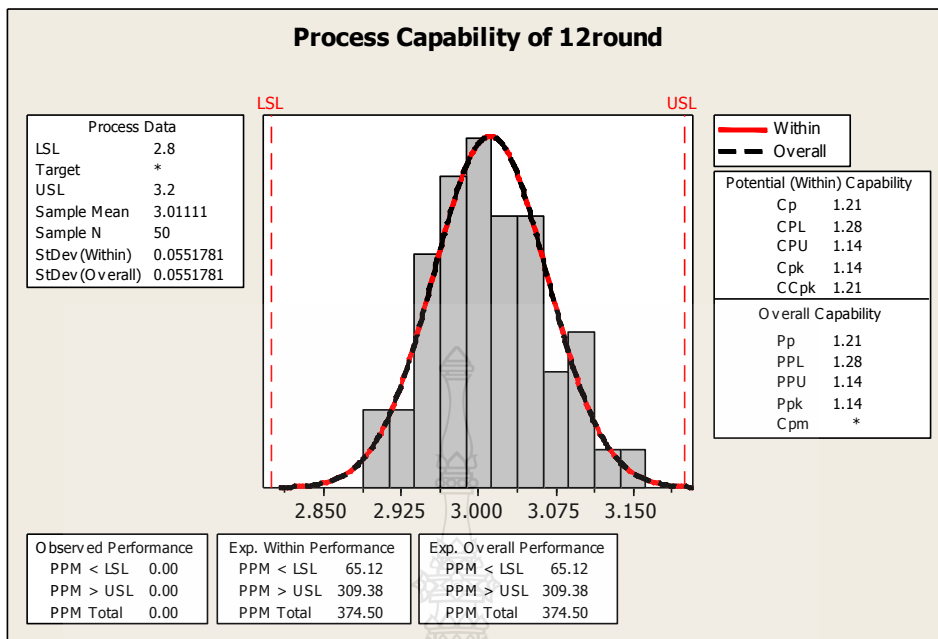
รูปที่ 4.7 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 0.14 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่ใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบที่ไม่แม่นยำแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 0.04 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด และจากรูปที่ 4.8 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 0.12 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่ใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 0.07 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด



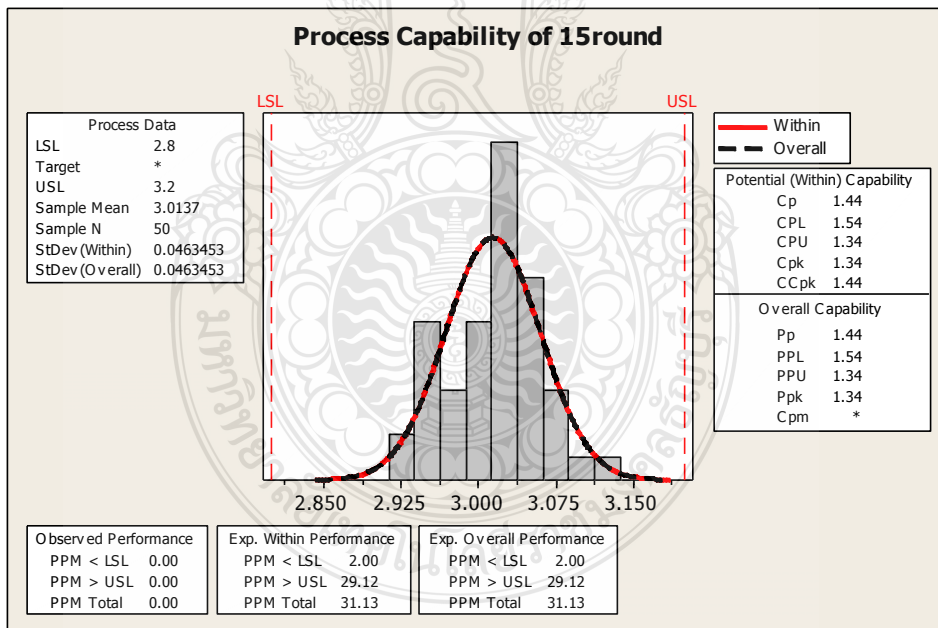
รูปที่ 4.7 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์



รูปที่ 4.8 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์



รูปที่ 4.9 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์



รูปที่ 4.10 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 3 แอมแปร์

รูปที่ 4.9 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบ ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 1.21 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 1.14 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด และรูปที่ 4.10 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 1.44 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 1.34 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด

ตารางที่ 4.3 ทดลองกระบวนการเสี้ยนค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่ กระแส 2 แอมแปร์

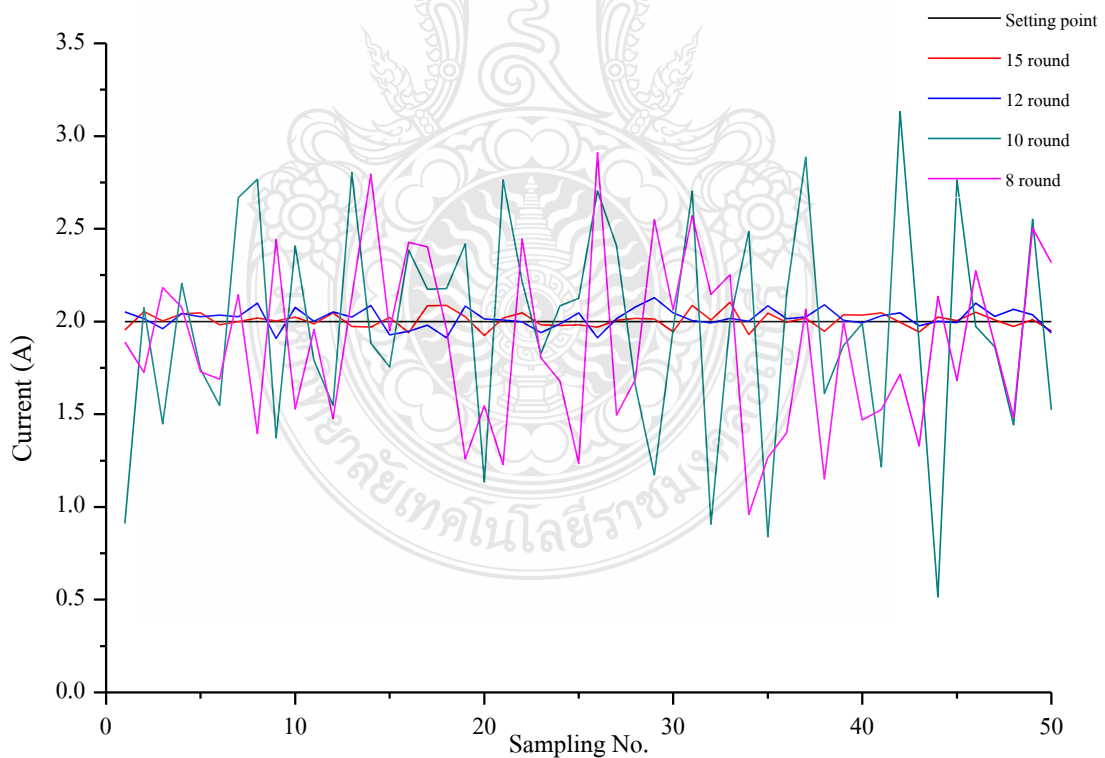
Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
1	2	1.953	2.052	0.911	1.890	1.605	1.536
2	2	2.054	2.015	2.074	1.725	0.990	2.033
3	2	2.003	1.961	1.448	2.184	0.000	3.078
4	2	2.042	2.044	2.205	2.076	1.069	2.494
5	2	2.046	2.026	1.743	1.728	3.400	2.934
6	2	1.981	2.035	1.548	1.689	2.431	2.917
7	2	1.999	2.025	2.668	2.144	1.728	1.527
8	2	2.019	2.099	2.766	1.397	1.804	1.517
9	2	2.002	1.908	1.374	2.442	2.013	0.494
10	2	2.023	2.077	2.408	1.529	2.368	2.711
11	2	1.988	2.002	1.790	1.957	1.483	0.704
12	2	2.046	2.051	1.550	1.476	2.583	1.195
13	2	1.973	2.024	2.802	2.132	2.831	1.903
14	2	1.969	2.087	1.882	2.796	1.145	2.224
15	2	2.022	1.928	1.755	1.951	1.666	3.302
16	2	1.941	1.947	2.385	2.427	2.315	1.142

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่
กระแส 2 แอมแปร์

Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
17	2	2.084	1.981	2.173	2.403	3.658	1.797
18	2	2.087	1.911	2.178	1.960	2.282	3.044
19	2	2.026	2.083	2.419	1.259	0.787	1.885
20	2	1.925	2.014	1.135	1.546	2.589	2.808
21	2	2.018	2.008	2.764	1.229	0.805	1.482
22	2	2.047	1.998	2.215	2.445	3.664	1.760
23	2	1.981	1.940	1.827	1.805	1.407	2.553
24	2	1.979	1.987	2.085	1.678	1.077	1.655
25	2	1.983	2.046	2.125	1.233	1.511	0.061
26	2	1.971	1.912	2.705	2.910	3.385	1.842
27	2	2.007	2.016	2.408	1.495	1.742	1.858
28	2	2.018	2.078	1.655	1.687	2.870	0.536
29	2	2.013	2.128	1.173	2.549	0.926	1.432
30	2	1.945	2.047	1.960	2.062	1.657	1.130
31	2	2.086	2.005	2.702	2.569	2.419	2.183
32	2	2.009	1.993	0.908	2.146	0.936	3.142
33	2	2.104	2.017	2.001	2.252	2.376	3.076
34	2	1.929	2.001	2.487	0.960	2.063	1.400
35	2	2.045	2.085	0.839	1.266	2.501	1.759
36	2	1.997	2.015	2.146	1.400	1.614	4.399
37	2	2.019	2.024	2.886	2.065	2.978	2.553
38	2	1.948	2.089	1.611	1.151	1.609	1.441
39	2	2.036	2.007	1.870	1.999	0.234	2.086
40	2	2.034	1.992	1.990	1.468	1.222	2.770
41	2	2.046	2.030	1.217	1.525	2.523	2.747

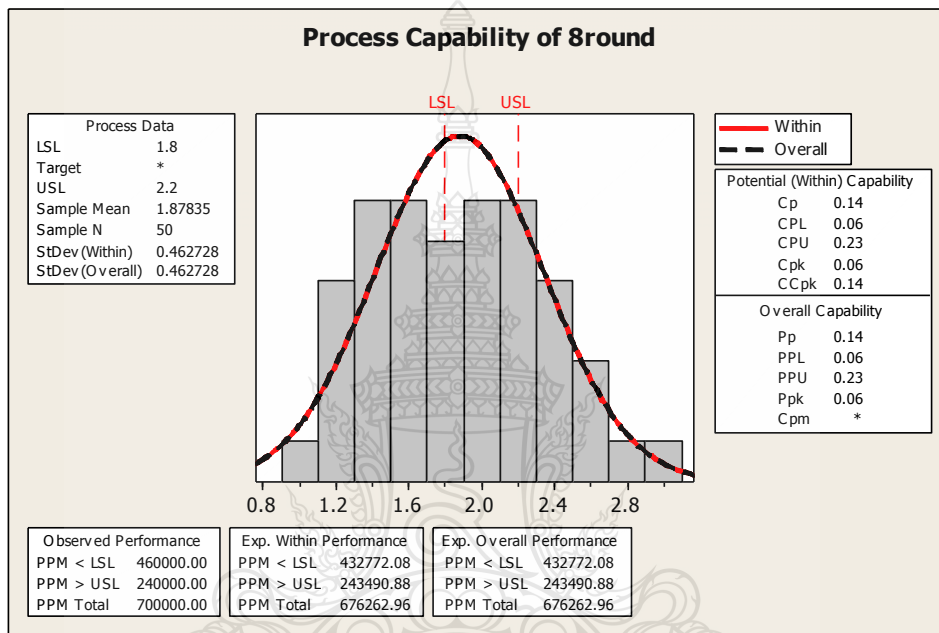
ตารางที่ 4.3 (ต่อ)ทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบการทำงานที่
กระแส 2 แอมแปร์

Sampling No.	Setting point (A)	15 round (A)	12 round (A)	10 round (A)	8 round (A)	5 round (A)	3 round (A)
42	2	1.996	2.047	3.131	1.715	1.956	3.546
43	2	1.944	1.977	1.881	1.330	3.361	1.323
44	2	2.024	2.001	0.514	2.135	1.744	1.097
45	2	2.005	1.995	2.764	1.682	3.200	1.963
46	2	2.050	2.099	1.973	2.273	2.519	1.966
47	2	2.009	2.028	1.863	1.874	2.428	1.265
48	2	1.973	2.066	1.444	1.483	2.303	1.577
49	2	2.010	2.036	2.551	2.504	1.304	0.970
50	2	1.949	1.939	1.523	2.317	2.436	1.680



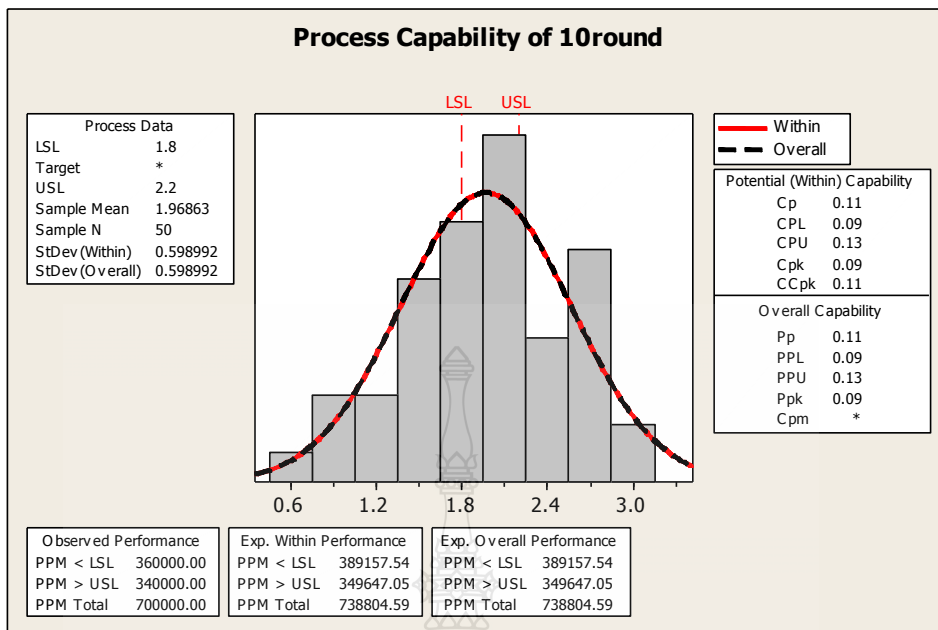
รูปที่ 4.11 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบ 8 10 12 และ 15 รอบ ที่การทำเส้นค่าเฉลี่ย
ที่กระแส 2 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.11 เป็นผลการทดลองการวัดสัญญาณและป้อนกลับจำนวนรอบ 8 ถึง 15 รอบ โดยยิ่งจำนวนรอบการป้อนกลับที่มากขึ้น การวัดสัญญาณมีความแม่นยำในการวัดมาก จากรูปที่ 4.11 มีการวัดสัญญาณที่เป็นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านโหลดหนึ่งขวน้ำที่ 2 แอมแปร์ เมื่อนำผลที่ได้จากจำนวนรอบการป้อนกลับต่าง ๆ มาคำนวณความเป็นไปได้ของความแม่นยำทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab มีการกำหนดเงื่อนไขช่วงการวัดสัญญาณที่ยอมรับได้ที่ 1.8 ถึง 2.2 แอมแปร์ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

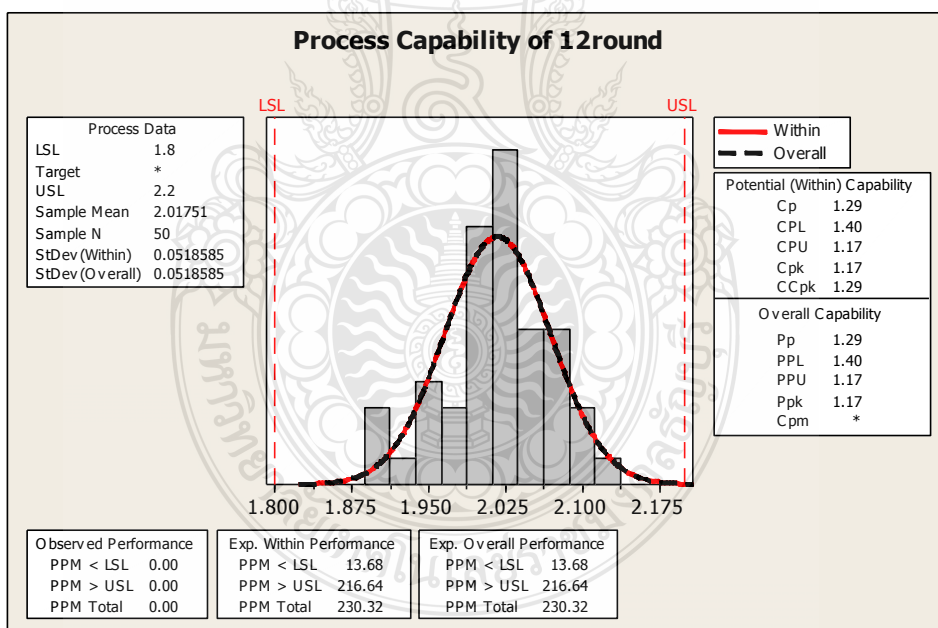


รูปที่ 4.12 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์

รูปที่ 4.12 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 0.14 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 8 รอบที่ไม่แม่นยำแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 0.06 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด และจากรูปที่ 4.13 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 0.11 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 0.09 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด

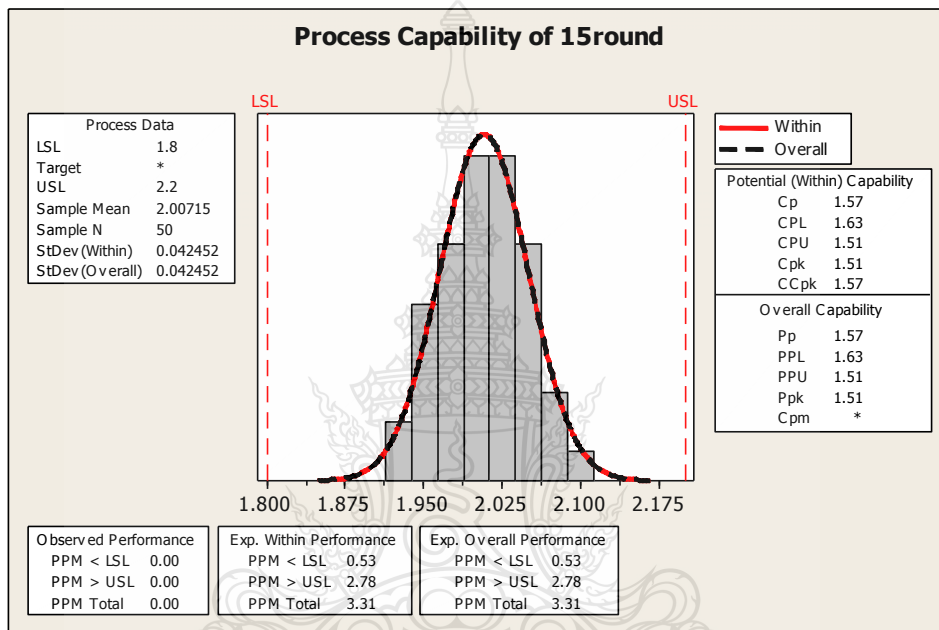


รูปที่ 4.13 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 10 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์



รูปที่ 4.14 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.14 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 1.29 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 12 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 1.17 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด



รูปที่ 4.15 กราฟทดลองสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบการทำเส้นค่าเฉลี่ยที่กระแส 2 แอมแปร์

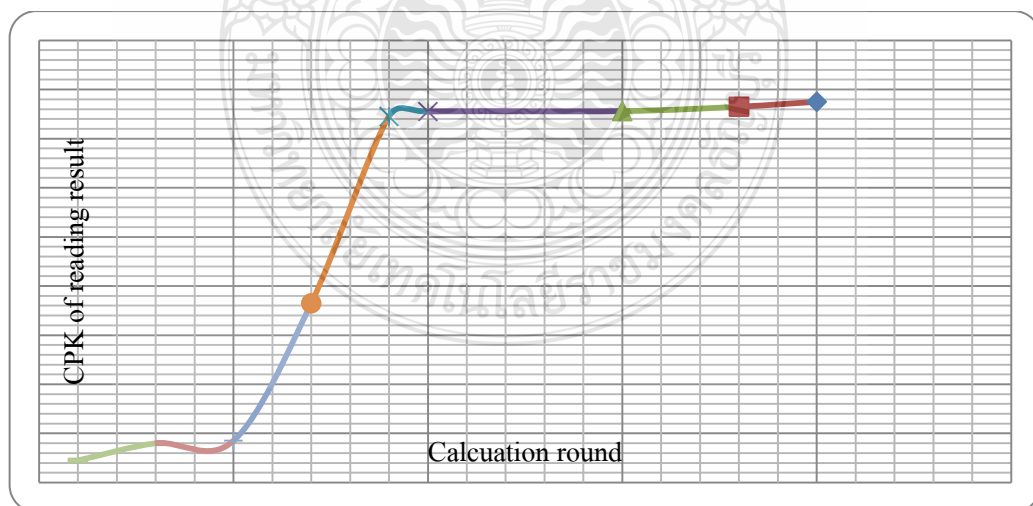
จากรูปที่ 4.15 เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จากกระบวนการป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่สูง ซึ่งแสดงด้วยค่า C_p เท่ากับ 1.57 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลว่าข้อมูลมีความแม่นยำกับค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ และมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการวัดที่การใช้การป้อนกลับต่อจำนวน 15 รอบที่แม่นยำมากขึ้นแสดงด้วยค่า C_{pk} เท่ากับ 1.51 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงผลการความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิด

เมื่อพิจารณาจากการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เมื่อให้จำนวนรอบการป้อนกลับในการวัดสัญญาณจำนวนรอบมากขึ้น ความแม่นยำในการวัดจะมากขึ้นตามจำนวนรอบที่มากขึ้น โดยความแม่นยำดังกล่าวแสดงด้วยค่าความแม่นยำของข้อมูลปัจจุบันคือค่า C_p และความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นว่าระบบสามารถทำงานได้แม่นยำหรือไม่ด้วยค่า C_{pk} จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงได้ผล

การทดลองที่จำนวนรอบการป้อนกลับที่ 15 รอบมีความแม่นยำใกล้เคียงกับ 12 รอบและมีความแม่นยำในการวัดสัญญาณมากกว่า 8 และ 10 รอบ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ทดลองเปรียบเทียบค่า Cpk และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่ได้รับจากกระบวนการวัดเปรียบเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณ ที่กระแส 4 แอมแปร์

Calculation Round at 4 A	Cpk	Standard deviation
20	1.550	0.0432
18	1.530	0.0459
15	1.512	0.0454
12	1.510	0.0543
10	1.510	0.1299
9	1.490	0.2415
8	1.170	0.4870
7	0.730	0.4813
5	0.170	0.4840
3	0.160	0.7680
1	0.090	0.9180



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่า Cpk และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้รับจากกระบวนการวัดเปรียบเทียบกับจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณที่กระแส 4 แอมแปร์

โดยจากการทดลองกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยต่อสัญญาณป้อนกลับต่อจำนวนรอบตั้งแต่ 1 รอบไปจนถึง 50 รอบ พบว่าจำนวนรอบการทำงานที่ 12 รอบให้ผลการแกว่งของกระแสไฟฟ้าไม่มาก และใช้เวลาในการทำงานไม่มากเกินไปในการเข้าสู่สภาวะควบคุมกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ โดยจากค่า Cpk และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้แสดงถึงความแม่นยำในการควบคุมกระแสที่ไม่แตกต่างกับจำนวนรอบการป้อนกลับที่สูงขึ้น จึงเลือกใช้จำนวนรอบการทำงานที่ 12 รอบ

ทดลองกระบวนการพีไอดีจูนนิ่ง (PID Tunning) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ ต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ทำการทดลองที่กระแส 3 แอมแปร์เป็นหลักเนื่องจากเป็นค่ากลางโดยมีสมการดังสมการที่ 4.2

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.2)$$

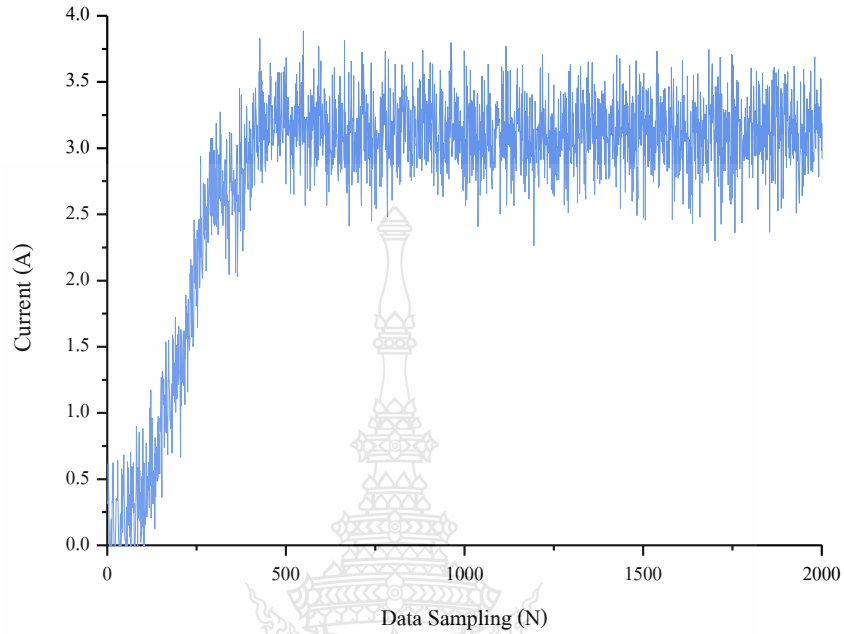
การปรับค่าการควบคุมแบบพีไอดีจะกระทำโดยกระบวนการ โดยวิธีการนี้แนะนำเสนอโดย John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols ในคริสต์ทศวรรษที่ 1940 ขึ้นแรกตั้งค่า K_i และ K_d เป็น 0 เพิ่มอัตราขยาย P สูงที่สุดกระทั่งเริ่มเกิดการแกว่งของสัญญาณแล้วบันทึกค่า K_u นำค่า K_u ที่เกิดจากช่วงการแกว่งของ P มาหาค่าตัวแปร K_p จากนั้นเพิ่มอัตราขยายของเทอม I และ D ตามลำดับแล้วนำมาหาค่า K_i และ K_d ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การแทนค่าแบบ John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols

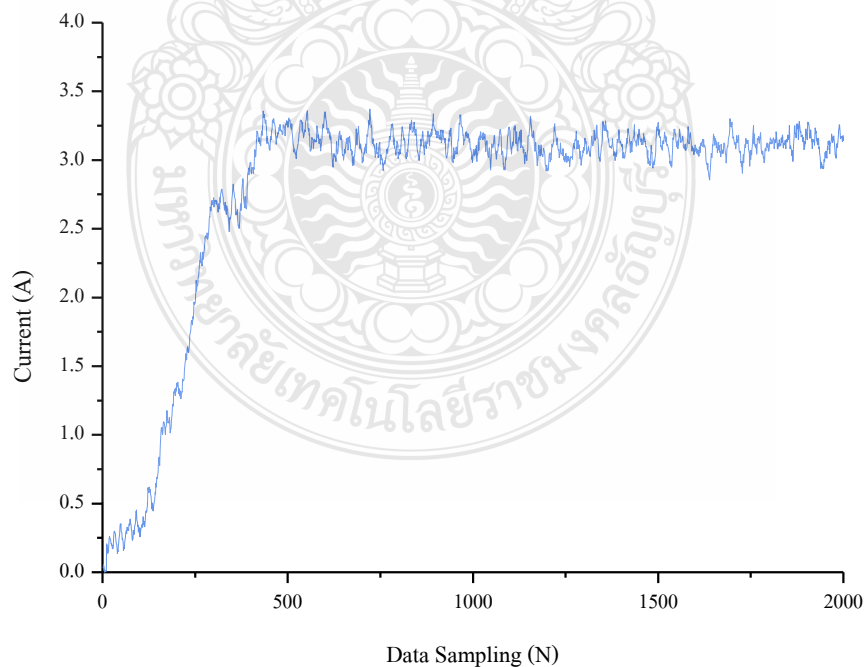
Control Type	K_p	K_i	K_d
P	0.50 K_u	-	-
PI	0.45 K_u	1.2 K_p/P_u	-
PID	0.60 K_u	2 K_p/P_u	$K_p P_u/8$

การปรับค่า เนื่องจากระบบสามารถปรับค่าการตอบสนองได้ทั้งหมด 1024 ชั้น (10 bits ADC Data acquisition) กำหนดสัญญาณสุ่มที่ 2 กิโลเฮิรตซ์ กระบวนการปรับจะกระทำแบบออนไลน์จูนนิ่ง (Online Tunning) การทดลองจะปรับ K_p จนกระทั่งระบบบออสซิลเลต (Oscillate) และทำการปรับคืน ขั้นตอนการปรับนี้จะต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากการออสซิลเลต อาจทำให้มอเตอร์ร้อนจัดจนเสียหายได้เนื่องจากปรากฏการ Latch up ทดลองปรับค่า K_u จนกระทั่งเกิดการออสซิลเลตโดยปรับค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ ผลการปรับทำการทดลองสั้น 10 ครั้งได้ค่าของ K_u ที่ 215 ที่ ADC ดังนั้น $K_u = 0.2099$ จาก $ADC(bits)/100\%(gain = 1)$, $1024/100 = 10.24$, $(215/10.24)/100\%$

= 0.2099, $K_p = 215 \times 0.6 = 129$ หรือ $K_p = 0.1259$, หลังจากนั้นทำการทดลอง โดยการปรับ K_i และ K_d เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ 4.17 กราฟกระแสที่ควบคุมที่ 3 แอมแปร์ โดยกำหนดค่า K_p K_i และ K_d จากกระบวนการ Ziegler–Nichols, $K_d = (K_p \times P_u) / 8$, $K_d = (129 \times 8) / 8$, $K_d = 129$



รูปที่ 4.18 กราฟกระแสที่ควบคุมที่ 3 แอมแปร์ โดยกำหนดค่า K_p K_i และ K_d ร่วมกับกระบวนการปรับค่าแบบ Ziegler–Nichols ร่วมกับกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ย 12 รอบ

จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงการปรับค่าควบคุมแบบพีไอดี จะเห็นได้ว่าการแกว่งของกระแส จากจุดที่ตั้งไว้ค่อนข้างมาก โดยการแกว่งของกระแสที่วัดได้อยู่ระหว่าง 2.5-4 แอมแปร์ ซึ่งผิดพลาด จากจุดที่ตั้งไว้ที่ 3 แอมแปร์มาก จึงนำการควบคุมแบบพีไอดีไปใช้ร่วมกับวิธีการเส้นค่าเฉลี่ย 12 รอบ ทำให้ได้ผลดังรูปที่ 4.18 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนขึ้นว่า ระบบควบคุมกระแสสามารถควบคุมกระแสให้เข้า ใกล้จุดที่ตั้งไว้ที่ 3 แอมแปร์ ได้ดีกว่าการใช้การควบคุมแบบพีไอดีแบบเดียว

จากการทดลองปรับค่าต่างๆและใช้ร่วมกับกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ยรอบการทำงาน 12 รอบ ระบบสามารถทำงานได้โดยมีการแกว่งของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เล็กน้อย และการเลือกเงื่อนไขการทำงาน ของกระบวนการนี้เลือกการควบคุมกระแสที่ 3 แอมแปร์มาใช้งาน โดยเลือกจากเหตุผลที่เป็น ค่ากลางระหว่าง 2 แอมแปร์กับ 4 แอมแปร์

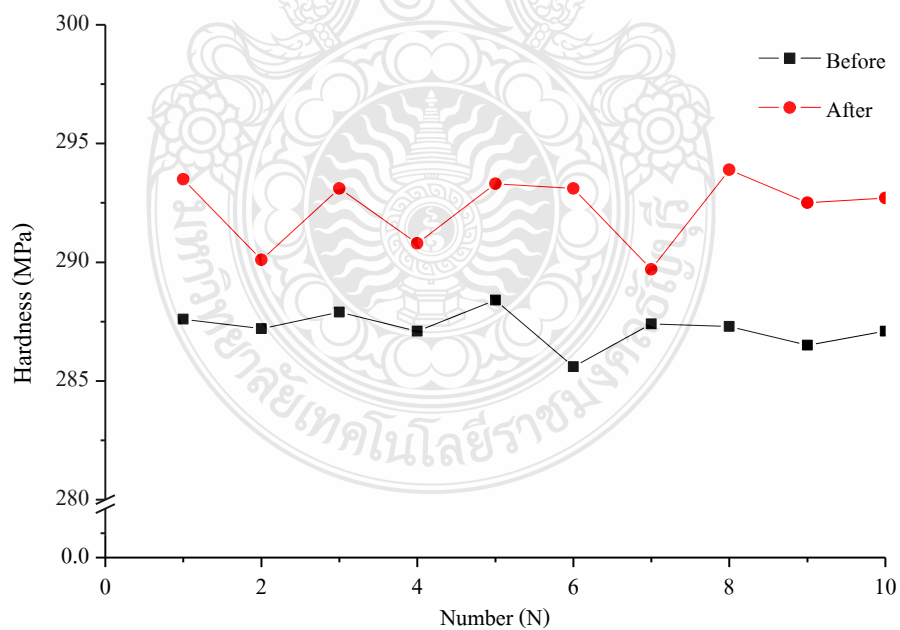
4.2 การประยุกต์ใช้ในงานหุบเคลือบแข็ง

ในการทดสอบนอกจากทดสอบระบบควบคุมการทำงานของระบบให้ความร้อนแบบ เหนียวมาแล้วนั้น การนำมาประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยนี้ใช้สกรูขนาดยาว 25 มิลลิเมตรที่มีความแข็งแรง ระหว่าง 280 ถึง 290 เมกกะปาสกาล (MPa) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตรโดยใช้การ ควบคุมกระแสที่ 4 3 และ 2 แอมแปร์โดยกำหนดค่า K_p K_i และ K_d ร่วมกับกระบวนการปรับค่าแบบ Ziegler–Nichols ร่วมกับกระบวนการเส้นค่าเฉลี่ย 12 ครั้งตามลำดับ โดยในการให้ความร้อนกับสกรู ใช้เวลาในการให้สกรูเป็นระยะเวลา 1 นาทีแล้วนำมาลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.6 จากการทดสอบความแข็งระหว่างก่อนหุบเคลือบ แข็งและหลังหุบเคลือบแข็งผลดังรูปที่ 4.19 ผลที่ได้คือ ก่อนทำการหุบเคลือบแข็งความแข็งของสกรูมี ความแข็งอยู่ระหว่าง 285.6 ถึง 288.4 เมกกะปาสกาล มีค่าเฉลี่ยความแข็งเท่ากับ 287.2 เมกกะปาสกาล หลังหุบเคลือบแข็งของสกรูมีความแข็งอยู่ระหว่าง 289.7 ถึง 293.9 เมกกะปาสกาล โดยมีค่าเฉลี่ยความ แข็งเท่ากับ 292.3 เมกกะปาสกาล และมีความแตกต่างของความแข็งของสกรูโดยใช้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.1 เมกกะปาสกาล คิดเป็นร้อยละความต่างเท่ากับ ร้อยละ 1.77 และ จากตารางที่ 4.7 การทดสอบ ความแข็งก่อนหุบเคลือบแข็งและหลังหุบเคลือบแข็งแสดงดังรูปที่ 4.20 ผลที่ได้คือ ก่อนทำการหุบ เคลือบแข็งความแข็งของสกรูมีความแข็งอยู่ระหว่าง 285.9 ถึง 287.6 เมกกะปาสกาล โดยมีค่าเฉลี่ย ความแข็งเท่ากับ 286.9 เมกกะปาสกาล หลังหุบเคลือบแข็งของสกรูมีความแข็งอยู่ระหว่าง 300.9 ถึง 332.8 เมกกะปาสกาล โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งเท่ากับ 324.4 เมกกะปาสกาล มีความแตกต่างของความ แข็งของสกรูเฉลี่ยเท่ากับ 37.5 เมกกะปาสกาล คิดเป็นความต่างร้อยละ 13.07

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 นาทีและลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่ 27 องศาเซลเซียสโดยใช้กระแส 2 แอมแปร์

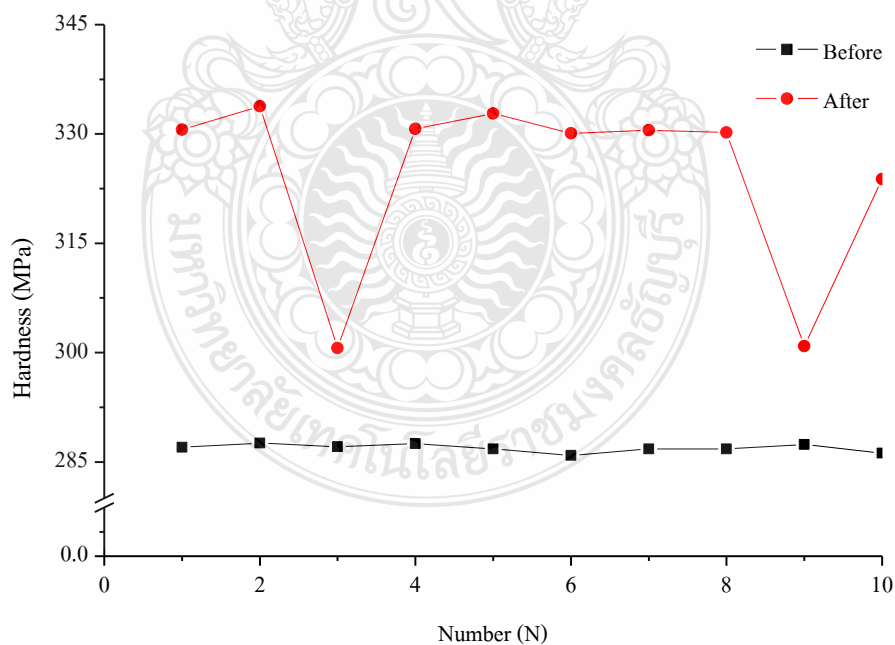
ลำดับสกรู	ก่อนชุบแข็ง (MPa)	หลังชุบแข็ง(MPa)
1	287.6	293.5
2	287.2	290.1
3	287.9	293.1
4	287.1	290.8
5	288.4	293.3
6	285.6	293.1
7	287.4	289.7
8	287.3	293.9
9	286.5	292.5
10	287.1	292.7
เฉลี่ย	287.2	292.3



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างก่อนชุบเคลือบกับหลังชุบเคลือบ โดยใช้กระแส 2 แอมแปร์

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 นาทีและลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่ 27 องศาเซลเซียสโดยใช้กระแส 3 แอมแปร์

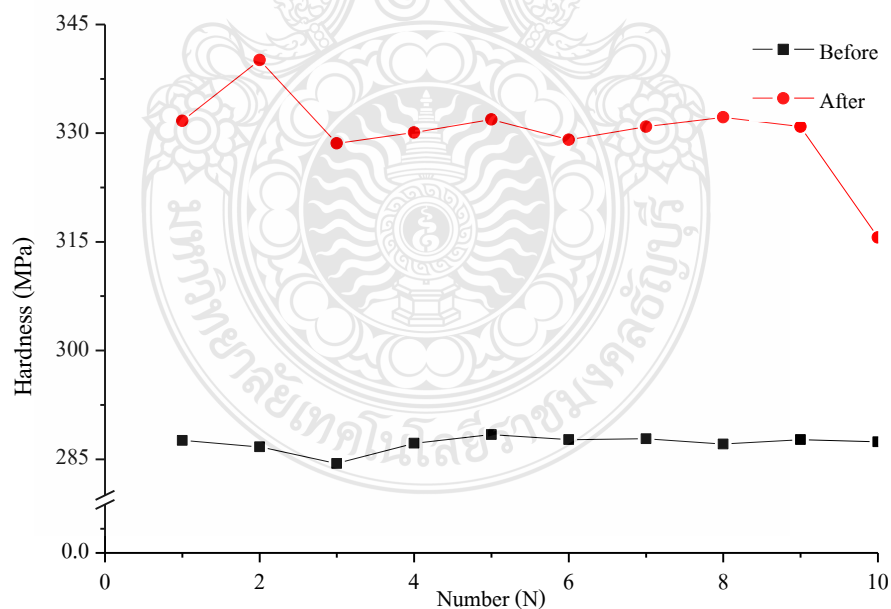
ลำดับสกรู	ก่อนชุบแข็ง (MPa)	หลังชุบแข็ง(MPa)
1	287.0	330.6
2	287.6	333.8
3	287.1	300.6
4	287.5	330.7
5	286.8	332.8
6	285.9	330.1
7	286.8	330.5
8	286.8	330.2
9	287.4	300.9
10	286.2	323.8
เฉลี่ย	286.9	324.4



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างก่อนชุบเคลือบกับหลังชุบเคลือบ โดยใช้กระแส 3 แอมแปร์

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 นาทีและลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่ 27 องศาเซลเซียสโดยใช้กระแส 4 แอมแปร์

ลำดับสกรู	ก่อนชุบแข็ง (MPa)	หลังชุบแข็ง(MPa)
1	287.6	331.7
2	286.7	340.1
3	284.4	328.6
4	287.2	330.1
5	288.4	331.9
6	287.7	329.1
7	287.8	330.9
8	287.1	332.2
9	287.7	330.9
10	287.4	315.6
เฉลี่ย	287.2	330.1



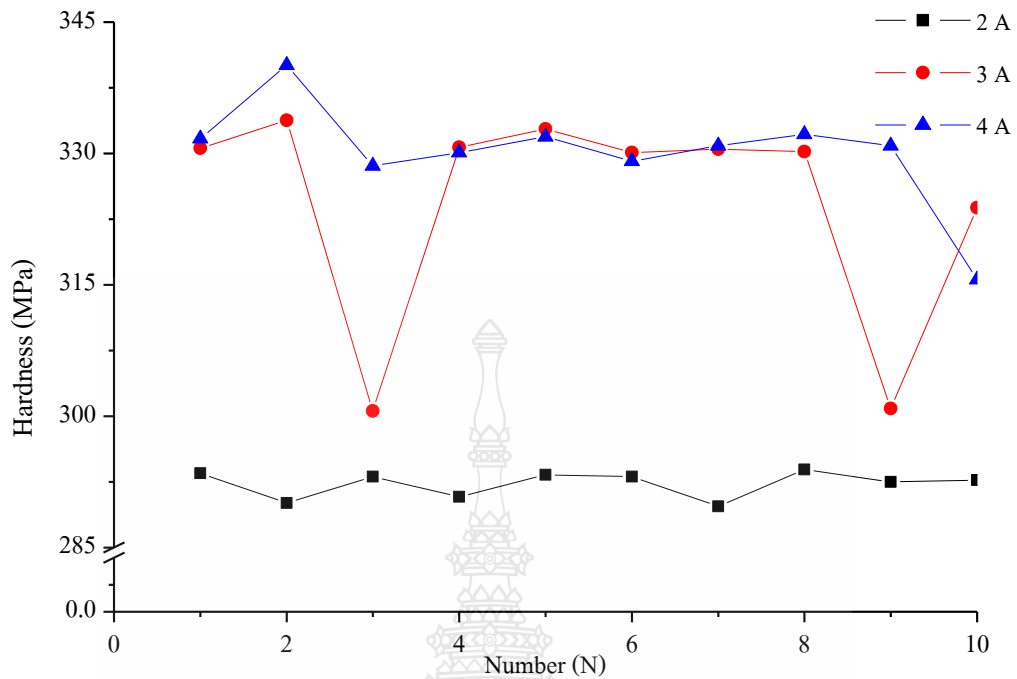
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างก่อนชุบเคลือบกับหลังชุบเคลือบ โดยใช้กระแส 4 แอมแปร์

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.8 จากการทดสอบความแข็งแรงระหว่างก่อนชุบเคลือบแข็งและหลังชุบเคลือบแข็งดังรูปที่ 4.21 ผลที่ได้คือ ก่อนทำการชุบเคลือบแข็งความแข็งแรงของสกรูมีความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 284.4 เมกกะปาสกาล ถึง 288.4 เมกกะปาสกาล โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเท่ากับ 287.2 เมกกะปาสกาล ผลการทดสอบความแข็งแรงหลังชุบเคลือบแข็งของสกรูมีความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 315.6 เมกกะปาสกาล ถึง 340.1 เมกกะปาสกาล โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเท่ากับ 330.1 เมกกะปาสกาล โดยมีความแตกต่างของความแข็งแรงของสกรูโดยใช้ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 42.9 เมกกะปาสกาล คิดเป็นร้อยละความต่างเท่ากับร้อยละ 14.94

จากตารางที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบผลของการทดสอบความแข็งแรงของการชุบเคลือบแข็งที่มีการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 2 3 และ 4 แอมแปร์ตามลำดับ ผลค่าความแข็งแรงที่ควบคุมกระแส 2 แอมแปร์ มีความแข็งแรงของสกรูอยู่ระหว่าง 289.7 เมกกะปาสกาล ถึง 293.9 เมกกะปาสกาล ส่วนค่าความแข็งแรงที่ควบคุมกระแส 3 แอมแปร์ โดยมีค่าความแข็งแรงของสกรูอยู่ระหว่าง 300.9 เมกกะปาสกาล ถึง 332.8 เมกกะปาสกาล และสุดท้ายค่าความแข็งแรงที่ควบคุมกระแส 4 แอมแปร์มีความแข็งแรงของสกรูอยู่ระหว่าง 315.6 เมกกะปาสกาล ถึง 340.1 เมกกะปาสกาล ดังรูปที่ 4.22 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการทดสอบความแข็งแรงหลังชุบแข็งที่ควบคุมกระแสที่ 2 3 และ 4 แอมแปร์ตามลำดับ

ลำดับสกรู	2 แอมแปร์	3 แอมแปร์	4 แอมแปร์
1	293.5	330.6	331.7
2	290.1	333.8	340.1
3	293.1	300.6	328.6
4	290.8	330.7	330.1
5	293.3	332.8	331.9
6	293.1	330.1	329.1
7	289.7	330.5	330.9
8	293.9	330.2	332.2
9	292.5	300.9	330.9
10	292.7	323.8	315.6
เฉลี่ย	292.3	342.4	330.1



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสกรูระหว่างกระแส 2 3 และ 4 แอมแปร์

จากผลการทดลองประยุกต์ใช้งานระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับการชุบเคลือบแข็ง ได้ว่า การทำงานของระบบโดยรวมทำงานได้ตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ แล้วสามารถควบคุมกระแสให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลองได้เป็นอย่างดี โดยผลการทดลองชุบเคลือบแข็งเห็นได้ว่าระบบสามารถให้ความร้อนพอที่จะทำให้โครงสร้างผิวชิ้นงานภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง แล้วเมื่อนำสู่กระบวนการชุบเคลือบแข็งพบว่าตัวอย่างชิ้นที่เป็นสกรู มีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยงานวิจัยนี้ระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีการใช้กำลังงานที่โหลดเรโซแนนซ์ ระหว่าง 100 วัตต์ไปจนถึง 200 วัตต์ ส่วนค่ากำลังงานที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานชุบเคลือบแข็ง อยู่ที่ 150 วัตต์ เพราะเป็นค่าการทำงานที่โหลดเรโซแนนซ์ไม่ร้อนเกินไป รวมถึงมีการใช้กำลังงานงานที่ต่ำแต่ได้ผลการทดสอบกับชิ้นงานที่ไม่ต่างกับการใช้กำลังงานที่ 200 วัตต์ มากนัก โดยดูได้จากความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น จากความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบแข็งไม่ต่างกัน คือร้อยละ 13.07 สำหรับการควบคุมกระแส 3 แอมแปร์ และร้อยละ 14.94 สำหรับการควบคุมกระแส 4 แอมแปร์ ซึ่งต่างกันเพียงร้อยละ 1.87

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยเพื่อทดสอบว่าระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยสามารถแก้ปัญหาตามสมมติฐานทั้งเรื่องน้ำหนักที่หนักเพียง 3.28 กิโลกรัม กำลังงานที่ไม่สูงมากนัก รวมทั้งระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าในช่วงต่างๆที่สามารถทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ดี โดยจากการวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการวิจัยระบบควบคุมควบคุมอุณหภูมิเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบเคลือบสามารถสรุปได้ว่า การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้วิธีการเส้นค่าเฉลี่ยร่วมกับการควบคุมแบบพีไอได้นั้นสามารถนำมาควบคุมการทำงานโดยวิธีการคุมกระแสที่ผ่านชุดโหลดตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ตามที่กำหนดที่ 2 3 และ 4 แอมแปร์ตามลำดับ ส่งผลให้ระบบสามารถควบคุมกำลังงานได้ระหว่าง 100-200 วัตต์ ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานชุบเคลือบแข็งวัสดุ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบพีไอดี กับระบบควบคุมที่ใช้การควบคุมแบบเส้นค่าเฉลี่ยร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดี ทั้งสองระบบมีความแม่นยำในการควบคุมกระแสต่างกันอย่างชัดเจน สำหรับการควบคุมแบบพีไอดีมีความแม่นยำของกระแสน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเส้นค่าเฉลี่ยร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดี เมื่อนำระบบแบบที่สองมาใช้ควบคุมการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สามารถควบคุมกระแสได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้กระแสที่ผ่านชุดเหนี่ยวนำคงที่ทำให้ความร้อนที่เกิดบนชิ้นงานทดสอบ มีการเพิ่มขึ้นของความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

2. จากการวิจัยประยุกต์ใช้ในงานชุบเคลือบแข็งวัสดุ โดยใช้วัสดุเป็นสกรูเหล็กเมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงพอให้เกิดความเปลี่ยนแปลงที่ผิวของชิ้นงาน

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนและหลังชุบเคลือบแข็ง

ก่อนชุบเคลือบ	หลังชุบเคลือบ 2 A	หลังชุบเคลือบ 3 A	หลังชุบเคลือบ 4 A
287.1 MPa	292.27 MPa	342.4 MPa	330.11 MPa

จากนั้นนำชิ้นงานไปลดอุณหภูมิลงด้วยน้ำแบบรวดเร็ว แล้วนำไปทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานเปรียบเทียบระหว่างก่อนการชุบและหลังชุบเคลือบแข็งพบว่าหลังการชุบเคลือบแข็งชิ้นงานทดสอบมีความแข็งแรงขึ้น ต่างจากก่อนชุบซึ่งแสดงว่าระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สามารถ

ให้ความร้อนที่มากพอให้วัสดุเกิดความร้อนเพียงพอที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความแข็งแรงมากขึ้นจากเดิม โดยแสดงผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 5.1 ซึ่งสามารถนำระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมาใช้ปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโลหะได้

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวคิดเพื่อการพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการทำงานของระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถทำงานได้ดีในระดับหนึ่ง แต่ปัญหาที่พบเป็นปัญหาใหญ่คือความร้อนที่โหลดเรโซแนนซ์ และการเกิดการออสซิลเลชันของวงจรตรวจวัดกระแสเป็นบางครั้ง ซึ่งความร้อนที่โหลดเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นทำให้ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดเปลี่ยนไป ทำให้จุดความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยน ทำให้เกิดกำลังงานย้อนกลับไปสร้างความเสียหายแก่มอสเฟต ในวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ได้ แนวทางในการแก้ปัญหาอาจจะต้องหาวิธีระบายความร้อนให้ขดลวดที่ดีกว่าเช่นการใช้น้ำ หรือสารหล่อเย็นรวมถึงการเปลี่ยนขดลวดที่สามารถนำความร้อนได้ดีกว่าในงานวิจัยนี้ เพราะส่วนของงานวิจัยนี้ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ

ปัญหาอีกประการคือการเกิดออสซิลเลชันในวงจรตรวจวัดกระแส เนื่องจากการควบคุมกระแสที่ผ่านโหลดเรโซแนนซ์นั้น ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมความกว้างของสัญญาณความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยมต้องปรับความกว้างแคบของรูปคลื่นสัญญาณตลอดเวลา เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้โอกาสเกิดการออสซิลเลชันจากวงจรที่ต่อร่วมค่อนข้างมาก รวมทั้งเมื่อวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ทำงานด้วยความถี่ที่สูง จะเกิดสัญญาณรบกวนระบบค่อนข้างมาก การแก้ปัญหาอาจทำได้โดยการแยกชุดกำลังงานสูง และกรองด้วยวงจรฟิลเตอร์ตามจุดต่อแต่ละวงจร รวมถึงการจัดวางแผ่นวงจรลงเครื่องด้วย ดังนั้นรายละเอียดที่กล่าวมาดังกล่าวควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขสำหรับงานวิจัยในอนาคตต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ, “การออกแบบและสร้างต้นแบบชุดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อทอบขึ้นรูปโลหะด้วยอินเวอร์เตอร์เซชบริดจ์ร่วมกับดีซีฟูลดิซีคอนเวอร์เตอร์ชนิดทอนแรงดัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2552.
- [2] สิทธิศักดิ์ กิตติพงษ์วุฒิ, “การวิเคราะห์และออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเรโซแนนซ์แบบกึ่งบริดจ์สำหรับเครื่องหลอมโลหะ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร, 2550.
- [3] Khan, I., Tapson, J. and de Vries, I., “An Induction Furnace Employ A 100 kHz Mosfet Full-Bridge Current-Source Load-Resonant Inverter,” *Proceedings of IEEE Conference. International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, July 1998, pp. 530-534.
- [4] กฤษณ์ชนม์, *คุณภาพระบบไฟฟ้ากำลัง*. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ไฮเทคอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด, 2553.
- [5] สุวัฒน์ คั่น, *เทคนิคการออกแบบวงจรสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพ, 2537.
- [6] มงคล, ประชา, วรการ, สุริยา, “การออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์,” ใน *การประชุมวิชาการ ม.อ.บ. ครั้งที่ 3*, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2552.
- [7] ศักดา พรหมเหมือน, สมพงษ์ ศรีลัด, “เครื่องหลอมอลูมิเนียมเหนี่ยวนำความถี่สูง,” *วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าปีที่ 2*, ฉบับที่ 1, นน. 1-9, 2553.
- [8] คงศักดิ์ รัตน์นิมชัย, สำราญ สันทาลุณย์, “ออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ,” *โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม, วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา* 2545.
- [9] ไพบุลย์ บุษพา, “เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงอย่างง่าย สำหรับเหล็กผสมคาร์บอนทรงกระบอก,” *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18*, จังหวัดขอนแก่น, 2547.
- [10] พูนศรี วรรณการ, “การออกแบบเครื่องเชื่อมความถี่สูงโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์,” ใน *การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551, นน. 332-339.

- [11] มนัส สังวรศิลป์, สมเกียรติ สุขเดช, *ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์*, กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ อีเล็กทรอนิกส์เวิลด์, 2544.
- [12] H. Fujita & H. Akagi, “Pulse – Density – Modulated Power Control of a 4kw, 450kHz, Voltage – Source Inverter for Induction melting Application,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no 2, March/April, 1996, pp 279 – 286.
- [13] Mokhter , K. Shigehiro, Y. and Minoru, A., “A 50 – 150KHz Half – Bridge Inverter for Induction Heating Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no.1, January 1996, pp. 163-172.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่





การประชุมสัมมนาวิชาการ

พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 5

The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)

18-20 December 2555



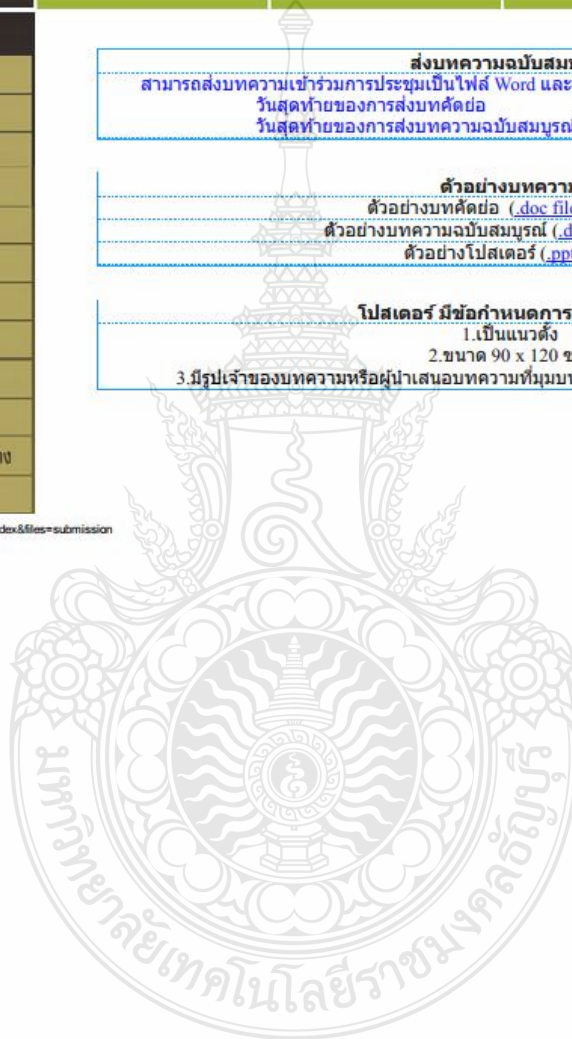
หน้าแรก	การส่งบทความ	กำหนดการสำคัญ	สถานที่จัดงาน	ติดต่อเรา
---------	--------------	---------------	---------------	-----------

เมนู
Call For Papers
ความเป็นมา
สารจากประธาน
คณะกรรมการ
กำหนดการสำคัญ
โปรแกรมการประชุม
การส่งบทความ
การลงทะเบียน
Social Program
สถานที่จัดงาน
สถานที่พักและการเดินทาง
ผู้สนับสนุน

ส่งบทความฉบับสมบูรณ์
สามารถส่งบทความเข้าร่วมการประชุมเป็นไฟล์ Word และ PDF ได้ที่ trec5.chiangmai@gmail.com
วันสุดท้ายของการส่งบทความคือ 31 กรกฎาคม 2555
วันสุดท้ายของการส่งบทความฉบับสมบูรณ์ 15 สิงหาคม 2555

ตัวอย่างบทความ
ตัวอย่างบทความ (doc file, pdf file)
ตัวอย่างบทความฉบับสมบูรณ์ (doc file, pdf file)
ตัวอย่างโปสเตอร์ (ppt file)

โปสเตอร์ มีข้อกำหนดการจัดทำ ดังนี้
1. เป็นแนวตั้ง
2. ขนาด 90 x 120 ซม.
3. มีรูปเจ้าของบทความหรือผู้นำเสนอบทความที่มอบบน ด้านขวาของโปสเตอร์ จำนวน 2 รูป



การศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมเตาหลอมวัสดุแบบเหนียวนำโดยใช้พลังงานต่ำ Study and development Inductance melting control system using low energy

ภควัตร์ คำสุข จักรี ศรีนันทน์

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3588 โทรสาร 0-2549-3422
E-mail: pakawatkan@gmail.com, jakkree.s@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมเตาหลอมวัสดุแบบเหนียวนำโดยใช้พลังงานต่ำ ในการออกแบบระบบใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่นต่อกับโหลดเรโซแนนซ์ RLC ชนิดอนุกรมแบบต่อตรง ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์จะผลิตความถี่ 47 กิโลเฮิร์ต ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ให้เหลือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นอะลูมิเนียมแท่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 10 13 มม. แต่ละแท่งยาว 10 มม. ในการทดสอบได้จ่ายความร้อนแบบเหนียวนำให้กับวัสดุทดสอบโดยใช้เวลา 6-9 นาที พบว่าวัสดุที่ใช้ทดสอบขนาดเล็กใช้เวลาในการหลอมละลายเร็วกว่าโดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วงมีค่าเท่ากับ 7.55 - 9.20 แอมป์ และมีผลการใช้กำลังไฟฟ้าของวงจรที่ใช้ในการหลอมวัสดุมีค่าต่ำสุดที่ 377.5 วัตต์ และสูงสุดที่ 426.5 วัตต์ เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้กำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.5 - 3.0 กิโลวัตต์ ในงานวิจัยเหล่านั้นมีการต่อโหลดเรโซแนนซ์ทางเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ทำให้เกิดค่าความสูญเสียกำลังงานในหม้อแปลง ซึ่งแตกต่างจากการต่อโหลดเรโซแนนซ์แบบต่อตรงที่ไม่มีการสูญเสียกำลังงานในหม้อแปลงทำให้มีการใช้กำลังงานที่ต่ำกว่าในการหลอมวัสดุที่มีขนาดไม่ต่างกัน

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่น เรโซแนนซ์แบบต่อตรง เครื่องเหนียวนำความร้อน หลอมอะลูมิเนียม

1. บทนำ

การหลอมหรือชุบแข็งวัสดุในงานอุตสาหกรรม มีการหลอมหรือชุบวัสดุด้วยการให้ความร้อนแบบเหนียวนำมากขึ้น[1] จากเดิมที่มีการใช้เตาหลอมแบบใช้เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่นใช้เชื้อเพลิงถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติมาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนกับเตาหลอมเป็นต้น[2] การให้ความร้อนแบบเหนียวนำนั้นเป็นการสร้างความร้อนจากภายในตัวชิ้นงานออกมา โดยมีการควบคุมความลึกจากผิวชิ้นงาน ด้วยวิธีการให้แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างกัน ทำให้มีความสะอาดทั้งเรื่องฝุ่น คิวน์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้เชื้อเพลิงแบบถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติ[2] การให้ความร้อนแบบเหนียวนำสิ่งที่เกี่ยวข้องเป็นหลักคือ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง โดยวงจรอินเวอร์เตอร์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือวงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage source inverter) และแบบจ่ายกระแส (Current source inverter)[1],[2] อีกส่วนที่มีความสำคัญก็คือขดลวดเหนียวนำสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแสมีข้อดีที่สามารถใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำสามารถควบคุมการทำงานง่าย วงจรเรโซแนนซ์ที่ต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์มีการต่อแบบใช้หม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งทำให้เกิดค่าความสูญเสียกำลังงานในหม้อแปลงระหว่างชนปรุสมมุติกับขดลวดขดขด[3]

งานวิจัยนี้ขอนำเสนอการควบคุมเตาหลอมวัสดุแบบเหนียวนำแบบต่อตรงระหว่างโหลดเรโซแนนซ์กับอนุกรมกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งส่งผลให้วงจรมีการใช้พลังงานต่ำกว่าการต่อโหลดเรโซแนนซ์แบบใช้หม้อแปลง ทำให้สามารถใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกำลังไม่เกิน 0.5 กิโลวัตต์ โดยที่เตาหลอมยังสามารถหลอมวัสดุได้

2. ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านไปตามบนชิ้นงาน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนบนตัวชิ้นและเกิดความร้อนจากตัวชิ้นงาน ความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลวนและความต้านทานของชิ้นงาน ความร้อนจะลงไปที่ผิวเท่านั้นเป็นไปตามสมการที่ (1)

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

δ = ความลึกผิว (Skin Depth)

μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ

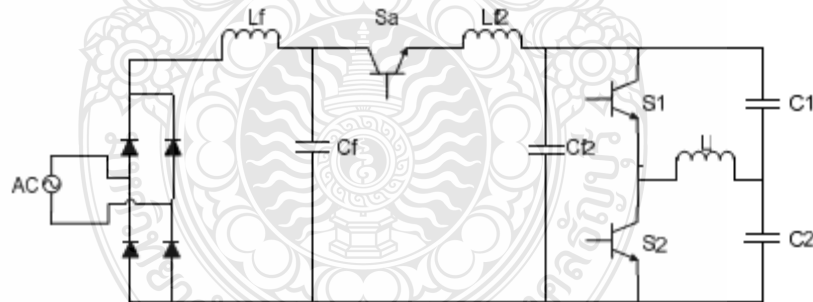
ρ = ค่าสภาพความต้านทานจำเพาะของวัสดุ

f = ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ใน กระแสไฟฟ้าสลับจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกลับไปกลับมาตามขั้วของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนผ่านชิ้นงานโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กที่อยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในชิ้นงานไหลวนไปมาในระบบปิดทำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานในระดับความลึกผิว (Skin Depth) เป็นมิลลิเมตรซึ่งความร้อนจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ กระแสเหนี่ยวนำ ความต้านทานสมมูลย์ของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนไปยังบริเวณอื่นๆของชิ้นงาน

3. ส่วนประกอบของระบบ

ส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองความถี่ วงจรดีซีทูล์ค้อนเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสแบบฮาล์ฟบริดจ์ และชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

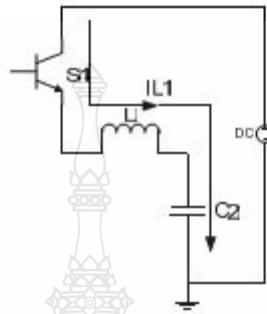


รูปที่ 1 วงจรเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

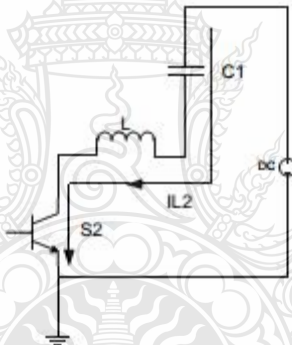
จากรูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 35 โวลต์ 50 เฮิร์ตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50 โวลต์ มีกระแสสูงสุดประมาณ 10 แอมป์เพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 47 กิโลเฮิร์ต โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวผลิตความถี่และไอซี FOD3180 ขับขาเกตของมอดเฟลของวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงไปคล่องผ่านอลูมิเนียม ทำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานเนื่องจากกระแสไหลวนบน

ชิ้นงานทำให้เกิดการหลอมละลายของอลูมิเนียมในที่สุด การทำงานของวงจรสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆคือ ส่วนวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และส่วนของวงจรโหลดเร็วโซลิตซ์แบบอนุกรม

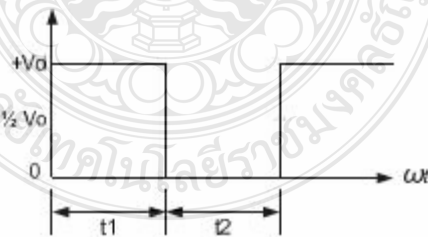
การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงการทำงาน คือช่วงที่ 1 คือ S1 ปิดวงจร S2 เปิดวงจรและช่วงที่ 2 คือ S1 เปิดวงจร S2 ปิดวงจร โดยแสดงรูปที่2 และรูปที่3 ตามลำดับ ส่วนแรงดันขาออกแสดงตามรูปที่4



รูปที่2 การทำงานช่วงที่1

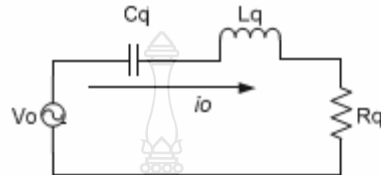


รูปที่3 การทำงานช่วงที่2



รูปที่4 แรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

ในการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น จะทำงานด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย ทำให้ในการทำงานจะเกิดค่าความต้านทานที่วงจรไหลตรงเรโซแนนซ์เล็กน้อย เนื่องจากขณะที่ขึ้นงานเกิดความร้อนความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงไป จึงจัดการทำงานของวงจรให้ทำงานสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย เพื่อป้องกันความเสียหายจากการลัดวงจรของมอเตอร์เฟสขดนำกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยสามารถคำนวณกระแส i_o จากวงจรสมมูลได้จากรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของไหลตรงเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากรูปที่ 5 การทำงานของวงจรคือ เมื่อความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์ (f_s) มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) กระแสที่ไหลผ่านวงจรไหลตรงเรโซแนนซ์ (i_o) มีค่าสูงสุดซึ่งสามารถหาค่ากระแส (i_o) ได้ตามสมการที่ 5

$$Z_o = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} \quad (2)$$

$$Z_o = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f_s Lq + \frac{1}{2\pi f_s Cq}\right)^2} \quad (3)$$

$$i_o = \frac{V}{R} = \frac{V_o}{Z_o} \quad (4)$$

$$i_o = \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi f_s Lq + \frac{1}{2\pi f_s Cq}\right)^2}} \quad (5)$$

i_o คือกระแสที่ไหลในวงจรสมมูลของไหลตรงเรโซแนนซ์

4.ผลการทดลอง

จากการทดลองโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานและวัดกำลังไฟฟ้าทางอินพุทของวงจรไหลตรงเรโซแนนซ์ โดยการทดลองจะวัดอุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียสบนผิวของชิ้นงานอุณหภูมิเริ่มที่ทรงกลมตัวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 10 13 มิลลิเมตรแต่ละแท่งยาว 10 มิลลิเมตร โดยในการวัดเริ่มนับเวลาตั้งแต่เริ่มจ่ายกระแสให้วงจรไหลตรงเรโซแนนซ์ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เป็นผลการทดลองระหว่างกระแสกับเวลาที่ได้ความร้อนกับชิ้นงาน

ตารางที่ 1 ความร้อนบนผิวชิ้นงานเมื่อเวลาต่างกัน

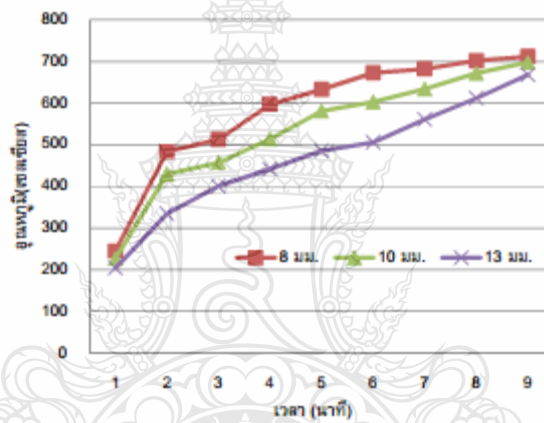
ขนาดเวลา(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8 มม.	245	484	513	597	633	673	682	702	712
10 มม.	227	430	457	514	581	603	634	672	698
13 มม.	204	335	401	442	486	506	561	612	668

จากตารางที่ 1 ความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับเวลา โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นนานเท่าไร อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานก็จะสูงขึ้นตามเวลาที่มากขึ้นไปด้วย

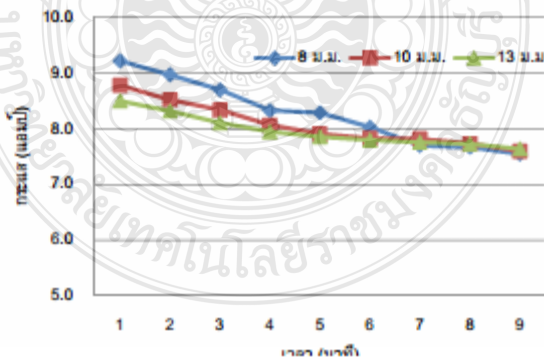
ตารางที่ 2 กระแสไฟฟ้าทางอินพุตของวงจรเรโซแนนซ์เมื่อเวลาต่างกัน

ขนาดเวลา(min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8 มม.	9.22	8.97	8.70	8.33	8.29	8.03	7.70	7.67	7.55
10 มม.	8.78	8.52	8.34	8.07	7.91	7.83	7.82	7.74	7.6
13 มม.	8.5	8.32	8.11	7.95	7.86	7.8	7.76	7.73	7.64

จากตารางที่ 2 ความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไปมีความสัมพันธ์กับกระแส โดยชุดวงจรโพลดิเรโซแนนซ์แบบอนุกรมนั้นจะมีกระแสไหลผ่านมากที่สุดเมื่อโหลดที่วางไว้มีความถี่เรโซแนนซ์ จากตารางที่ 2 เมื่อเริ่มเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่อง กระแสที่ไหลในวงจรโพลดิเรโซแนนซ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบนผิวชิ้นงานและเวลา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา

5.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองรูปที่ 6 เมื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยชิ้นงานที่มีขนาดเล็กอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยอุณหภูมิเริ่มต้นจากนาฬิกาที่ 1-7 มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ชิ้นงานเริ่มหลอมเหลว อุณหภูมิของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะคงที่ตั้งแต่ นาฬิกาที่ 7 เป็นต้นไปเนื่องจากอัตราการสูญเสียความร้อนของชิ้นงานกับการแผ่รังสีความร้อนเริ่มใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 7 เมื่อให้ความร้อนกับชิ้นเป็นเวลาต่อเนื่อง อุณหภูมิของชิ้นงานเริ่มเพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านชุดวงจรไหลตรงโซแนนซ์มีค่ามากในตอนเริ่มต้นของจากนั้นเวลา เมื่อใช้เวลาในการให้ความร้อนกับชิ้นงานมากขึ้น กระแสที่ไหลผ่านชุดวงจรไหลตรงโซแนนซ์มีค่าลดลงอย่างชัดเจนจากนาฬิกาที่ 1-4 แต่เมื่อชิ้นงานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิน้อยลง กระแสก็เริ่มมีแนวโน้มคงที่โดยมีการลดลงของกระแสน้อยกว่าช่วงแรกคือตั้งแต่ นาฬิกาที่ 5 เป็นต้นไป เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานเริ่มคงที่ความสามารถในการซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงานจะมีค่าเข้าใกล้กับความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ส่งผลให้ความต้านทานของชิ้นงานเปลี่ยนไปและจุดเรโซแนนซ์ของไหลตรงโซแนนซ์ของไหลตรงโซแนนซ์นำกระแสได้น้อยลง

เมื่อนำค่ากระแสต่ำสุดและสูงสุดนำมาหาค่ากำลังงานที่ใช้ในการหลอมจะได้ค่ากำลังต่ำสุดเท่ากับ 377.50 วัตต์ และกำลังงานสูงสุดที่ใช้ในการหลอมมีค่าเท่ากับ 461 วัตต์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการใช้กำลังงานต่ำในเบื้องต้น เครื่องต้นแบบยังมีความเสถียรของระบบไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งยังต้องพัฒนาระบบควบคุมความถี่ให้คงที่มากกว่าเดิมต่อไป

6.กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบคุณ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และนายวิศณุ สมัครมิ่ง วิศวกรบริษัทบริษัทชานาไมโครอิเล็กทรอนิกส์จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิเชียร ทพยรัตน์ศิริ วันชัย ทพยย์สิงห์ และคณะ "เครื่องความร้อนสำหรับงานชุบชิ้นโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสชนิด H-Bridge ร่วมกับวงจรดีซีบูตัสอินเวอร์เตอร์แบบทอนแรงดัน" การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 หน้า 481-484 พ.ศ.2551
- [2] วิเชียร ทพยรัตน์ศิริ "การออกแบบและสร้างต้นแบบชุดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบชิ้นรูปโลหะด้วยอินเวอร์เตอร์เอชบีวีดีจ ร่วมกับดีซีบูตัสอินเวอร์เตอร์ชนิดทอนแรงดัน" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2552
- [3] ไพบูลย์ บุษมา "เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงอย่างง่าย สำหรับเหล็กผสมคาร์บอนทรงกระบอก" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 พ.ศ.2547

10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

EMSES2012 December 5-8, 2012

Sunee Grand Hotel and Convention Center, Ubon Ratchathani, Thailand



Call for Papers

Organizer:



Co-organizer:



Publication in Energy Procedia:

In addition to the conference presentation, the conference committee offer presenters the possibility to publish papers with referee in Energy Procedia (Elsevier). <http://www.elsevier.com/locate/energyprocedia>



- General Chair:**
 Assoc. Prof. Dr. Namyoot Songthanapitak Thailand
 Prof. Dr. Kiyoshi Yoshikawa Japan
- Organizing Chair:**
 Asst. Prof. Dr. Sommai Pivsa-Art Thailand
 Prof. Dr. Hideaki Ohgaki Japan
- International Program Committee Chair:**
 Prof. Dr. Susumu Yoshikawa Japan
 Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho Thailand
 Prof. Dr. Shiro Saka Japan
 Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo Stadler Germany
 Prof. Dr. Young S. Chai Korea
- Steering Committee:**
 Prof. Dr. Masayoshi Okubo Japan
 Prof. Dr. Somchai Wongwiset Thailand
 Prof. Dr. Nadarajah Mithulanathan Australia
 Prof. Dr. Yukio Ogata Japan
 Dr. Sei-ichi Aiba Japan
 Prof. Dr. Yuichi Anada Japan
 Prof. Dr. Nipon Tangtham Thailand
 Prof. Dr. Takeshi Yao Japan
 Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas Reddy India
 Assoc. Prof. Dr. David Jan Cowan USA
 Assoc. Prof. Dr. Per B Zetterlund Australia
- Technical Program Committee:**
 Dr. Krischonme Bhumkittipich Thailand
- General Secretary:**
 Dr. Krischonme Bhumkittipich Thailand
 Dr. Sumonman Niamlang Thailand
- Publication Committee:**
 Prof. Dr. Preecha P. Yupapin Thailand
 Dr. Boonyang Plangklang Thailand
 Dr. Nathabhat Phankong Thailand

Contact Us: emses@en.rmutt.ac.th

Important Dates:

- Full Paper Submission Deadline: **October 1, 2012**
- Notification of Acceptance: **October 22, 2012**
- Revised Full Paper Submission Deadline: **November 12, 2012**
- Early Registration and Payment: **November 12, 2012**

Conference Topics:

Prospective authors are invited to submit their papers reporting original work as well as tutorial overviews in all areas of energy, material technology and engineering. The topics for regular sessions include, but are not limited to the following fields:

- 1. Energy Technology**
 Global and Regional Energy Demand and Supply, Energy Resource Development Policy, Renewable Energy and Emerging Technologies: Solar, Wind, Fuel Cell, Tidal Wave, and etc., Biomass Gasification and Combustion, Biofuels – Prospects for Cleaner Technology, Cogeneration and Hybrid Energy Systems, Power System Design and Operation, Power System Dynamics and Stability, Numerical Method and AI in Power Engineering, Control System in Energy Technology, Power Electronics and Machine in Energy Technology, Electronic and Communication on Energy Technology, Telecommunication on Energy technology, Energy Efficiency and Management, High Voltage Applications in Energy Technology, Pyrolysis Technology, Biodegradable Plastics, Energy Storage Technology, Transportation and Logistic Engineering, and Others
- 2. Environmental and Social Impact**
 Sustainable Environmental Sanitation Systems, Integrated Approaches on Health and Environmental Sanitation, Trans-boundary Pollution Controls and Practices, Environmental Contamination and Remediation Techniques, Global Climate Change and Its Mitigation Measures, Appropriate Technologies on Waste Reuse, Recycling and Recovery, Water Resource and Environmental Engineering, and Others
- 3. Nanotechnology and Material Technology**
 Nanomaterials, Nano processing, Nanostructured Devices, Nanotechnology Applications, Polymer Technology, Metallurgical Engineering, Chemical Process, Polymer Process, Plastic Engineering, and Others
- 4. Energy Economic and Management**
 Pricing of Electricity, Demand Side Management, Integrated Resource Planning, Clean Development Mechanism, Emission Trading, and Others
- 5. Nuclear Technology**
 Reactor Technology, Turbine Technology, Electricity Generation, Background and Introduction of Nuclear Technology, and Others

Please see the details of the symposium on the website: <http://www.emses.org>

10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering
(EMSES2012)

Study and development Inductance melting control
system using low energy

P. Chamsuk^a, J. Srinonchat^{b*}

^{a,b}Signal Processing Research Laboratory, Department of Electronics and Telecommunication, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klang 6, Thanyaburi, Pathumthani, Thailand, 12110

Abstract

This paper proposes a method study and development induction heating system using low energy the method was designed system by half-bridge inverter circuit to the direct load of LC series resonant. The half-bridge inverter had been generating frequency on 47 kHz and adjustable a pulse width modulation (PWM) which program by microcontroller power supply full-bridge 50 volt and overload current sensor by means of hall current sensor. The exemplar had an aluminum round bar diameter size 8 10 13 mm. and 10 mm. as long size. The method had provided heat aluminum while 6-9 minute the small size of exemplar had melted fast more than extra size with use of current among 7.55-9.2 ampere is used minimum electric power of 377.5 watt and 461 watt as maximum. Comparison with other research used of power since 0.5-3 kilowatt have to from an isolated high frequency transformer had been losing power transfer more than direct resonant load wherewith the material have coincided of size.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V.
Selection and peer-review under responsibility of COE of Sustainable Energy System, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

Keyword: half-bridge inverter; aluminum melted; induction heating system

1. Introduction

Induction heating is a well-known technique to produce a very high temperature for applications [3] this technique requires voltage of high frequency that is ability to stimulate a inducing high frequency eddy current in piece of work is a result of heating effect. Induction heating equipment using high-frequency inverter topologies has the practical advantages of safety, cost effectiveness, energy saving, clean environment, very high thermal conversion efficiency, rapid and direct local focusing heating process, high power density, high reliability, environmental non-acoustic and low electromagnetic noise

* Corresponding author. Tel.: +662 549 3588; fax: +662 549 4622.
E-mail address: jakkree.s@en.rmutt.ac.th.

[1,3-8] A large number of topologies have been developed in this area. Among them, current-fed and voltage-fed inverters are most commonly used [3] a half-bridge inverter is among the topologies used in induction heating applications. Switching schemes like pulse density modulation (PDM) [2], asymmetrical duty cycle control (ADC) [3] and frequency modulation (PFM) [4] have been reported. A resonance circuit have been connected to a half bridge inverter is used with a high frequency transformer which caused loss of power transformers in primary coil to secondary coil.

This work proposes an automatic adjustable by means of pulse-width modulation (PWM) for a half bridge inverter which is connected to directed LC serial resonant. As a result a system is lower than energy using high frequency transformer. That DC power supply can be using to power not exceeding 0.5 kw and system have melted of efficiently for a material.

Induction heating occurs from electrical and heating phenomenon based on electromagnetic Induction, Skin Effect, and Heat Transfer. When supplying the AC signal to magnetic coil which specimen is installed inside. The AC signal will induce magnetic field crossing the induction coil, so that , if the specimen is magnetize the magnetic field crossing the specimen will induce current flow. Mostly, specimen in skin deep level while the flowing paths are closed loops conducting heat on the specimen's skin. Such heat which depends on the induction current and equivalent resistance of the flowing paths will be transferred to neighborhood through radiation, convection, and conduction at the Skin.

Fig.1 demonstrates simple induction heating method. If the specimen is installed inside or near the induction coil, the specimen will be induced and the heat will occur. Considering the system as a transformer Unit, the induction coil performs as primary coil whose turn equal to the turn of induction coil and the specimen perform as one-turn secondary coil connecting to a load like short circuit due to the equivalent resistance of the specimen is relatively low.

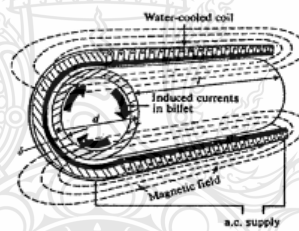


Fig.1. Simple introduction heating.

Fig. 2 demonstrates equivalent circuit of the induction coil and the specimen. Giving I_1 as the current flowing in the induction coil and I_2 as the current flowing in the specimen, these two currents are related as follows

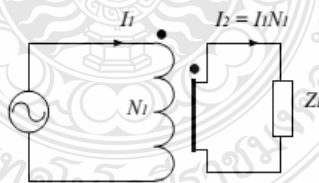


Fig.2. Equivalent induction heating circuit

$$I_2 = I_1 N_1 \tag{1}$$

Where R_1 is the equivalent resistance of specimen Heating losses, P_w in the specimen equals to

$$P_w = I_1^2 N_1^2 R_w \tag{2}$$

Form equation (1) to (2) property of the induction coil can be calculated as shown Induction coil efficiency

$$\eta = \frac{R_w}{R_1 + R_w} \tag{3}$$

When the magnetic field induced eddy currents on the material, and heat from material. Heat depends on the amount of current flow and the resistance of the material. Deep heat equation is shown as (4).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \tag{4}$$

- δ = Skin depth
- μ = Relative permeability
- f = Frequency
- ρ = Resistivity

When the AC signal entered to the induction coil. Skin depth is the depth in millimeters which is more or less heat depending on Induced currents and resistance of the path through which current flows. The heat is transferred by thermal radiation to other area the rest of the material. Power supply converts an AC voltage of 35 volts 50 Hz to dc voltage 50V and maximum currents of 15 amps for input to a half-bridge inverter circuit. Frequency is 47 kHz generated by the microcontroller AVR mega16 of OSC control diagram and FOD3120 driver pin gate a MOSFET of half bridge inverter circuit in order to the magnetic induction. An inverter driver converts dc voltage into ac voltage square wave frequency 47 kHz to the load resonance. Load resonant coil consists of 33 μ H inductor connected in series with the capacitor 0.36 μ F generate the magnetic field canal through the material cause radiate heat from eddy currents on material. Current sensor used to measure the currents through load resonant circuit to forward to control currents by OSC control.

Detecting the Hall current sensor current design and will be running two. It is part of hall current sensor and op amp by hall current sensor.

It is the current and voltage signals into circuit with op amp is used to amplify signal and send to OSC control limit current less than 10 amps as shown in Figure 3.

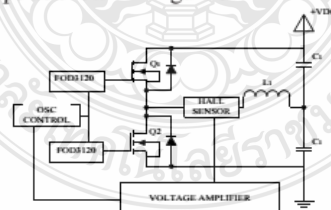


Fig. 3. Diagram of Hall current sensor

In the current not to exceed limit. Method of adjusting duty cycle of *Pulse-width modulation (PWM)* has decreased automatically using has been programming by microcontroller AVR mega16 is main controller which belong OSC control.

The induction heating system for that would work with higher of resonance frequency slightly the performance will take impedance at load resonance circuit few because the specimen thermal resonance frequency change therefore management functions of the circuit to operate higher more a frequency resonance to prevent damage from short circuit current of MOSFET as resonance frequency. It can be calculated from the equivalent circuit of Fig. 4.

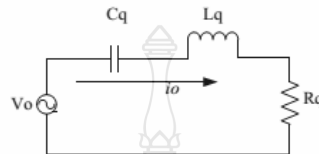


Fig. 4. Equivalent circuit of serial load resonance

Fig. 4 based on the inverter switching frequency is equal to the resonance frequency. A current through circuit load resonance with the maximum current which can be determined by equation 5.

$$Z_o = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} \tag{5}$$

$$Z_o = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f_s Lq + \frac{1}{2\pi f_s Cq}\right)^2} \tag{6}$$

$$i_o = \frac{V}{R} = \frac{V_o}{Z_o} \tag{7}$$

$$i_o = \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi f_s Lq + \frac{1}{2\pi f_s Cq}\right)^2}} \tag{8}$$

i_o is current through circuit load resonance.

The circuit can be divided into two periods, the work is the first that S1 closed circuit S2 open circuit and the second is S1 open circuit S2 closed circuit as shown in Figure 5 and Figure 6 respectively voltage are shown in Figure 7.

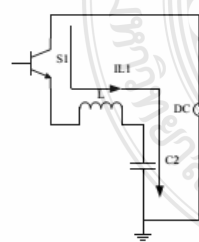


Fig. 5. Periods 1

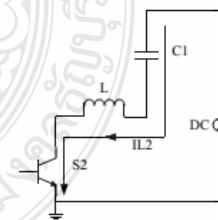


Fig. 6. Periods 2

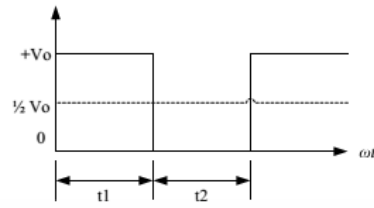


Fig. 7. Output voltage of the inverter circuit

2. Experimental results

Experiments by heating the sample and measuring the power at input of circuit to load resonance. Experiment will measure the temperature in degrees Celsius on surface of work piece aluminum rods sphere diameter of 8, 10, 13 mm, each bar is 10 mm and measure are counted time from begin of current to the load resonant circuit as table 1 and table 2 is a results between current and time to heat the work piece.

Table1. Heat on the surface at different times

size/time	8mm	10mm	13mm
1 min	245	227	204
2 min	484	430	335
3 min	513	457	401
4 min	597	514	442
5 min	633	581	486
6 min	673	603	506
7 min	682	634	561
8 min	702	672	612
9 min	712	698	668

Table2. Input current of load resonance at different times

size/time	8mm	10mm	13mm
1 min	9.22	8.78	8.5
2 min	8.97	8.52	8.32
3 min	8.70	8.34	8.11
4 min	8.33	8.07	7.95
5 min	8.29	7.91	7.86
6 min	8.03	7.83	7.8
7 min	7.70	7.82	7.76
8 min	7.67	7.74	7.73
9 min	7.55	7.6	7.64

From Table 1, heat generated on the work piece relative to time. When time for how long the surface temperature will rise by a lot more time with.

From Table 2, when increase in the heat continued current flow in the load resonance decreases continuously as program is set to run up to 10 amps.

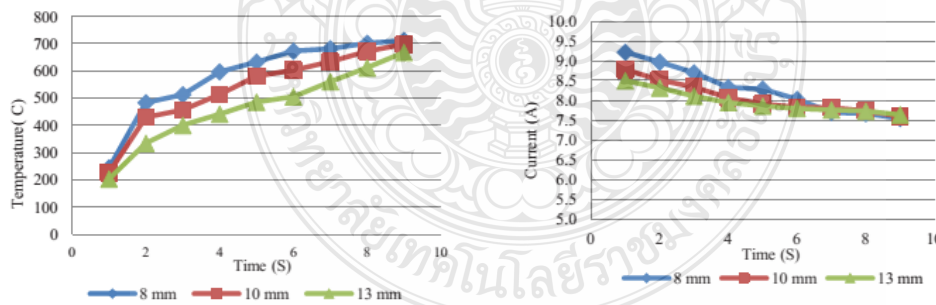


Fig. 8. The relationship between temperature and time

Fig. 9. The relationship between current with time

3. Conclusion

Experiments from figure 8 when provide heat and work continuously. Temperature of the specimen has increased rapidly. The work pieces are small; the temperature will rise faster than the larger pieces by means of initial temperature of 1-7 minutes have increasing rapidly. And when the workpiece to temperature arrive melting point temperature of the specimen is likely to remain since after 7 minute onwards. Because rate of heat loss of the specimen with the thermal radiation from similar. From figure 10 when provide heat and work continuously. Temperature began increases of the workpiece and the current through the series load resonant circuit is much from the beginning of time. When use time for it to heat to work better current through the load resonance is markedly reduced from current limit program working and when the workpiece started to change temperature less current trends constant, it has to be a reduction of at least 5 minutes during the first is on.

When the minimum and maximum of current values were determined using a fusion power will be equal to the lowest power 377.50 watts and maximum power used for melting is equal to 461 watts. However, this research is in a preliminary experiment using low power. The prototype system is the stability of system is not efficient enough which develop a control system must also provide a constant frequency and PWM over the following.

References

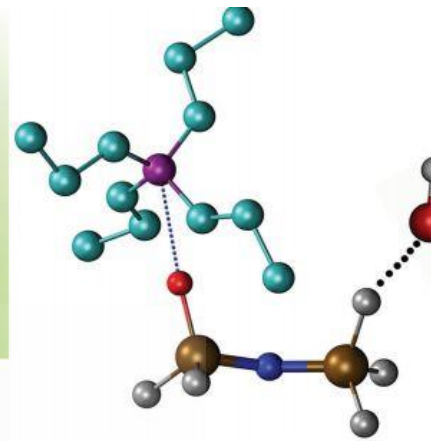
- [1] Sadakata H, Terai H, Omori H, Yamasita H, Nakaoka M, The development of ZCS-PWM-SEPP inverter with complexed control method, *IEEE SPC-03-30*, February 2003.
- [2] Nam-Ju Park, Dong-Yun Lee, Dong-Seok Hyun, A Power-Control Scheme With Constant Switching Frequency in Class-D Inverter for Induction-Heating Jar Application, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, June.
- [3] Imbertson P, Mohan N, New directions in dc-dc power conversion based on idealized concepts leading ultimately to the asymmetrical duty-cycle power converter, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 44, pp. 722–727, Aug. 1997.
- [4] Viriya, P; Sittichok, S; Matsuse, K; Analysis of High-Frequency Induction Cooker with Variable Frequency Power Control, "PCC Osaka 2002, vol.3, April, pp. 1507–1502
- [5] Yasui K, Kitaizumi T, Bessyo D, Omori H, Terai HM, Abdullah AI, Nakaoka, M, Latest development of soft switching inverter power supply using active clamp scheme with a charge up function for magnetron drive, *IEEJ PCC-Osaka*, April 2002, Vol. 3, pp. 1484–1489
- [6] Bessyo D, Yasui K, Omori H, Terai H, Nakaoka, M, The inverter circuit skills to realize low-cost, compact-size power supply for microwave oven, and the advantages of improved defrosting, *Proc. IEEE-IAS Int. Appliance Technical Conf.*, April 2000.
- [7] Sugimura H, Ahmed NA, Ahmed T, Lee H-W, Nakaoka M, Utility AC frequency to high frequency AC power conversion circuit with soft switching PWM strategy, *KIEE Int. Trans. Electr. Mach. Energy Convers. Syst.*, 2005, 5-B, (2), pp. 181–188.
- [8] Muraoka H, Nakaoka M, Sakamoto K, High-frequency PWM forward converter with auxiliary active clamped capacitor for low voltage high current operation, *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC)*, Vancouver, Canada, July 2001, Vol. 3, pp. 1523–1528.
- [9] Kaneda M, Tanaka H, Nakaoka M, A novel prototype of single-ended push-pull soft-switching high-frequency inverter using a single auxiliary ZVS-PWM switch, *Technical Report of IEICE-J Energy Electronics Professional Meeting*, February 2000, Vol. 100, No. 628, pp. 31–37.

Proceedings

11th

Eco-Energy and
Materials

Science and
Engineering
Symposium



Energy Technology, Environmental
and Social Impact, Nanotechnology
and Material Technology, Energy
Economic and Management, Nuclear
Technology, New Technology,
Automotive Composite, and Other
- Topics related to Energy Field.

Organized by



December 18-21, 2013

Phuket Graceland Resort and Spa
Phuket, Thailand

Co-organized by



Study and development Induction heating applied for hardening

P. Chamsuk ^a, J Srinonchat ^b

^aRajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, Thailand

^bRajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, Thailand

Abstract— This paper proposes a method study and development induction heating applied for hardening using low energy the method was designed system by half-bridge inverter circuit to the direct load of LC series resonant. The half-bridge inverter had been generating frequency on 47 kHz and adjustable a power which program by microcontroller power supply full-bridge 50 volt and overload current sensor by means of hall current sensor. The exemplar had a steel bolts diameter size 3 mm. The method had provided heat steel bolts while 3 minute after that let it cool down to normal temperature. The method use of current among 3.6 ampere while no steel bolts and among 2.5 ampere while steel bolts is used minimum electric power of 125 watt and 180 watt as maximum. Comparison with the other is coated with a hard and difficult time and energy than this.

Keywords— Half bridge Inverter, Pulse width modulation, Moving average technique.



* Jakkree Srinonchat. Tel.: +0-2-549-3564; fax: +0-2-549-3563.
E-mail address: jakkree.s@en.rmutt.ac.th.

1. INTRODUCTION

Induction hardening is a form of heat treatment in which a metal part is heated by induction heating and then quenched. The quenched metal undergoes a martensitic transformation, increasing the hardness and brittleness of the part. Induction hardening is used to selectively harden areas of a part or assembly without affecting the properties of the part as a whole [1]. Induction heating is a non contact heating process which utilises the principle of electromagnetic induction to produce heat inside the surface layer of a work-piece. By placing a conductive material into a strong alternating magnetic field, electrical current can be made to flow in the material thereby creating heat due to the I²R losses in the material. In magnetic materials, further heat is generated below the curie point due to hysteresis losses. The current generated flows predominantly in the surface layer, the depth of this layer being dictated by the frequency of the alternating field, the surface power density, the permeability of the material, the heat time and the diameter of the bar or material thickness. By quenching this heated layer in water, oil or a polymer based quench the surface layer is altered to form a martensitic structure which is harder than the base metal [2].

2. HEAT INDUCTION HARDENING

Heat induction using the magnetic field induce to device under hardening, magnetic field will made the eddy current on surface device, impact from eddy current made the device under hardening heat up, the surface temperature depend on eddy current on surface versus resistance of device under hardening, skin depth temperature belong to frequency and permittivity of material by equation (1)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \tag{1}$$

- where
- δ = Skin Depth
- μ = Permittivity of material
- ρ = Material resistance
- f = frequency of current using

When apply alternation current to device under hardening the skin dept will belong to frequency, Induction heating systems for hardening are available in a variety of different operating frequencies typically from 1 kHz to 400 kHz. Higher and lower frequencies are available but typically these will be used for specialist applications. The relationship between operating frequency and current penetration depth and therefore hardness depth is inversely proportional, the lower the frequency the deeper the case, there fore if the system

require to hardening surface with maintain the material property under material depth, the system must able to varies operating frequency too, Frequencies for various case depths and material diameters shown as table (1).

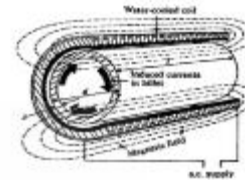


Fig.1. Simple introduction heating.

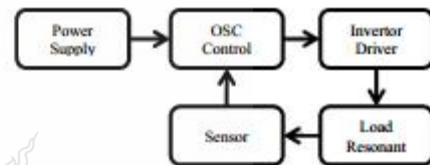


Fig 2. An induction heating system

Table 1. Frequencies for various case depths and material diameters [1]

Case depth [mm]	Bar diameter [mm]	Frequency [kHz]
0.8 to 1.5	5 to 25	200 to 400
1.5 to 3.0	10 to 50	10 to 100
	>50	3 to 10
3.0 to 10.0	20 to 50	3 to 10
	50 to 100	1 to 3
	>100	1

3. MOVING AVERAGE TECHNIQUE

In statistics, a moving average (rolling average or running average) is a calculation to analyze data points by creating a series of averages of different subsets of the full data set. Is also called a moving mean or rolling mean and is a type of finite impulse response filter. Variations include: simple, and cumulative, Given a series of numbers and a fixed subset size, the first element of the moving average is obtained by taking the average of the initial fixed subset of the number series. Then the subset is modified by "shifting forward"; that is, excluding the first number of the series and including the next number following the original subset in the series. This creates a new subset of numbers, which is averaged. This process is repeated over the entire data series. The plot line

* Jakkree Srinonchat. Tel.: +0-2-549-3564; fax: +0-2-549-3563.
E-mail address: jakkree.s@en.rmutt.ac.th.

connecting all the (fixed) averages is the moving average. A moving average is a set of numbers, each of which is the average of the corresponding subset of a larger set of datum points. A moving average may also use unequal weights for each datum value in the subset to emphasize particular values in the subset.

A moving average is commonly used with time series data to smooth out short-term fluctuations and highlight longer-term trends or cycles. The threshold between short-term and long-term depends on the application, and the parameters of the moving average will be set accordingly. For example, it is often used in technical analysis of financial data, like stock prices, returns or trading volumes. It is also used in economics to examine gross domestic product, employment or other macroeconomic time series. Mathematically, a moving average is a type of convolution and so it can be viewed as an example of a low-pass filter used in signal processing. When used with non-time series data, a moving average filters higher frequency components without any specific connection to time, although typically some kind of ordering is implied. Viewed simplistically it can be regarded as smoothing the data. In a cumulative moving average, the data arrive in an ordered datum stream, and the user would like to get the average of all of the data up until the current datum point. For example, an investor may want the average price of all of the stock transactions for a particular stock up until the current time. As each new transaction occurs, the average price at the time of the transaction can be calculated for all of the transactions up to that point using the cumulative average, typically an equally weighted average of the sequence of i values x_1, \dots, x_i up to the current time

$$CA_i = \frac{x_1 + \dots + x_i}{i} \quad (2)$$

Where

CA_i = Result from calculation
 X = Input data by varies time
 I = round of varies time

4. IMPLEMENTATION AND RESULTS

The skin depth control were direct impact to current control and frequency control system, stability of current will made the hardening quality good or poor, current control system by using digital feed back control system must got the correct input, analog input from induction will contain a lot of noise due to induction system will generated harmonic from various frequency and properties of load, when load temperature has change material resistance will reduce from original value (3), the moving average will improve the quality of input reading.



Fig.3. Experiment heating



Fig.4. Experiment testing

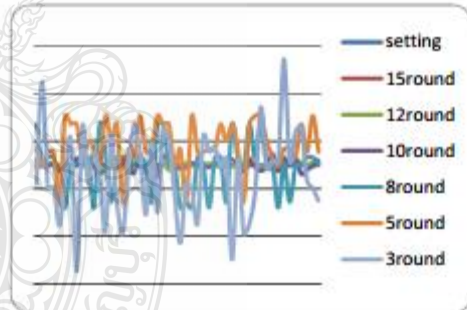


Fig 5. Moving average round versus setting point

The moving average direct impact to the quality of input reading for feedback system, the experiment was show the reading between actual and setting point, round of moving average direct impact to quality of input reading, high calculation round will made CPK increas, after 8 round calculation quality of input reading beyond to set point which giving CPK above 0.75, at 10 round calculation CPK reach to 1.51, After 10 round to 20 round CPK increase only 2.5%

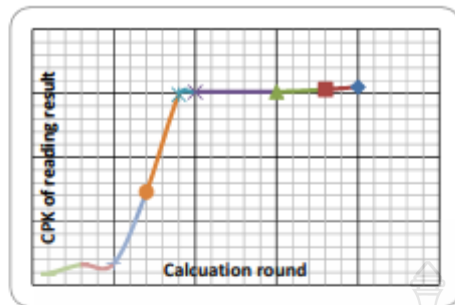


Fig 6. Moving average CPK result versus calculation round

Fig 5 shows the best control in the use of the control system at the 10 round, when applied with materials is steel bolts 3 mm, the moving average can provide heat to work within 3 minutes using current to 2.5 amps. And when the test is used to control the number of systems have been used for more than ten electricity for more than 2.5 amps because the system enters the state set post.

Fig 6, an experiment using the size of the nut screw 3 millimeter long, 100 mm controlled flow at 2.5 amps using moving average 10 cycle control as a period of 3 minutes after the specimen is taken to reduce the heat immediately with water temperature 25 °c then the material properties of the specimen to the test next.

5. SUMMARY

This article paper presents the development of heat induction technique to hardening bolt, the inverter usage 47Khz generated, driven by Pulse with modulation technique with half bridge concept, Power of inverter 125W, bolt diameter 3 mm, development technique using moving average technique to improve stability of inverter at feedback control system, the result are comparison between processing time versus stability of current output, , time process per cycle about 20mSec, result show processing time versus stability best point at 10 round calculation with CPK of current setting up from 2.5 to 3.5 by using process time 10mSec per 10 round calculation.

The system can be applied in a coating of solid metal. It is time to dip to 3 minutes each time, which in turn is expected to have a material hardness compared to the unvarnished. The system can be used in the lowest power at 125 watts and 180 watts max.

ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank the project supervisor, Asst. Prof. Dr. Jakkree Srinonchat for his guidance and SPRL lab at Rajamagala University of Technology Thanyaburi Pathumthani for courtesy place.

REFERENCES

- [1] Bodart O, Bourean A V, Touzani R 2001 Numerical investigation of optimal control of induction heating process, *Applied Mathematical Model*, 25: 697–712
- [2] Kayacan M C 2004 A fuzzy approach for induction hardening parameter selection, *J. Materials and Design*, 25(2): 155–161
- [3] Totik Y, Sadeler R, Altun H, Gavgali M 2003 The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions, *Materials and Design*, 24(1): 25–30

ภาคผนวก ข

โปรแกรมระบบควบคุมกระแส



โปรแกรมผลิตความถี่

/*****

This program was produced by the

CodeWizardAVR V2.05.3 Standard

Automatic Program Generator

Copyright 1998-2011 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.

<http://www.hpinfotech.com>

Project :

Version :

Date : 12/23/2012

Author : PerTic@n

Company : If You Like This Software,Buy It

Comments:

Chip type : ATmega16

Program type : Application

AVR Core Clock frequency: 8.000000 MHz

Memory model : Small

External RAM size : 0



Data Stack size : 256

*****/

```
#include <mega16.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <stdlib.h> // External Interrupt 0 service routine
```

```
#include <delay.h>
```

```
// Declare your global variables here
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
// Declare your local variables here
```

```
// Input/Output Ports initialization
```

```
// Port A initialization
```

```
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
```

```
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
```

```
PORTA=0x00;
```

```
DDRA=0x00;
```

```
// Port B initialization
```

```
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTB=0x00;

DDRB=0x00;

// Port C initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=Out

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=0

PORTC=0x00;

DDRC=0x01;

// Port D initialization

// Func7=Out Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=Out Func0=In

// State7=0 State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=0 State0=P

PORTD=0x01;

DDRD=0x82;

// Timer/Counter 0 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer 0 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF
```



```
// OC0 output: Disconnected

TCCR0=0x00;

TCNT0=0x00;

OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer1 Stopped

// Mode: Normal top=0xFFFF

// OC1A output: Discon.

// OC1B output: Discon.

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge

// Timer1 Overflow Interrupt: Off

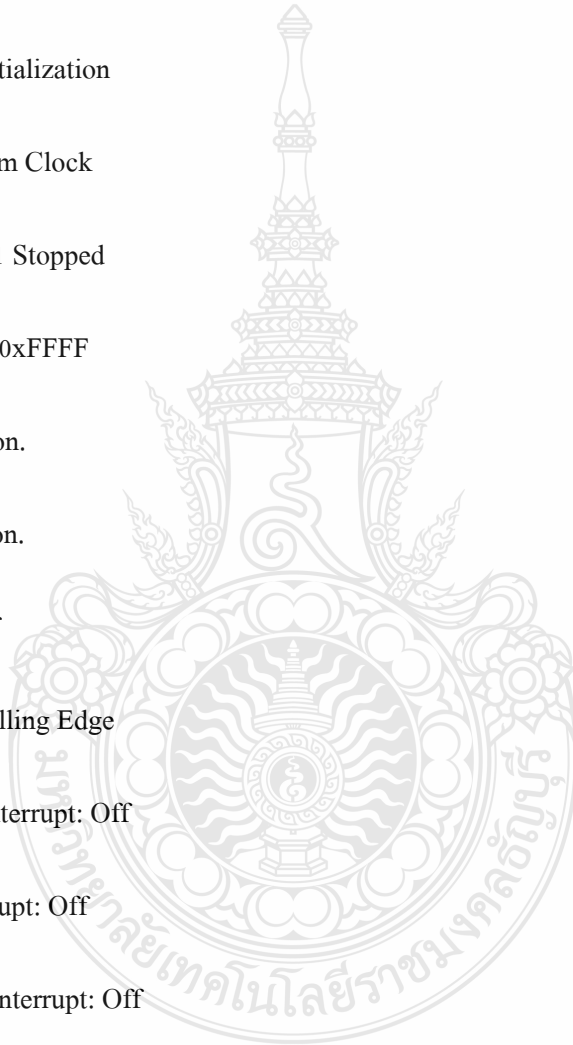
// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off

TCCR1A=0x00;

TCCR1B=0x00;
```



```
TCNT1H=0x00;

TCNT1L=0x00;

ICR1H=0x00;

ICR1L=0x00;

OCR1AH=0x00;

OCR1AL=0x00;

OCR1BH=0x00;

OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer2 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

// OC2 output: Disconnected

ASSR=0x00;

TCCR2=0x00;

TCNT2=0x00;

OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization
```



```
// INT0: Off

// INT1: Off

// INT2: Off

MCUCR=0x00;

MCUCSR=0x00;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization

TIMSK=0x00;

// USART initialization

// USART disabled

UCSRB=0x00;

// Analog Comparator initialization

// Analog Comparator: Off

// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off

ACSR=0x80;

SFIOR=0x00;

// ADC initialization

// ADC disabled

ADCSRA=0x00;
```

```
// SPI initialization

// SPI disabled

SPCR=0x00;

// TWI initialization

// TWI disabled

TWCR=0x00;

PORTD.7=0;

PORTC.0=0;

while (1)
{
    PORTC.0=0;

    #asm("nop")

    PORTD.7=1;

    delay_us(10);

    #asm("nop")

    #asm("nop")

    #asm("nop")

    #asm("nop")
}
```



```
#asm("nop")

PORTD.7=0;

#asm("nop")

PORTC.0=1;

delay_us(10);

#asm("nop")

#asm("nop")

#asm("nop")

#asm("nop")

#asm("nop")

}

}
```

โปรแกรมควบคุมกระแส

This program was produced by the

CodeWizardAVR V2.05.3 Standard

Automatic Program Generator

Copyright 1998-2011 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.

<http://www.hpinfotech.com>

Project :

Version :

Date : 11/4/2013

Author : PerTic@n

Company : If You Like This Software,Buy It

Comments:

Chip type : ATmega16

Program type : Application

AVR Core Clock frequency: 8.000000 MHz

Memory model : Small

External RAM size : 0

Data Stack size : 256

*****/

```
#include <mega16.h>
```

```
#include <mega16.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>

#include <stdlib.h> // External Interrupt 0 service routine

#include <delay.h>

#define ADC_VREF_TYPE 0x40

int tmp1,tmp2;

// Read the AD conversion result

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)

{

ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);

// Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage

delay_us(10);

// Start the AD conversion

ADCSRA|=0x40;

// Wait for the AD conversion to complete

while ((ADCSRA & 0x10)==0);

ADCSRA|=0x10;

return ADCW;

}
```

```

// Declare your global variables here

void main(void)

{

// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization

// Port A initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTA=0x00;

DDRA=0x00;

// Port B initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTB=0x00;

DDRB=0x00;

// Port C initialization

// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out Func1=Out Func0=Out

// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0 State0=0

```



```
PORTC=0x00;

DDRC=0xFF;

// Port D initialization

// Func7=Out Func6=Out Func5=Out Func4=Out Func3=Out Func2=Out Func1=Out Func0=Out

// State7=0 State6=0 State5=0 State4=0 State3=0 State2=0 State1=0 State0=0

PORTD=0x00;

DDRD=0xFF;

// Timer/Counter 0 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer 0 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

// OC0 output: Disconnected

TCCR0=0x00;

TCNT0=0x00;

OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer1 Stopped
```

```
// Mode: Normal top=0xFFFF

// OC1A output: Discon.

// OC1B output: Discon.

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge

// Timer1 Overflow Interrupt: Off

// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off

TCCR1A=0x00;

TCCR1B=0x00;

TCNT1H=0x00;

TCNT1L=0x00;

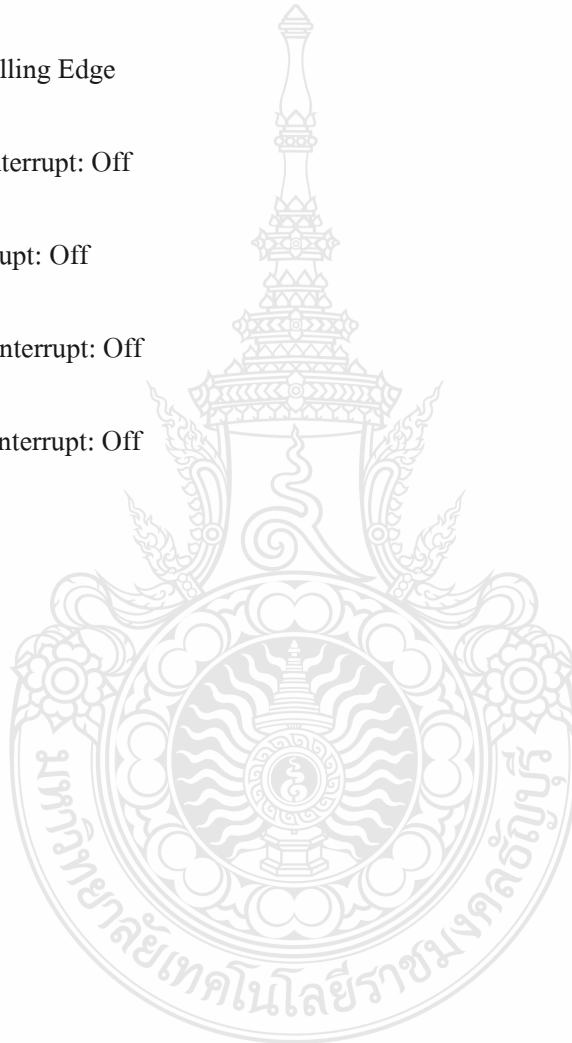
ICR1H=0x00;

ICR1L=0x00;

OCR1AH=0x00;

OCR1AL=0x00;

OCR1BH=0x00;
```



```
OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer2 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

// OC2 output: Disconnected

ASSR=0x00;

TCCR2=0x00;

TCNT2=0x00;

OCR2=0x00;

// External Interrupt(s) initialization

// INT0: Off

// INT1: Off

// INT2: Off

MCUCR=0x00;

MCUCSR=0x00;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization

TIMSK=0x00;
```



```
// USART initialization

// USART disabled

UCSRB=0x00;

// Analog Comparator initialization

// Analog Comparator: Off

// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off

ACSR=0x80;

SFIOR=0x00;

// ADC initialization

// ADC Clock frequency: 125.000 kHz

// ADC Voltage Reference: AVCC pin

// ADC Auto Trigger Source: ADC Stopped

ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;

ADCSRA=0x86;

// SPI initialization

// SPI disabled

SPCR=0x00;

// TWI initialization
```

```
// TWI disabled

TWCR=0x00;

PORTD.7=0;

PORTC.0=0;

tmp1=0;

while (1)

{

PORTC.0=0;

#asm("nop")

tmp1=tmp1+1;

if(tmp1 >= 10)

{

tmp2=read_adc(0);

tmp1=0;

}

PORTD.7=1;

delay_us(10);

if(tmp2 > 250)
```



```
{  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
}  
  
PORTD.7=0;  
  
#asm("nop")  
  
PORTC.0=1;  
  
delay_us(10);  
  
if(tmp2 > 250)  
{  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
#asm("nop")  
  
}
```



Program type : Application

AVR Core Clock frequency: 8.000000 MHz

Memory model : Small

External RAM size : 0

Data Stack size : 256

*****/

```
#include <mega8.h>
```

```
#include <delay.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <stdlib.h> // External Interrupt 0 service routine
```

```
#include <string.h> // Declare your global variables here
```

```
float volt,amp,power,power_KWH,tick2;
```

```
int t1,t2,d1,d2,d3,d4,d5;
```

```
int tick1,tmp1;
```

```
char status,data;
```

```
#ifndef RXB8
```

```
#define RXB8 1
```


#endif

#ifndef TXB8

#define TXB8 0

#endif

#ifndef UPE

#define UPE 2

#endif

#ifndef DOR

#define DOR 3

#endif

#ifndef FE

#define FE 4

#endif

#ifndef UDRE

#define UDRE 5

#endif

#ifndef RXC

#define RXC 7



```

#endif

#define FRAMING_ERROR (1<<FE)

#define PARITY_ERROR (1<<UPE)

#define DATA_OVERRUN (1<<DOR)

#define DATA_REGISTER_EMPTY (1<<UDRE)

#define RX_COMPLETE (1<<RXC)

// USART Receiver buffer

#define RX_BUFFER_SIZE 8

char rx_buffer[RX_BUFFER_SIZE];

#if RX_BUFFER_SIZE <= 256

unsigned char rx_wr_index,rx_rd_index,rx_counter;

#else

unsigned int rx_wr_index,rx_rd_index,rx_counter;

#endif

// This flag is set on USART Receiver buffer overflow

bit rx_buffer_overflow;

// USART Receiver interrupt service routine

interrupt [USART_RXC] void usart_rx_isr(void)

```

```
{  
  
char status,data;  
  
status=UCSRA;  
  
data=UDR;  
  
t2=0;  
  
status=UCSRA;  
  
data=UDR;  
  
if(t1==5)  
{  
  
t1=0;  
  
goto exit2;  
  
}  
  
if(t1>0)  
{  
  
goto set_tick;  
  
}  
  
if (data=='m')  
  
{
```



```
volt=volt*0.03910;

printf("%-f",volt);

printf("V , ");

amp = 512 - amp;

amp=amp*0.0586;

printf("%-f",amp);

printf("A , ");

power = volt*amp;

printf("%-f",power);

printf("W , ");

printf("%-f",power_KWH);

printf("KWHr");

printf("\r\n");

t1=0;

goto exit1;

}

else if (data=='s')

{
```



```
t1=1;

printf("Start set Tick");

printf("\r\n");

goto exit1;

}

else if (data=='r')

{

t2=1;

tick2=0;

power_KWH=0;

printf("\r\n");

printf("Start Log");

printf("\r\n");

goto exit1;

}

else if (data=='e')

{

t2=0;
```



```
    printf("\r\n");

printf("Stop Log");

    printf("\r\n");

goto exit1;

}

else

{

    goto exit1;

}

set_tick:

    if (t1==4)

    {

        printf(".");

    }

    if (data=='0')

    {

        if(t1==1)d1=0;

        if(t1==2)d2=0;
```



```
if(t1==3)d3=0;

if(t1==4)d4=0;

t1=t1+1;

printf("0");

goto exit1;
}

if (data=='1')
{

if(t1==1)d1=1;

if(t1==2)d2=1;

if(t1==3)d3=1;

if(t1==4)d4=1;

t1=t1+1;

printf("1");

goto exit1;

}

if (data=='2')
{
```



```
if(t1==1)d1=2;

if(t1==2)d2=2;

if(t1==3)d3=2;

if(t1==4)d4=2;

t1=t1+1;

printf("2");

goto exit1;
}

if (data=='3')
{
if(t1==1)d1=3;

if(t1==2)d2=3;

if(t1==3)d3=3;

if(t1==4)d4=3;

t1=t1+1;

printf("3");

goto exit1;
}
```




```
    if (data=='4')
{
    if(t1==1)d1=4;

    if(t1==2)d2=4;

    if(t1==3)d3=4;

    if(t1==4)d4=4;

    t1=t1+1;

    printf("4");

    goto exit1;
}

    if (data=='5')
{
    if(t1==1)d1=5;

    if(t1==2)d2=5;

    if(t1==3)d3=5;

    if(t1==4)d4=5;

    t1=t1+1;

    printf("5");
```



```
    goto exit1;
}

if (data=='6')
{
    if(t1==1)d1=6;

    if(t1==2)d2=6;

    if(t1==3)d3=6;

    if(t1==4)d4=6;

    t1=t1+1;

    printf("6");

    goto exit1;
}

if (data=='7')
{

    if(t1==1)d1=7;

    if(t1==2)d2=7;

    if(t1==3)d3=7;

    if(t1==4)d4=7;
```



```
t1=t1+1;

printf("7");

goto exit1;

}

if (data=='8')
{

if(t1==1)d1=8;

if(t1==2)d2=8;

if(t1==3)d3=8;

if(t1==4)d4=8;

t1=t1+1;

printf("8");

goto exit1;

}

if (data=='9')
{

if(t1==1)d1=9;

if(t1==2)d2=9;
```



```

if(t1==3)d3=9;

if(t1==4)d4=9;

t1=t1+1;

printf("9");

goto exit1;
}

exit2:

printf("\r\n");

printf("Setting Done ");

printf("%d",d1);

printf("%d",d2);

printf("%d",d3);

printf(".");

printf("%d",d4);

printf(" Sec");

printf("\r\n");

tick1=((d1*1000)+(d2*100)+(d3*10)+(d4*1));

if (tick1==0)

```



```
{  
  
d4=1;  
  
printf("\r\n");  
  
printf("Invalid Setting restore to ");  
  
printf("%d",d1);  
  
printf("%d",d2);  
  
printf("%d",d3);  
  
printf(".");  
  
printf("%d",d4);  
  
printf(" Sec");  
  
printf("\r\n");  
  
}  
  
t1=0;  
  
exit1:  
  
data=0;  
  
// printf("\r\nOK\r\n\r\n");  
  
}  
  
#ifndef _DEBUG_TERMINAL_IO_
```



```
// Get a character from the USART Receiver buffer
```

```
#define _ALTERNATE_GETCHAR_
```

```
#pragma used+
```

```
char getchar(void)
```

```
{
```

```
char data;
```

```
while (rx_counter==0);
```

```
data=rx_buffer[rx_rd_index++];
```

```
#if RX_BUFFER_SIZE != 256
```

```
if (rx_rd_index == RX_BUFFER_SIZE) rx_rd_index=0;
```

```
#endif
```

```
#asm("cli")
```

```
--rx_counter;
```

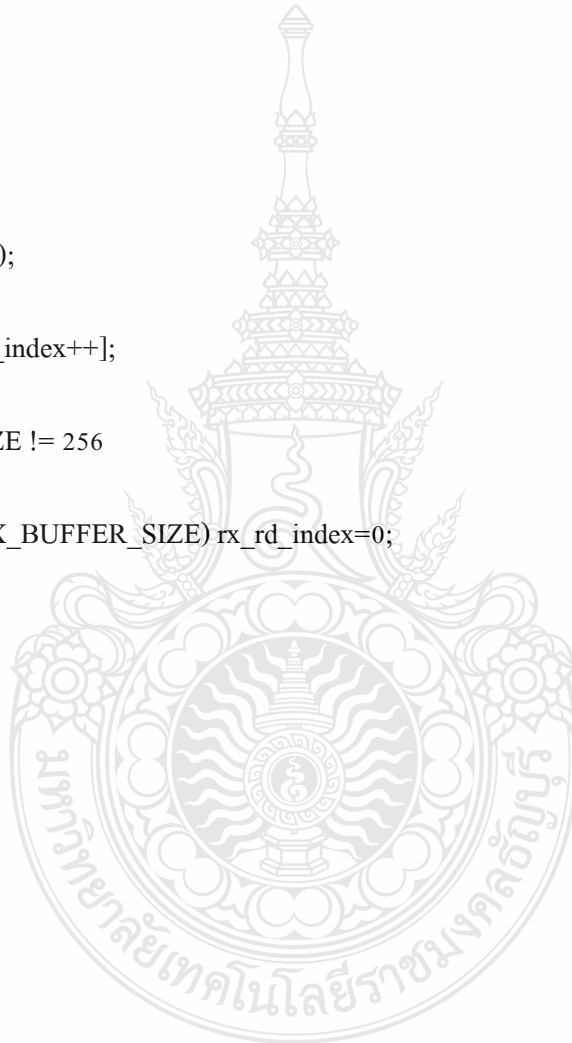
```
#asm("sei")
```

```
return data;
```

```
}
```

```
#pragma used-
```

```
#endif
```



```

// Standard Input/Output functions

#include <stdio.h>

#define ADC_VREF_TYPE 0x40

// Read the AD conversion result

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);

    // Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage

    delay_us(10);

    // Start the AD conversion

    ADCSRA|=0x40;

    // Wait for the AD conversion to complete

    while ((ADCSRA & 0x10)==0);

    ADCSRA|=0x10;

    return ADCW;

}

// Declare your global variables here

void main(void)

```

```

{

// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization

// Port B initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTB=0x00;

DDRB=0x00;

// Port C initialization

// Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTC=0x00;

DDRC=0x00;

// Port D initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=Out Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=0 State0=P

PORTD=0x01;

DDRD=0x02;

```



```
// Timer/Counter 0 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer 0 Stopped

TCCR0=0x00;

TCNT0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer1 Stopped

// Mode: Normal top=0xFFFF

// OC1A output: Discon.

// OC1B output: Discon.

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge

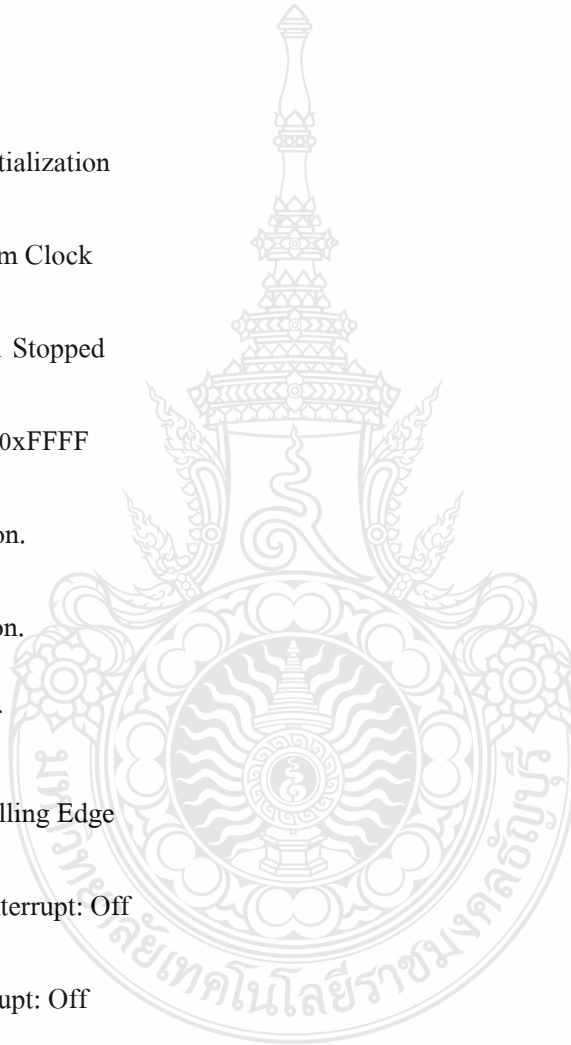
// Timer1 Overflow Interrupt: Off

// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off

TCCR1A=0x00;
```



TCCR1B=0x00;

TCNT1H=0x00;

TCNT1L=0x00;

ICR1H=0x00;

ICR1L=0x00;

OCR1AH=0x00;

OCR1AL=0x00;

OCR1BH=0x00;

OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer2 Stopped

// Mode: Normal top=0xFF

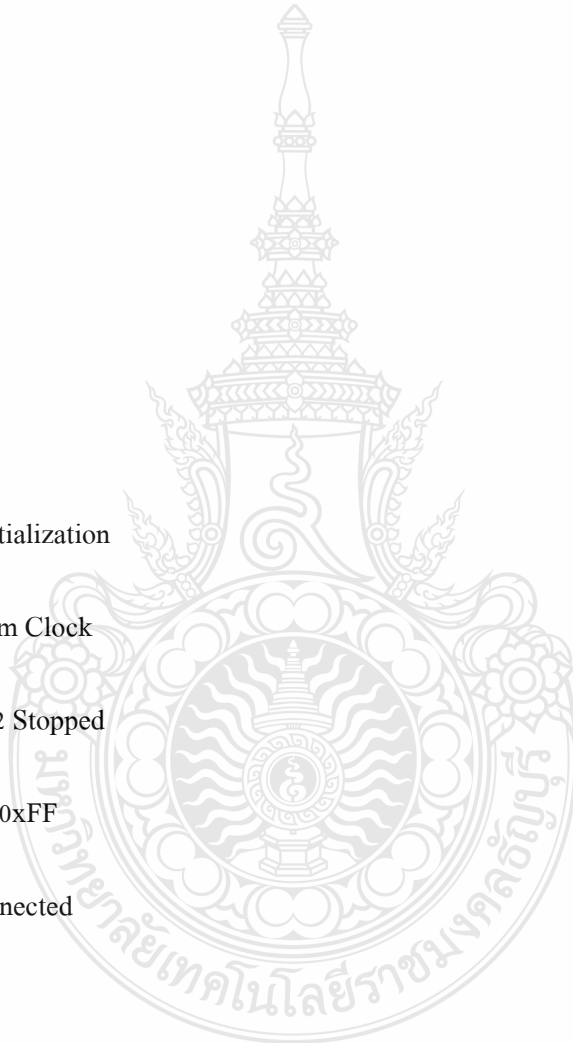
// OC2 output: Disconnected

ASSR=0x00;

TCCR2=0x00;

TCNT2=0x00;

OCR2=0x00;



```
// External Interrupt(s) initialization

// INT0: Off

// INT1: Off

MCUCR=0x00;

// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization

TIMSK=0x00;

// USART initialization

// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity

// USART Receiver: On

// USART Transmitter: On

// USART Mode: Asynchronous

// USART Baud Rate: 9600

UCSRA=0x00;

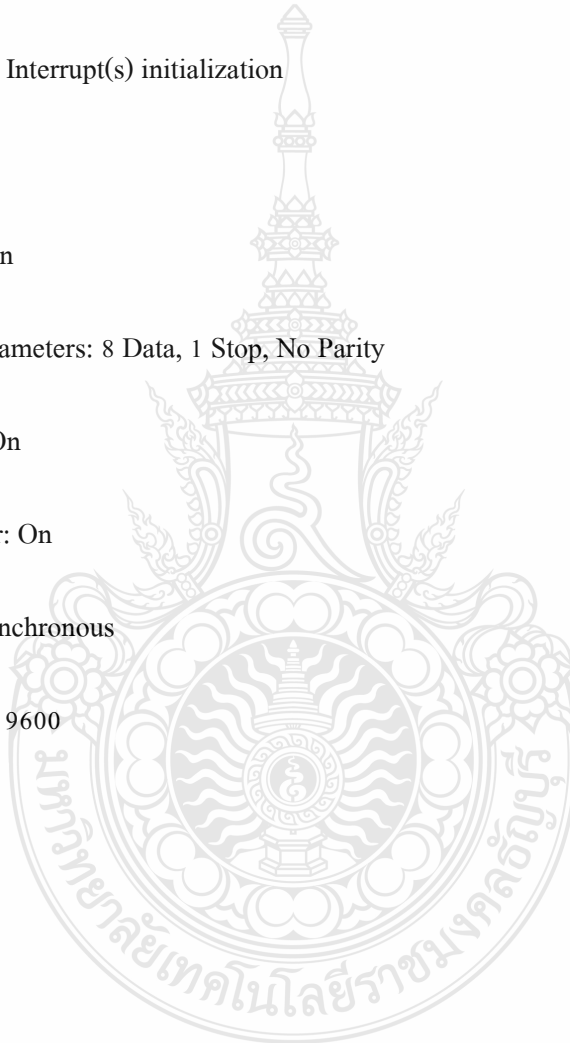
UCSRB=0x98;

UCSRC=0x86;

UBRRH=0x00;

UBRRL=0x33;

// Analog Comparator initialization
```



```
// Analog Comparator: Off

// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off

ACSR=0x80;

SFIO=0x00;

// ADC initialization

// ADC Clock frequency: 125.000 kHz

// ADC Voltage Reference: AVCC pin

ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;

ADCSRA=0x86;

// SPI initialization

// SPI disabled

SPCR=0x00;

// TWI initialization

// TWI disabled

TWCR=0x00;

// Global enable interrupts

#asm("sei")

t1=0;
```



```
power_KWH=0;

while (1)

{

// Place your code here

amp = read_adc(0);

volt= read_adc(1);

d5 = read_adc(0);

if (t2==1)

{

volt=volt*0.03910;

printf("%-f",volt);

printf("V , ");

amp = 512 - amp;

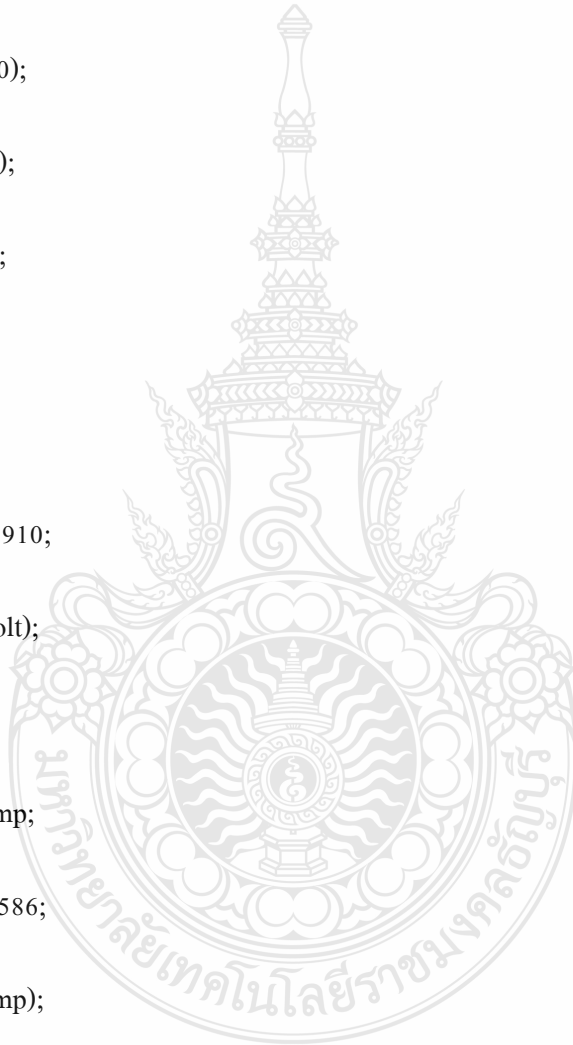
amp=amp*0.0586;

printf("%-f",amp);

printf("A , ");

power = volt*amp;

printf("%-f",power);
```



```

printf("W , ");

printf("%-f",power_KWH);

printf("KWHr");

printf("\r\n");

tick1=((d1*1000)+(d2*100)+(d3*10)+(d4*1));

for (tmp1 = 0; tmp1 < tick1; tmp1++) // 0010 =1000mSec
{

    delay_ms(100); //100 = 1sec

}

// tick2=tick2+((tick1*100)/1000);

tick2=(tick1/10);

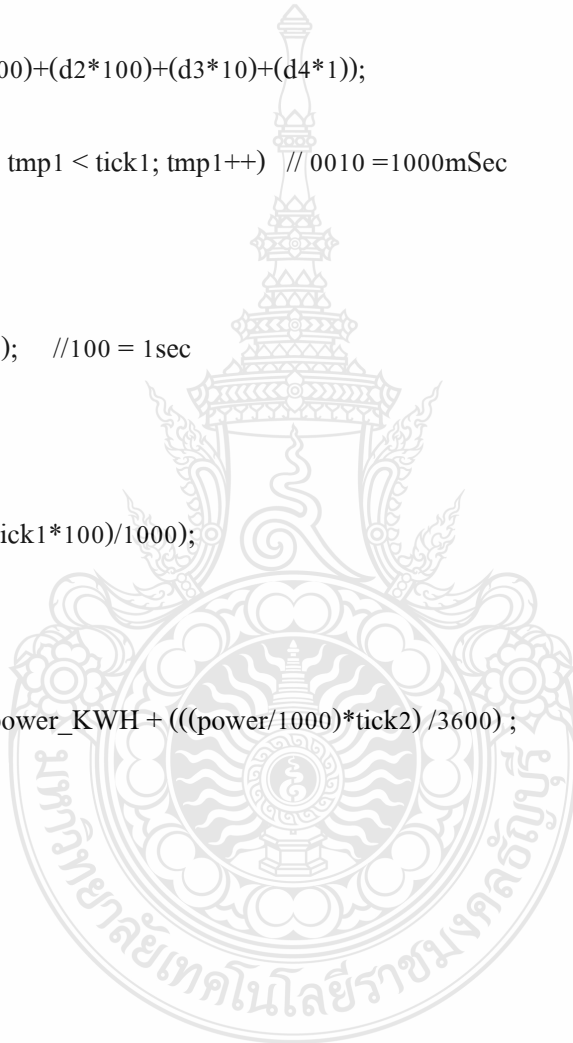
power_KWH= power_KWH + (((power/1000)*tick2) /3600) ;

}

};

}

```



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายภควัฒร์ คำสุข
วัน เดือน ปีเกิด	17 สิงหาคม 2523
ที่อยู่	63/1 หมู่ที่ 3 ตำบลหนอง อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาเทคโนโลยี โทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	ช่างเทคนิคศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ.2545 ถึง พ.ศ.2550 นักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัด เชียงใหม่ พ.ศ.2550 ถึง ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	091-8523915
อีเมล	pakawat_mju@hotmail.com

