# การออกแบบและสร้างเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์ในงานหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อน

# DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PULSE DENSITY MODULATION BASED RESONANCE INVERTER FOR PLASTIC MELTING WITH INDUCTION HEATING

**จีระศักดิ์ วงศา**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร**
**ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า**
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**
**ปีการศึกษา 2558**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

# การออกแบบและสร้างเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์ในงานหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อน

**จีระศักดิ์ วงศา**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร**
**ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า**
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**
**ปีการศึกษา 2558**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การออกแบบและสร้างเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์ในงานหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อน Design and Construction of a Pulse Density Modulation Based Resonance Inverter for Plastic Melting with Induction Heating |
| **ชื่อ - นามสกุล** | นายจีระศักดิ์ วงศา |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D. |
| **ปีการศึกษา** | 2558 |

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

......................................................... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรินทร์ แหงมงาม, Ph.D.)

......................................................... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์อรรถพล เงาพิทักษ์กุล, วศ.ด.)

......................................................... กรรมการ
(อาจารย์ณฐภัทร พันธ์คง, Ph.D.)

......................................................... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.........................................................คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 24 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การออกแบบและสร้างเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์ในงานหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อน |
| **ชื่อ -นามสกุล** | นายจีระศักดิ์ วงศา |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D. |
| **ปีการศึกษา** | 2558 |

# บทคัดย่อ

กระบวนการหลอมพลาสติกรีไซเคิลโดยส่วนใหญ่ใช้ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อในการหลอมซึ่งมีประสิทธิภาพการทำความร้อนต่ำ ปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะนำหลักการเหนี่ยวนำความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการหลอมพลาสติก โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ที่ใช้เทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการหลอมพลาสติกให้ดียิ่งขึ้น

การออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพในการหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อนขนาด 1 กิโลวัตต์ จะเปรียบเทียบกับการหลอมแบบขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ทดสอบกับพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้ 3 ชนิดคือ โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 60% 80% และ 100% โดยมีความถี่มอดูเลตที่ 400 เฮิรตซ์

ผลการวิจัยการออกแบบและสร้างเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์ในงานหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อนพบว่า มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 77.73 % แตกต่างจากการหลอมโดยใช้ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 25.86 % การติดตั้งใช้งานที่โรงงานอุตสาหกรรมใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 5.1 กิโลวัตต์ สามารถลดกำลังไฟฟ้าได้ถึง 198.03 หน่วยต่อวัน และมีประสิทธิภาพสูงถึง 72.16%

**คำสำคัญ:** การหลอมพลาสติก การเหนี่ยวนำความร้อน การควบคุมความหนาแน่นพัลส์

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | Design and Construction of a Pulse Density Modulation Based Resonance Inverter for Plastic Melting with Induction Heating |
| **Name – Surname** | Mr. Jeerasak Wongsa |
| **Program** | Electrical Engineering |
| **Thesis Advisor** | Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D. |
| **Academic Year** | 2015 |

# ABSTRACT


A band heater was usually used for melting in the plastic recycling process. However, this kind of heater had low efficiency. According to this problem, the induction heating was designed into the process instead. A series resonance circuit full bridge inverter with pulse density modulation (PDM) technic was used to test the plastic melting efficiency.

To test the plastic melting efficiency, a band heater and a 1-kilowatt induction barrel heating application were used to melt three kinds of recyclable plastic - Polyethylene terephthalate (PET), High-density polyethylene (HDPE), and Low density polyethylene (LDPE). The power was controlled by adjusting pulse density modulation to 60%, 80% and 100% with the Frequency Modulation of 400 Hz.

The research revealed that the pulse density modulation based resonant inverter for an induction barrel heating application had an average melting efficiency of 77.73% which is higher than the band heater which had the melting efficiency of 25.86%. The installation of this induction barrel heating application in a factory used an average power of 5.1 kW. It could save 198.03 units of power a day with a high efficiency of 72.16%.



**Keywords :** plastic melting, induction heating, pulse density modulation

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาที่มีค่าและคอยให้คำปรึกษาอย่างดียิ่ง รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ แหงมงาม อีกทั้ง ดร.ณฐภัทร พันธ์คง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล ผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้อง มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อ.บัญชา ศรีวิโรจน์ อ.จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว อ.เอกรัตน์ นภกานต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยืน ปาระเคน ที่คอยส่งเสริมสนับสนุนให้ได้เข้ารับการศึกษาต่อ อีกทั้งการได้รับทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยธนบุรี โดย ดร.อุไรรัตน์ แย้มชุติ ดร.นภวรรณ แย้มชุติ และท่านอธิการบดี ดร.บัญชา เกิดมณี ที่ส่งเสริมสนับสนุนให้บุคลากรได้ศึกษาต่อเพื่อให้เกิดการพัฒนาตนเอง และเป็นที่พึ่งพาตลอดการศึกษาขอขอบคุณเจ้าของเอกสาร บทความ ตำรา หนังสือ ของทุกท่าน ที่ผู้วิจัยใช้ในการสืบค้นข้อมูล และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยตลอดช่วงเวลาของการศึกษา ทุกประการ

คุณค่าและประโยชน์จากการค้นคว้าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบทดแทนบุญคุณต่อ นางเสาร์ วังแสง ผู้เป็นยายที่เลี้ยงดูแลอบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่เล็ก นายสมฤทธิ์ วงศา ผู้เป็นบิดา นางบัวเงา วงศา ผู้เป็นมารดา และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนศิษย์มาตลอด ด้วยวิญญาณของความเป็นครู ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

จีระศักดิ์ วงศา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ........ (3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ........ (4)
กิตติกรรมประกาศ ........ (5)
สารบัญ ........ (6)
สารบัญตาราง ........ (8)
สารบัญรูป ........ (9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ........ (12)
บทที่ 1 บทนำ ........ 13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ........ 13
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย ........ 14
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย ........ 14
1.4 ขอบเขตของการวิจัย ........ 14
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ ........ 15
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย ........ 15
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ ........ 16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ........ 17
2.1 กระบวนการหลอมพลาสติก ........ 17
2.2 หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ........ 27
2.3 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ........ 33
2.4 การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ........ 44
2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณภูมิและอุปกรณ์ตรวจจับกระแส ........ 53
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ........ 57
2.7 บทสรุป ........ 59
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ........ 60
3.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ........ 61
3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ ........ 62
3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ ........ 63

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


3.4 การออกแบบวงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ........ 68

3.5 การสร้างขดลวดเหนี่ยวนำ ........ 69

3.6 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ........ 72

3.7 การจำลองการทำงาน ........ 72

3.8 สรุปผลการดำเนินงาน ........ 77

บทที่ 4 ผลการวิจัย ........ 78

4.1 การทดสอบการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ........ 78

4.2 การทดสอบการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ........ 81

4.3 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ........ 83

4.4 พลังงานที่ใช้จากการปฏิบัติในงานอุตสาหกรรม ........ 87

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ........ 90

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ........ 91

5.1 สรุปผลการวิจัย ........ 91

5.2 ข้อเสนอแนะ ........ 92

บรรณานุกรม ........ 93

ภาคผนวก ........ 94

ภาคผนวก ก อุปกรณ์และชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย ........ 95

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ ........ 99

ประวัติผู้เขียน ........ 146

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของพลาสติกแต่ละประเภท ........ 22
ตารางที่ 2.2 จำนวนโรงงานในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก ในปี พ.ศ. 2546........ 24
ตารางที่ 2.3 ตารางคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในบาเรลที่ความถี่ 30 kHz........ 29
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน... 35
ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์ คลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ ชนิดอนุกรมและขนาน........ 36
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ ........ 37
ตารางที่ 2.7 โหมดของสัญญาณนาฬิกาเมื่อใช้เซรามิคเรโซเนเตอร์ ........ 45
ตารางที่ 2.8 โหมดของสัญญาณนาฬิกาเมื่อใช้คริสตอล ........ 45
ตารางที่ 2.9 หน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆ และการต่อใช้งานวงจรพื้นฐาน........ 47
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐานชนิดต่างๆ........ 51
ตารางที่ 2.11 สภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน ........ 51
ตารางที่ 3.1 American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes and Properties ........ 65
ตารางที่ 3.2 ค่าของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงาน........ 69
ตารางที่ 3.3 ค่าต่างๆที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Psim........ 72
ตารางที่ 4.1 การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ........ 74
ตารางที่ 4.2 การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ........ 77

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกประเภท PE ........ 18
รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์สำหรับพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)........ 20
รูปที่ 2.3 พลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)........ 20
รูปที่ 2.4 พลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)........ 20
รูปที่ 2.5 พลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)........ 21
รูปที่ 2.6 พลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน (PP) ........ 21
รูปที่ 2.7พลาสติกชนิดโพลิสไตรีน (PS) ........ 22
รูปที่ 2.8 สัญลักษณ์พลาสติกชนิดอื่นๆ ........ 22
รูปที่ 2.9 ฮีตเตอร์เข็มขัด ........ 26
รูปที่ 2.10 การใช้พลังงานของเครื่องก่อนและหลังการหุ้มฉนวนเครื่องฉีดพลาสติกชุดหนึ่ง ........ 27
รูปที่ 2.11 การเกิดความความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ........ 27
รูปที่ 2.12 วงจรเทียบเท่าของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กกับบาเรล ........ 28
รูปที่ 2.13 อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวดเหนี่ยวนำกับบาเรล ........ 29
รูปที่ 2.14 เส้นกราฟแสดงการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของบาเรลจากตารางที่ 2.3........ 31
รูปที่ 2.15 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน........ 32
รูปที่ 2.16 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์........ 33
รูปที่ 2.17 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกลบ ........ 34
รูปที่ 2.18 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกบวก ........ 34
รูปที่ 2.19 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์ ........ 35
รูปที่ 2.20 คลื่นแรงดันและกระแสโหลดของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์........ 36
รูปที่ 2.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาท์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ ........ 39
รูปที่ 2.22 กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตซิ่งต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ ........ 40
รูปที่ 2.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุตที่มุมเฟสต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุมเฟส........ 41

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.24 กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่มุมต่างเฟสต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุมต่างเฟส ..... 41
รูปที่ 2.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ ..... 43
รูปที่ 2.26 กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ Pulse density ค่าของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ PDM ..... 43
รูปที่ 2.27 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรเลอร์ ..... 44
รูปที่ 2.28 เซรามิครีโซเนเตอร์และการต่อใช้งาน ..... 47
รูปที่ 2.29 คริสตอลรีโซเนเตอร์ ..... 47
รูปที่ 2.30 โครงสร้างขาของ Crystal Square-wave ..... 47
รูปที่ 2.31 PIC16F877 และตำแหน่งหน้าที่ของขาที่ใช้งาน ..... 49
รูปที่ 2.32 ลักษณะโครงสร้างของเทอร์โมคับเปิล ..... 53
รูปที่ 2.33 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส ..... 56
รูปที่ 3.1 แผนผังของการออกแบบเครื่องหลอมพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ..... 60
รูปที่ 3.2 Diode Bridge Rectifier ขนาด 800V 35A ..... 61
รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแส 1 เฟสและ LC Filter ..... 62
รูปที่ 3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ..... 63
รูปที่ 3.5 วงจรการทำงานและลักษณะคลื่นแรงดัน กระแสเอาท์พุท ..... 64
รูปที่ 3.6 คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท กรณีคลื่น PDM 50/100 ..... 66
รูปที่ 3.7 คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท กรณีคลื่น PDM 100/200 ..... 67
รูปที่ 3.8 คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท กรณีคลื่น PDM 150/300 ..... 67
รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของการออกแบบวงจรควบคุม ..... 69
รูปที่ 3.10 ลักษณะการออกแบบเบ้าหลอมพลาสติก ..... 71
รูปที่ 3.11 การจำลองการทำงานบนโปรแกรม Psim ..... 72
รูปที่ 3.12 รูปคลื่นสัญญาณขับเกต PDM=60% ..... 73
รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด PDM=60% ..... 73
รูปที่ 3.14 กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ PDM=60% ..... 74
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นสัญญาณขับเกต PDM=80% ..... 74
รูปที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด PDM=80% ..... 74

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.17 กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ PDM=80% ... 75
รูปที่ 3.18 รูปคลื่นสัญญาณขับเกต PDM=100% ... 75
รูปที่ 3.19 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด PDM=100% ... 75
รูปที่ 3.20 กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ PDM=100% ... 76
รูปที่ 4.1 การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ... 78
รูปที่ 4.2 กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมพลาสติกแต่ละชนิด ... 80
รูปที่ 4.3 การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ... 81
รูปที่ 4.4 กำลังไฟฟ้าอินพุต,กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมพลาสติกแต่ละชนิด
ที่ความหนาแน่นพัลส์ 60% 80% และ 100% ... 82
รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าอินพุตและค่าตัวประกอบกำลังที่ความหนาแน่นพัลส์ 100 % ... 83
รูปที่ 4.6 แรงดันและกระแสเอาท์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 100 % ... 84
รูปที่ 4.7 ผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกของกระแส ที่ความหนาแน่นพัลส์ 100 % ... 84
รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าอินพุตและค่าตัวประกอบกำลังที่ความหนาแน่นพัลส์ 80 % ... 85
รูปที่ 4.9 แรงดันและกระแสเอาท์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 80 % ... 85
รูปที่ 4.10 ผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกของกระแส ที่ความหนาแน่นพัลส์ 80 % ... 85
รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าอินพุตและค่าตัวประกอบกำลังที่ความหนาแน่นพัลส์ 60 % ... 86
รูปที่ 4.12 แรงดันและกระแสเอาท์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 60 % ... 86
รูปที่ 4.13 ผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกของกระแส ที่ความหนาแน่นพัลส์ 60 % ... 87
รูปที่ 4.14 การทดสอบหลอมพลาสติกด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อในงานอุตสาหกรรม ... 88
รูปที่ 4.15 การทดสอบหลอมพลาสติกด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำในงานอุตสาหกรรม ... 89
รูปที่ 4.16 แผนภูมิเปรียบเทียบการใช้กำลังงานของฮีตเตอร์แต่ละชนิด ... 90

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|---|---|
| Cp | ค่าความร้อนจำเพาะ |
| $f$ | ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz) |
| $f_r$ | ความถี่เรโซแนนซ์, เฮิรตซ์ |
| I | กระแสไฟฟ้า, แอมป์ |
| $I_{ref}$ | กระแสที่ไหลผ่านวงจรเรียงกระแส, แอมป์ |
| kW | หน่วยกำลังไฟฟ้า, กิโลวัตต์ |
| kWh | หน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้า, กิโลวัตต์ชั่วโมง |
| Lc | ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของขดลวดเหนี่ยวนำ, เฮนรี่ |
| Lv | ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของบาเรล, เฮนรี่ |
| N | จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ, รอบ |
| P | กำลังไฟฟ้า, กิโลวัตต์ |
| P.F. | ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า |
| $P_{in}$ | กำลังไฟฟ้าอินพุทสูงสุด, วัตต์ |
| Q | กำลังไฟฟ้าเสมือน, วาร์ |
| R | ค่าความต้านทาน, โอห์ม |
| Rc | ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ, โอห์ |
| Rv | ค่าความต้านทานของขดลวด, โอห์ม |
| $R_{vp}$ | ค่าความต้านทานของโหลดบาเรลทางด้านปฐมภูมิ, โอห์ม |
| S | กำลังไฟฟ้าปรากฏ, โวลต์แอมป์ |
| $T_s$ | คาบเวลาของความถี่ในระบบ, วินาที |
| V | ค่าแรงดันไฟฟ้า, โวลต์ |
| $V_{in}$ | แรงดันอินพุท, โวลต์ |
| $X_s$ | ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด, โอห์ม |
| $\rho$ | สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะ ($\Omega \cdot m$) |
| $\mu_r$ | ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ |

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน สิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ ส่วนมาก ทำจากพลาสติก หรือมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบ เช่น ภาชนะต่างๆ บรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า วัสดุก่อสร้าง รถยนต์ ฯลฯ จนกล่าวได้ว่าพลาสติกเป็นส่วนหนึ่งของการดำเนินชีวิต ในปี พ.ศ. 2557 มีปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกประมาณ 2.5 ล้านตันต่อปีและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีโรงงานกระจายอยู่ทั่วประเทศรวมทั้งสิ้นกว่า 4,800 แห่ง กระบวนการหลอมพลาสติกโดยส่วนใหญ่ นิยมใช้ขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดหรืออีกชื่อหนึ่งคือขดลวดความร้อนแบบกระบอก (Band Heater) ในการให้ความร้อน ซึ่งสัดส่วนการใช้พลังงานในส่วนนี้พบว่า พลังงานที่เป็นส่วนของการหลอมพลาสติกใช้เพียงร้อยละ 10-20 พลังงานสะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ถึงร้อยละ 60 อีกร้อยละ 20 เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิวของบาเรล ความร้อนปริมาณนี้นอกจากสิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังทำให้พื้นที่ทำงานร้อนขึ้น [1]

จากการศึกษาค้นคว้ากระบวนการให้ความร้อนต่าง ๆ ทั่วไป พบว่าการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งทำให้ความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวอุปกรณ์โดยตรงนั้น ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนโดยทั่วไป แต่ระบบเหนี่ยวนำความร้อนส่วนใหญ่ที่ผ่านมานั้นถูกสร้างขึ้นด้วยวงจรควบคุมที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก

งานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้การเหนี่ยวนำความร้อนมาใช้ในกระบวนการหลอมพลาสติกโดยเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดความร้อนขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดและการใช้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อทดสอบถึงประสิทธิภาพการทำความร้อน เพื่อที่เป็นข้อมูลในเชิงพาณิชย์ในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนหลอมพลาสติกซึ่งมีอยู่มากมาย อีกทั้งจากปัญหาที่พบในเรื่องของขนาดและวงจรควบคุม จึงเป็นประเด็นหลักและเป็นปัญหาที่นำมาศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ โดยที่ระบบควบคุมถูกลดรูปของตัวประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้ก็เนื่องจากในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไมคอนโทรลเลอร์นั้นมีศักยภาพที่สูงมากขึ้น ทั้งในเรื่องของขนาดและหน่วยความจำ ความรวดเร็วตลอดจนคำสั่งในการทำงาน และฟังก์ชั่นในการใช้งานที่จำเป็นอีกด้วย

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทย

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาประยุกต์ใช้ในการหลอมพลาสติก

1.2.3 เพื่อศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมระบบการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะลดขนาดของวงจรทางด้านฮาร์ดแวร์ลง

1.2.4 เพื่อศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยจำนวนความหนาแน่นพัลส์ มาใช้ควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

กระบวนการหลอมพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบันอุปกรณ์ในการให้ความร้อนนั้นใช้ขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดซึ่งจากข้อมูลของกรมอุตสาหกรรมที่ได้ทดสอบพบว่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมของพลาสติกจริงๆ ใช้เพียงร้อยละ 10-20 และจากงานวิจัยหรือบทความต่างๆในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้นได้ทดสอบถึงประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่ดีกว่าขดลวดความร้อนแบบขดลวด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำขดลวดแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงมาทดสอบประสิทธิภาพในการให้ความร้อนเมื่อเทียบกับขดลวดความร้อนแบบขดลวดว่ามีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนที่ดีกว่า

การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบคือ การควบคุมด้วยการปรับความถี่ การควบคุมมุมเฟสชิพและการควบคุมจำนวนความหนาแน่นพัลส์ ซึ่งในเรื่องของการเหนี่ยวนำความร้อนนั้นการควบคุมส่วนใหญ่มักจะถูกควบคุมตามปริมาณอุณหภูมิที่กำหนดไว้ของการเหนี่ยวนำความร้อนเพียงชั่วขณะ ในส่วนของการหลอมพลาสติกต้องควบคุมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานและใช้พลังงานสูง เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่หรือมีค่าผิดพลาดน้อยเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบเครื่องหลอมพลาสติกแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนแบบขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดที่กำลังไฟฟ้าอินพุตขนาด 1 กิโลวัตต์ จากแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส 220 โวลต์

1.4.2 วงจรกำลังสำหรับเครื่องหลอมพลาสติกเป็นแบบเต็มคลื่นใช้เทคนิคสวิตช์ที่แรงดันศูนย์

1.4.3 ทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบระหว่างขดลวดความร้อนแบบเข็มขัดและการใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนในการทำความร้อนของเตาหลอมที่ช่วงอุณหภูมิ 100-300 $^{\circ}C$

## 1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1.5.1 ศึกษาเรียนรู้งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ความรู้พื้นฐานตลอดจนความก้าวหน้าในด้านนวัตกรรมและงานวิจัยทางด้านการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่มีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน

1.5.2 ศึกษาข้อมูล โครงสร้างตลอดจนหลักการทำงาน ของการเหนี่ยวนำในรูปแบบต่าง ๆ

1.5.3 ศึกษาข้อมูลกระบวนหลอมพลาสติกในปัจจุบันจากข้อมูลอ้างอิงของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

1.5.4 ศึกษาหลักการทำงานของโปรแกรม Power Sim เพื่อจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรกำลังในวงจรเหนี่ยวนำความร้อนแบบต่างๆ

1.5.5 ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ภาษาซี และกระบวนการควบคุมในการควบคุมอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม

1.5.6 ออกแบบและสร้างวงจรกำลังเพื่อใช้ในการทดลองและเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1.5.7 ออกแบบและสร้างวงจรควบคุมสำหรับวงจรขับสัญญาณสวิตช์ การตรวจเช็คอุณหภูมิเพื่อสร้างสัญญาณขับเกต ในการควบคุมแบบลูปปิด

1.5.8 เก็บผลการทดสอบการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการให้ความร้อนแบบขดลวดเข็มขัด (Band Heater) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heater)

1.5.9 ติดตั้งชุดทดสอบในระบบงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เข้ามาศึกษาการใช้งานและการประหยัดพลังงานได้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.6.1 ได้รับความรู้ความเข้าใจในกระบวนหลอมพลาสติกในอุตสาหกรรมการผลิตและการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทย

1.6.2 ได้รับความรู้ความเข้าใจในกระบวนการเหนี่ยวนำความร้อนและนำมาประยุกต์ใช้ในการหลอมพลาสติก

1.6.3 ได้รับความรู้ความเข้าใจในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมระบบเหนี่ยวนำความร้อน

1.6.4 เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหลอมพลาสติกให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้นและลดการใช้พลังงานทางไฟฟ้า

1.6.5 ได้รับความรู้ความเข้าใจในการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีควบคุมจำนวนความหนาแน่นพัลส์ ให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

## 1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.7.1 ZVS (Zero Voltage Switch) คือ เทคนิคการสวิตช์ในขณะที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์

1.7.2 Resonance คือ ส่วนของวงจรโหลด จะประกอบด้วยส่วนของค่าตัวเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน โดยทั่วไปแล้ววงจรโหลดเรโซแนนซ์ ใช้อยู่ 3 ประเภท คือการต่อวงจรโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและการต่อวงจรโหลดเรโซแนนซ์แบบขนานและวงจรแบบกึ่งเรโซแนนซ์

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาข้อมูลต่างๆ เพื่อการประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการหลอมพลาสติกประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ เพื่อเป็นการนำข้อมูลทฤษฎีที่ได้นั้น ไปใช้ในการออกแบบวงจรและโครงสร้างในส่วนต่างๆ ตลอดจนการเก็บผลการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่สำคัญคือ

1) กระบวนการหลอมพลาสติก
2) หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า
3) หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน
4) การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
5) อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิและอุปกรณ์ตรวจจับกระแส
6) วงจรคอนเวอร์เตอร์และเทคนิคการสับสวิตช์
7) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

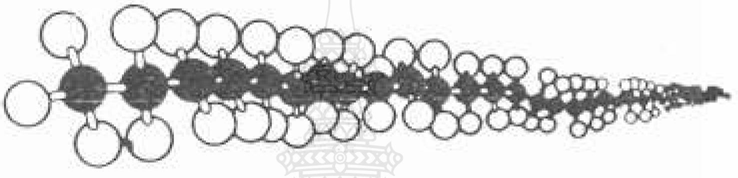
## 2.1 กระบวนการหลอมพลาสติก [1]

ปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวันของเรา สิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ ส่วนมากทำจากพลาสติก หรือมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบ เช่น ภาชนะต่างๆ บรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า วัสดุก่อสร้าง รถยนต์ ฯลฯ จนกล่าวได้ว่าพลาสติกเป็นส่วนหนึ่งของการดำเนินชีวิต

อุตสาหกรรมพลาสติกจึงเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญในปี 2557 มีโรงงานกระจายอยู่ทั่วประเทศรวมทั้งสิ้นกว่า 4,800 แห่ง ตั้งแต่โรงงานตึกแถวไปจนถึงโรงงานขนาดใหญ่ ในปี พ.ศ. 2544-2546 มีปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกประมาณ 2.5 ล้านตันต่อปี มีการใช้แรงงานจำนวนมากประมาณ 169,026 คน และอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกกว่า 1 ล้านคน มีมูลค่าการส่งออกถึง 1.3 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ 2546 หรือคิดเป็นร้อยละ 40 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ และมีมูลค่าการนำเข้าผลิตภัณฑ์พลาสติก เม็ดพลาสติกและเครื่องจักรที่สูงมากเช่นเดียวกัน อุตสาหกรรมพลาสติกมีอัตราการเติบโตในปี พ.ศ. 2546 ถึงร้อยละ 6 ในการผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยการผลิตหลักอย่างหนึ่ง จึงเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2546]

2.1.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาเมื่อประมาณร้อยกว่าปีมานี้ มีโครงสร้างเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งอะตอมของคาร์บอนถูกร้อยกันเป็นสายยาวเหยียดยาวกว่าในสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น โพรเพน (C3H8) มีคาร์บอน 3 อะตอม ขณะที่โพลิเอทาธิลีน หรือ PE (C100 H202)มีคาร์บอน 100 อะตอม อะตอมของไฮโดรเจนยึดจับเป็นกิ่งออกจากสายของคาร์บอน ปัจจุบันเราสามารถสังเคราะห์พลาสติกชนิดต่างๆ ได้มากมายจากการแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนด้วยสารอื่น เช่น คลอรีนเป็นพลาสติกประเภท PVC เมทธิลเป็นพลาสติกประเภท PP เป็นต้น



**รูปที่ 2.1** ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกประเภท PE [1]

ด้วยโครงสร้างดังกล่าวทำให้พลาสติกมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีคุณสมบัติเป็นของแข็งในสภาวะใช้งานและอ่อนตัวเป็นของไหลเมื่อแปรรูป ซึ่งการแปรรูปจะใช้ความร้อนหรือแรงอัดหรือทั้งสองอย่างพร้อมกันพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ได้แก่พลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่หลังจากแปรรูปแล้วได้ โดยคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กันมากได้แก่ โพลิเอทิลีน (PE) โพลิโปรปิลีน (PP) พีวีซี (PVC) อะคริลิค ฟลูออโรคาร์บอน ไนล่อน เป็นต้น ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของพลาสติกเหล่านี้ ได้แก่ ป้ายโฆษณา เชือกไนล่อน ถุง ภาชนะ ของเล่น สายไฟ กล่องโฟม หมวกกันน็อค ฯลฯ

2. เทอร์โมเซตติ้ง (Thermosettings) ได้แก่พลาสติกที่เมื่อผ่านการแปรรูปแล้วจะคงรูปถาวรไม่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายของโมเลกุล การให้ความร้อนหลังแปรรูปจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ และหากให้ความร้อนต่อไปจะกลายเป็นถ่านดำ พลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติ้งที่เรานำมาใช้กันมากได้แก่ เมลามีน อีพอกซี่ นิโนลิค โพลีเอสเตอร์ ซิลิโคน ยูรีเทน เป็นต้น ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากพลาสติกเทอร์โมเซตติ้งได้แก่ ภาชนะเมลามีน ไฟเบอร์กลาส อุปกรณ์ไฟฟ้า เส้นใยสังเคราะห์กาว ฯลฯ

2.1.2 การรีไซเคิลพลาสติก

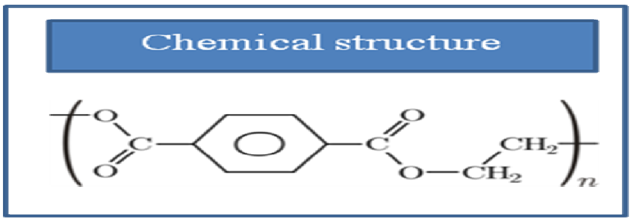
พลาสติกที่ใช้กันมีหลายชนิด พลาสติกที่รีไซเคิลได้ หลักๆ เป็น เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่ง เป็นพลาสติกที่อ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง พลาสติกประเภทนี้สามารถนำมาหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ โดยเราสังเกตุได้จาก ก้นขวดซึ่งมักจะใส่สัญลักษณ์ว่า รีไซเคิลได้ และใส่หมายเลข* ชนิดของพลาสติกนั้นไว้

การนำพลาสติกกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่นั้นประเด็นสำคัญอยู่ที่การแยกประเภทของพลาสติกก่อนที่จะนำไปรีไซเคิล และการกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป โดยปกติแล้วพลาสติกผสมเกือบทุกประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เนื่องจากพอลิเมอร์ที่แม้จะมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมือนกัน แต่ไม่สามารถเข้ากันได้เสมอไป (Incompatible) ตัวอย่างเช่น โพลีเอสเตอร์ ที่ใช้ทำขวดพลาสติก จะเป็นโพลีเอ-สเตอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า เมื่อเทียบกับโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเส้นใย (Fiber)

นอกจากนี้ ยังมีสารเติมแต่งอีกประเภท ได้แก่ พวก Compatibilizer ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการรีไซเคิลของพลาสติก สารเติมแต่งนี้จะช่วยให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์ 2 ประเภทที่เข้ากันไม่ได้ ดังนั้น Compatibilizer จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรีไซเคิล ตัวอย่างเช่น การใช้ Chlorinated PE สำหรับพลาสติกผสม PE/PVC

กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกเริ่มต้นด้วยการแยกพลาสติกชนิดต่างๆ ออกจากกัน เนื่องจากพลาสติกต่างชนิดกันมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่น ความแข็ง ความนิ่ม ความใส เมื่อพลาสติกแต่ละชนิดถูกแยกออกจากกันแล้ว จะถูกบีบให้แบนแล้วมัดรวมกันเป็นก้อนเพื่อแยกส่งไปยังโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลที่โรงงานพลาสติกแต่ละชนิดจะถูกนำมาบดให้เป็นชิ้นเล็ก และล้างทำความสะอาดในบ่อน้ำขนาดใหญ่ ในขั้นตอนนี้ฝุ่นและสิ่งสกปรกจะถูกกำจัดออกไป หลังจากนั้นชิ้นพลาสติกจะถูกทำให้แห้งโดยการตากแดดหรือใช้อากาศร้อน ป้ายกระดาษหรือฟิล์มที่ติดมากับชิ้นพลาสติกจะถูกเป่าแยกออกมา จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการหลอมชิ้นพลาสติกผ่านเครื่องอัดรีด (extruder) ออกมาเป็นเส้น ก่อนตัดให้เป็นเม็ดเล็กๆ บรรจุลงกล่อง เพื่อส่งไปยังโรงงานขึ้นรูปพลาสติกให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ หากการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่นี้ใช้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลทั้งหมด ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้จะมีสมบัติทางกายภาพลดลง บางครั้งโรงงานจะนำเม็ดพลาสติกใหม่มาผสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดีขึ้น ตัวอย่างพลาสติกรีไซเคิลเรียงตามตัวเลขระบุที่ใต้ขวด หรือภาชนะ

ก) สัญลักษณ์

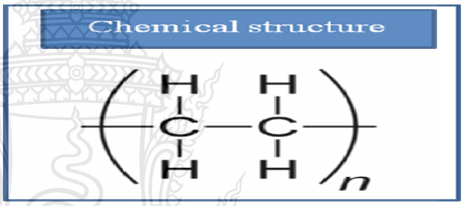



ข) โครงสร้างอะตอม

**รูปที่ 2.2** สัญลักษณ์สำหรับพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) [1]

1) โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET, PETE) ใช้ทำขวดบรรจุน้ำดื่ม ขวดบรรจุของดอง ขวดแยม ขวดน้ำมันพืช ถาดอาหารสำหรับเตาอบ และเครื่องสำอาง สามารถนำมารีไซเคิลเป็นเส้นใย สำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม ใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน ถุงหูหิ้ว กระเป๋า ขวด

ก) สัญลักษณ์

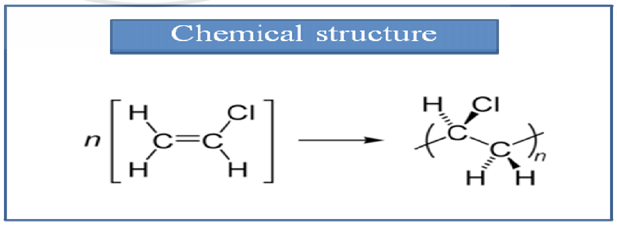



ข) โครงสร้างอะตอม

**รูปที่ 2.3** พลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) [1]

2) โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density polyethylene, HDPE) ใช้ทำขวดนม น้ำผลไม้ โยเกิร์ต บรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาด แชมพูสระผม แป้งเด็ก และถุงหูหิ้ว สามารถนำมารีไซเคิลเป็นขวดใส่น้ำยาซักผ้า ขวดน้ำมันเครื่อง ท่อ ลังพลาสติก ไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวน

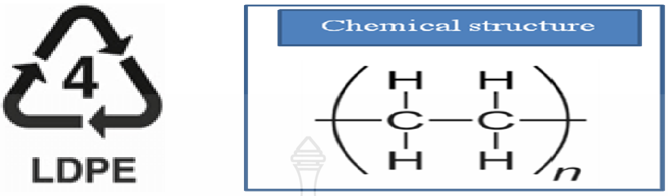
ก)สัญลักษณ์




ข) โครงสร้างอะตอม

**รูปที่ 2.4** พลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) [1]

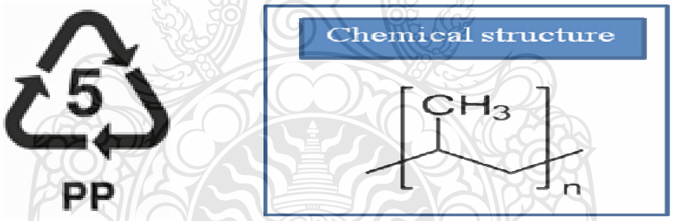
3) โพลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) ใช้ทำท่อน้ำประปา สายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ม่านในห้องอาบน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ ขวดใส่แชมพูสระผม ประตู หน้าต่าง วงกล และหนังเทียม สามารถนำมารีไซเคิลเป็นท่อน้ำประปาหรือรางน้ำ




ก) สัญลักษณ์ ข) โครงสร้างอะตอม

**รูปที่ 2.5** พลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [1]

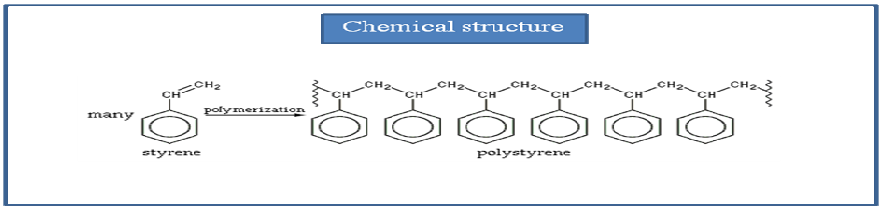
4) โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ใช้ทำฟิล์มห่ออาหารและห่อของ ถุงใส่ขนมปัง ถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหาร สามารถนำมารีไซเคิลเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหูหิ้ว ถังขยะ กระเบื้องปูพื้น เฟอร์นิเจอร์ แท่งไม้เทียม




ก) สัญลักษณ์ ข) โครงสร้างอะตอม

**รูปที่ 2.6** พลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน (PP) [1]

5) โพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ชาม จาน ถัง ตะกร้า กระบอกใส่น้ำแช่เย็น ขวดซอส แก้วโยเกิร์ต ขวดบรรจุยา สามารถนำมารีไซเคิลเป็นกล่องแบตเตอรี่ในรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชนและกรวยสำหรับน้ำมัน ไฟท้าย ไม้กวาดพลาสติก แปรง




ก)สัญลักษณ์ ข) โครงสร้างอะตอม

**รูปที่ 2.7** พลาสติกชนิดโพลิสไตรีน (PS) [1]

6) โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ใช้ทำภาชนะบรรจุของใช้เช่น เทปเพลง สำลี หรือของแห้ง เช่น หมูแผ่น หมูหยอง และคุ๊กกี้ นอกจากนั้นยังนำมาทำโฟมใส่อาหาร ซึ่งจะเบามาก สามารถนำมารีไซเคิลเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวิดีโอ ไม้บรรทัด กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ แผงสวิตช์ไฟ ฉนวนความร้อน ถาดใส่ไข่ เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ

**รูปที่ 2.8** สัญลักษณ์พลาสติกชนิดอื่นๆ [1]

7) พลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่พลาสติกทั้ง 6 กลุ่มข้างต้น หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกหลายชนิด ในขั้นตอนของการบดพลาสติกเพื่อให้มีขนาดเล็กลง ไม่ไปอุดตันในกระบวนการรีไซเคิลนั้น จะทำให้พลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติความแข็งแรงทางกายภาพลดลง เนื่องจากแรงเฉือนเชิงกล (Mechanical Shear) ในเครื่องบดไปทำลายโซ่ของโพลิเมอร์ให้แตกออก ทำให้ความยาวของโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลง ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลง นอกจากนั้นเรื่องของความบริสุทธิ์ก็มีความสำคัญต่อสมบัติของพลาสติกแต่ละชนิดในการเลือกเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หากใช้กระบวนการแยกพลาสติกที่ไม่ดีพอ อาจทำให้ไม่ได้พลาสติก รีไซเคิลที่บริสุทธิ์

**ตารางที่ 2.1** คุณลักษณะของพลาสติกแต่ละประเภท

| | โพลิเอทิลีน เทเรพทาเลต (PET) | โพลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (HDPE) | โพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) | โพลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ (LDPE) | โพลิโพรพิลีน (PP) | โพลิสไตรีน (PS) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ความใส | ใส | ขุ่น | ใส | ขุ่น | ขุ่น | ใส |
| การป้องกันความชื้น | พอใช้ถึงดี | ดีถึงดีมาก | พอใช้ | ดี | ดีถึงดีมาก | ไม่ดีถึงพอใช้ |
| การป้องกันออกซิเจน | ดี | ดี | ดี | ไม่ดี | ไม่ดี | พอใช้ |
| อุณหภูมิสูงสุด ($^{\circ}$C) | 260 | 120 | 80 | 115 | 165 | 240 |
| ความแข็ง | ปานกลางถึงสูง | ปานกลาง | ปานกลางถึงสูง | ต่ำ | ปานกลางถึงสูง | ปานกลางถึงสูง |
| ความทนทานต่อการกระแทก | ดีถึงดีมาก | ดีถึงดีมาก | พอใช้ถึงดี | ดีมาก | พอใช้ถึงดี | พอใช้ถึงดี |
| ความทนทานต่อความร้อน | ไม่ดีถึงพอใช้ | ดี | ไม่ดีถึงพอใช้ | พอใช้ | ดี | พอใช้ |
| ความทนทานต่อความเย็น | ดี | ดีมาก | พอใช้ | ดีมาก | ไม่ดีถึงพอใช้ | ไม่ดี |
| ความทนทานต่อแสงแดด | ดี | พอใช้ | พอใช้ถึงดี | พอใช้ | พอใช้ | ไม่ดีถึงพอใช้ |

2.1.3 ขั้นตอนการผลิตเม็ดพลาสติก

1. การตรวจขยะพลาสติก (Inspection)

ขั้นตอนแรกนี้เป็นการแยกสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่ติดอยู่กับขยะพลาสติกออก เช่น เศษหิน ทราย หรือแก้ว ตลอดจนการแยกขยะพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ออกมา การแยกสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออกจากกันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1.1 วิธี Gravimetric ซึ่งอาศัยความแตกต่างของมวลหรือน้ำหนัก

1.2 วิธี Densiometric ซึ่งอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งวิธีหลังนี้จะให้ประสิทธิภาพในการแยกที่ดีกว่า เนื่องจากความหนาแน่นเป็นค่าเฉพาะของสาร ดังนั้นขนาดของวัสดุจะไม่มีผลต่อการแยกวิธีนี้

1.3 วิธีการลอยตัวในของเหลว (Direct Flotation)

วิธีนี้ทำการแยกวัสดุโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น โดยวัสดุผสมจะถูกส่งผ่านเข้าไปในแท็งค์ หรือกระบอกซึ่งบรรจุของเหลว ที่มีความหนาแน่นมากกว่าส่วนประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด เพื่อให้ส่วนประกอบนั้นลอยขึ้นมาส่วนบน และสามารถแยกออกไปได้ง่าย

นอกจากนี้ยังมีวิธีแยกโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic) ในการแยกโลหะที่เป็นเหล็กออกมา แต่ถ้าเป็นโลหะประเภทอื่น นิยมใช้วิธีไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic) ซึ่งจะทำการแยกโดยอาศัยความแตกต่างในการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยอาศัยหลักที่ว่า วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า จะสูญเสียประจุได้รวดเร็วกว่าวัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้นเมื่อผ่านวัสดุที่ถูกชาร์จ ด้วยประจุไฟฟ้าไปบนวัตถุที่เป็นกลาง แล้วผ่านไปบนวัตถุที่มีประจุตรงข้าม วัสดุที่เป็นฉนวนจะถูกดึงดูดได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีประจุตกค้างอยู่มากกว่า

2. การตัดและล้าง (Chopping and Washing)

ในขั้นตอนนี้พลาสติกจะถูกตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ และล้างให้สะอาด ขั้นตอนนี้ฝุ่นและสิ่งสกปรกจะถูกกำจัดออกไป ในขั้นตอนของการบดพลาสติกเพื่อให้มีขนาดเล็กลง ไม่ไปอุดตันในกระบวนการรีไซเคิลนั้น จะทำให้พลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติความแข็งแรงทางกายภาพลดลง เนื่องจากแรงเฉือนเชิงกล (Mechanical Shear) ใน เครื่องบดไปทำลายโซ่ของโพลิเมอร์ให้แตกออก ทำให้ความยาวของโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลลดลง ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกลดลง นอกจากนั้นเรื่องของความบริสุทธิ์ก็มีความสำคัญต่อสมบัติของพลาสติกแต่ละชนิดในการเลือกเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หากใช้กระบวนการแยกพลาสติกที่ไม่ดีพอ อาจทำให้ไม่ได้พลาสติก รีไซเคิลที่บริสุทธิ์

3. การลอยในน้ำ (Flotation Tank)

ถ้าขยะพลาสติกปนกันมาหลายประเภท ซึ่งเรามีวิธีการคัดแยกพลาสติกตามประเภทอย่างง่ายๆ โดยการนำมาลอยน้ำ บางชิ้นจะจมและบางชิ้นสามารถลอยน้ำได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของพลาสติกนั้นๆ

4. ทำให้แห้ง (Drying)

หลังจากผ่านขั้นตอนการล้างและลอยในน้ำแล้ว พลาสติกจะถูกนำมาเป่าด้วยลมร้อนเพื่อทำให้แห้ง

5. หลอมด้วยความร้อน (Melting)

จากนั้นนำขยะพลาสติกที่ได้มาหลอมใหม่โดยใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก

6. การกรอง (Filtering)

พลาสติกเหลวที่ได้จะถูกส่งผ่านแผ่นกรองที่มีขนาดพอเหมาะ เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ยังตกค้างอยู่ จากนั้นพลาสติกเหลวจะผ่านเข้าสู่เครื่องอัดรีด (Extruder) ออกมาเป็นเส้น

7. การทำเม็ดพลาสติก (Pelletizing)

ขั้นตอนนี้เส้นพลาสติกจะถูกตัดให้เป็นเม็ดเล็กๆ บรรจุลงกล่องเพื่อส่งไปยังโรงงานขึ้นรูปพลาสติกให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่โดยใช้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลทั้งหมดจะทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้จะมีสมบัติทางกายภาพลดลง บางครั้งโรงงานจะนำเม็ดพลาสติกใหม่มาผสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดีขึ้น

2.1.4 อุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทย

อุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศ เริ่มจากการนำเข้าเครื่องจักรและเม็ดพลาสติกเพื่อแปรรูป ประมาณปีพ.ศ. 2512 ปริมาณการใช้งานพลาสติกได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ต่อมาเมื่อมีการค้นพบก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทยประมาณปี พ.ศ. 2524 รัฐบาลจึงได้จัดตั้งบริษัทปิโตรเคมีแห่งชาติ (NPC) ในปี พ.ศ. 2532 บริษัท ไทยโอลิฟินด์ จำกัด และบริษัทไทยอโรมาติกส์ จำกัด ขึ้นในปี พ.ศ. 2536 บริษัทเหล่านี้นำผลิตภัณฑ์จากก๊าซธรรมชาติจาก ปตท. มาผลิตเป็นโอลิฟินด์ และอโรเมติกส์ป้อนให้กับผู้ผลิตเม็ดพลาสติกภายในประเทศ นับเป็นจุดเริ่มต้นของการผลิตพลาสติกภายในประเทศ

**ตารางที่ 2.2** จำนวนโรงงานในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก ในปี พ.ศ. 2546

| **ประเภทผลิตภัณฑ์** | **จำนวนโรงงาน** |
|---|---|
| เครื่องใช้ เครื่องเรือน และชิ้นส่วนพลาสติก | 1,843 |
| เสื่อ พรม | 17 |
| ภาชนะบรรจุ เช่น ถุง กระสอบ | 1,288 |
| ทำเม็ดพลาสติก แท่ง ท่อ หลอด แผ่น | 719 |
| รองเท้า ชิ้นส่วนรองเท้า | 185 |
| การบดย่อย โม่ พลาสติก | 155 |

2.1.5 การหลอมพลาสติก

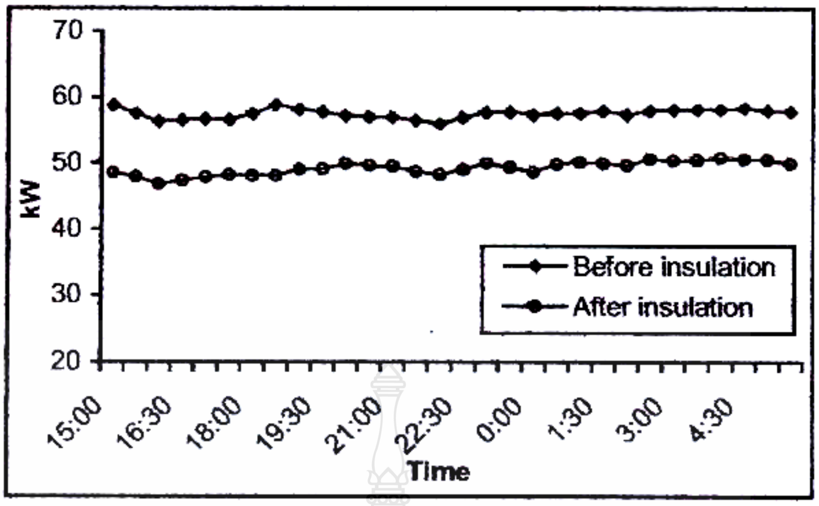
เครื่องแปรรูปพลาสติก จะใช้ฮีตเตอร์แบบเข็มขัด (Band Heaters) รัดรอบบาเรล และบริเวณดาย มีทั้งเฟสเดียว และ 3 เฟส ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งโดยทั่วไปจะมี heater 4-6 ชุด แบ่งเป็น กลุ่มหน้า กลุ่มกลาง กลุ่มท้าย ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้มักเป็นแบบแผ่น ขนาด 1,000 -1,500 วัตต์/แผ่น ลวดฮีตเตอร์ (Heater): ซึ่งเรียกว่า ลวด Nikrothal 80 หรือ R80 โดยส่วนผสมของนิเกิล 80% และโครเมียม 20%

ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส โดยมีคุณสมบัติเหนียว และทนความร้อนได้สูงถึง 1400 องศาเซลเซียสหุ้มอยู่รอบกระบอกสกรูหรือ บาเรล การควบคุมอุณหภูมิมักเป็นแบบปิดเปิด (ON-OFF) อุณหภูมิที่ตั้งอยู่ในช่วง 170-200 °C ขึ้นกับชนิดพลาสติก แต่ละกลุ่มจะมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่เรียกว่า เธอร์โมสตัทซ์ ( Thermostat ) ซึ่งสามารถปรับตั้งอุณหภูมิของแต่ละกลุ่มได้ความละเอียด หรือความแม่นยำส่วนใหญ่ ไม่ควรเกิน 10 องศาเซลเซียส สำหรับการควบคุมความร้อนที่ดีสามารถจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ เมื่อพิจารณาไฟฟ้าที่ป้อนให้ฮีตเตอร์หุ้มบาเรลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง15 เซนติเมตร ความยาว 1 เมตร อุณหภูมิผิว 140 °C พบว่า เป็นส่วนของการหลอมพลาสติกเพียงร้อยละ 10-20 และสะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ ร้อยละ 60 ที่เหลือร้อยละ 20 เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิวบาเรล ความร้อนปริมาณนี้นอกจากสิ้นเปลืองพลังงาน แล้วยังทำให้พื้นที่ทำงานร้อนขึ้น อนึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพความร้อน ( Thermal Efficiency )โดยการหุ้มฉนวนภายนอกกระบอกพลาสติก สามารถช่วยลดการทำงานของ Heater ไฟฟ้าลงได้ เทียบเป็นการประหยัดได้ ประมาณ 20%

ก. ลักษณะฮีตเตอร์ ข. สัดส่วนพลังงานความร้อน

**รูปที่ 2.9** ฮีตเตอร์เข็มขัด [1]

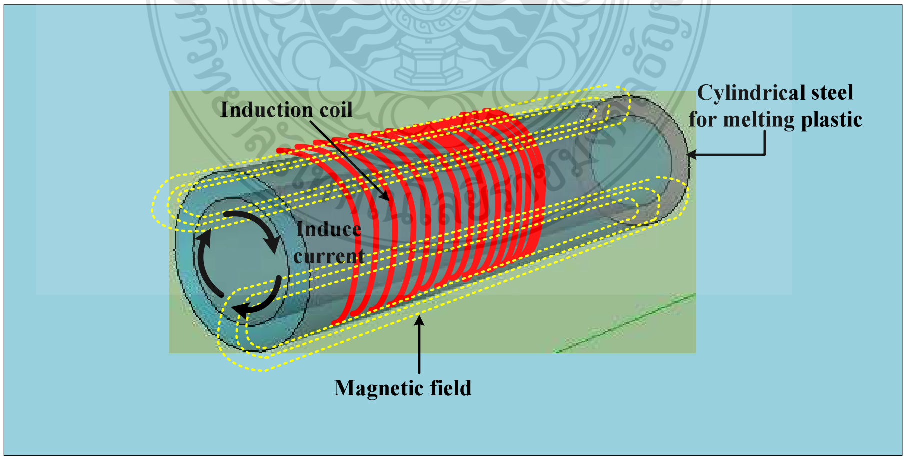
ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของบาเรล สามารถลดลงถึง 80% ได้ โดยการหุ้มฉนวน ฉนวนที่ใช้อาจใช้เซรามิคไฟเบอร์ ความหนา 1-1.5 นิ้ว ในรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของพลังไฟฟ้าที่ลดลงจากการหุ้มฉนวน




**รูปที่ 2.10** การใช้พลังงานของเครื่องก่อนและหลังการหุ้มฉนวนเครื่องฉีดพลาสติกชุดหนึ่ง [1]

## **2.2 หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า** [2]

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 2.11 เมื่อนำขดลวดมาพันรอบกับบาเรลที่ถูกหุ้มฉนวนแล้ว ความร้อนจะเกิดขึ้นที่บาเรลโดยตรง ซึ่งอาศัยกระแสไหลวนในบาเรล ทำให้บาเรลร้อนได้ในเวลาอันรวดเร็ว มีหลักการพิจารณาเหมือนกับหม้อแปลง เพื่อหาค่าอินดักแตนซ์และค่าความต้านทานต่างๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิด จึงเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้โลหะของบาเรล ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต่อไป




**รูปที่ 2.11** การเกิดความความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

หลักการให้ความร้อนเหนี่ยวนำเมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction coil) ดังรูปที่ 2.11 ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง กับบาเรล ถ้าบาเรลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferromagnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับบาเรลจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ในบาเรลเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บาเรล และถ่ายเทความร้อนไปยังพลาสติกที่อยู่ภายในบาเรล ทำให้พลาสติกร้อนได้ในที่สุด ประสิทธิภาพต่อการทำความร้อนมีประสิทธิภาพที่สูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นกับบาเรลโดยตรง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลง ดังรูปที่ 2.12 โดยบาเรลทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวดเพียง 1 รอบ โดยมี

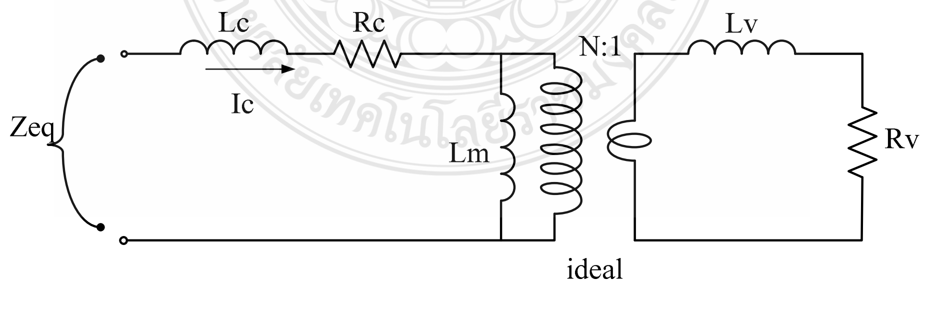
- ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของบาเรล ( $L_v$ )
- ค่าความต้านทานของบาเรล ( $R_v$ )

ส่วนขดลวดทางด้านปฐมภูมิสามารถแทนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำโดยมี

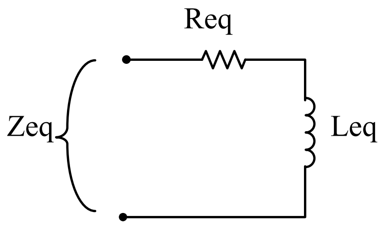
- ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L_c$ )
- ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $R_c$ )
- ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก ( $L_m$ )

ซึ่งค่า $L_m$ มีค่าน้อย เมื่อรวม $R_v$ และ $L_v$ ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับทางด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม $Z_{eq}$ ประกอบด้วย $R_{eq}$ และ $L_{eq}$ ดังรูปที่ 2.12

ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลนี้สามารถเขียนแทนด้วยวงจรเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า $L_{eq}$ และความต้านทานเทียบเท่า $R_{eq}$




**รูปที่ 2.12** วงจรเทียบเท่าของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กกับบาเรล [2]




**รูปที่ 2.13** อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวดเหนี่ยวนำกับบาเรล [2]

ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลสามารถเขียนแทนด้วยวงจรอนุกรมเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า และความต้านทานเทียบเท่าสามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$\mathrm{Re}\,q = Rc + N^2 Rv \tag{2.1}$$

เมื่อ $R_{vp} = N^2 R_v$ จะได้

$$R_{eq} = R_c + R_{vp} \tag{2.2}$$

$$L_{eq} = L_c + N^2 L_v \tag{2.3}$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

$R_c$ คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหรือขดลวดเหนี่ยวนำ

$R_v$ คือ ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิหรือโหลดบาเรล

$L_c$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วทางด้านปฐมภูมิ

$L_v$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วทางด้านทุติยภูมิ

$R_{vp}$ คือ ความต้านทานของโหลดบาเรลทางด้านปฐมภูมิ

กำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$P_c = I_c^2 R_c \tag{2.4}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในโหลดบาเรลมีค่าเท่ากับ

$$P_v = I_v^2 R_v \tag{2.5}$$

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิจะได้

$$P_v = I_c^2 R_{vp} \tag{2.6}$$

เนื่องจาก

$$I_v = NI_c \tag{2.7}$$

โดยที่ $I_c$ คือ กระแสในโหลดบาเรล

$I_v$ คือ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ

ดังนั้นประสิทธิภาพของโหลดบาเรลสามารถหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_v}{P_v + P_c} \tag{2.8}$$

$$\eta = \frac{I_v^2 R_v}{I_v^2 R_v + I_c^2 R_c} \tag{2.9}$$

$$\eta = \frac{I_v^2 R_v}{\left[\frac{I_v^2}{N^2}\right]\left[R_v N^2\right] + I_c^2 R_c} \tag{2.10}$$

$$\eta = \frac{I_v^2 R_{vp}}{\left[I_c^2\right] \cdot \left[R_{vp}\right] + I_c^2 R_c} \tag{2.11}$$

$$\eta = \frac{R_{vp}}{R_{vp} + R_c} \tag{2.12}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + Rc / Rvp} \tag{2.13}$$

ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยกระแสไหลวนในโหลดบาเรลที่บริเวณชั้นผิวนอกของบาเรลที่มีความลึกเท่ากับ $\delta$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของบาเรลดังสมการ

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \tag{2.14}$$

โดยที่ $\rho$ คือสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของบาเรล ($\Omega \cdot m$)

$f$ คือความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)

$\mu_r$ คือความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

ดังนั้น ความต้านทานที่ผิวของโหลดบาเรลในย่านความถี่สูง $Rv$ มีค่าดังนี้

$$Rv = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \tag{2.15}$$

นำสมการ 2.15 แทนค่าในสมการที่ 2.5 จะได้กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของโหลดบาเรล $P_v$ ดังนี้

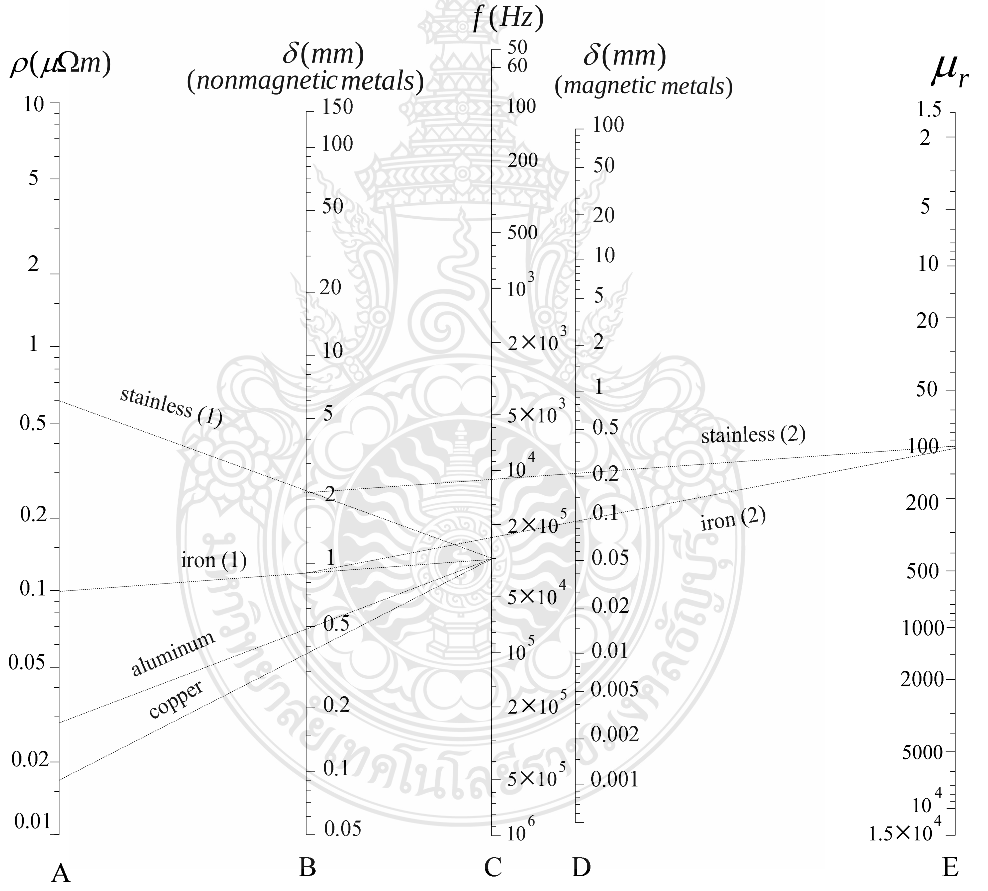
$$P_v = I_v^2 R_v = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot (NI_c)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \tag{2.16}$$

จากสมการ 2.15 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของบาเรล ($R_v$) จะแปรผันโดยตรงกับสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ($\rho$) ของบาเรล ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของบาเรล($\mu_r$) และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ ($f$) ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ 2.16 จะได้ว่าการเพิ่มของเพาเวอร์เอาท์พุต

( $P_v$ ) ของบาเรลสามารถเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มความถี่ ( $f$ )ของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำและแอมป์-เทอร์น ( $N.I_c$ ) ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

**ตารางที่ 2.3** ตารางคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในบาเรลที่ความถี่ 30 kHz

| **Material** | **iron** | **stainless** | **aluminum** | **copper** |
|---|---|---|---|---|
| **Resistivity** $(\Omega.m)$ : $\rho$ | $9.8\times10^{-8}$ | $60\times10^{-8}$ | $2.8\times10^{-8}$ | $1.7\times10^{-5}$ |
| **Relative permeability :** $\mu_r$ | 100 | 100 | 1 | 1 |
| **Skin depth (mm) :** $\delta$ | 0.909 | 0.225 | 0.486 | 0.378 |
| **Surface resistivity** $(\Omega)$ **:** $R_v$ | $11\times10^{-4}$ | $27\times10^{-4}$ | $0.575\times10^{-4}$ | $0.448\times10^{-4}$ |




**รูปที่ 2.14** เส้นกราฟแสดงการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของบาเรลจากตารางที่ 2.3 [2]

<u>กรณีใช้วัสดุสาร Nonmagnetic</u>

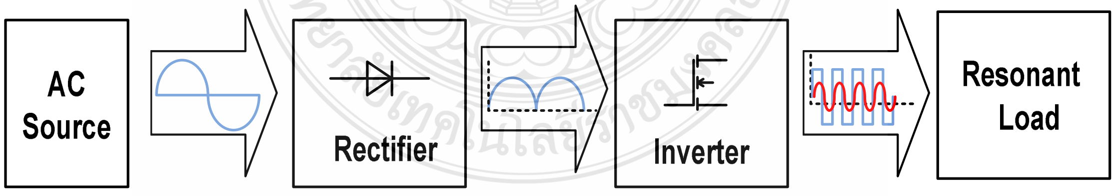
ลากเส้นจากตำแหน่งบนสเกล $\rho$ : A ไปยังตำแหน่งบนสเกล f : C และอ่านค่าที่ได้บนสเกล $\delta$ : B

กรณีใช้วัสดุสาร Ferromagnetic

ลากเส้นระหว่างตำแหน่งบนสเกล $\rho$ : A และสเกล f : C จะได้จุดตัดกับตำแหน่งบนสเกล $\delta$ : B จากนั้นลากเส้นระหว่างจุดตัดนี้กับตำแหน่งบนสเกล $\mu_r$ : E จะได้จุดตัดใหม่ที่ตำแหน่งบนสเกล D อ่านค่า $\delta$ ที่ได้ตำแหน่งจุดตัดนี้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่นำมาใช้ทำบาเรลจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุนั้นไม่ว่าจะเป็น สภาพความต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ของบาเรล ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ( $\mu_r$ ) ความลึกผิว ( $\delta$ ) สภาพความต้านทานของบาเรล ( $R_2$ ) จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $N$ ) และความถี่ที่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนขดลวดเหนี่ยวนำ( $f$ ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ให้ค่าความต้านทานเทียบเท่า ( $R_{eq}$ ) และอินดักแตนซ์เทียบเท่า ( $L_{eq}$ ) ของวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนไป โดยที่บาเรลที่ทำด้วยสาร Non-Ferromagnetic เช่น อลูมิเนียมและทองแดงจะมีค่าสภาพความต้านทานของบาเรล ( $R_2$ ) ต่ำมากเมื่อเทียบกับภาชนะที่ทำด้วยสาร Ferromagnetic เช่นสแตนเลสและเหล็กเป็นต้น ดังนั้นวัสดุที่ทำด้วยสาร Non Ferro-magnetic เมื่อนำมาใช้เป็นบาเรลจะทำให้มีกระแสสูงมาก เป็นผลทำให้ชุดอินเวอร์เตอร์เสียหายได้ ขณะเดียวกันบาเรลที่ทำจากสาร Ferromagnetic ก็จะให้กระแสความถี่สูงจากวงจรอินเวอร์เตอร์มีขนาดลดลงได้มาก

จากตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของบาเรลที่วัสดุต่างชนิดกัน ที่ความถี่ 30 kHz จะเห็นได้ว่าวัสดุที่ทำด้วยสาร Nonmagnetic เช่นอลูมิเนียมและทองแดง มีค่าสภาพความต้านทาน ( $\rho$ ) และความซึมซาบแม่เหล็ก ( $\mu_r$ ) ต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าของสแตนเลสและเหล็ก ซึ่งทำด้วยสาร Ferromagnetic ดังนั้นการเพิ่มกำลังเอาท์พุตสำหรับโหลดที่ภาชนะทำด้วยสาร Nonmagnetic สามารถกำหนดได้ตามสมการที่ 2.16 คือเพิ่มความถี่ในขดลวดเหนี่ยวนำและเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ



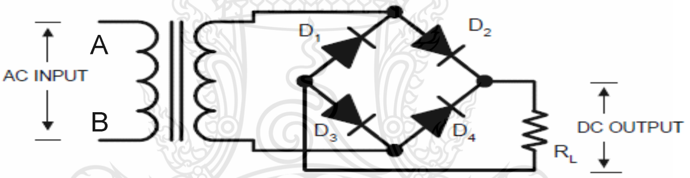

**รูปที่ 2.15** หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน [2]

## 2.3 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน [2]

สำหรับโครงสร้างของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำความถี่สูง สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 2.15 รายละเอียดประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ เพื่อป้อนให้กับวงจรเรียงกระแส ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านเอาท์พุตจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อกรองไฟกระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูง โดยใช้เพาเวอร์ไอจีบีที (Insulated gate bipolar transistor) เป็นอุปกรณ์สวิตช์ เพื่อจ่ายให้กับชุดโหลดเรโซแนนซ์ ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนต่างๆดังนี้

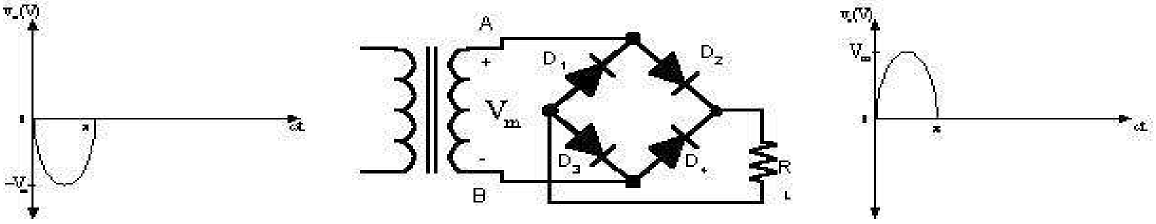
2.3.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave) อีกแบบหนึ่ง คือวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ แรงดันไฟสลับจะต่อเข้าที่สองมุมของวงจรบริดจ์และเอาต์พุตจะถูกนำออกที่สองมุมที่เหลือ ดังในรูปที่ 2.16

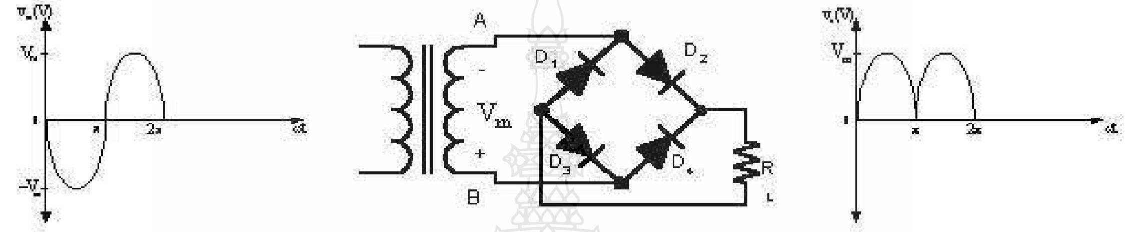



**รูปที่ 2.16** วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ [2]

ในแต่ละครึ่งไซเคิลของวงจรอินพุตสมมุติว่าเมื่อขั้ว A ของขดทุติยภูมิมีค่าเป็นบวก และขั้ว B มีค่าเป็นลบจึงเหมือนกับครึ่งไซเคิลลบถูกป้อนเข้าทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D2 และ D3 จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรงดังนั้นกระแสจึงไหลครบวงจรจากขั้ว A ผ่านไดโอด D2 ความต้านทานโหลดและไดโอด D3 แล้วกลับเข้าสู่ขั้ว B ของหม้อแปลง และเมื่อแรงดันไฟสลับเปลี่ยนข้างมาเป็นขั้วบวกที่ขั้ว B และเป็นลบที่ขั้ว A การนำกระแสของไดโอดจะเปลี่ยนไปโดยเริ่มจากจุด B ของขดทุติยภูมิผ่าน D4 ความต้านทานโหลดและ D1 กลับเข้าขั้ว A ของหม้อแปลง ทิศทางแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีทิศทางเดียวกับตอนแรกคือ มีขั้วบวกอยู่ทางด้านบนดังรูปที่ 2.17 ดังนั้นการนำกระแสไดโอดจะเกิดสลับกันทีละสองตัวคือ D2 กับ D3 และ D1 กับ D4




**รูปที่ 2.17** การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกลบ [2]




**รูปที่ 2.18** การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกบวก [2]

ค่าพารามิเตอร์ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะได้สัญญาณเอาต์พุตเพียงครึ่งไซเคิล แต่ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะได้สัญญาณเอาต์พุตทุกรูปคลื่นของสัญญาณอินพุต ดั้งนั้นค่าแรงดันหรือค่ากระแสย่อมได้มากกว่าแบบครึ่งคลื่น ซึ่งการคำนวณหาค่าโดยใช้สมการเดียวกันแต่จะให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} = 0.636I_m \quad (2.17)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{2\pi} = 0.636V_m \quad (2.18)$$

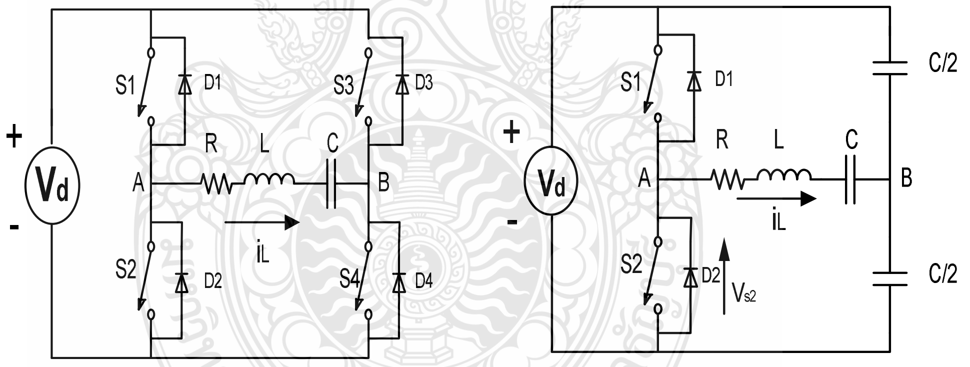
$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.19)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.20)$$

ค่าแรงดันย้อนกลับ (Peak Inverse Voltage – PIV) เป็นค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุดที่ตกคร่อมไดโอดขณะที่ได้รับไบอัสกลับ ไดโอดที่ใช้จะต้องมีแรงดันทลาย (Breakdown) สูงกว่า PIV ซึ่ง PIV ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ = Vm

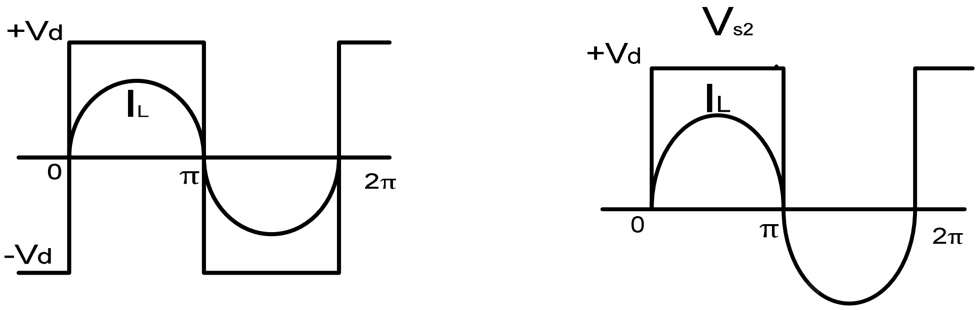
2.3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ [3]

อินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูง ซึ่งโหลดเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำนี้ จะเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโดยมีวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเรโซแนนซ์ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 2.19(ก) และ 2.19(ข) ตามลำดับสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ ดังรูปที่ 2.19(ก) จะมีคู่สวิตช์ $S_1, S_4$ และ $S_2, S_3$ ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูง เมื่อวัดแรงดันเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ ($V_{AB}$) จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ กระแสผ่านโหลด($i_L$)เป็นรูปคลื่นซายย์ดังรูปที่ 2.20 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์ดังรูปที่ 2.19 (ข) ทำหน้าที่เหมือนฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แต่จะมีสวิตช์ $S_1$ และ $S_2$ ทำงานสลับกันเมื่อวัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ($V_{S2}$) จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ $+V_d$ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด ($i_L$) เป็นรูปคลื่นซายน์ดังรูปที่ 2.20 (ข) จะเห็นได้ว่าวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมากกว่าฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ให้กำลังไฟฟ้ามากซึ่งจะต้องสามารถรับแรงดันและกระแสที่มีปริมาณมาก




(ก) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ (ข) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

**รูปที่ 2.19** วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์




(ก) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ (ข) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

**รูปที่ 2.20** คลื่นแรงดันและกระแสโหลดของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

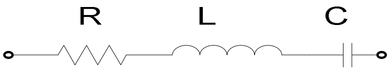
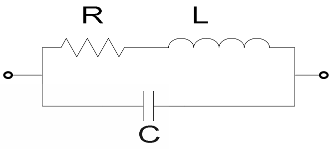
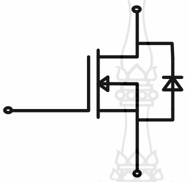
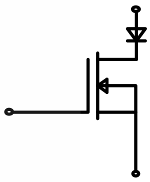
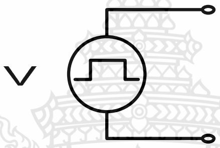
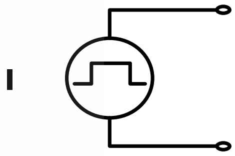
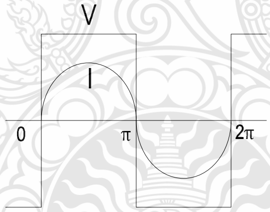
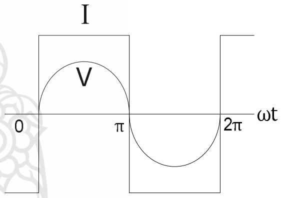
2.3.3 โหลดเรโซแนนซ์ [4]

สำหรับโหลดเรโซแนนซ์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไปเช่น เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องหลอมโลหะ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องเชื่อมความถี่สูง จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ ( Zero current switch : ZCS ) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ ( Zero voltage switch : ZVS ) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจร เรโซแนนซ์ คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนซ์กระแสในวงจรมีค่ามากส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ที่มีค่า Q สูง ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ L-C ในวงจรที่เลือกใช้ก็เช่นกันจะต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมและชนิดขนาน ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และโครงสร้างของวงจร ดังแสดงในตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมจะใช้แหล่งจ่ายชนิดแรงดันคงที่ (Constant voltage source) เนื่องจากต้องใช้คาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อกรองแรงดันให้เรียบแล้วจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์

**ตารางที่ 2.4** การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน [3] [4]

| **วงจรอินเวอร์เตอร์** | **ข้อดี** | **ข้อเสีย** |
|---|---|---|
| **เรโซแนนซ์อนุกรม** | - โครงสร้างง่ายราคาถูก<br>- สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าดีซีได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเร็กติฟายเออร์โดยไม่ต้องมีวงจรปรับแรงดัน<br>- กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับควบคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์ | - ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้<br>- ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้<br>- ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ที่สวิตถ์ให้เลื่อนออกจากความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ค่อยเป็นซายน์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นตามมา |
| **เรโซแนนซ์ขนาน** | - ขณะป้อนวงจรเพื่อขับสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์วงจรโหลดสามารถเปิดวงจรออกได้<br>- สามารถทนทนการลัดวงจรที่โหลดได้<br>- อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์จึงมีค่า peak คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ | - ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าดีซีได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรคติฟายเออร์ แต่ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตถ์ควบคุม<br>- จำเป็นต้องมี coke เนื่องจากเป็น constant current<br>- มีขนาดใหญ่เนื่องจากมีcoke และวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ |

**ตารางที่ 2.5** การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์ คลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ ชนิดอนุกรมและขนาน [4]

| **Inverter** | **Series Resonant** | **Parallel Resonant** |
|---|---|---|
| Load |   |   |
| Switch |  |  |
| Source |   |   |
| Output Waveform |   |   |

สำหรับลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นสแควร์และกระแสจะเป็นรูปคลื่นซายน์ ส่วนอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ขนานจะมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกันคือจะเป็นชนิดแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) เนื่องจากต้องใช้อินดักเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อกรองกระแสให้เรียบแล้วจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่วนลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นซายน์ในขณะที่รูปคลื่นกระแสจะเป็นรูปคลื่นสแควร์

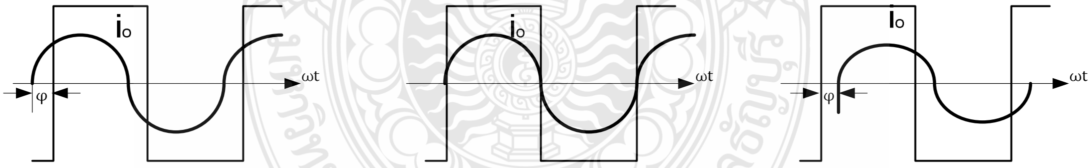
**ตารางที่ 2.6** เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ [4]

| **คุณสมบัติ** | **วงจรอนุกรม RLC** | **วงจรขนาน RLC** |
|---|---|---|
| ความถี่เรโซแนนซ์ $f_r$ | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ |
| แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R$ | สูงสุดที่ $f_r$ | คงที่ที่ $V_o$ |
| กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน $R$ | คงที่ที่ $\frac{V_o}{R}$ | ต่ำสุดที่ $f_r$ |
| ค่า $Q$ | $Q = \frac{2\pi f_R L}{R}$ | $Q = \frac{R}{2\pi f_R L}$ |
| ค่าแบนด์วิดช์, $BW$ | $BW = \frac{f_R}{Q}$ | $BW = \frac{f_R}{Q}$ |
| สภาวะ Impedance ที่จุดต่ำกวา $f_r$ | Capacitive | Inductive |
| สภาวะ Impedance ที่จุดเหนือกว่า $f_r$ | Inductive | Capacitive |
| ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนนค่า $R$ | เพิ่มค่า $R$, คา $BW$ เพิ่ม | เพิ่มค่า $R$, คา $BW$ ลด |
| ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า $\frac{L}{C}$ | เพิ่มค่า $\frac{L}{C}$, คา $BW$ ลด | เพิ่มค่า $\frac{L}{C}$, คา $BW$ ลด |

2.3.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์

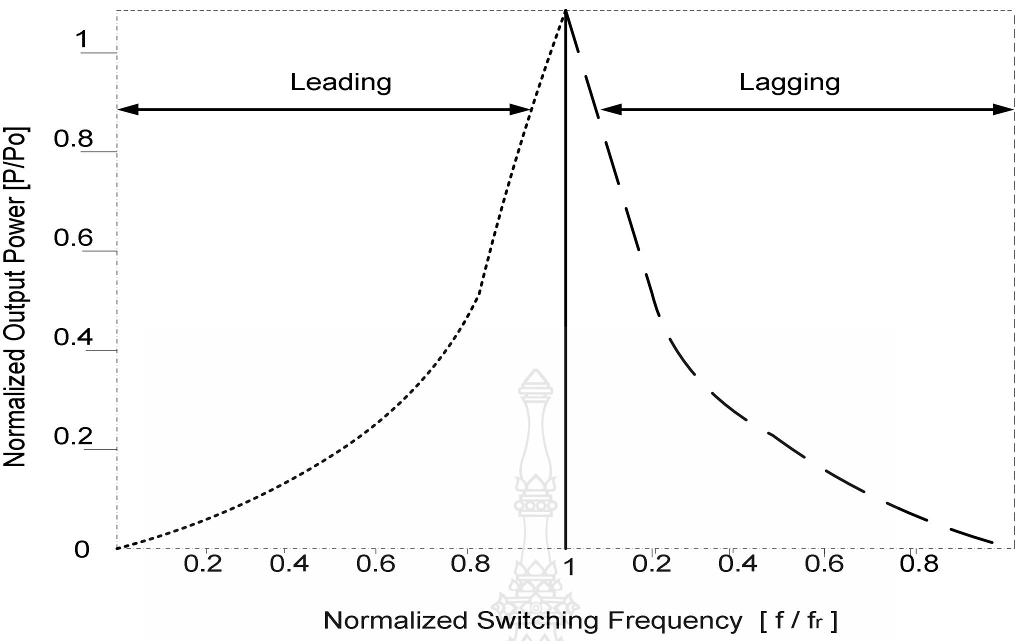
การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมได้ 3 แบบ คือ

1) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีปรับความถี่ : $f$




(ก) $f < f_r$ (ข) $f = f_r$ (ค) $f > f_r$

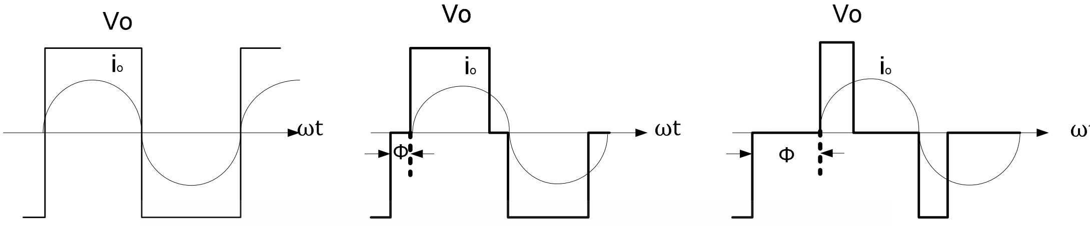
**รูปที่ 2.21** รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาท์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้า ด้วยการปรับความถี่ [2]




**รูปที่ 2.22** กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตชิ่งต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ [4]

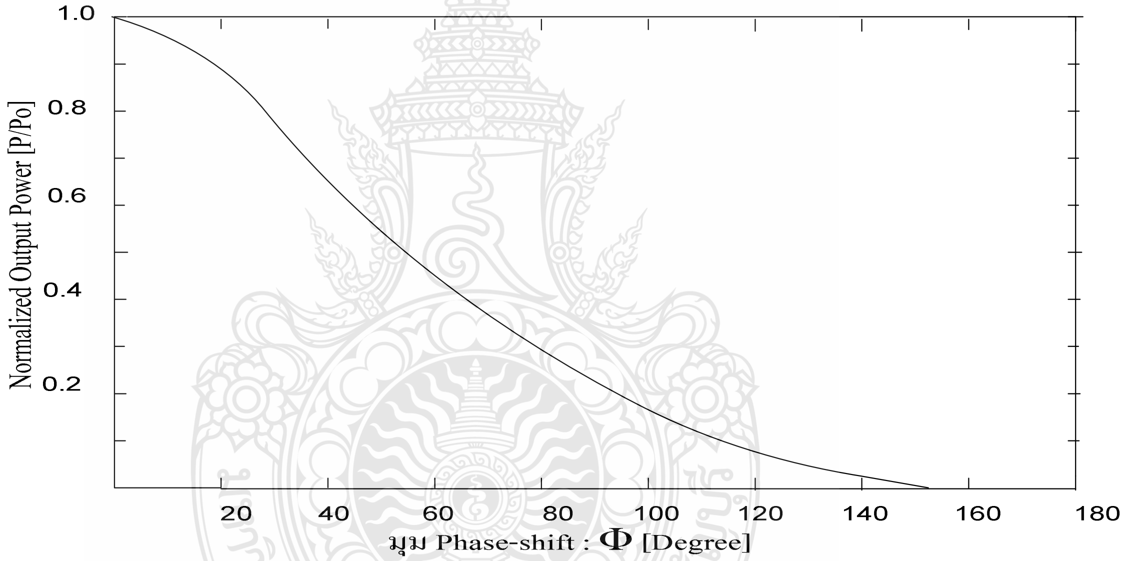
การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในกรณีนี้ สามารถทำได้โดยปรับความถี่สวิตชิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่โหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสวิตชิ่งน้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ดังรูปที่ 2.21(ก) และรูปที่ 2.21(ค) จะได้ปริมาณกระแสที่ลดลง ส่วนที่ความถี่สวิตชิ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21(ข) จะได้กระแสที่มีปริมาณสูงสุด ดังนั้น เมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์กับค่าความถี่สวิตชิ่งที่เปลี่ยนแปลงจะได้ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ของจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่สวิตชิ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ และจะได้กำลังไฟฟ้าลดต่ำลงที่ความถี่สวิตชิ่งน้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่นี้จะมีข้อดีคือ ระบบควบคุมไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัด คือ จะมีการสูญเสียที่ตัวสวิตช์ และปรับความถี่สวิตชิ่งให้มีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้กระแสเพี้ยนไปจากลักษณะคลื่นซายน์มากขึ้น ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นตามมาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์มีค่าต่ำลง

2) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเฟส




(ก) มุม Phase-shift 0 องศา (ข) มุม Phase-shift 60 องศา (ค) มุม เฟส 120 องศา

**รูปที่ 2.23** รูปคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุตที่มุมเฟสต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้า ด้วยการปรับมุมเฟส [2]



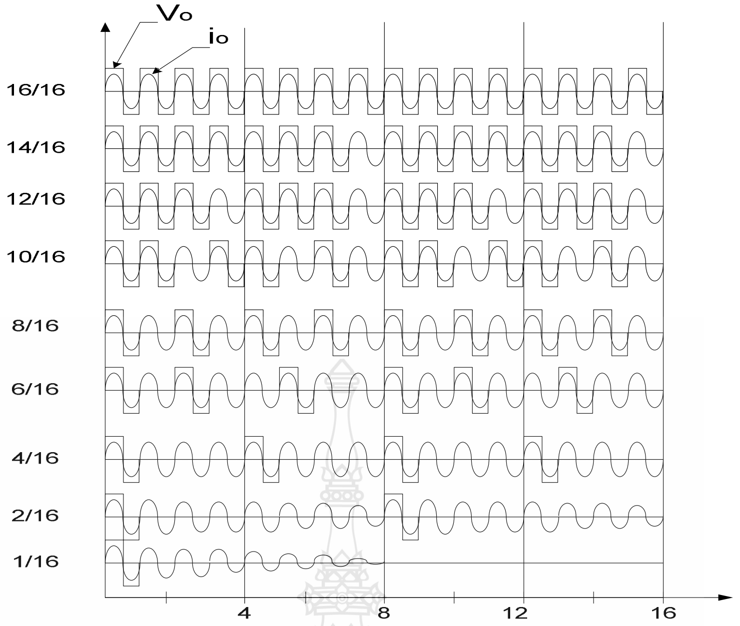

**รูปที่ 2.24** กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่มุมต่างเฟสต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้า ด้วยการปรับมุมต่างเฟส [2]

การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเฟสนั้นจะเป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณกึ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ให้ซ้อนกับสัญญาณอีกกึ่งหนึ่งเป็นบางส่วนตามขนาดของมุมเฟส โดยที่ความถี่สวิตชิ่งจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ตำแหน่ง ZVS เสมอ ดังรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเฟสต่างๆเช่น ที่มุมเฟส 0 องศา

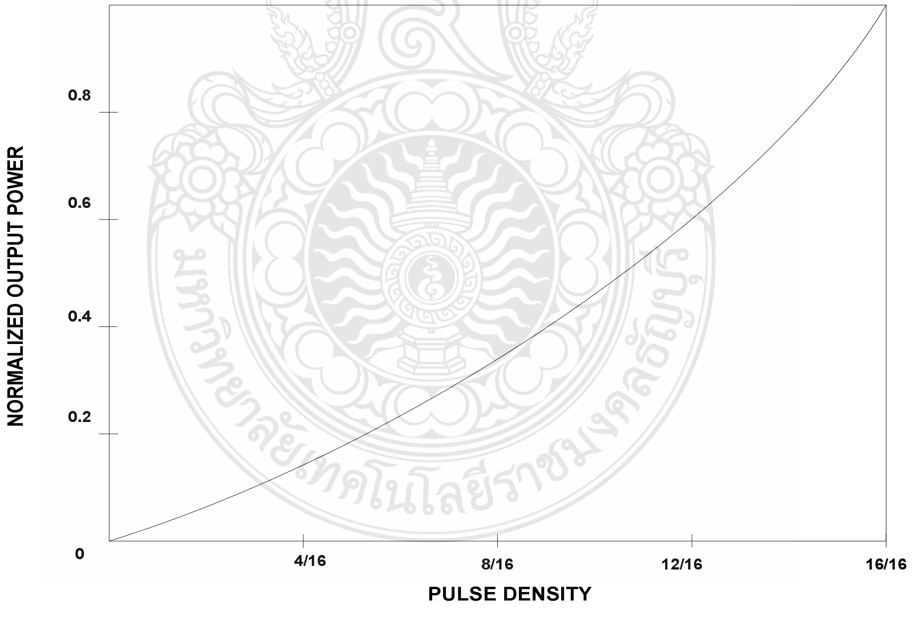
ดังรูปที่ 2.23 (ก) จะได้ปริมาณกระแสมากสุด และปรับมุมเฟส เพิ่มขึ้นเป็น 60 องศา และ 120 องศา ดังรูปที่ 2.23(ข) และรูปที่ 2.23(ค) ตามลำดับ ปริมาณกระแสจะลดต่ำลงเรื่อยๆดังนั้น เมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเฟสต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 2.24 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับมุมเฟสมากขึ้น กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์จะลดลงเรื่อยๆ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับมุมเฟสนี้มีข้อด้อยคือ เมื่อปรับมุมเฟสมากขึ้น จะมีผลทำให้กระแสจ่ายโหลดทางด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปจากคลื่นซายน์มากขึ้น ซึ่งข้อด้อยนี้สามารถปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นโดยการเลือกค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์ให้มีค่าสูงขึ้น

3) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Pulse-Density-Modulation (PDM) [3]

การควบคุมด้วยวิธีนี้เป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการลดจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์ของเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์จากจำนวนมากไปหาน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีการปรับเปลี่ยนจาก16ไซเคิล ไปจนถึง1ไซเคิล กระแสไหลผ่านโหลดจะมีปริมาณมากสุดเมื่อปรับแรงดันเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะลดลงเรื่อยๆเมื่อปรับแรงดันเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลลดลง ดังนั้น เมื่อนำมาเขียนกราฟกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะปรับจำนวนไซเคิลเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ไปจะได้ดังรูปที่ 2.26 โดยจะเห็นได้ว่าที่จำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์จะมีค่ามากสุดและจะลดลงเรื่อยๆเมื่อปรับจำนวนไซเคิลลดลง การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะมีข้อด้อยคือ ระดับกำลังไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนค่าไปจะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง แต่จะเป็นทีละ step ซึ่งมีทั้งหมด 16 step ดังแสดงในรูปที่ 2.25 นอกจากนั้นในกรณีที่มีการปรับลดกำลังไฟฟ้าลงไปถึงระดับต่ำๆจะมีผลทำให้กระแสที่จ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์ จะมีลักษณะเป็นคลื่นซายน์ที่ไม่คงที่ แต่ระดับ peak ของคลื่นซายน์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่คงที่




**รูปที่ 2.25** รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ [3]




**รูปที่ 2.26** กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ Pulse density ค่าของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ PDM [3]

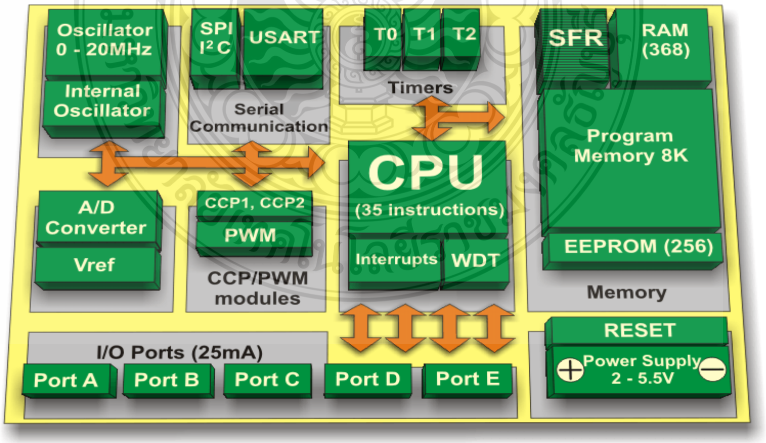
## 2.4 การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ระบบเหนี่ยวนำความร้อนส่วนใหญ่ที่ผ่านมานั้นจะถูกสร้างขึ้นด้วยวงจรควบคุมที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก จากปัญหาที่พบในเรื่องของขนาดและวงจรจึงเป็นประเด็นหลักและเป็นปัญหาที่จะนำมาศึกษาสำหรับโครงงานวิจัยในครั้งนี้ โดยที่ระบบควบคุมจะถูกลดรูปของตัวประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้ก็เนื่องจากในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไมคอนโทรลเลอร์นั้นจะมีศักยรูปที่สูงมากขึ้น ทั้งในเรื่องของขนาดและหน่วยความจำ ความรวดเร็วตลอดจนคำสั่งในการทำงาน และฟังก์ชั่นในการใช้งานที่จำเป็นอีกด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีให้เลือกมากมายหลายตระกูลและหลายบริษัท เช่นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ของบริษัท Philips ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ของบริษัท ATMEL และไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ที่บริษัท Micro chip เป็นผู้ผลิต

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ซึ่งถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จนสามารถนำมาใช้งานในการควบคุมได้อย่างหลากหลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ครบครัน อีกทั้งยังง่ายต่อผู้ที่เริ่มศึกษา คือสามารถที่จะเรียนรู้ได้ง่ายและสามารถนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่สูง ราคาถูก เป็นที่นิยม

2.4.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC [5]

โครงสร้างโดยทั่วไป ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้




**รูปที่ 2.27** โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรเลอร์

2.4.1.1 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit)

เป็นวงจรอิเลคทรอนิคส์ที่ทำงานหรือประมวลผล ตามชุดของคำสั่งเครื่องจากซอฟต์แวร์ คำนี้เริ่มใช้ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ต้นศตวรรษ 1960 หน่วยประมวลผลเปรียบเสมือนเป็นสมองของคอมพิวเตอร์ ในการทำหน้าที่ตัดสินใจหรือคำนวณ จากคำสั่งที่ได้รับมา เช่น การเปรียบเทียบ การกระทำการทางคณิตศาสตร์ ฯลฯ โดยมีกระบวนการพื้นฐานคือ

- อ่านชุดคำสั่ง (Fetch)
- ตีความชุดคำสั่ง (Decode)
- ประมวลผลชุดคำสั่ง (Execute)
- อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ (Memory)
- เขียนข้อมูล/ส่งผลการประมวลกลับ (Write back)

2.4.1.2 หน่วยความจำ (Memory)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory ) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดาษทดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วๆไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

2.4.1.3 ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port)

มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะด้วยการกดสวิตช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุต เพื่อแสดงผลเช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

2.4.1.4 ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS)

คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียูหน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณ จำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus), บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus) บัสข้อมูลเป็นสายสัญญาณที่บรรจุข้อมูล เพื่อการประมวลผลทั้งหมด ขนาดของบัสจะขึ้นอยู่กับความสามารถการประมวลผลของ

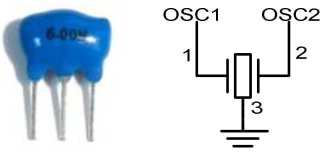
ซีพียู สำหรับในงานทั่วๆ ไป ขนาดของบัสข้อมูลจะเป็น 8 บิต และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมาจนถึง 16,32 และ 64 บิต บัสแอดเดรสเป็นสายสัญญาณที่บรรจุค่าตำแหน่งของหน่วยความจำ โดยการติดต่อกับหน่วยความจำนั้น ซีพียู ต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน ดังนั้นจำนวนสายสัญญาณของแอดเดรสจึงต้องมีจำนวนมาก ยิ่งมากเท่าไหร่ ก็จะเป็นการแสดง ขนาดของหน่วยความจำที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อได้ โดยสามารถคำนวณได้จาก จำนวนแอดเดรสของหน่วยความจำ = 2 ยกกำลัง n (n คือจำนวนของเส้นทาง) ยกตัวอย่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งมีสายแอดเดรส 10 เส้น ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้ สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้ 2 ยกกำลัง 10 = 1,024 ตำแหน่ง หากต้องการทราบความจุของหน่วยความจำจริงๆ จะต้องทราบถึงขนาดของบัสข้อมูลก่อนว่าเป็นเท่าใด หากเป็น 8 บิต ความจุของหน่วยความจำที่มีสายแอดเดรส 10 เส้น จะเท่ากับ 8×1024 = 8,192 บิต และ 1 กิโลไบต์ เท่ากับ 1,024 ไบต์ ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว จึงมีความจุของหน่วยความจำเท่ากับ 8,192 บิต หรือ 1,024 ไบต์ หรือ 1 กิโลไบต์บัสควบคุมเป็นกลุ่มของสายสัญญาณควบคุมการติดต่อทั้งหมดของซีพียูกับหน่วยความจำและพอร์ต สำหรับสายสัญญาณเลือกควบคุมหลักได้แก่ สายสัญญาณเลือก-อ่าน-เขียนหน่วยความจำ สายสัญญาณเลือก-อ่าน-เขียนข้อมูลกับพอร์ต

2.4.1.5 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock)

นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับการกำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

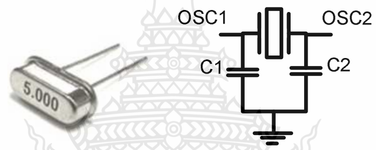
PIC สามารถเลือกใช้ออสซิลเลเตอร์ภายในหรือภายนอกได้ สำหรับออสซิลเลเตอร์ภายในจะเป็นประเภท RC ออสซิลเลเตอร์ซึ่งมีความถี่คงที่ 4 MHz ที่แรงดัน 5 โวลต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยวงจรออสซิลเลเตอร์ประเภท RC ออสซิลเลเตอร์ ความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่ถ้าเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ภายนอก ความถี่จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อ วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาหรือวงจรออสซิลเลเตอร์ภายนอกมี 3 แบบดังนี้

**แบบที่ 1** สร้างเซรามิคเรโซเนเตอร์ (Ceramic Resonators) เหมาะสำหรับงานที่ใช้คามถี่ไม่สูงมากนัก เพราะราคาถูกเมื่อเทียบกับออสซิลเลเตอร์ประเภทอื่น โดยการต่อใช้งาน ขากลางจะเป็นขากราวน์ (Ground : GND) ส่วนอีกสองขาต่อเข้ากับ CLKIN และ CLKOUT ของ PIC



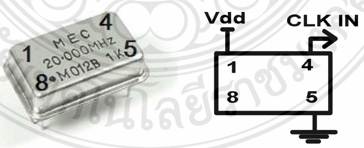

**รูปที่ 2.28** เซรามิครีโซเนเตอร์และการต่อใช้งาน [6]

**แบบที่ 2** สร้างจากผลึกแร่คริสตอล (Quartz Crystal Oscillator) ใช้ตัวคริสตอลกำเนิดสัญญาณความถี่กำลังต่ำออกมา โดยจะต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) ลงกราวน์ (GND) ทั้ง 2 ขา และทั้งสองขาต่อเข้ากับขา OSC1/CLKIN และ OSC/CLKOUT ของ PIC ซึ่งคริสตอลจะมีราคาแพงกว่าเซรามิคเรโซเนเตอร์ แต่จะให้ความถี่ที่มีความเที่ยงตรงมากกว่า




**รูปที่ 2.29** คริสตอลรีโซเนเตอร์ [6]

**แบบที่ 3** สร้างวงจรกำเนิดความถี่สำเร็จรูป (Crystal Square-wave Oscillator) ซึ่งจะมีคริสตอลและวงจรอยู่ภายในตัว ทำให้ความถี่ที่ออกมามีความเที่ยงตรงมาก แต่ราคาแพง โดยการต่อเข้ากับ PIC ดังนี้ ขา 1 ต่อเข้ากับไฟ 5 โวลต์ ขา 5 ต่อ กราวน์ (GND) ขา 4 ต่อเข้ากับ CLKIN ของ PIC ขา 8 ไม่ต่อ และขา CLKOUT ของ PIC ก็ไม่ต่อเช่นกัน




**รูปที่ 2.30** โครงสร้างขาของ Crystal Square-wave [6]

ในรูปที่ 2.28 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จะเป็นการใช้ตัวคริสตอลต่อกับตัวเก็บประจุลงกราวน์ทั้งสองขา และทั้ง 2 ขาของคริสตอลต่อเข้ากับขา OSC1/CLKOUT ของ

PIC สำหรับการเลือกใช้ความถี่ของคริสตอลจะมีผลต่อโหมดของสัญญาณนาฬิกาในการเขียนโปรแกรม แสดงดัง ตารางที่ 2.6 โดยมีโหมดต่างๆ ดังนี้

โหมด LP (Low Power Crystal) ทำงานที่ความถี่ตั้งแต่ 32 KHz ถึง 100 KHz

โหมด XT (Crystal/Resonator) ทำงานถี่ความถี่ตั้งแต่ 100 KHz ถึง 4 MHz

โหมด HS0 (High Speed Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ 8 MHz ถึง 16 MHz

โหมด HS (High Speed Crystal/Resonator) ทำงานที่ความถี่ 4 MHz ถึง 20 MHz

โหมด RC (External Resistor/Capacitor) มี 2 โหมด สามารถกำหนดความถี่ได้จากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

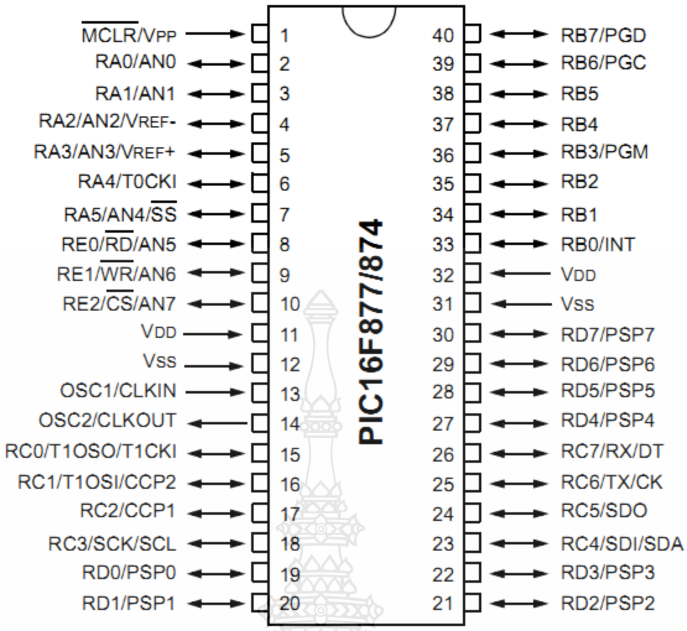
**ตารางที่ 2.7** โหมดของสัญญาณนาฬิกาเมื่อใช้เซรามิคเรโซเนเตอร์ [5]

| โหมด | ความถี่ | C1 | C2 |
|---|---|---|---|
| XT | 455 KHz | 68 – 100 pF | 68 – 100 pF |
| | 2.0 MHz | 15 – 68 pF | 15 – 68 pF |
| | 4.0 MHz | 15 – 68 pF | 15 – 68 pF |
| HS0 | 8.0 MHz | 10 – 68 pF | 10 – 68 pF |
| | 16.0 MHz | 10 – 22 pF | 10 – 22 pF |

**ตารางที่ 2.8** โหมดของสัญญาณนาฬิกาเมื่อใช้คริสตอล

| โหมด | ความถี่ | C1 | C2 |
|---|---|---|---|
| LP | 32 KHz | 33 pF | 33 F |
| | 200 KHz | 15 pF | 15 pF |
| XT | 200 kHz | 47 – 68 pF | 47 – 68 pF |
| | 1.0 MHz | 15 pF | 15 pF |
| | 4.0 MHz | 15 pF | 15 pF |
| HS | 4.0 MHz | 15 – 33 pF | 15 – 33 pF |
| | 8.0 MHz | 15 -33 pF | 15 -33 pF |
| | 20 MHz | 15 -33 pF | 15 -33 pF |

2.4.2 หน้าที่ของขาสัญญาณ PIC16F877 [5]




**รูปที่ 2.31** PIC16F877 และตำแหน่งหน้าที่ของขาที่ใช้งาน [5]

PIC16F877 เป็นเบอร์ขนาดกลางระหว่าง 16F84 กับ 18F442/458 สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย และหากจะเขียนเบอร์ที่เล็กกว่านี้สามารถเขียนได้ดี เป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์อื่นในตระกูลเดียวกัน คุณสมบัติโดยทั่วไปของ PIC16F877 มีดังต่อไปนี้

1. มีคำสั่งให้ใช้งาน 35 คำสั่ง
2. คำสั่งหนึ่งๆใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 Cycle
3. ทำงานได้สูงสุดที่ 20MHz
4. ทำงานแบบ Pipe-line ทำให้ทำงาน 2 อย่างพร้อมๆกันได้
5. หน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ Flash มีขนาด 8 kword (1 word=14 บิต)
6. มี RAM ขนาด 368 ไบต์
7. มี EEPROM ขนาด 256 ไบต์
8. ตอบสนองกับอินเตอร์รัพได้ทั้งหมด 14 แหล่ง
9. มี Stack ให้ใช้ได้สูงสุด 8 ระดับ (เวลาเขียนโปรแกรมต้องระวังให้ดีครับ) 10. มีระบบ Power On Reset, Power Up Timer, Oscillator Start-up timer
11. มี Watchdog timer

12. มีระบบ Code Protection กันใครการคัดลอกโปรแกรม

13. มีโหมดประหยัดพลังงาน

14. สัญญาณนาฬิกามีหลายโหมดให้เลือกใช้งานเช่น XTAL หรือ วงจร RC ก็ได้

15. สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5 VDC ได้

16. ใช้การโปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming

17. ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2 VDC ถึง 5.5 VDC

18. Current Sink และ Current Source อยู่ที่ 25 mA สามารถขับ LED ได้เลยต่างจาก MCS-51 คือต้องเพิ่มแหล่งจ่ายกระแสขึ้นอีกชุด

19. มี Timer/Counter 3 ตัว

20. มีโมดูล Capture/Compare/PWM อีก 2 ชุด

21. มี Analog TO Digital Converter แบบ 10 บิต จำนวน 8 ช่องนำเข้าในตัวเอง ทำให้ประหยัดค่าซื้อ Analog TO Digital Converter ไปได้มาก

22. มีระบบ USART สำหรับต่อกับ การสื่อสารแบบ RS232

23. มีระบบตรวจระดับไปเลี้ยง (Brown-out reset)

24. มี I/O พอร์ตทั้งหมด 5 พอร์ต แต่ละพอร์ตมีจำนวนบิตไม่เท่ากัน

**ตารางที่ 2.9** หน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆ และการต่อใช้งานวงจรพื้นฐาน [6]

| ขาหรือพอร์ต | การต่อใช้งาน |
|---|---|
| MCLR/VPP/THV | Master Clear (Reset) Input / Programming Voltage Input ทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณรีเซต (Reset) เมื่อขานี้ได้รับลอจิก 0 ไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกรีเซต และทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณรับแรงดัน ขณะทำงานบันทึกโปรแกรมลงหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ |
| VDD | Positive Supply (+2.00 V ถึง +5.5 V) ทำหน้าที่เป็นขาไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์ |
| VSS | Ground ทำหน้าที่เป็นขากราวด์ |
| OSC1/CLKIN | Oscillator Crystal Output / External Clock Source Output ทั้งสองขาทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณสำหรับต่อคริสตอล ในกรณีที่อยู่ในโหมดการใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก (Crystal Oscillator Mode) |
| OSC2/CLKOUT | |

**ตารางที่ 2.9** หน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆ และการต่อใช้งานวงจรพื้นฐาน (ต่อ)

| | |
|---|---|
| Port A | มีจำนวน 6 ขา เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง (Bi-directional I/O Port) คือเป็นได้ทั้งพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาท์พุตใช้ในการส่งและรับข้อมูล |
| - RA0/AN0 | รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 0 |
| - RA1/AN1 | รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 1 |
| - RA2/AN2/Vref- | รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 2 |
| - RA3/AN3/Vref+ | รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 3 |
| - RA4/TOCKI | รับสัญญาณ Input Clock ของ Timer 0 |
| - RA5/AN4/SS/LVDIN | รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 4 |
| SS | รับสัญญาณ Slave Select จาการติดต่อของ Serial Port แบบ Synchronize |
| Port B | พอร์ต B มีจำนวน 8 ขา ขนาด 8 บิต เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล นอกจากนี้บางขายังทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตจากการอินเทอร์รัปต์ (Interrupt) จากภายนอกด้วย |
| - RB0/INT | รับสัญญาณอินพุตจากการอินเทอร์รัปต์จากภายนอก |
| - RB1 | รับสัญญาณอินพุท-เอาท์พุท ทั่วไป |
| - RB2 | รับสัญญาณอินพุท-เอาท์พุท ทั่วไป |
| - RB3/PGM | รับสัญญาณอินพุตแรงดันต่ำในการบันทึกโปรแกรม (ถ้ามีการ Enable) |
| - RB4 | รับสัญญาณอินพุท-เอาท์พุท ทั่วไป |
| - RB5 | รับสัญญาณอินพุท-เอาท์พุท ทั่วไป |
| - RB6/ PGC | ขาสัญญาณนาฬิกาในการบันทึกโปรแกรม |
| - RB7/ PGD | ขาสัญญาณข้อมูลในการบันทึกโปรแกรม |
| Port C | พอร์ต C มีจำนวน 8 ขา ขนาด 8 บิต เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล นอกจากนี้ยังทำหน้าที่อื่น ๆของแต่ละขาดังต่อไปนี้ |
| - RC0<br>T1OSO<br>TICKI | สามารถทำงานได้ 3 สัญญาณคือ<br>ขาสัญญาณเอาท์พุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ Timer 1<br>ขาสัญญาณอินพุตของสัญญาณนาฬิกาของ Timer 1 |
| - RC1 CCP2<br><br>T1OSI | ขาสัญญาณเอาต์พุตของโมดูล CCP2 (Capture2, Compare2. PWM2)<br>ขาสัญญาณอินพุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ Timer 1 |
| - RC2 / CCP1 | ขาสัญญาณเอาต์พุตของโมดูล CCP2 (Capture2, Compare2. PWM1) |
| - RC3<br>SCK<br>SCL | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>ขาสัญญาณนาฬิกาของวงจร SPI<br>ขาสัญญาณนาฬิกาของวงจร $i^2c$ |

**ตารางที่ 2.9** หน้าที่ของขาสัญญาณต่างๆ และการต่อใช้งานวงจรพื้นฐาน (ต่อ)

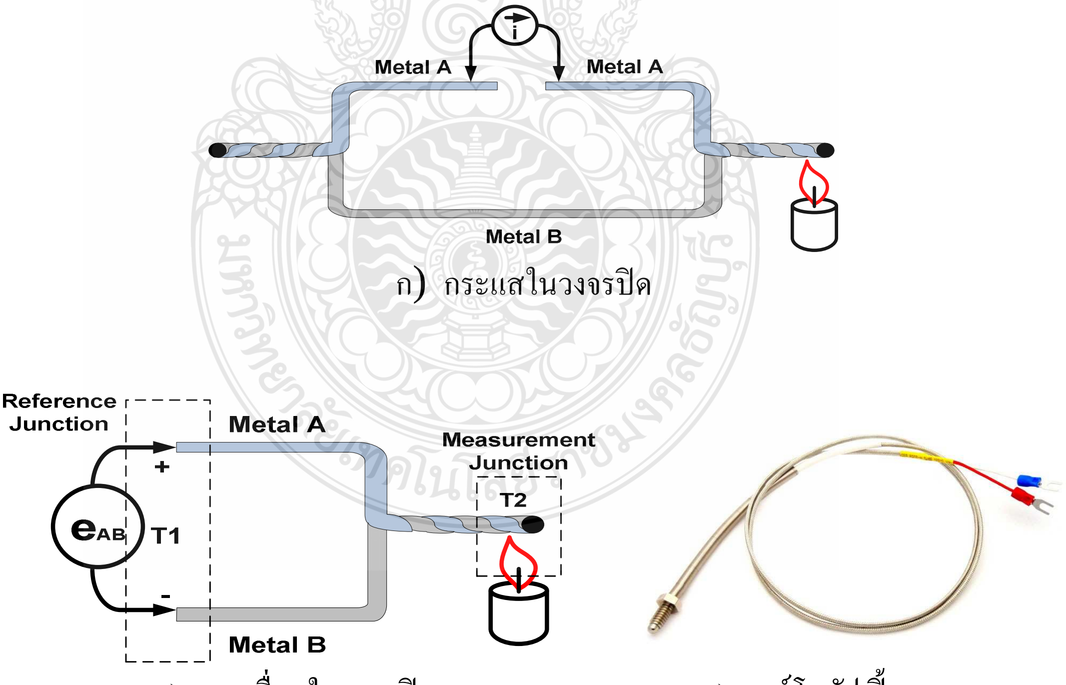
| | |
|---|---|
| - RC4<br>SDI<br>SDA | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>ขาสัญญาณของระบบบัส $i^2c$<br>ขาสัญญาณอินพุตและ Serial Data ของระบบ SIP |
| - RC5 / SDO | ขาสัญญาณเอาต์พุตและ Serial Data ของระบบ SPI |
| - RC6<br>TXD<br>CK | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>ขาส่งข้อมูลแบบ Serial Port<br>ขาสัญญาณนาฬิกา แบบ Synchronize |
| - RC7<br>RXD<br>DT | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>ขารับข้อมูลแบบ Serial Port<br>ขารับข้อมูลแบบ Synchronize |
| Port D | พอร์ต D มีจำนวน 8 ขา ขนาด 8 บิต เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล นอกจากนี้ยังทำหน้าที่อื่นๆ ของแต่ละขาดังต่อไปนี้ |
| - RD0 / PSP0 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 0 |
| - RD1 / PSP1 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 1 |
| - RD2 / PSP2 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 2 |
| - RD3 / PSP3 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 3 |
| - RD4 / PSP4 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 4 |
| - RD5 / PSP5 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 5 |
| - RD6 / PSP6 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 6 |
| - RD7 / PSP7 | ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาน บิต 7 |
| Port E | พอร์ต E มีจำนวน 3 ขา เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง ใช้ในการส่งและรับข้อมูล นอกจากนี้ยังทำหน้าที่อื่นๆ ของแต่ละขาดังต่อไปนี้ |
| - RE0<br>AN5<br>RD | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 5<br>ขารับสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนานควบคุมการอ่าน |
| - RB1<br>AN6<br>WR | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 6<br>ขารับสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนานควบคุมการเขียน |
| - RB2<br>AN7<br>CS | สามารถทำงานได้ 2 สัญญาณคือ<br>รับสัญญาณอินพุตสำหรับ ADC ช่อง 7<br>ขาสัญญาณขยายพอร์ตแบบขนาดควบคุมการเลือกอุปกรณ์ |

## 2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิและอุปกรณ์ตรวจจับกระแส [5]

2.5.1 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเทอร์โมคับเปิล (Thermocouple)

อุณหภูมินับเป็นค่าการวัดพื้นฐานหรือพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ต้องทำการวัดค่า เพื่อนาไปใช้ประโยชน์ในระบบการควบคุมให้เป็นไปตามความต้องการ อุณหภูมิเป็นตัวแทนของความร้อน การตรวจวัดอุณหภูมิใช้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากสัญญาณอนาล็อกไปสู่สัญญาณดิจิตอล โดยสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยมีรูปแบบใหญ่ๆของเซนเซอร์อยู่ด้วยกัน 4 รูปแบบคือ

ตัวตรวจจับอุณหภูมิของเทอร์โมคับเปิลดังรูปที่ 2.31 โครงสร้างเบื้องต้นประกอบด้วยเส้นลวด 2 เส้น ทำมาจากโลหะต่างชนิดกัน ต่อเชื่อมปลายทั้งสองของเส้นลวดเข้าด้วยกันเป็นลูป รอยต่อด้านหนึ่งเรียกว่ารอยต่อร้อน เป็นรอยต่อที่ได้รับอุณหภูมิสูง และรอยต่ออีกด้านหนึ่งเรียกว่ารอยต่อเย็น เป็นรอยต่อที่ได้รับอุณหภูมิต่ำ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในลูปของเทอร์โมคับเปิล แรงดันที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดตามสัดส่วนระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อทั้งสอง ในรูปแสดงการปลดขั้วต่อของเทอร์โมคับเปิลด้านอุณหภูมิต่ำให้แยกออกจากกันและใส่โวลท์มิเตอร์เข้าไปเพื่อให้เป็นลูปเหมือนเดิม ทำให้มองเห็นว่าโลหะ A และโลหะ B ด้านอุณหภูมิต่ำไม่สัมผัสกัน ในความเป็นจริงวงจรในรูปนี้ยังคงเกิดแรงดันขึ้นเช่นกัน




ก) กระแสในวงจรปิด

ข) แรงเคลื่อนในวงจรปิด

ค) เทอร์โมคัปเปิ้ล

**รูปที่ 2.32** ลักษณะโครงสร้างของเทอร์โมคับเปิล

เทอร์โมคัปเปิ้ลมีหลายชนิดให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิและลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของชนิดนี้เกิดจากวัสดุของโลหะที่นำมาจับคู่เข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคอปเปิ้ลที่ได้แตกต่างกันไป นอกจากนี้ยังได้มีการผสมโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้ทำอยู่เดิม เช่นแพลตินัม เนื่องจากมีราคาสูง ตัวโลหะผสมที่เกิดขึ้นเช่นโครเมล (Cromel) คือ โลหะผสมของนิกเกิล 90% และโครเมียม 10% อลูเมล (Alumel) คือโลหะผสมของนิกเกิล 95% อลูมิเนียม 2% แมงกานีส 2% และซิลิคอน 1% ,คอนสแตนแตน (Constantan) คือโลหะผสมของทองแดง 60% และนิกเกิล 40%

การใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลควรเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณามีหลายข้อ เช่นค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน,ราคา,ความกัดกร่อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัส, ต้องใช้เทอร์โมเวลหรือไม่, ลักษณะบรรยากาศที่เป็น Oxidizing, Reducing, Insert หรือ Vacumm เป็นต้น

**ตารางที่ 2.10** คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐานชนิดต่างๆ

| **Type** | **ส่วนผสม** | **ย่านอุณหภูมิ** | | **แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ (mV)** |
|---|---|---|---|---|
| | | $^{o}C$ | $^{o}F$ | |
| B | แพลทินัม- 30%โซเดียม<br>แพลทินัม- 6%โซเดียม | 0 ถึง 1820 | 32 ถึง 3310 | 0 ถึง 13.814 |
| R | แพลทินัม- 13%โซเดียม | -50 ถึง 1768 | -60 ถึง 3210 | -02.26 ถึง 21.108 |
| S | แพลทินัม - 10%โซเดียม<br>แพลทินัม | -50 ถึง 1768 | -60 ถึง 3210 | -0.236 ถึง 18.698 |
| J | เหล็ก/คอนสแตนแตน | -210 ถึง 760 | -350 ถึง 1400 | -8.096 ถึง 42.922 |
| K | โครเมล/อะลูเมล | -270 ถึง 1372 | -450 ถึง 2500 | -6.458 ถึง 54.875 |
| T | ทองแดง/คอนสแตนแตน | -270 ถึง 400 | -450 ถึง 750 | -6.258 ถึง 20.869 |
| E | โครเมล/คอนสแตนแตน | -270 ถึง 1000 | -450 ถึง 1830 | -9.835 ถึง 76.358 |

**ตารางที่ 2.11** สภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ Thermowell

| **ความเหมาะสมในการใช้งาน** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tc Type** | **บรรยากาศ Oxidizing** | **บรรยากาศ Reducing** | **บรรยากาศ Inert** | **Vacuum** | **บรรยากาศ Sulferous** | **อุณหภูมิ < 0 °C** | **มีไอของโลหะ** |
| B | ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ได้ในช่วงสั้น ๆ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ |
| R | ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ |
| S | ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ |
| J | ได้ | ได้ | ได้ | ได้ | ไม่ได้ถ้า > 500 °C | ไม่ได้ | ได้ |
| K | ได้* | ไม่ได้ | ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ได้ |
| T# | ได้ | ได้ | ได้ | ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ได้ |
| E | ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ได้ | ได้ |

หมายเหตุ * ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E,J และ T เมื่ออุณหภูมิ > 550 °C

# โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ < 0 °C

Oxidizing : กระบวนการทางเคมีที่ดึงออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารนั้น

Reducing : กระบวนการทางเคมีที่ออกซิเจนถูกดึงออกจากสารนั้นเพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารภายนอก

Vacuum : ค่าความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศจนถึงสภาวะสูญญากาศ

Inert : สภาวะเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี

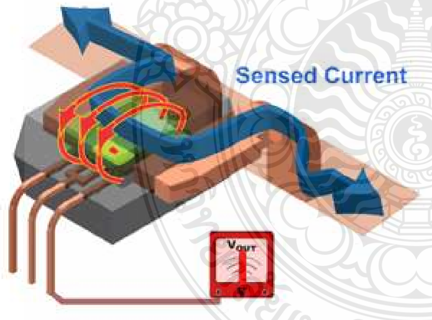
2.5.2 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส (Current Sensor)

Hall effect current sensor สามารถวัดค่ากระแสโดยการวัดคล้องสายของกระแสที่ไหล และให้เอาท์พุตออกมาเป็นแรงดัน ฮอลเอฟเฟ็คมีมากมายหลายชนิด บางชนิดที่ให้แรงดันเอาท์พุตรูปแบบสัญญาณจริง แต่ฮอลเอฟเฟ็คส่วนใหญ่จะใช้เป็น Instrument สำหรับความแม่นยำสูง สามารถวัดสัญญาณที่มี DC และ Hamonics ปะปนมากได้ หรือกระแสมีความซับซ้อนของสัญญาณปะปนสูง เหมาะสำหรับการต้องวัดเพื่อวิเคราะห์หา Harmonics ต่างๆ การเลือกใช้ต้องระวังแบนวิดท์ (ความถี่ใช้งาน) ด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) หรือฮอลล์เอฟเฟค เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ค้นพบโดยเอ็ดวิน ฮอลล์(Edwin Hall) ในปี พ.ศ. 2422 สิ่งที่เค้าค้นพบมีหลักการโดยสรุปดังนี้

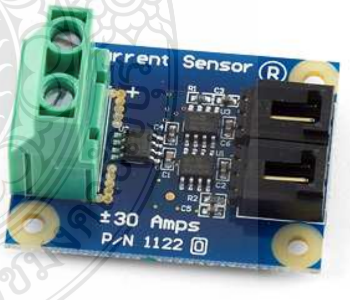
แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเรียกว่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ขึ้นที่ตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสคงที่ให้แผ่นตัวนำจะทำให้กระแสไหลผ่านแผ่นตัวนำอย่างคงที่ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบไปขั้วบวก

เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กมากระทำกับแผ่นตัวนำในทิศทางตั้งฉากจะทำให้ประจุพาหะ (Charge Carrier) ขงตัวนำเบี่ยงเบนไปด้านบนของตัวนำ จากรูป ประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนมีประจุเป็นประจุลบทำให้ด้านบนของแผ่นตัวนำมีขั้วไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนด้านล่างของแผ่นตัวนำจะมีขั้วตรงข้ามกับด้านบนนั่นคือมีประจุบวก เมื่อวัดความต่างศักย์ระหว่างด้านบนกับด้านล่างทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นแรงดันลบ โดยขนาดของแรงดันที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่มากระทำ หากความเข้มสนามแม่เหล็กมากก็จะทำให้เกิดแรงดันมาก และถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อย แรงดันก็จะน้อยตามไปด้วย

ส่วนกรณีที่มีการกลับขั้วแม่เหล็กจะทำให้แรงดันเอาท์พุตกลับขั้วกับกรณีที่กล่าวมา ตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนได้แก่ ตัวนำไฟฟ้าทั่วไป สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ส่วนตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นประจุบวกได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) ปัจจุบันฮอลล์เอฟเฟคจะอยู่ในรูปของวงจรรวมหรือ IC (Integrated Circuit) ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะให้แรงดันเอาท์พุตสูงกว่าตัวนำไฟฟ้าทั่วไป




ก) โครงสร้างภายในฮอลเอฟเฟ็ค




ข) ชุดตรวจจับกระแสขนาด 30A

**รูปที่ 2.33** อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส

การใช้งานฮอลล์เซนเซอร์เป็นการใช้วัดค่าความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ดังนั้นเราจึงสามารถนำฮอลล์เซนเซอร์มาใช้เป็นเซนเซอร์วัดการกระจัดได้เช่นกัน นอกจากใช้วัดสนามแม่เหล็กทั่วไปแล้ว ฮอลล์เซนเซอร์ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดกระแสไฟฟ้าโดยวิธีฮอลล์เอฟเฟคอีกด้วย โดยปกติแล้วการใช้แอมป์มิเตอร์วัดกระแสในวงจรต้องวัดแบบอนุกรมเราอาจต้องตัดวงจรเพื่ออนุกรมมิเตอร์เข้าไปแต่ฮอลล์เอฟเฟคจะทำให้การวัดง่ายขึ้น เมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวดเรียกว่าแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถ้าเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ได้ เราก็สามารถคำนวณเป็นค่ากระแสออกมาได้เช่นกัน ปัจจุบันได้มีการผลิตเซนเซอร์กระแสไฟฟ้าแบบฮอลล์เอฟเฟคในรูปของไอซีหลายเบอร์ด้วยกัน มีตั้งแต่กระแสต่ำๆ ไปจนถึงกระแสเป็นร้อยแอมป์เลยทีเดียว

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติก [1]

คู่มือนี้เป็นสรุปของกระทรวงอุตสาหกรรมในปี พ.ศง 2554 โดยได้สรุปภาวะอุตสาหกรรมโดยการรวบรวม ผลการสำรวจจากแหล่งต่างๆ เช่น การสำรวจผลการประกอบการของกิจการอุตสาหกรรมรายเดือนของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และการสำรวจภาวะอุตสาหกรรมของธนาคารแห่งประเทศไทย ซึ่งมีการทำเป็นดัชนีในลักษณะต่างๆ ผนวกกับข้อมูลทางการจ้างงาน การค้าและการลงทุนระหว่างประเทศ การสำรวจความคิดเห็นของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมและผู้บริโภคและการพยากรณ์ต่างๆ เกี่ยวกับภาวะเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเพื่อให้เห็นถึงภาวะอุตสาหกรรมที่ชัดเจนขึ้น

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ [2]

บทความนี้ สิทธิโชค สินรัตน์ ได้นำเสนอการศึกษาการใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนกับเตาหุงต้มโดยวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งมีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ โดยใช้ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอเตอร์เรโซแนนซ์อนุกรม โดยจะแบ่งรายละเอียดออกเป็นบท ๆ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงหลักการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยมีโหลดเป็นชุดขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมภาชนะหุงต้ม และหลักการคำนวณหาวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมภาชนะหุงต้ม ซึ่งจะอยู่ในบทที่ 2 จากนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอเตอร์ 2 ลักษณะ และการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านอินพุทและเอาท์พุทของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB พร้อมกับการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 ส่วนในบทที่ 5 และ 6 จะเป็นการคำนวณวิเคราะห์หาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรเรโซแนนซ์

เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่ จากนั้นจะเป็นหลักการคำนวณหาค่าความต้านทานและอินดักแตนซ์เทียบเท่าของโหลดเรโซแนนซ์อนุกรมซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าต่อไป พร้อมกับการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องทางทฤษฎี โดยจะทำการทดสอบในช่วงกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.5-2 กิโลวัตต์ และความถี่ในช่วง 30-40 กิโลเฮิรตซ์ เตาหุงต้มเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 2 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิรทซ์ และสามารถหุงต้มน้ำ 1 ลิตร ให้เดือดได้ภายในเวลา 3.5 นาที ขณะที่เตาหุงต้มแบบขดลวดความร้อนทั่วไปจะใช้เวลามากกว่าประมาณเท่าตัว

งานวิจัยเรื่องการควบคุมกำลังไฟฟ้าของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ด้วยจำนวนพัลส์ PDM สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง[3]

ยงยุทธ นาราษฎร์และวิริยะ พิเชษจำเริญได้นำเสนอวิธีกรควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยจำนวน พัลส์ PDM ของเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งได้นำเสนอรายละเอียดหลักการทำงานและการวิเคราะห์เรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ความถี่สูง การคำนวณหาคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุต$V_O, I_O$ของ PDM โดยได้คำนวณหาองค์ประกอบต่างๆ ของPDM ที่50/100 เป็นตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าเอาท์พุต $P_O$ และอินพุต $P_d$ ประสิทธิภาพ $\eta$ นอกจากนั้นได้เลือกรูปแบบพัลส์ PDM 300/300,299/300,... สำหรับการทดสอบสมรรถนะโดยการให้ความร้อนแก่แท่งชิ้นงานขนาด ¾ นิ้ว จนถึง 400 $^{o}C$ ซึ่งปรากฏว่าใช้เวลา 2 นาที ด้วยพัลส์ PDM 300/300 Duty Ratio = 1.0 และกำลังไฟฟ้าเอาท์พุต 450 วัตต์

วิทยานิพนธ์เรื่องเตาหุงต้มเหนี่ยวนำคลาสอี[4]

จีระศักดิ์ วงศาและคณะ ได้นำเสนอข้อมูลการทำงานของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนคลาสอี ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตขนาด 1 กิโลวัตถ์ โดยใช้อุปกรณ์ในการสวิตซ์เป็นไอจีบีทีเพียงตัวเดียว ทั้งนี้ในส่วนของการควบคุมใช้ไมโครคอลโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณขับเกตุและส่วนของการป้องกันกระแสเกิน การปรับกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตใช้การควบคุมด้วยการปรับความถี่และดิวตี้ไซเคิลที่ไมโครคอลโทรลเลอร์ จากการทดลอง ทำการทดสอบโดยการใช้หม้อ Stainless steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร โดยการทำงานของเครื่องจะมีประสิทธิภาพรวมที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าผลรวมการกระจายฮาร์โมนิกของกระแสอยู่ที่ 4 เปอร์เซ็นต์และค่าตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุตเท่ากับ 0.99

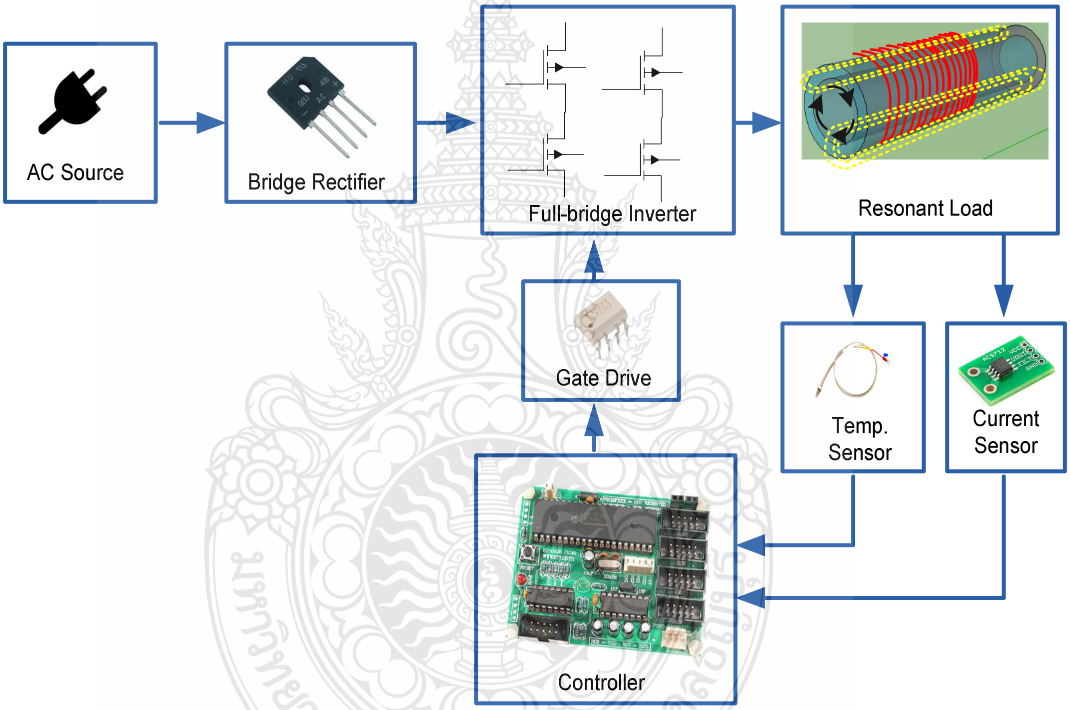
## 2.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานในส่วนที่สำคัญต่างๆ ทั้งในส่วนของกระบวนการหลอมพลาสติก ชนิดของพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้ หลักการของการเหนี่ยวนำความร้อน วงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งแบบเรโซแนนซ์อนุกรมและแบบขนาน เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในลักษณะของการสวิตช์ นอกจากนั้นจะเป็นการกล่าวถึงวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์สวิตช์ที่แรงดันศูนย์ ที่มีความแตกต่างและผลเสียรวมถึงปัญหาในการนำเอาวิธีการต่างมาทำให้เกิดการสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ตลอดจนการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC มาใช้ในการควบคุมการทำงาน

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการในส่วนต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ส่วนประกอบของระบบ การออกแบบและจัดสร้างเครื่องหลอมพลาสติกโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับอุณหภูมิและกระแสเพื่อใช้ในการควบคุมและการป้องกัน การออกแบบและจัดสร้างชุดควบคุมประมวลผลและแสดงผลการทำงาน โดยได้ออกแบบชุดทดสอบการหลอมพลาสติกที่กำลังทางไฟฟ้าซึ่งมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1




**รูปที่ 3.1** แผนผังของการออกแบบเครื่องหลอมพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 การออกแบบประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระสลับ 220 Vrms/50Hz เข้าสู่ชุดวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงหลังจากนั้นเข้าสู่วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เพื่อจ่ายให้กับโหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม ซึ่งจะต้องมีการควบคุมการปรับความร้อนโดยการปรับความถี่ของสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ควบคู่ไปกับวิธีควบคุมความหนาแน่นพัลส์ โดยใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A เป็นตัวสร้างสัญญาณ เข้าสู่วงจรขยายสัญญาณขับเกต และรับค่าของอุณหภูมิผ่านตัวตรวจจับอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล เนื่องจากทนอุณหภูมิได้สูง และใช้ ฮอลเอฟเฟ็คมาช่วยในการอ่านค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดเพื่อแสดงผลผ่านจอ LCD ต่อไป

## 3.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์คือวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave) อีกแบบหนึ่ง ออกแบบโดยคำนึงถึงกระแสที่ไหลผ่านเป็นหลักโดยคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่ระบบต้องการดังสมการที่ 3.1

**รูปที่ 3.2** ไดโอดแบบเต็มคลื่น ขนาด 800V 35A

$$P_{in} = V_{in}.I_{in}.\cos\phi \qquad (3.1)$$

<u>พิกัดกำลังไฟฟ้าที่กำหนด</u>

| | |
|---|---|
| พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่อง ประมาณ | 1,000 W |
| แรงดันอินพุตกระแสสลับ | 220 $V_{rms}$ |
| ตัวประกอบกำลัง (ต่ำสุด) ด้านอินพุต | 0.95 |

จากสมการที่ 3.1 จะได้ กระแสที่จะไหลผ่านไดโอด

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}\cos\theta} \qquad (3.2)$$

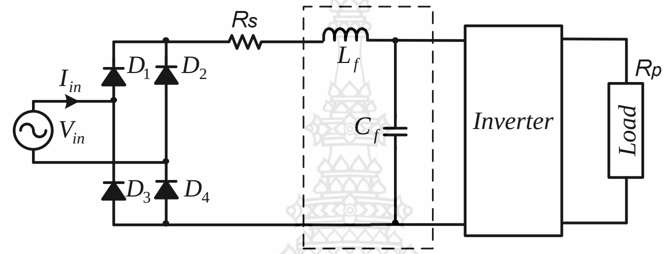
$$I_{in} = \frac{1,000}{220(0.95)}$$

$$I_{in} = 4.78A$$

เนื่องจากวงจรมีการทำงานแบบสวิตช์ซึ่งซึ่งไดโอดทำงานสูงสุดไม่เกิน 70 % ของพิกัดกำลัง ทำให้พิกัดกระแสของไดโอดอยู่ที่ 6.84 $A_{rms}$ และกระแสสูงสุดจึงเท่ากับ $6.84\sqrt{2} = 9.67A_{peak}$ ในที่นี้เลือกจึงใช้ไดโอดกำลังชนิดเต็มคลื่นแบบโมดูล ขนาด 800V 10A ดังรูปที่ 3.2

## 3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่

มาตรฐาน IEC 61000-3-2 (2000-08) หรือ มอก.1448-2544 เป็นมาตรฐานอ้างอิงสำหรับกำหนดขนาดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายที่ได้ออกแบบ ตามมาตรฐานระบุไว้ว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดขึ้น โดยกำหนดขีดจำกัดของส่วนประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าเข้า ที่มีกระแสไฟฟ้าเข้าไม่เกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟส และประสงค์ให้ต่อกับระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสาธารณะบริภัณฑ์ จึงต้องมีการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะของวงจรกรองความถี่ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.2




**รูปที่ 3.2** วงจรเรียงกระแส 1 เฟสและ LC Filter

เมื่อ $V_{in}$ คือ แรงดันอินพุท

$P_{in}$ คือ กำลังไฟฟ้าอินพุทสูงสุด

$I_{ref}$ คือ กระแสที่ไหลผ่านวงจรเรียงกระแส

$T_s$ คือ คาบเวลาของความถี่ในระบบ

พิกัดกำลังที่ออกแบบไว้ 1,000 วัตต์ แรงดันอินพุตสูงสุด $V_p$ = 311.13 โวลต์ ความถี่ต่ำสุด 50 เฮิรตซ์

จาก $R_p = \frac{V_p^2}{P_{in}}$ ดังนั้นจะได้ว่า $R_p = \frac{311.13^2}{1000}$ = 96.80 Ω

ซึ่ง $Q = \sqrt{\frac{R_p}{R_s} - 1}$ ดังนั้นจะได้ว่า $Q = \sqrt{\frac{96.80}{46.02} - 1}$ = 1.05

จาก $X_s = Q_s R_s = (1.05)(46.02)$ = 48.34 Ω (Inductive)

และ $X_p = \frac{R_p}{Q_p} = \frac{96.80}{1.05}$ = 92.19 Ω (Capacitive)

ที่ความถี่ 50 Hz ได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ

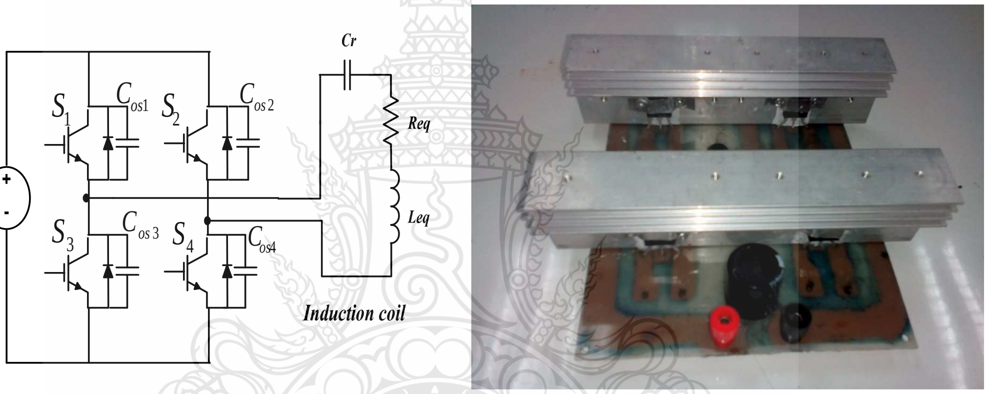
$$L_f = \frac{X_s}{\omega} = \frac{48.34}{2\pi(50)} = 153.87 \text{ mH}$$

ที่ความถี่ 50 Hz ได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$C_f = \frac{1}{\omega x_p} = \frac{1}{2\pi(50)(92.19)} \qquad = \qquad 34.53\ \mu F$$

## 3.3 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ [3]

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เนื่องจากสามารถจ่ายกำลังทางไฟฟ้าได้สูงกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยออกแบบกำลังทางไฟฟ้าสูงสุดที่พิกัด 1,000 วัตต์ สามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าได้ เพื่อเหมาะสมกับการทดสอบเปรียบเทียบควบคู่ไปกับการทดสอบการให้ความร้อนของขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ เพื่อทดสอบให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพได้ โดยมีการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.4

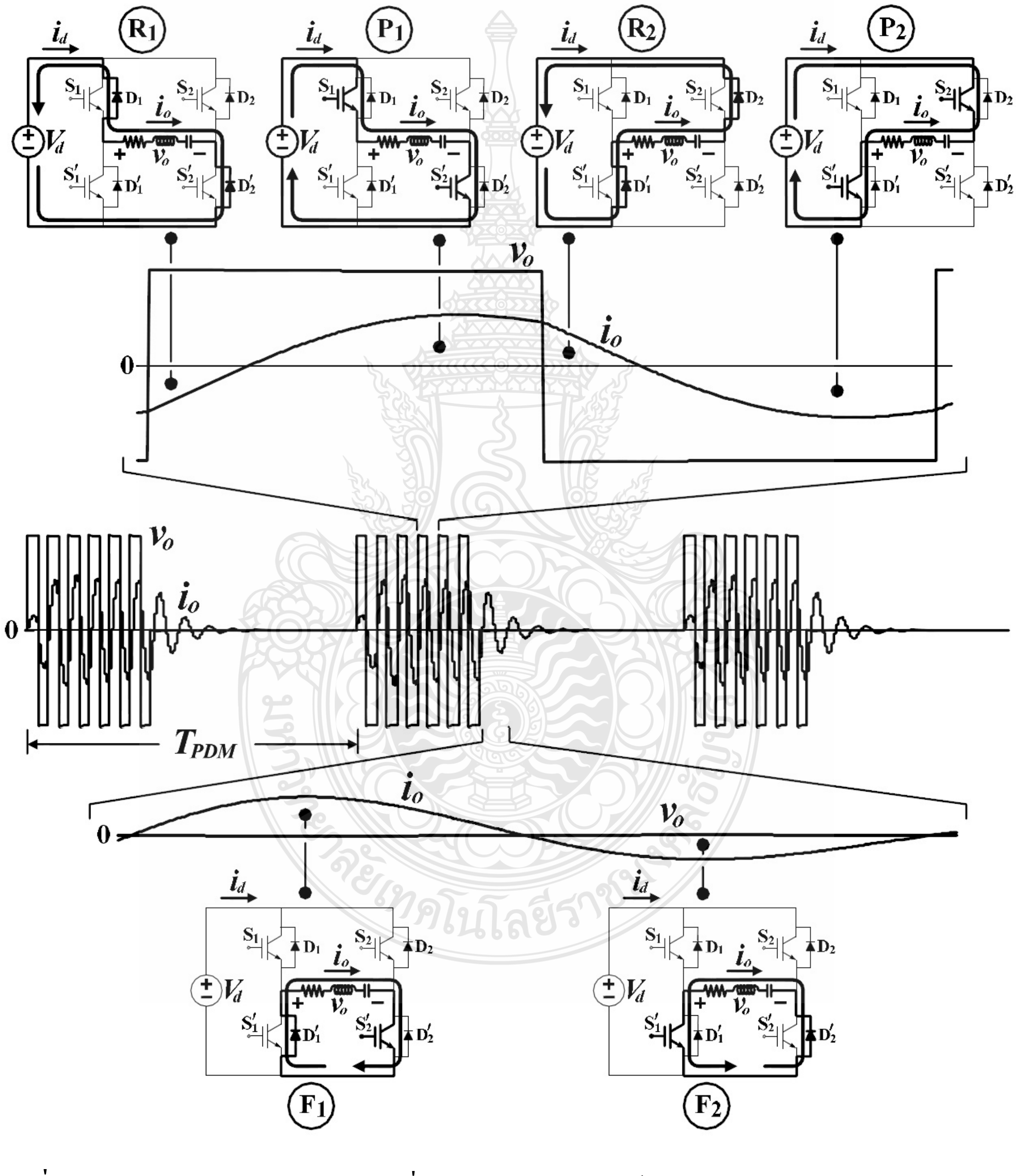



**รูปที่ 3.4** วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ที่ใช้ในการออกแบบ

3.3.1หลักการออกแบบโดยวิเคราะห์จากการทำงานของวงจร

การทำงานของวงจรที่ใช้ควบคุมการปรับลดกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทด้วยการปรับลดจำนวนความหนาแน่นพัลส์ ในแต่ละคาบเวลา ของคลื่นแรงดันเอาท์พุทสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จะมีช่วงการทำงานในบริเวณช่วงที่มีสัญญาณพัลส์ ด้านเอาท์พุท โดยจะประกอบด้วยช่วงที่มีพัลส์บวกและช่วงที่พัลส์ลบซึ่งในบริเวณพัลส์บวกและลบนี้จะมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า 2 ทิศทางจากแหล่งจ่ายไปยังเอาท์พุทเป็นส่วนใหญ่ซึ่งตรงกับช่วงโหมดทำกำลัง ( P1 , P2 ) และส่งคืนจากเอาท์พุทกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเป็นส่วนน้อยซึ่งตรงกับช่วงโหมดฟื้นฟู ( R1 , R2 ) สำหรับบริเวณที่ไม่มีพัลส์เอาท์พุทซึ่งตรงกับช่วงโหมดอิสระ ( F1 , F2 ) จะไม่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า การปรับลดกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทจึงสามารถทำได้โดยการปรับลดจำนวนความหนาแน่นพัลส์ในแต่ละคาบเวลาของคลื่นเอาท์พุทนี้ เช่น

ความหนาแน่นพัลส์ 100/100, 90/100, 80/100…เรื่อยไป เป็นต้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ออกแบบไว้มีค่าเท่ากับ 1000 วัตต์ ที่ตัวประกอบกำลังต่ำสุดเท่ากับ 0.5 ดังนั้นกระแสเฉลี่ยเอาท์พุตที่ได้จากการคำนวณจึงมีค่าเท่ากับ $I_o$ = 1000/(220X0.5) = 9.90 แอมป์ จึงเลือกใช้ไอจีบีที ยี่ห้อ IXYS เบอร์ IXGH30N120B3D1 ที่สามารถทนกระแสได้ถึง 30 แอมป์ และเนื่องจากสามารถทนค่ากำลังสูญเสียในตัวสวิทช์ได้สูง เนื่องจากรับแรงดันตกคร่อมได้ถึง 1200 โวลต์




**รูปที่ 3.5** วงจรการทำงานและลักษณะคลื่นแรงดัน กระแสเอาท์พุท[3]

3.3.2 การคำนวณคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท *vo* , *io* และองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ จากหลักการทำงานในหัวข้อที่ 3.3.1 สามารถนำมาเขียนสมการแรงดันและกระแสเอาท์พุท $v_o, i_o$ ในแต่ละโหมดการทำงานของวงจรได้ โดยสมการ 3.6 และ 3.7 จะอยู่ในช่วงโหมดฟื้นฟู (R1) สมการ 3.8 และ 3.9 ในช่วงโหมด Powering (P1) สมการที่ 3.10 และ 3.11 ในช่วงโหมด ฟื้นฟู (R2) สมการที่ 3.12 และ 3.13 ในช่วงโหมดกำลัง (P2) สมการ 3.14 และ 3.15 ในช่วงโหมดอิสระ (F1) และสุดท้ายคือสมการที่ 3.16 และ 3.17 ในช่วงโหมดอิสระ (F2)

$$v_o = v_d + 2v_{F,D} \tag{3.6}$$

$$i_o = e^{-\alpha t}\left[\left(\frac{v_d + 2v_{F,D} - v - \alpha LI}{\omega t}\right)\sin(\omega t) + I\cos(\omega t)\right] \tag{3.7}$$

$$v_o = v_d + 2v_{CE(on)} \tag{3.8}$$

$$i_o = e^{-\alpha t}\left[\left(\frac{v_d - 2v_{CE(on)} - v - \alpha LI}{\omega t}\right)\sin(\omega t) + I\cos(\omega t)\right] \tag{3.9}$$

$$v_o = -v_d + 2v_{F,D} \tag{3.10}$$

$$i_0 = e^{-\alpha t}\left[\left(\frac{-v_d + 2v_{F,D} - v - \alpha LI}{\omega L}\right)\sin(\omega t) + I\cos(\omega t)\right] \tag{3.11}$$

$$v_0 = -v_d + 2v_{CE(on)} \tag{3.12}$$

$$i_0 = e^{-\alpha t}\left[\left(\frac{-v_d + 2v_{CE(on)} - v - \alpha LI}{\omega L}\right)\sin(\omega t) + I\cos(\omega t)\right] \tag{3.13}$$

$$v_0 = -v_{F,D} - v_{CE(on)} \tag{3.14}$$

$$i_0 = e^{-\alpha t}\left[\left(\frac{-v_{F,D} - v_{CE(on)} - v - \alpha LI}{\omega L}\right)\sin(\omega t) + I\cos(\omega t)\right] \tag{3.15}$$

$$v_0 = v_{F,D} + v_{CE(on)} \tag{3.16}$$

$$i_0 = e^{-\alpha t}\left[\left(\frac{v_{F,D} + v_{CE(on)} - v - \alpha LI}{\omega L}\right)\sin(\omega t) + I\cos(\omega t)\right] \tag{3.17}$$

$I$ คือค่าเริ่มต้นของกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ของแต่ละโหมดการทำงานของวงจร

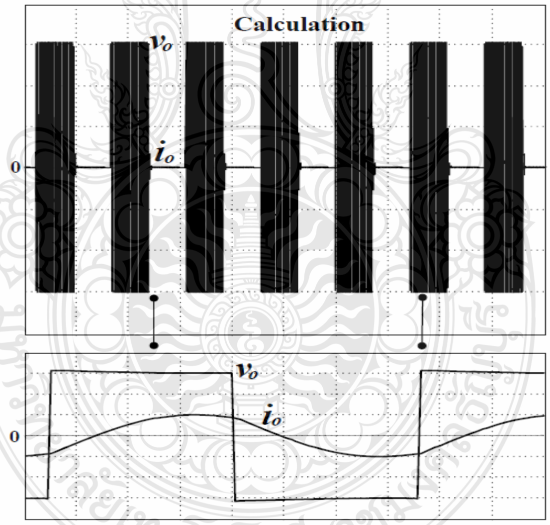
$V$ คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ของแต่ละโหมดการทำงานของวงจร

$V_{F,D}$ คือค่าแรงดันคร่อมไดโอดขณะนำกระแส

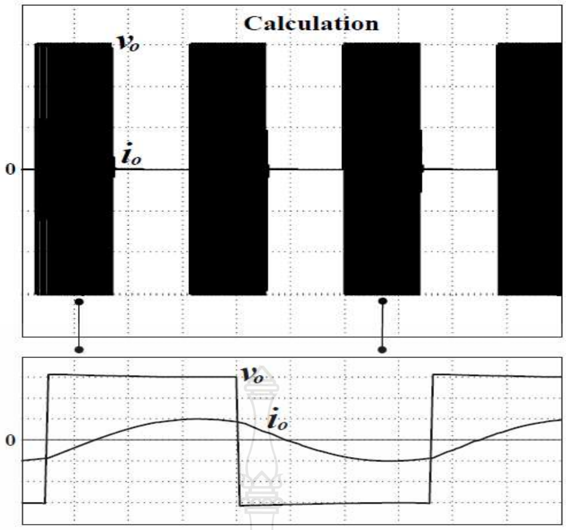
$V_{CE(on)}$ คือค่าแรงดันคร่อมสวิทช์ไอจีบีทีขณะนำกระแส

โดยที่ $\alpha = \dfrac{R}{2L}$, $\omega = \sqrt{\dfrac{1}{LC} - \left[\dfrac{R}{2L}\right]^2}$

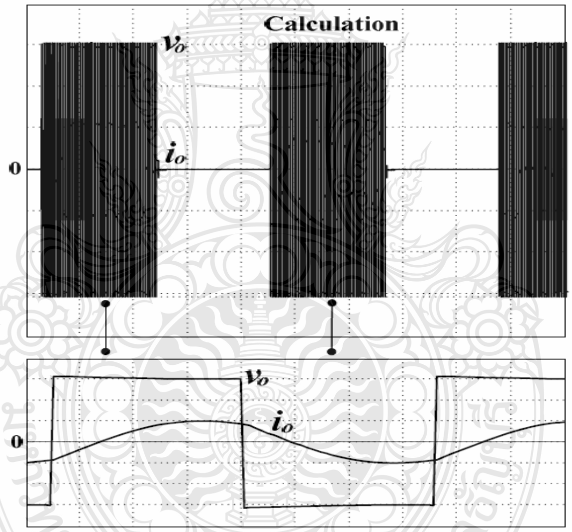
เมื่อนำสมการเหล่านี้ไปคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถเขียนคลื่นคำนวณของแรงดันและกระแสเอาท์พุท $v_o$ ,$i_o$ ภายใต้เงื่อนไขของรูปแบบ ความหนาแน่นพัลส์ ที่เลือกใช้ เช่น 50/100, 100/200 และ 150/300 ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 และทดลองตามลำดับที่เงื่อนไขของ ความหนาแน่นพัลส์ 50/100 อัตรส่วนช่วงใช้งาน 0.5 ดังรูปที่ 3.7 ตลอดจนรูปที่ 3.8 ได้คลื่นแรงดันและกระแสจากการคำนวณในทำนองเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขของ ความหนาแน่นพัลส์ 100/200 และ 150/300 ตามลำดับโดยมีค่า อัตราส่วนช่วงใช้งาน 0.5 เดียวกัน




**รูปที่ 3.6** คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท กรณีคลื่น ความหนาแน่นพัลส์ 50/100 [3]




**รูปที่ 3.7** คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท กรณีคลื่น ความหนาแน่นพัลส์ 100/200 [3]




**รูปที่ 3.8** คลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุท กรณีคลื่น ความหนาแน่นพัลส์ 150/300 [3]

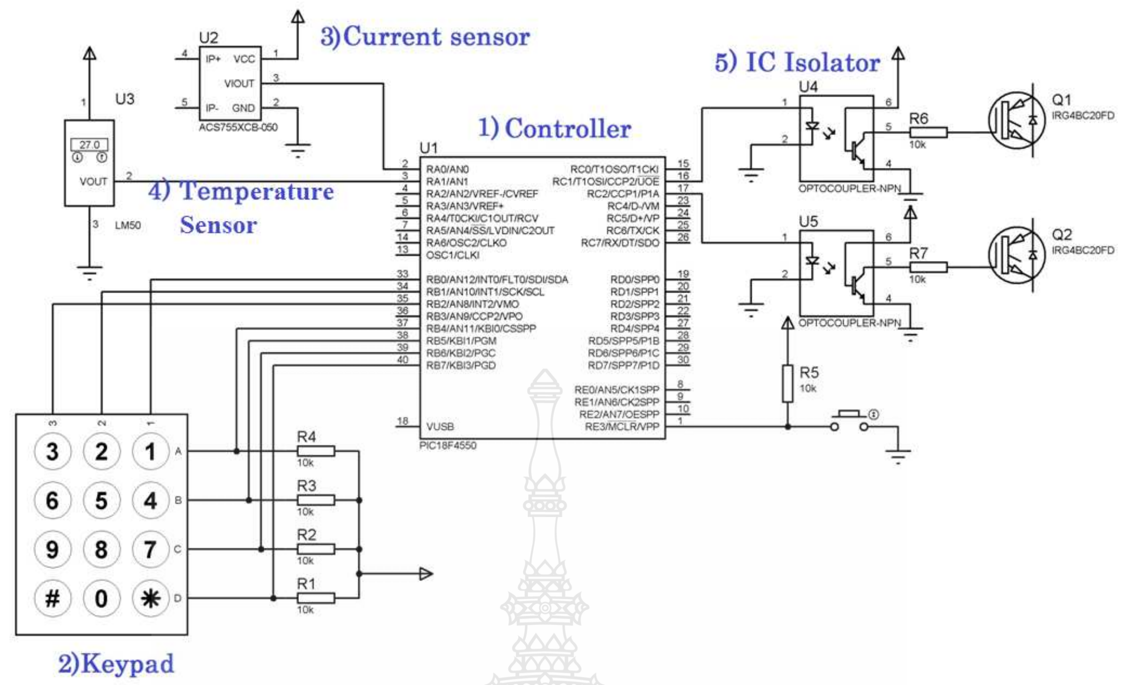
3.3.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท *Po* กำลังไฟฟ้าอินพุท *Pd* ประสิทธิภาพ และสมรรถนะการให้ความร้อน

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า (*Po*) ด้านเอซีเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถทำได้โดยการแตกหาองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของคลื่นแรงดัน และกระแสเอาท์พุท $v_o$ , $i_o$ พร้อมมุมต่างเฟส $\theta$ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุท *Po*1 ใน 1 ไซเคิลได้ และเมื่อ

นำไปคูณกับ อัตราส่วนช่วงใช้งาน (D) ก็จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทรวม $Po$ = (D)$Po1$ ส่วนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า $Pd$ ด้านดีซีอินพุทก็สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน โดยการหาค่าเฉลี่ยของกระแส $i_d$ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระแสเอาท์พุท $i_o$ เฉพาะในช่วงการทำงานของโหมดฟื้นฟู และโหมดกำลัง เท่านั้น โดยการแตกฮาร์โมนิกส์เพื่อหาองค์ประกอบดีซีด้วยวิธี FFT และเมื่อนำไปคูณกับค่าแรงดันดีซี $Vd$ ก็จะได้ค่ากำลังไฟฟ้า $Pd1$ ในช่วง 1 ไซเคิล จากนั้นจึงนำไปคูณกับค่าอัตราส่วนช่วงใช้งานก็จะได้ค่ากำลังไฟฟ้ารวม $Pd$ = (D)( $Pd1$ ) จากกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท $Po$ และกำลังไฟฟ้าอินพุท $Pd$ สามารถนำมาคำนวณหาเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพ $\eta$ และอัตราส่วนช่วงใช้งาน

## 3.4 การออกแบบวงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของการควบคุมการทำงานนั้นประกอบไปด้วยการรับค่าสัญญาณอินพุต ได้แก่ คำสั่งจากผู้ใช้งานด้วยคีย์แพดสวิตช์ ค่ากระแสของโหลดเรโซแนนซ์และค่าอุณหภูมิของเตาหลอมพลาสติก ผ่านอุปกรณ์ตรวจจับกระแสและอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ ที่ป้อนกลับเข้ามาเพื่อควบคุมการทำงานของเตาหลอมให้รักษาอุณหภูมิให้คงที่ โดยสามารถปรับตั้งอุณหภูมิของเตาหลอมได้ตั้งแต่ 200 – 300 องศาเซลเซียส ซึ่งการควบคุมนั้นได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A หรือเบอร์ใกล้เคียงที่สามารถรับสัญญาณอนาล็อกอินพุต มีฟังก์ชันคีย์แพดสวิตช์รองรับ อีกทั้งยังสามารถสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ เพื่อใช้ในการขับมอสเฟตหรือไอจีบีทีที่มีความเหมาะสมได้ ซึ่งการขับนั้นต้องขยายสัญญาณขับเกตด้วยไอซีแยกส่วนสัญญาณพื่อขับด้วยแรงดันที่เหมาะสมกับอุปกรณ์สวิตช์ต่าง ๆ ต่อไป โดยการควบคุมนั้นประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้ แสดงดังรูปที่ 3.9




**รูปที่ 3.9** ส่วนประกอบของการออกแบบวงจรควบคุม

## 3.5 การสร้างขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L_{eq}$ )

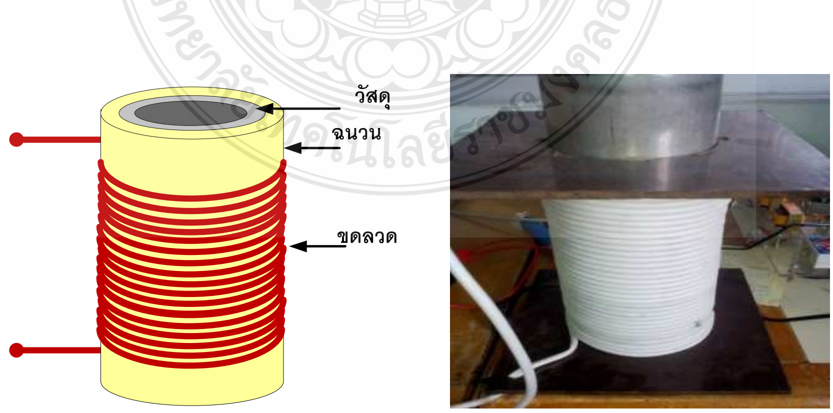
เนื่องจากธรรมชาติของโลหะที่นำมาใช้ทำขดลวดเหนี่ยวนำทำด้วยทองแดงย่อมมีคุณสมบัติในการต้านทานกระแสไฟฟ้าทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับในเครื่องหลอมพลาสติกซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ความต้านทานของขดลวดมีค่าความต้านทานต่อกระแสสูงขึ้นถ้าความถี่สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ขดลวดพันรอบเตาหลอมเป็นลักษณะทรงกระบอก ดังนั้นความกว้างของชุดขดลวดจึงต้องมีขนาดใกล้เคียงหรือพอดีกับเบ้าหลอม ขดลวดดังนั้นต้องเลือกขนาดของขดลวดที่สามารถยอมให้กระแสไหลผ่านด้วยดี ด้วยอ้างอิงตารางขดลวด AWG ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งต้องพันตีเกลียวขดลวดเพื่อชดเชยผลอันเกิดจากสกินเอฟเฟค (Skin Effect ) ที่เกิดขึ้นกับการไหลของกระแสในขดลวดทองแดงขณะทำงานที่ความถี่สูง และมีพื้นที่เพียงพอกับปริมาณกระแสที่ไหลทำงานที่พิกัดสูงสุด (ที่ความถี่เรโซแนนซ์ $F_{resonant}$ ) จะได้ $I_L = \dfrac{1000}{0.5(311.13)} = 6.43$ แอมป์ ดังนั้นเลือกใช้ขดลวด AWG เบอร์ 23 ทนกระแสสูงสุดได้ 0.729 แอมป์ ที่ความถี่ 53 kHz จำนวน 19.28(1.25)/0.729 = 11.03 $\approx$ 12 ขดลวดที่ได้เมื่อนำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำขณะมีโหลดบาเรลจะได้เท่ากับ 92.5 ไมโครเฮนรี่ ความต้านทาน 1.67 โอห์ม ที่ระยะ Gap 2 เซนติเมตร การออกแบบฟอร์มขดลวดเป็นทรงกลมแสดงดังรูปที่ 3.10

**ตารางที่ 3.1** American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes and Properties

| **AWG** | **Diameter** [inches] | **Diameter** [mm] | **Area** [$mm^2$] | **Resistance** [Ohms / 1000 ft] | **Resistance** [Ohms / km] | **Max Current** [Amperes] | **Max Frequency** for 100% skin depth |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0000 (4/0) | 0.46 | 11.684 | 107 | 0.049 | 0.16072 | 302 | 125 Hz |
| 000 (3/0) | 0.4096 | 10.40384 | 85 | 0.0618 | 0.202704 | 239 | 160 Hz |
| 00 (2/0) | 0.3648 | 9.26592 | 67.4 | 0.0779 | 0.255512 | 190 | 200 Hz |
| 0 (1/0) | 0.3249 | 8.25246 | 53.5 | 0.0983 | 0.322424 | 150 | 250 Hz |
| 1 | 0.2893 | 7.34822 | 42.4 | 0.1239 | 0.406392 | 119 | 325 Hz |
| 2 | 0.2576 | 6.54304 | 33.6 | 0.1563 | 0.512664 | 94 | 410 Hz |
| 3 | 0.2294 | 5.82676 | 26.7 | 0.197 | 0.64616 | 75 | 500 Hz |
| 4 | 0.2043 | 5.18922 | 21.2 | 0.2485 | 0.81508 | 60 | 650 Hz |
| 5 | 0.1819 | 4.62026 | 16.8 | 0.3133 | 1.027624 | 47 | 810 Hz |
| 6 | 0.162 | 4.1148 | 13.3 | 0.3951 | 1.295928 | 37 | 1100 Hz |
| 7 | 0.1443 | 3.66522 | 10.5 | 0.4982 | 1.634096 | 30 | 1300 Hz |
| 8 | 0.1285 | 3.2639 | 8.37 | 0.6282 | 2.060496 | 24 | 1650 Hz |
| 9 | 0.1144 | 2.90576 | 6.63 | 0.7921 | 2.598088 | 19 | 2050 Hz |
| 10 | 0.1019 | 2.58826 | 5.26 | 0.9989 | 3.276392 | 15 | 2600 Hz |
| 11 | 0.0907 | 2.30378 | 4.17 | 1.26 | 4.1328 | 12 | 3200 Hz |
| 12 | 0.0808 | 2.05232 | 3.31 | 1.588 | 5.20864 | 9.3 | 4150 Hz |
| 13 | 0.072 | 1.8288 | 2.62 | 2.003 | 6.56984 | 7.4 | 5300 Hz |
| 14 | 0.0641 | 1.62814 | 2.08 | 2.525 | 8.282 | 5.9 | 6700 Hz |
| 15 | 0.0571 | 1.45034 | 1.65 | 3.184 | 10.44352 | 4.7 | 8250 Hz |
| 16 | 0.0508 | 1.29032 | 1.31 | 4.016 | 13.17248 | 3.7 | 11 k Hz |
| 17 | 0.0453 | 1.15062 | 1.04 | 5.064 | 16.60992 | 2.9 | 13 k Hz |
| 18 | 0.0403 | 1.02362 | 0.823 | 6.385 | 20.9428 | 2.3 | 17 kHz |
| 19 | 0.0359 | 0.91186 | 0.653 | 8.051 | 26.40728 | 1.8 | 21 kHz |
| 20 | 0.032 | 0.8128 | 0.518 | 10.15 | 33.292 | 1.5 | 27 kHz |
| 21 | 0.0285 | 0.7239 | 0.41 | 12.8 | 41.984 | 1.2 | 33 kHz |

**ตารางที่ 3.1** American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes and Properties (ต่อ)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22 | 0.0254 | 0.64516 | 0.326 | 16.14 | 52.9392 | 0.92 | 42 kHz |
| 23 | 0.0226 | 0.57404 | 0.258 | 20.36 | 66.7808 | 0.729 | 53 kHz |
| 24 | 0.0201 | 0.51054 | 0.205 | 25.67 | 84.1976 | 0.577 | 68 kHz |
| 25 | 0.0179 | 0.45466 | 0.162 | 32.37 | 106.1736 | 0.457 | 85 kHz |
| 26 | 0.0159 | 0.40386 | 0.129 | 40.81 | 133.8568 | 0.361 | 107 kHz |
| 27 | 0.0142 | 0.36068 | 0.102 | 51.47 | 168.8216 | 0.288 | 130 kHz |
| 28 | 0.0126 | 0.32004 | 0.081 | 64.9 | 212.872 | 0.226 | 170 kHz |
| 29 | 0.0113 | 0.28702 | 0.0642 | 81.83 | 268.4024 | 0.182 | 210 kHz |
| 30 | 0.01 | 0.254 | 0.0509 | 103.2 | 338.496 | 0.142 | 270 kHz |
| 31 | 0.0089 | 0.22606 | 0.0404 | 130.1 | 426.728 | 0.113 | 340 kHz |
| 32 | 0.008 | 0.2032 | 0.032 | 164.1 | 538.248 | 0.091 | 430 kHz |
| 33 | 0.0071 | 0.18034 | 0.0254 | 206.9 | 678.632 | 0.072 | 540 kHz |
| 34 | 0.0063 | 0.16002 | 0.0201 | 260.9 | 855.752 | 0.056 | 690 kHz |
| 35 | 0.0056 | 0.14224 | 0.016 | 329 | 1079.12 | 0.044 | 870 kHz |
| 36 | 0.005 | 0.127 | 0.0127 | 414.8 | 1360 | 0.035 | 1100 kHz |
| 37 | 0.0045 | 0.1143 | 0.01 | 523.1 | 1715 | 0.0289 | 1350 kHz |
| 38 | 0.004 | 0.1016 | 0.00797 | 659.6 | 2163 | 0.0228 | 1750 kHz |
| 39 | 0.0035 | 0.0889 | 0.00632 | 831.8 | 2728 | 0.0175 | 2250 kHz |
| 40 | 0.0031 | 0.07874 | 0.00501 | 1049 | 3440 | 0.0137 | 2900 kHz |



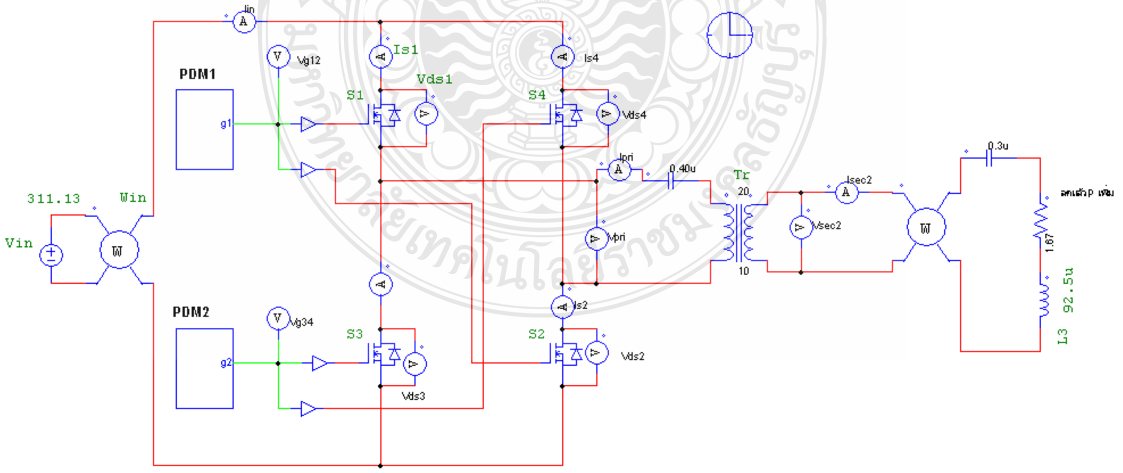

**รูปที่ 3.10** ลักษณะการออกแบบเบ้าหลอมพลาสติก

### 3.6 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ($C_1$)

จากค่าความเหนี่ยวของนำขดลวดซึ่งมีค่า 92.5 ไมโครเฮนรี่ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 30 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นจะสามารถนำมาหาค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ($C_1$) จากสมการ $f_r = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ได้เท่ากับ 0.30 ไมโครฟารัด ในทางปฏิบัติใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรไพลีนฟิล์มขนาด 0.01ไมโครฟารัด > 600 $V_{DC}$ 30 ตัวต่อขนานกัน เพื่อลดค่าความต้านทานอนุกรมสมมูล (ESR:Equivalent Series Resistant) ที่อยู่ในตัวเก็บประจุให้น้อยลงเพราะเนื่องมาจากค่าความต้านทานดังกล่าวทำให้ตัวเก็บประจุมีความสูญเสียมากขึ้นขณะทำงานที่กระแสและความถี่สูง ส่งผลให้ตัวเก็บประจุนั้นเกิดความเครียดทางไฟฟ้าและทำให้เสียหายได้ในที่สุด

### 3.7 การจำลองการทำงาน

การดำเนินงานนั้นเริ่มจากการจำลองการทำงานและออกแบบวงจรควบคู่กันไป ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม เพื่อนำมาใช้ในการสร้างวงจรการทำงานจริง ในการจำลองการทำงานของวงจรกำลังนั้นได้ใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยกำหนดค่าของตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าต่าง ๆ นั้นก็ได้มาทั้งจากค่าจริงเช่น ค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต และบางค่าได้มาจากการวัดได้แก่ ค่าความต้านทานสมมูล ,ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล ส่วนในเรื่องของความถี่ในการสวิตซ์นั้น ต้องจำลองการทำงานในหลาย ๆ ย่านความถี่ เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมตามพิกัดกำลังไฟฟ้าของงานวิจัยที่ตั้งไว้

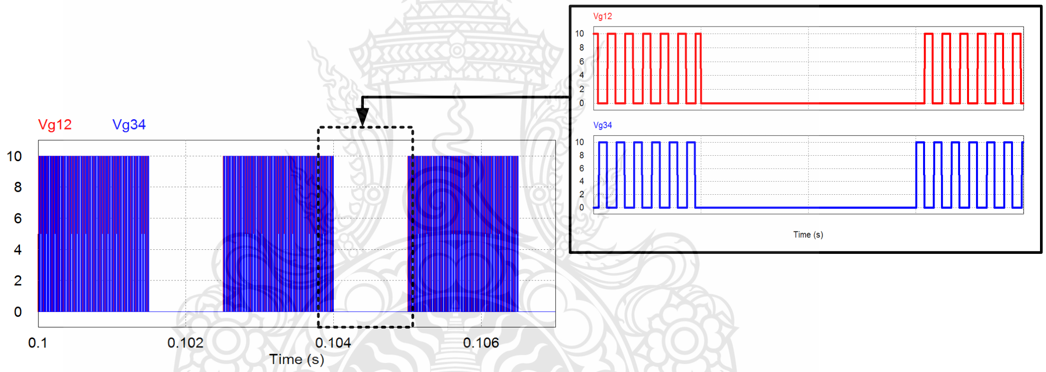



**รูปที่ 3.11** การจำลองการทำงานบนโปรแกรม Psim

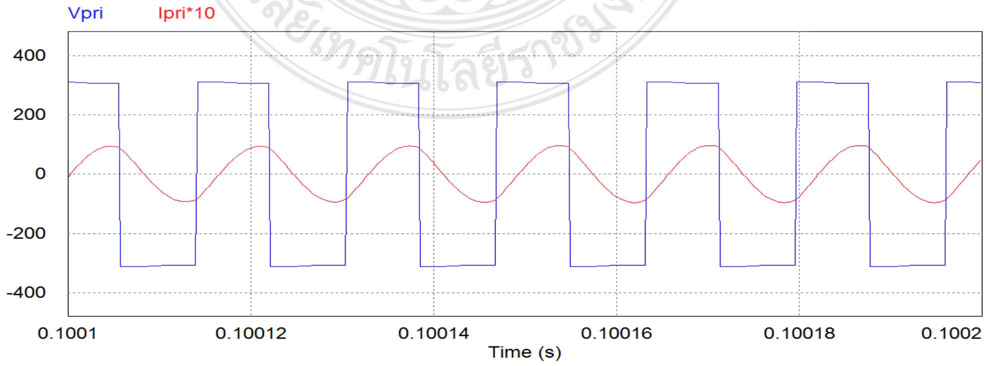
**ตารางที่ 3.2** ค่าของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

| อุปกรณ์ต่างๆ | สัญลักษณ์ | ค่า | หน่วย |
|---|---|---|---|
| แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุต | Vin | 311,50 | Vpeak,Hz |
| ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ | $C_r$ | 0.3 | $\mu$F |
| ความต้านทานสมมูล | $R_{eq}$ | 1.67 | $\Omega$ |
| ความเหนี่ยวนำสมมูล | $L_{eq}$ | 92.5 | $\mu$H |
| ความถี่ในการสวิตซ์ | $f_s$ | 60 | kHz |

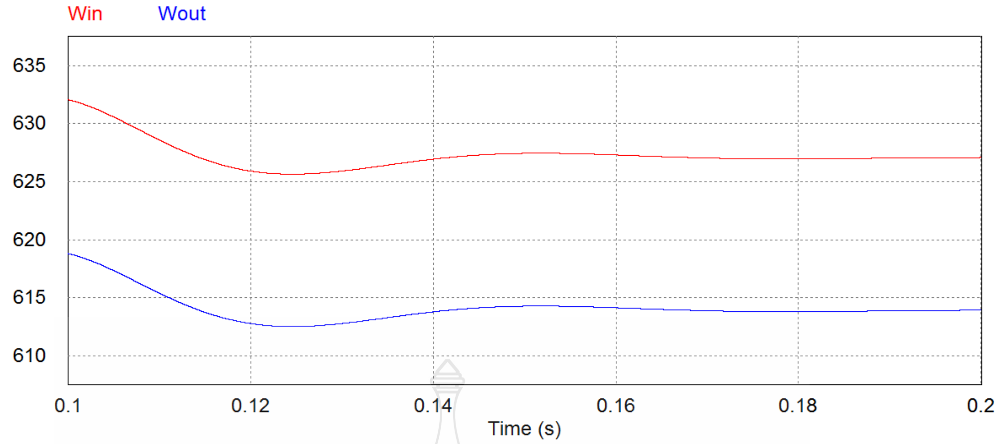
หลังจากที่ทำการจำลองการทำงานเสร็จแล้วนั้น จะได้ค่าต่างๆ อันได้แก่ ค่าแรงดันและกระแสอินพุต ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตและค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุต ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด ค่าแรงดันตกคร่อมสวิตซ์ และค่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตซ์ เมื่อเราทราบค่าเหล่านี้ก็สามารถที่จะนำค่าเหล่านี้ไปเลือกซื้ออุปกรณ์ต่างๆมาใช้ในวงจรที่จะประกอบขึ้นจริงต่อไป



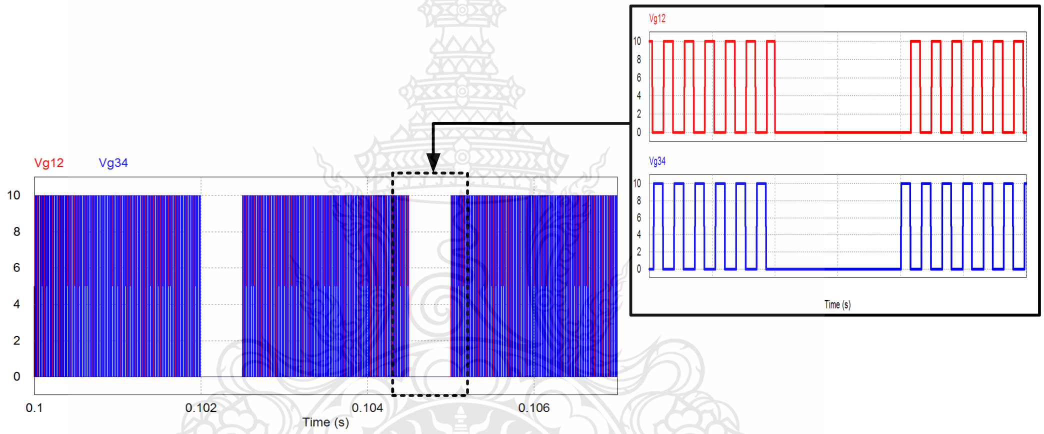

**รูปที่ 3.12** รูปคลื่นสัญญาณขับเกต ความหนาแน่นพัลส์=60%



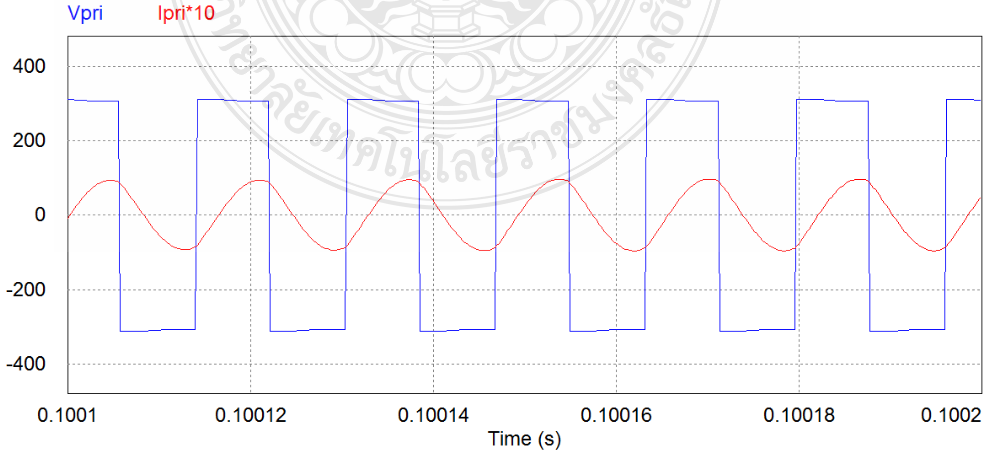

**รูปที่ 3.13** รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด ความหนาแน่นพัลส์=60%



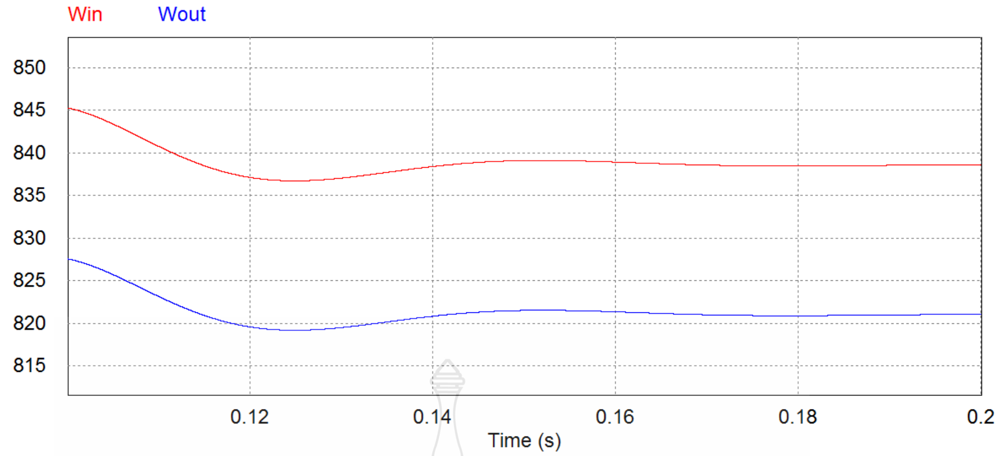

**รูปที่ 3.14** กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ ความหนาแน่นพัลส์=60%



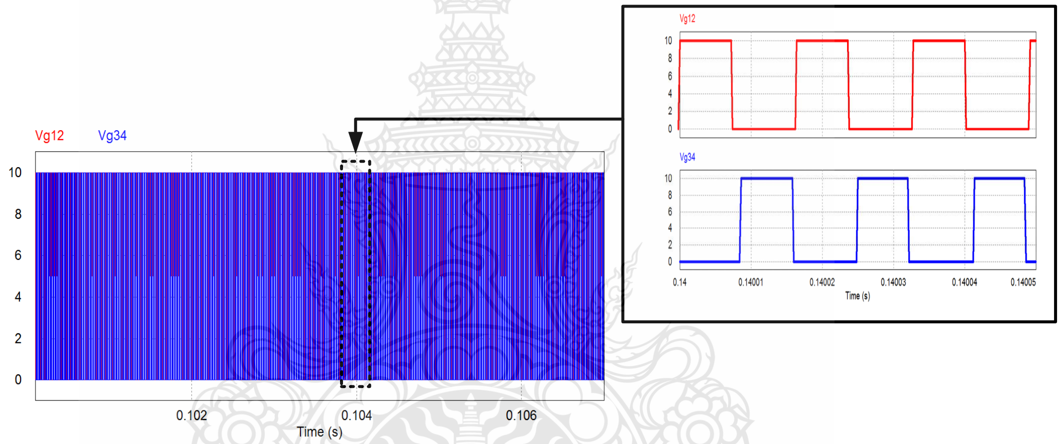

**รูปที่ 3.15** รูปคลื่นสัญญาณขับเกต ความหนาแน่นพัลส์=80%



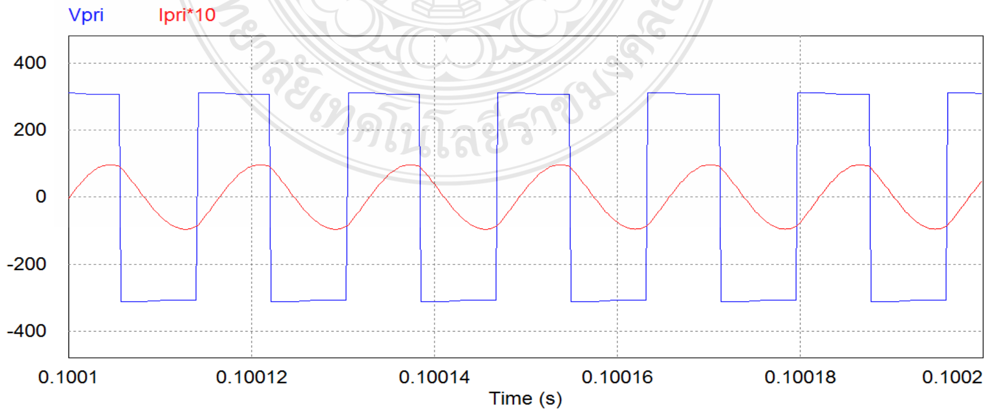

**รูปที่ 3.16** รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด ความหนาแน่นพัลส์=80%



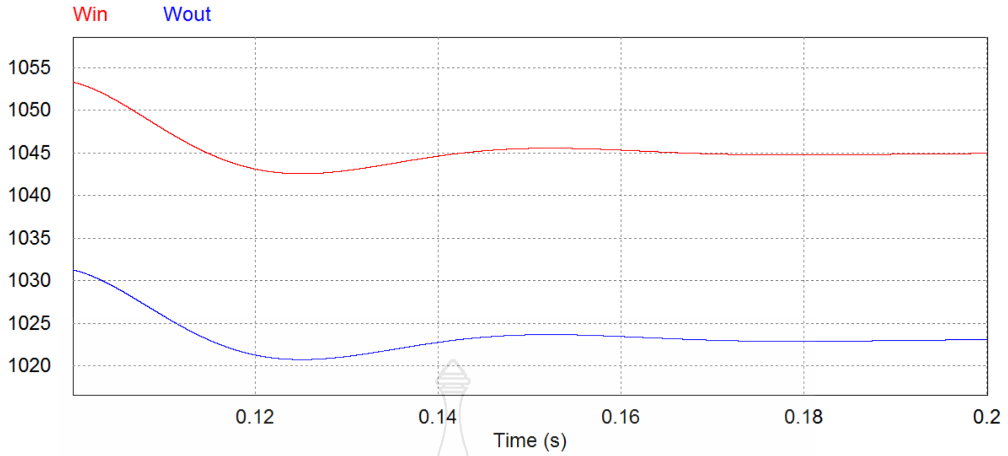

**รูปที่ 3.17** กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ ความหนาแน่นพัลส์=80%




**รูปที่ 3.18** รูปคลื่นสัญญาณขับเกต ความหนาแน่นพัลส์=100%




**รูปที่ 3.19** รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดและกระแสที่ไหลผ่านโหลด ความหนาแน่นพัลส์=100%




**รูปที่ 3.20** กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ ความหนาแน่นพัลส์=100%

จากการจำลองทดสอบปรับค่า ความหนาแน่นพัลส์ เท่ากับ 60% 80% และ 100% ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสามารถปรับลดได้ตามความหนาแน่นพัลส์ ทั้งนี้การคิดค่าตัวประกอบกำลัง ต้องคิดเฉพาะจุดที่มีมุมต่างของกระแสและแรงดันที่ชัดเจน จึงจะได้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** สรุปผลค่าต่างๆที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Psim

| ความหนาแน่นพัลส์ | ค่า | ค่าที่ได้ | หน่วย |
|---|---|---|---|
| 60% | $V_L$ | 307.92 | $V_{rms}$ |
| | $I_L$ | 6.81 | $A_{rms}$ |
| | $PF_{output}$ | 0.48 | - |
| | $P_{out}$ | 603.92 | W |
| 80% | $V_L$ | 307.00 | $V_{rms}$ |
| | $I_L$ | 6.82 | $A_{rms}$ |
| | $PF_{output}$ | 0.48 | - |
| | Pout | 804.00 | W |
| 100% | $V_L$ | 307.04 | $V_{rms}$ |
| | $I_L$ | 6.82 | $A_{rms}$ |
| | $PF_{output}$ | 0.48 | - |
| | $P_{out}$ | 1010.13 | W |

## 3.8 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาโดย

อาศัยการจำลองการทำงานในส่วนของวงจรกำลัง วงจรควบคุมกำลังไฟฟ้า และวงจรควบคุมการทำงาน ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ ทำให้ทราบถึงผลการทดลองจากการจำลอง แนวทางการออกแบบวงจรควบคุม ที่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตตามความหนาแน่นพัลส์ดังตารางที่ 3.3 แนวทางในการออกแบบวงจรต่างๆ นอกเหนือจากนั้นคือการทดสอบวงจรจริง โดยในการดำเนินการต่อไปคือการนำผลที่ได้จากการจำลองการทำงานมาเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริง รวมทั้งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความร้อนระหว่างฮีตเตอร์แบบขดลวดความร้อนและฮีตเตอร์แบบขดลวดเหนี่ยวนำต่อไป โดยได้ออกแบบการทดลองดังนี้คือ

1. การทดลองเก็บผลหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (Power Quality) ระหว่างฮีตเตอร์แบบเข็มขัดและฮีตเตอร์แบบขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวอย่างเช่น ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ค่าฮาร์มอนิกที่ส่งผลต่อระบบการจำหน่าย (Harmonic Distrotion) กำลังงานที่ใช้ต่ออัตราการผลิตต่อชั่วโมง เป็นต้น

2. การทดลองเก็บผลหาประสิทธิภาพทางความร้อนพลังงานที่ใช้ระหว่างฮีตเตอร์แบบเข็มขัดและฮีตเตอร์แบบขดลวดเหนี่ยวนำกับพลาสติก 3 ชนิดได้แก่โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลิเอทีลีนเทเรฟทาเลต(ขวดน้ำดื่ม), โพลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เช่น ขวดนมขวดน้ำผลไม้ โยเกิร์ตขวดแชมพู แป้งเด็ก ถุงหูหิ้ว, (LDPE) โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเช่น ถุงใส่ของ ฟิล์มห่ออาหารห่อของ สามารถนำมารีไซเคิลเป็นถุงดำ

# บทที่ 4
# ผลการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพในการหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อนเปรียบเทียบกับการหลอมโดยใช้ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ซึ่งทดสอบกับพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้ 3 ชนิดคือ โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

## 4.1 การทดสอบการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ

ในส่วนการทดสอบด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ทดสอบโดยเก็บผลระยะเวลาในการทำความร้อนเพื่อคำนวณหากำลังไฟฟ้าเอาท์พุต ซึ่งทดสอบโดยที่หลอมพลาสติกชนิด โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่อุณหภูมิ 270 $^{\circ}$C โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่อุณหภูมิ 130 $^{\circ}$C และโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}$C ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตขนาดเท่ากันคือ 1 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 4.1 มีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

**รูปที่ 4.1** การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ

**ตารางที่ 4.1** ผลการทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ

| ชนิดของพลาสติก | เวลาที่ใช้ในการหลอม | กำลังไฟฟ้าอินพุต (W) | กำลังเอาท์พุต (W) | ประสิทธิภาพ (%) |
|---|---|---|---|---|
| โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) | 20 นาที 35 วินาที | 1000 | 253.60 | 25.36 |
| โพลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) | 10 นาที 50 วินาที | 1000 | 268.92 | 26.89 |
| โพลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) | 10 นาที 15 วินาที | 1000 | 253.33 | 25.33 |

จากการเก็บผลการทดสอบด้วยเวลาเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพของขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ สามารถหาประสิทธิภาพของขดลวดความร้อนแบบรัดท่อได้ดังสมการที่ 4.1[2]

$$P_{out,total} = c\frac{(T_2 - T_1)}{(t_2 - t_1)} \tag{4.1}$$

โดยที่

$P_{out,total}$ คือ กำลังงานเอาท์พุตที่เปลี่ยนมาจากพลังงานความร้อนของพลาสติก (W)

$T_1$ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของพลาสติก ($^{\circ}C$)

$T_2$ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของพลาสติก ($^{\circ}C$)

$t_1$ คือ เวลาที่เริ่มต้นทำงาน (sec)

$t_2$ คือ เวลาที่สิ้นสุดทำงาน (sec)

$c$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของพลาสติกแต่ละชนิด (specific heat) kJ/(kg.K)

$$\%\eta_{total} = \frac{P_{out,total}}{P_{in}} \times 100 \tag{4.2}$$

โดยที่ $\%\eta_{total}$ คือ ประสิทธิภาพรวมระบบ

กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมของพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เท่ากับ

$$P_{out,total} = 1350\frac{(270-38)}{(1235)} = 253.60 \text{ วัตต์} \qquad \%\eta_{total} = \frac{253.60}{1{,}000}\times 100 = 25.36\ \%$$

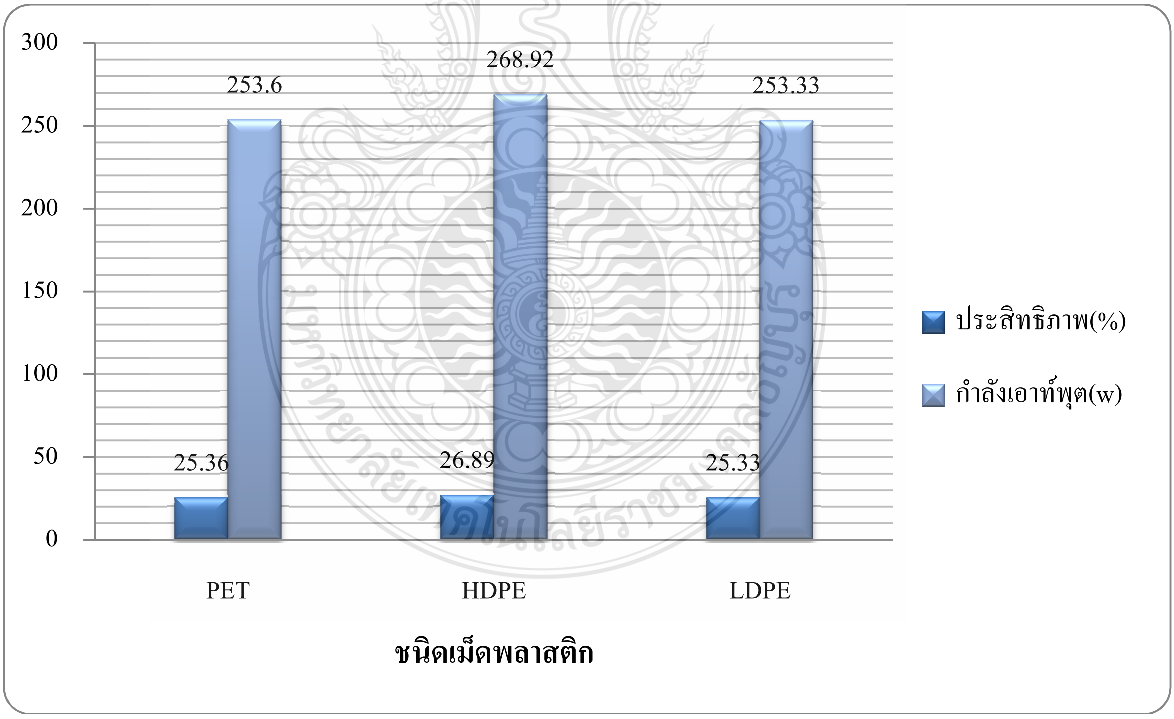
กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมของพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เท่ากับ

$$P_{out,total} = 1900\frac{(130-38)}{(650)} = 268.92 \text{ วัตต์} \qquad \%\eta_{total} = \frac{268.92}{1{,}000}\times 100 = 26.89\ \%$$

กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมของพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เท่ากับ

$$P_{out,total} = 1900\frac{(120-38)}{(615)} = 253.33 \text{ วัตต์} \qquad \%\eta_{total} = \frac{253.33}{1{,}000}\times 100 = 25.33\ \%$$

สามารถสรุปประสิทธิภาพและกำลังเอาท์พุตการหลอมของพลาสติกแต่ละประเภทด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อดังรูปที่ 4.1

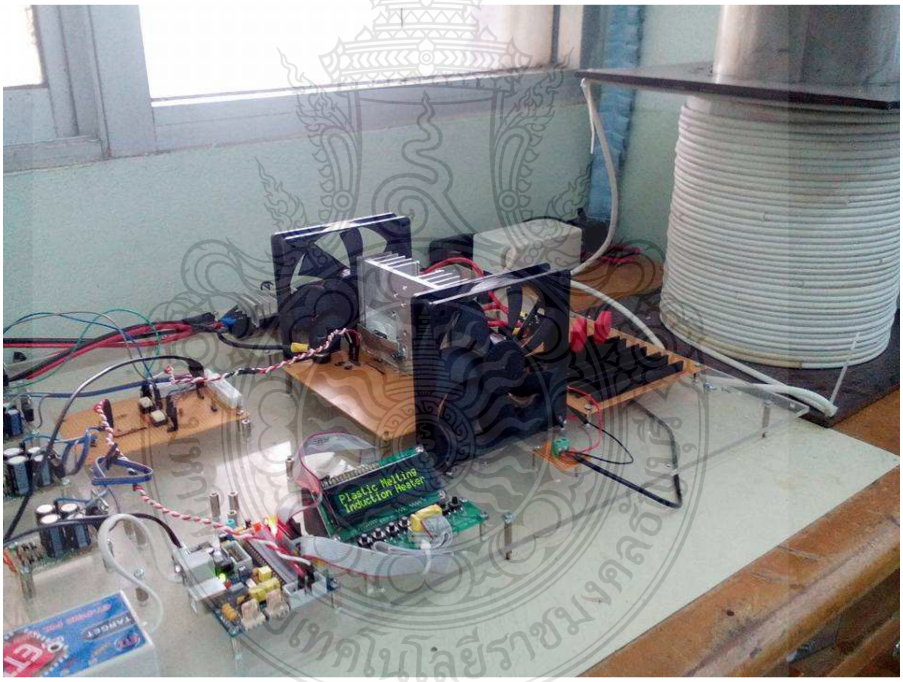



**รูปที่ 4.2** กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมพลาสติกแต่ละชนิด

จากการทดสอบหลอมพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อพบว่า มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 25.86 เปอร์เซ็นต์ จากกำลังไฟฟ้าอินพุตขนาดเท่ากันที่ 1,000 วัตต์ โดยมีกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเฉลี่ยเท่ากับ 258.62 วัตต์ นั่นแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของขดลวดความร้อนแบบรัดท่อมีประสิทธิภาพที่ต่ำ ไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้งาน เนื่องจากเกิดความสูญเสียมาก อีกทั้งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการหลอมพลาสติกและสิ้นเปลืองพลังงาน

## 4.2 การทดสอบการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

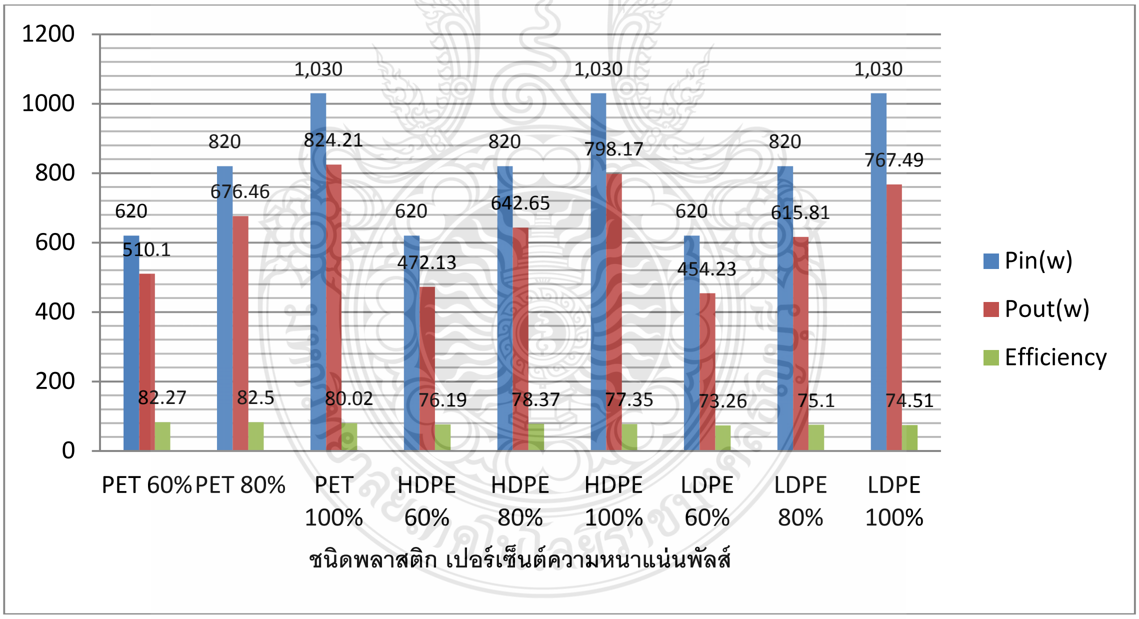
การทดสอบการหลอมด้วยขดลวดแบบเหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยความหนาแน่นพัลส์ ทดสอบเช่นเดียวกันกับขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ แต่จะแตกต่างในส่วนการควบคุม ซึ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมความหนาแน่นพัลส์ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 60,80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ในการมอดูเลต 400 เฮิรตซ์ มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2




**รูปที่ 4.3** การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4.2 การทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

| ชนิดของพลาสติก | ความหนาแน่นพัลส์ | เวลาที่ใช้ในการหลอม | กำลังไฟฟ้าอินพุต(W) | กำลังเอาท์พุต(W) | ประสิทธิภาพ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) | 60% | 10 นาที 14 วินาที | 620 | 510.10 | 82.27 |
| | 80% | 7 นาที 43วินาที | 820 | 676.46 | 82.50 |
| | 100% | 6 นาที 20 วินาที | 1,030 | 824.21 | 80.02 |
| โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) | 60% | 6 นาที 10 วินาที | 620 | 472.13 | 76.19 |
| | 80% | 4 นาที 32 วินาที | 820 | 642.65 | 78.37 |
| | 100% | 3 นาที 39 วินาที | 1,030 | 798.17 | 77.35 |
| โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) | 60% | 5 นาที 43 วินาที | 620 | 454.23 | 73.26 |
| | 80% | 4 นาที 13 วินาที | 820 | 615.81 | 75.10 |
| | 100% | 3 นาที 23 วินาที | 1,030 | 767.49 | 74.51 |
| **ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพโดยรวม** | | | | | **77.73** |

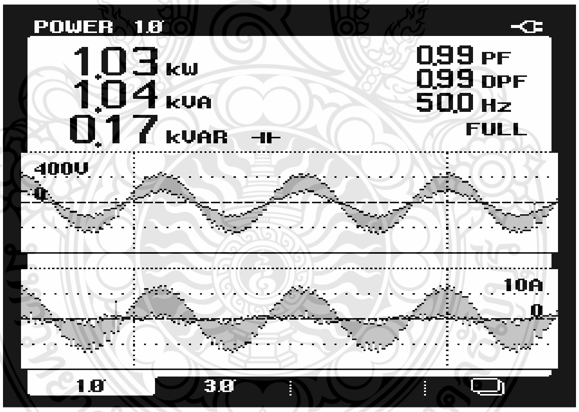



**รูปที่ 4.4** กำลังไฟฟ้าอินพุต, กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของการหลอมพลาสติกแต่ละชนิดที่ความหนาแน่นพัลส์ 60% 80% และ 100%

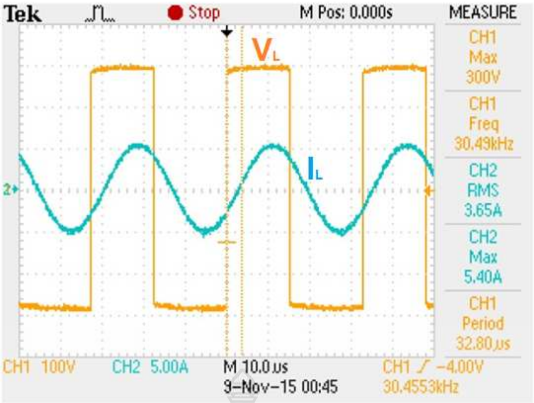
ดังตารางที่ 4.2 ทดสอบการหลอมพลาสติกทั้ง 3 ชนิดคือ ชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ทดสอบหลอมที่อุณหภูมิ 270 °C โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ทดสอบหลอมที่ 130 ° C และโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ทดสอบหลอมที่อุณหภูมิ 120 °C ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตมีการปรับความหนาแน่นพัลส์ 60% 80% และ 100% พบว่ามีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 77.73 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความหนาแน่นพัลส์โดยที่ประสิทธิภาพสูงกว่าขดลวดความร้อนถึง 3 เท่า จึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการหลอมพลาสติกจริง

## 4.3 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

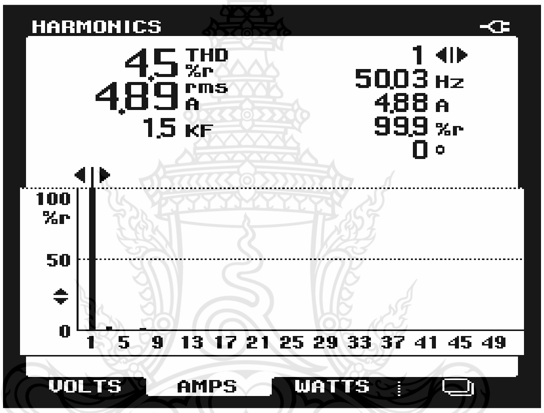
ในส่วนการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นการทดสอบเก็บค่าต่าง ๆ ได้แก่รูปคลื่นกระแสและแรงดันอินพุต รวมถึงกำลังไฟฟ้าอินพุต ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดและค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดเพื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุต เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบ รวมถึงการวัดค่าผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส โดยทำการวัดค่าโดยควบคุมความหนาแน่นพัลส์ที่ 100% 80% และ 60% ดังรูปที่ 4.5 – 4.13




**รูปที่ 4.5** กำลังไฟฟ้าอินพุตและค่าตัวประกอบกำลังที่ความหนาแน่นพัลส์ 100 %

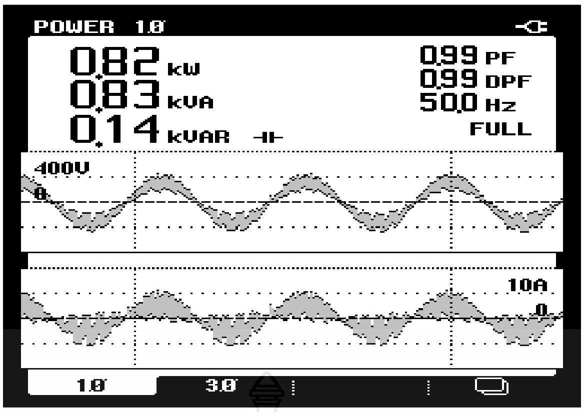



**รูปที่ 4.6** แรงดันและกระแสเอาท์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 100 %

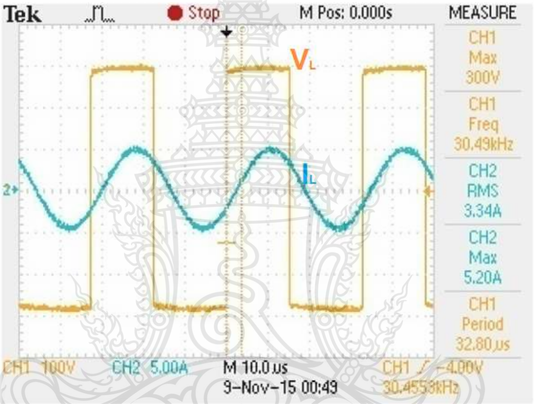



**รูปที่ 4.7** ผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส ที่ความหนาแน่นพัลส์ 100 %

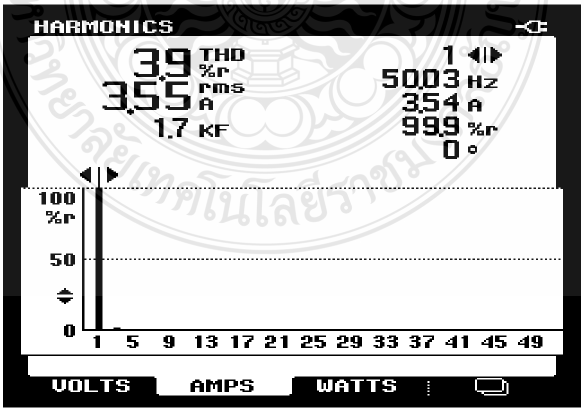
จากรูปที่ 4.5 – 4.7 ความหนาแน่นพัลส์ 100% มีกำลังไฟฟ้าอินพุตจากการวัดขนาดเท่ากับ 1.03 กิโลวัตต์ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ได้จากการวัด นำมาคำนวณจากสูตร $P = VI.[(\cos\theta + d)/2]$ จาก v = 300 โวลต์ I =3.65 แอมป์ และ $\cos\theta$ = 9/11.5 = 0.78 ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเท่ากับ 974.55 วัตต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุตแสดงว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ (974.55/1030)x 100 = 94.61 % และมีผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส 4.5%




**รูปที่ 4.8** กำลังไฟฟ้าอินพุตและค่าตัวประกอบกำลังที่ความหนาแน่นพัลส์ 80 %

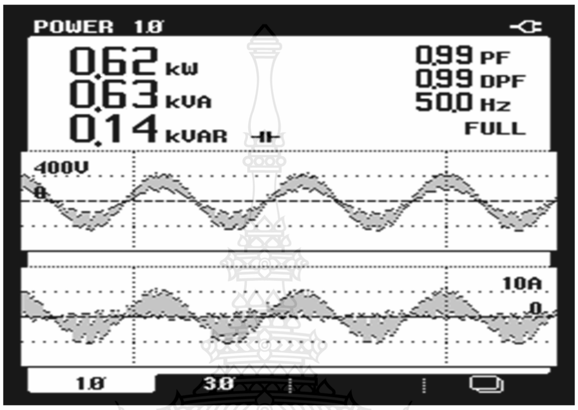



**รูปที่ 4.9** แรงดันและกระแสเอาท์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 80 %

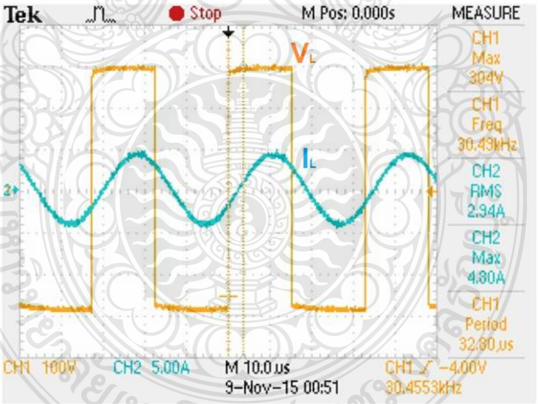



**รูปที่ 4.10** ผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส ที่ความหนาแน่นพัลส์ 80 %

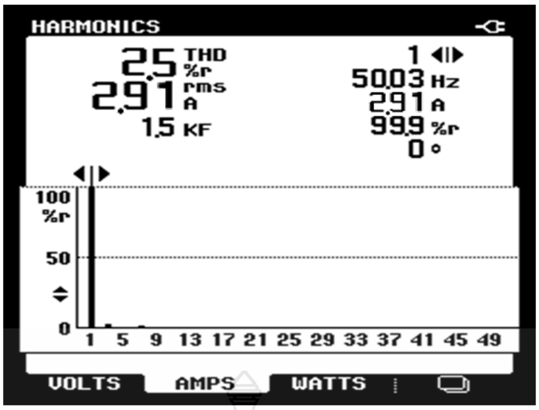
จากรูปที่ 4.8 – 4.10 ความหนาแน่นพัลส์ 80% มีกำลังไฟฟ้าอินพุตจากการวัดขนาดเท่ากับ 820 วัตต์ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ได้จากการวัด นำมาคำนวณจากสูตร $P = VI.[(\cos\theta + d)/2]$ จาก v = 300 โวลต์ I =3.34 แอมป์ และ $\cos\theta$ = 9/11.5 = 0.78 ดังนั้นได้กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเท่ากับ 791.58 วัตต์ ดังนั้นแสดงว่าประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ (791.58/820) x 100 =96.53 % และมีผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส 3.9%




**รูปที่ 4.11** กำลังไฟฟ้าอินพุตและค่าตัวประกอบกำลังที่ความหนาแน่นพัลส์ 60 %




**รูปที่ 4.12** แรงดันและกระแสเอาท์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 60 %




**รูปที่ 4.13** ผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส ที่ความหนาแน่นพัลส์ 60 %

จากรูปที่ 4.11 – 4.13 ความหนาแน่นพัลส์ 60% มีกำลังไฟฟ้าอินพุตจากการวัดขนาดเท่ากับ 620 วัตต์ ที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.99 กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตที่ได้จากการวัด นำมาคำนวณจากสูตร $P = VI.[(\cos\theta + d)/2]$ จาก v = 300 โวลต์ I =2.94 แอมป์ และ $\cos\theta$ = 9/11.5 = 0.78 ดังนั้นได้กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเท่ากับ 608.58 วัตต์ ดังนั้นแสดงว่าประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ (608.58/620) x 100 =98.15 % และมีผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส 2.5 %

## 4.4 พลังงานที่ใช้จากการปฏิบัติในงานอุตสาหกรรม

การทดสอบจากการปฏิบัติในงานอุตสาหกรรมนั้นเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากขดลวดความร้อนแบบรัดท่อเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้พลาสติกชนิด HDPE และ PET มาใช้หลอมโดยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อดังรูปที่ 4.14 มีกำลังการผลิตเม็ดพลาสติก HDPE และ PET เฉลี่ยที่ 1,700 และ1,100kg/วัน และใช้ไฟเฉลี่ยที่ 242.67 หน่วย/วัน และ 387.75 หน่วย/วัน ตามลำดับ เมื่อติดตั้งเครื่องหลอมแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนดังรูปที่ 4.15 มีการใช้พลังงานลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 98 หน่วย/วัน และ136.93 หน่วย/วัน ตามลำดับ

การคำนวณหาพลังงานที่ต้องการใช้ในการหลอม

$$Q = m \times s \times dT \qquad (4.3)$$

เมื่อ Q : ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ (J)

m : มวลของพลาสติก (g)

s : ความร้อนจำเพาะของพลาสติก HDPE=1.9,PET=1.35 (J/g°C)

dT : ค่าความแตกต่างอุณหภูมิที่ใช้งาน (°C)

**รูปที่ 4.14** การทดสอบหลอมพลาสติกด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อในงานอุตสาหกรรม

4.4.1 การทดสอบเก็บค่าพลังงานในการหลอมพลาสติกชนิด HDPE

(1) พลังงานที่ต้องการใช้ในการหลอมพลาสติก HDPE ต่อวันมีค่าเท่ากับ

$$Q = 1{,}700{,}000 \times 1.90 \times (122-45) = 259.683 \times 10^{6}\ J$$

คิดเป็นค่าพลังงานต่อชั่วโมงเท่ากับ $307.519 \times 10^{6} / 23 = 11.29 \times 10^{6}$ J, หรือ 3.14 kWh

(2) พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก HDPE จากขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 242.67 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ 242.67 kWh /23 ชม.= 10.55 กิโลวัตต์ ( kW )

ประสิทธิภาพของระบบฮีตเตอร์ มีค่าเท่ากับ (3.14 / 10.55) x 100 = 29.76%

(3) พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก HDPE จากขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 98 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ 98 kWh /23 ชม. = 4.26 กิโลวัตต์ ( kW )

นั่นคือ ประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนมีค่าเท่ากับ (3.14/4.26) x 100 = 73.71%

**รูปที่ 4.15** การทดสอบหลอมพลาสติกด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำในงานอุตสาหกรรม

4.4.2 การทดสอบเก็บค่าพลังงานในการหลอมพลาสติกชนิด PET

(1) พลังงานที่ต้องการใช้ในการหลอมพลาสติก PET ต่อวันมีค่าเท่ากับ

$$Q = 1,100,000 \times 1.35 \times (280-45) = 348.975 \times 10^{6}\ J$$

คิดเป็นค่าพลังงานต่อชั่วโมงเท่ากับ $348.975 \times 10^{6} / 23 = 15.17 \times 10^{6}$ J, หรือ 4.21 kWh

(2) พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก PET จากขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 387.75 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ 387.75 kWh /23 ชม.= 16.86 กิโลวัตต์ ( kW )

ประสิทธิภาพของระบบ มีค่าเท่ากับ (4.21 / 16.86) x 100 = 24.97%

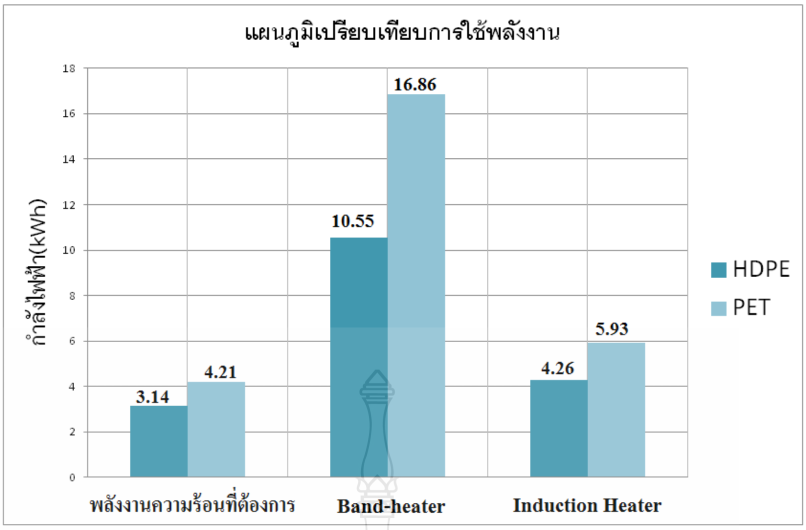
(3) พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก PET จากขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 136.39 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้น อัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ 136.39 kWh /23 ชม. = 5.93 กิโลวัตต์ ( kW )

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนมีค่าเท่ากับ (4.21/5.93) x 100 = 70.99%

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.16




**รูปที่ 4.16** แผนภูมิเปรียบเทียบการใช้กำลังงานของฮีตเตอร์แต่ละชนิด

นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยระหว่างเม็ดพลาสติก HDPE และ PET จะได้ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการเท่ากับ (3.14+4.21)/2 = 3.68 kWh ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าฮีตเตอร์แบบรัดท่อ (10.55+16.86)/2 = 13.71 kWh ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าฮีตเตอร์แบบเหนี่ยวนำ (4.26+5.93)/2 = 5.10 kWh หมายถึงว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำนั้นดีกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ เมื่อเฉลี่ยต่อชั่วโมงแล้วสามารถลดกำลังไฟฟ้าได้ถึง 8.61 kWh ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเทียบกับพลังงานที่ต้องการจริงในการหลอมเฉลี่ย 3.68 kWh มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 72.16 % ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนที่มีประสิทธิภาพเพียง 26.84 %

## 4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองควบคุมการปรับความหนาแน่นพัลส์ 60% 80% และ 100% ของการหลอมพลาสติกทั้ง 3 ชนิดด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน พบว่ามีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 77.73 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ 3 เท่า ซึ่งขดลวดความร้อนแบบรัดท่อนั้นมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพียง 25.86 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเท่ากับ 96.43 เปอร์เซ็นต์ ค่าตัวประกอบกำลังมี่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.99 และมีค่าเฉลี่ยผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกส์ของกระแส 3.63 % การติดตั้งระบบในโรงงานหลอมพลาสติกจริงมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 72.16 % ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนที่มีประสิทธิภาพเพียง 26.84 %

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

การนำหลักการเหนี่ยวนำความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการหลอมพลาสติกโดยควบคุมความแน่นของสัญญาณพัลส์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมได้ดียิ่งขึ้น การวิจัยได้ทดสอบหลอมพลาสติกด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ โดยหลอมพลาสติกชนิด โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่อุณหภูมิ 270 $^{\circ}$C โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ทดสอบหลอมที่อุณหภูมิ 130 $^{\circ}$C และโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ทดสอบหลอมที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}$C ที่กำลังไฟฟ้าอินพุตขนาดเท่ากันคือ 1 กิโลวัตต์ พบว่า มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 25.86 เปอร์เซ็นต์ โดยมีกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเฉลี่ยเท่ากับ 258.62 วัตต์ จากนั้นทำการทดสอบหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ควบคุมการปรับความหนาแน่นพัลส์ 60% 80% และ 100% พบว่ามีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 77.73 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ 3 เท่า การทดสอบประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเท่ากับ 96.43 เปอร์เซ็นต์ ค่าตัวประกอบกำลังมี่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.99 และมีค่าเฉลี่ยผลรวมการกระจายฮาร์มอนิกของกระแส 3.63 %

การติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรมจริง สามารถคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการเท่ากับ 3.68 kWh ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าฮีตเตอร์แบบรัดท่อ 13.71 kWh ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าฮีตเตอร์แบบเหนี่ยวนำ 5.10 kWh หมายถึงว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำนั้นดีกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ เมื่อเฉลี่ยต่อชั่วโมงแล้วสามารถลดกำลังไฟฟ้าได้ถึง 8.61 kWh ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเทียบกับพลังงานที่ต้องการจริงในการหลอมเฉลี่ยเท่ากับ 3.68 kWh มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 72.16 % ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนที่มีประสิทธิภาพเพียง 26.84 %

เห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการหลอมพลาสติกนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความหนาแน่นของสัญญาณพัลส์ นอกจากนี้หากนำไปใช้ในกระบวนการหลอมพลาสติกที่มีอยู่ตามโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่มีมากถึง 4,800 แห่ง สามารถลดพลังงานไฟฟ้าให้กับประเทศชาติได้ มากยิ่งขึ้น ซึ่งหากคำนวณถึงจุดคุ้มทุนแล้ว การลงทุนติดตั้งเพิ่มเติมในส่วนของการใช้ขดลวดความร้อนเหนี่ยวนำมีค่าใช้จ่ายโดยประมาณ 250,000 บาท สามารถลดใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 198 หน่วย/วัน ซึ่งหากค่าไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีการใช้ไฟฟ้าเกิน 400 หน่วยต่อเดือน จะมีค่าไฟเฉลี่ยที่ 4.42 บาท/หน่วย แสดงว่าใน 1 วัน สามารถลดค่าไฟได้ถึง

1,768 บาท ดังนั้นจะมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 250,000/1,768 = 142 วัน หรือเท่ากับ 5 เดือนโดยประมาณ ที่สามารถชดเชยการลงทุนในการติดตั้งการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้นได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบและการทดสอบหลักการเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกนั้นส่วนใหญ่เกิดความเสียหายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ หรือเกิดจากสัญญาณขับเกตและวงจรขยายสัญญาณ หรือส่วนต่าง ๆ ผู้วิจัยได้สรุปเป็นข้อเสนอแนะ เพื่อที่จะเกิดการพัฒนาให้การหลอมพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำนั้นมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น โดยได้สรุปปัญหาและข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ในงานวิจัยในอนาคตควรเพิ่มชุดตรวจจับสัญญาณป้องกันความเสียหายให้กับอุปกรณ์เช่น อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร, อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน และอื่นๆที่จำเป็น

5.2.2 ขณะทำการทดลองเมื่อปลดแหล่งจ่ายไฟแล้ว ควรรอให้ตัวเก็บประจุคลายประจุให้หมดก่อน ก่อนที่จะแก้ไขอุปกรณ์ เพราะอาจเกิดอันตรายแก่ผู้ทำการทดลองและเกิดความเสียหายแก่ตัวอุปกรณ์ได้

5.2.3 ควรที่จะมีการหาวิธีที่จะลดการสูญเสียของสวิตช์ เพื่อที่จะปรับเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้ดีมากขึ้น และเป็นการลดกำลังการใช้งานของไอจีบีทีลงด้วย

5.2.4 ในการทดลองควรที่จะมีอุปกรณ์ป้องกันหากเกิดการทำงานที่ผิดปกติ

5.2.5 ควรทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่จะนำมาประกอบกันเป็นระบบทีละส่วนก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานของส่วนประกอบนั้น ๆ สามารถทำงานได้ปกติ แล้วค่อยนำไปประกอบเข้ากับวงจร เพราะไม่เช่นนั้นแล้วหากมีส่วนหนึ่งส่วนใดทำงานผิดพลาด จะทำให้หาสาเหตุได้ยาก หากไม่ทำการทดสอบให้แน่ใจก่อน

# บรรณานุกรม


[1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, "คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติก," โครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535, มกราคม 2548, หน้า 47-48.

[2] สิทธิโชค สินรัตน์, "การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่". วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2545, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[3] ยงยุทธ์ นารายฎร์, วิริยะ พิเชฐจำเริญ, "การควบคุมกำลังไฟฟ้าของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ด้วยจำนวนพัลส์ PDM สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้ง 32 . พฤศจิกายน 2552, หน้า 98

[4] จีระศักดิ์ วงศา, "เตาหุงต้มเหนี่ยวนำคลาสอี", วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2553, มหาวิทยาลัยธนบุรี

[5] ดอนสัน ปงผาบ, ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC และการประยุกต์ใช้งาน, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) , (2550)

[6] ประจิน พลังสันติกุล, PIC C Programming With CCS C Compiler, กรุงเทพฯ : บริษัทแอฟซอฟต์เทคจำกัด, (2551)

# ภาคผนวก

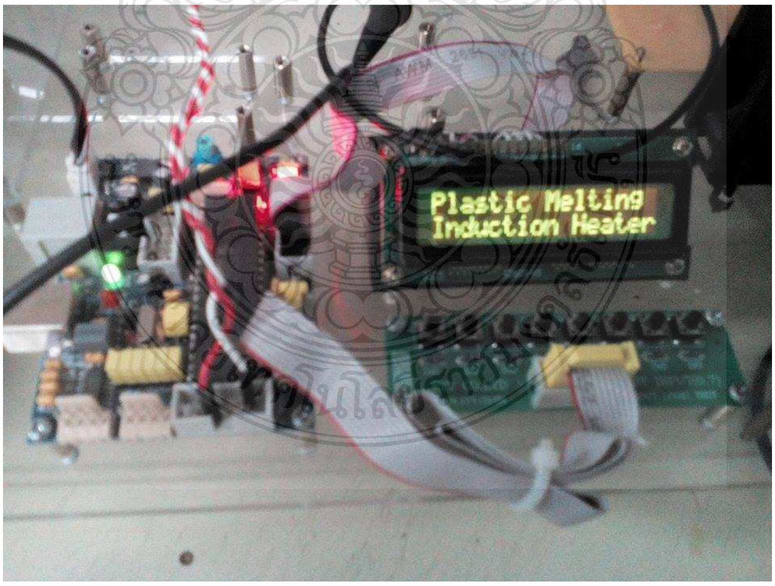
ภาคผนวก ก อุปกรณ์และชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

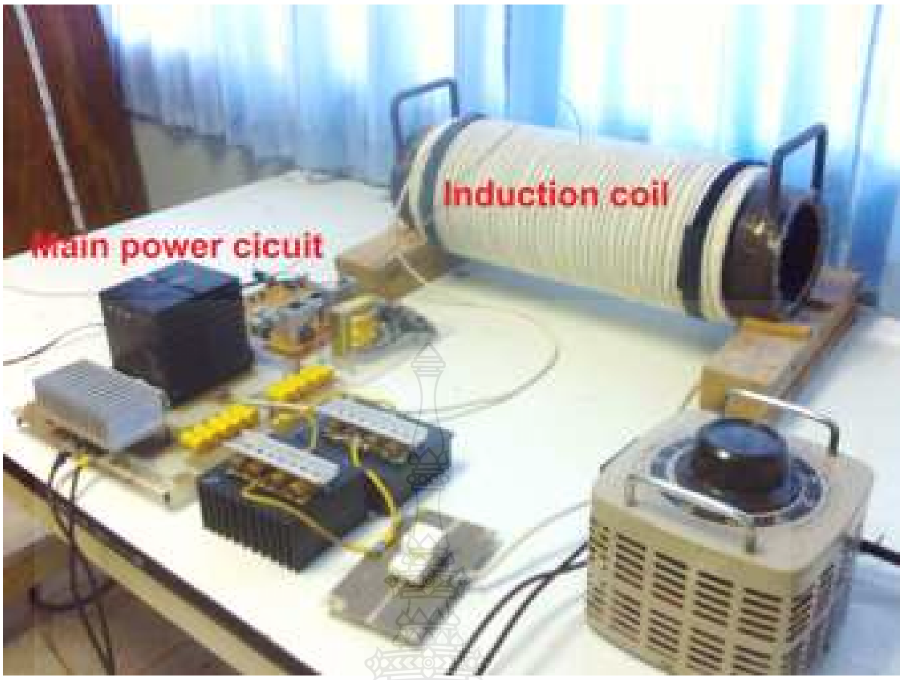
# ภาคผนวก ก

# อุปกรณ์ทดสอบและงานติดตั้งจริง

**รูปที่ ก.1** ชุดวงจรกำลังและขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการขนาด 1 kw




**รูปที่ ก.2** ชุดวงจรควบคุมที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการขนาด 1 kw




**รูปที่ ก.3** การใช้ขดลวดความร้อนในการหลอมพลาสติก ขนาด 5 kw

**รูป ก.4** วงจรควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

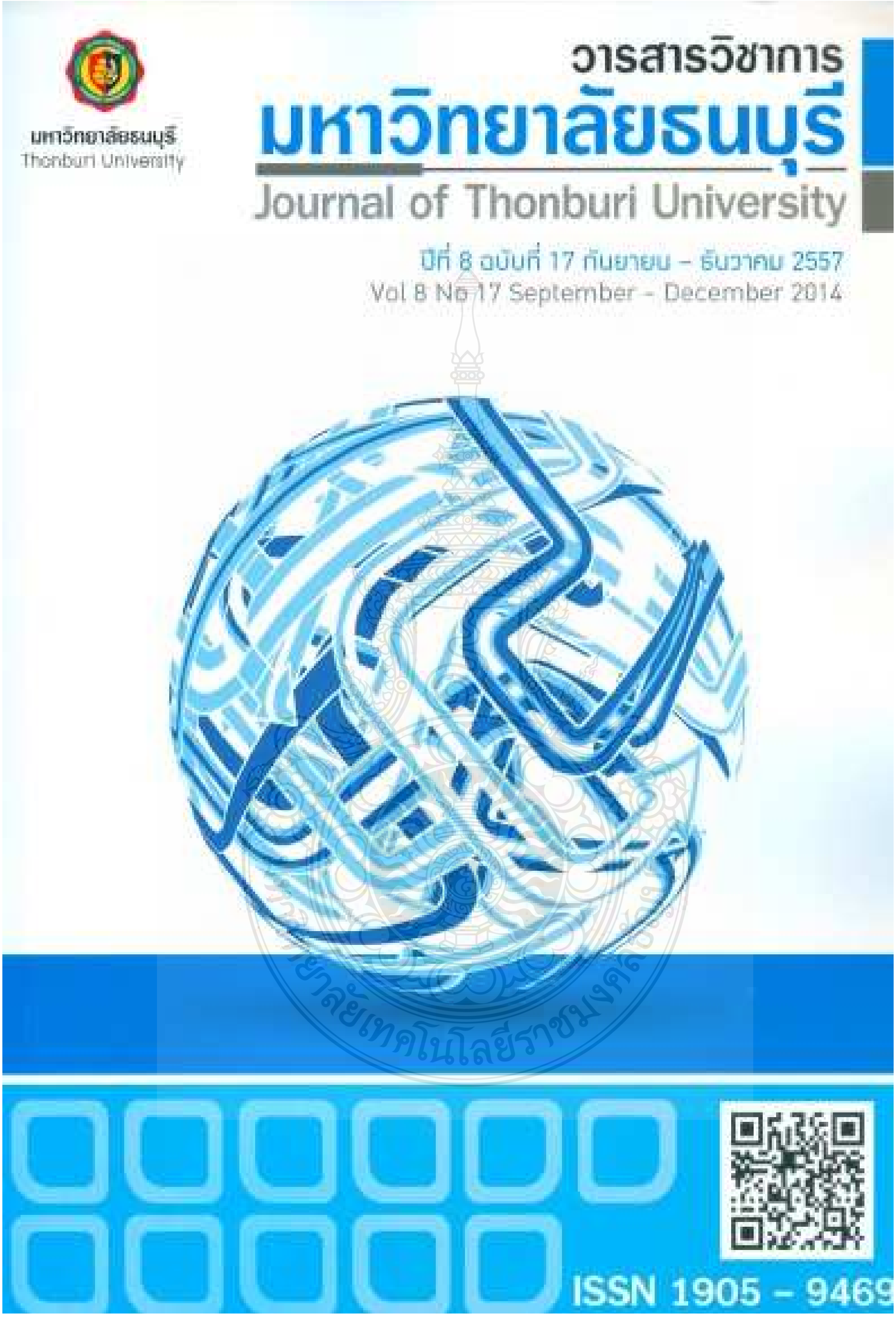
**รูปที่ ก.5** การใช้ขดลวดความร้อนในการหลอมพลาสติก

**รูป ก.6** การใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนในการหลอมพลาสติก

**ภาคผนวก ข**

**ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่**

1. จีระศักดิ์ วงศา,จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้วและวันชัย ทรัพย์สิงห์, “นวัตกรรมการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี ฉบับที่ 17 ISSN 1905-9469 หน้า 111-115
2. จีระศักดิ์ วงศาและวันชัย ทรัพย์สิงห์, “การทดสอบประสิทธิภาพการหลอมพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการหลอมรีไซเคิลพลาสติกชนิดความหนาแน่นสูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอี” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, 4-6 พฤศจิกายน 2558, หน้า 48
3. วันชัย ทรัพย์สิงห์และจีระศักดิ์ วงศา, “การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนในการหลอมพลาสติกรีไซเคิล” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, 4-6 พฤศจิกายน 2558, หน้า 50
4. จีระศักดิ์ วงศาและวันชัย ทรัพย์สิงห์, “การพัฒนากระบวนการหลอมพลาสติกรีไซเคิลด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38, 18-20 พฤศจิกายน 2558,


มหาวิทยาลัยธนบุรี
Thonburi University
วารสารวิชาการ
มหาวิทยาลัยธนบุรี
Journal of Thonburi University
ปีที่ 8 ฉบับที่ 17 กันยายน – ธันวาคม 2557
Vol 8 No 17 September - December 2014
ISSN 1905 - 9469

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

| | | |
|---|---|---|
| ศาสตราจารย์ เสนาะ | ติเยาว์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ดร. ธนาคม | สุนทรชัยนาคแสง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯ พระนครเหนือ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ | อยู่ถนอม | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิวิมล | มีอำพล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พยอม | วงศ์สารศรี | มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะบุตร | วานิชพงษ์พันธุ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ | กริชชาญชัย | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วลัยลักษณ์ | อัตธีรวงศ์ | สถาบันเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ | สมบูรณ์วิวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อังสนา | จั่นแดง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัญญา | วสุศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ไกร | โพธิ์งาม | มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| รองศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ | หรดาล | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร |
| รองศาสตราจารย์ ดร.คำรณ | ศรีน้อย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ไพรัช | ถิ่นธานี | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ชาญ | ถนัดงาน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฯพระนครเหนือ |
| รองศาสตราจารย์ วิทยา | ทิพย์สุวรรณพร | สถาบันเทคโนโลยีฯเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ผุสดี | รุมาคม | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ประยูร | บุญประเสริฐ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ไกรวิชิต | ตันติเมธ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| รองศาสตราจารย์ จลีพร | โกลากุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| รองศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์ | สุวรรณวงศ์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พระมหาสมศักดิ์ | ญาณโพโธ | มหาวิทยาลัยมหามกุฏราชวิทยาลัย |
| รองศาสตราจารย์ สมจิตร | ล้วนเจริญ | มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัณวริช | พลูปราชญ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการกองบรรณาธิการ

| | | | |
|---|---|---|---|
| กุลยา | สุขพงษ์ไทย | สำนักวิทยบริการ | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| จิรศักดิ์ | ส่งบุญแก้ว | คณะวิศวกรรมศาสตร์ | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| หัทยา | แย้มชุติ | สำนักวิชาการ | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| ศิริวัลย์ | จันทร์แก้ว | คณะบัญชี | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| ศรัณย์ธร | บรรจงคณิต | คณะบริหารธุรกิจ | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| ลินดา | แซ่ตั้น | คณะบริหารธุรกิจ | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| วัฒนา | เอกปมิตศิลป์ | คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| ธนัญญา | พุ่มมะเดื่อ | สำนักงบประมาณและการเงิน | มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| อัรฮาวี | เจ๊ะสะแม | ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ | มหาวิทยาลัยธนบุรี |

**บทความวิจัย**

80 ปัจจัยที่มีผลต่อการมีส่วนร่วมของประชาชนในการปกครองส่วนท้องถิ่นขององค์การบริหารส่วนตำบล จังหวัดเพชรบูรณ์

FACTORS AFFECTING PARTICIPATION OF RESIDENTS IN THE AREA OF SUBDISTRICT ADMINISTRATIVE ORGANIZATIONS IN PETCHABOON PROVINCE.

จ่าสิบเอกกมล เข็มนาจิตร์

90 ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงจูงใจใฝ่สัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาคณิตศาสตร์ ของนักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

FACTORS EFFECTING ON ACHIEVEMENT MOTIVATION IN LEARNING MATHEMATICS COURSES OF SCIENCE AND TECHNOLOGY STUDENTS IN BANGKOK UNIVERSITY

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤศวรรณ ประเสริฐสิทธิ์

**บทความวิชาการ**

102 ข้อคิดเห็นบางประการสำหรับการแก้ไขกฎหมายเกี่ยวกับการจัดเก็บภาษีคณะบุคคล

SOME OPINIONS FOR THE AMENDMENTOF THE LAW RELATED TO TAX IMPOSITION OF A NON-JURISTIC BODY OF PERSON

รัชดาพร สังวร

111 นวัตกรรมการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

INNOVATIVE OF INDUCTION HEATING.

จีระศักดิ์ วงศา, จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว, วันชัย ทรัพย์สิงห์

118 บทบาทของการค้าระหว่างประเทศผ่านชายแดนทางบกของประเทศไทย

THE ROLE OF INTERNATIONAL TRADE ALONG THE BORDER OF THAILAND

สุณัฐวีย์ น้อยโสภา

127 ปัจจัยทางการแข่งขันกับสภาวการณ์ปัจจุบัน

COMPETITIVE ENVIRONMENT FACTERS IN THE CURRENT SITUATION

วุฒิ วัชโรดมประเสริฐ

# นวัตกรรมการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
# INNOVATIVE OF INDUCTION HEATING.

จีระศักดิ์ วงศา[1], จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว[2],วันชัย ทรัพย์สิงห์[3]
Jeerasak Wongsa[1], Jirasak Songbunkaew[2] , Wanchai Subsingha[3]
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธนบุรี[1,2], มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี[3]
jeerasakthailand@gmail.com[1], w.subsinghaa@gmail.com[3]

## บทคัดย่อ

กระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นนวัตกรรมใหม่ในการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน แบบใช้แก๊สและรูปแบบอื่นๆ การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเหนี่ยวนำโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไปเกี่ยวคล้องกับวัสดุที่เป็นสาร Ferromagnetic ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในวัสดุที่เป็นเส้นทางปิด และเกิดความร้อนขึ้นในที่สุด ปัจจุบันหลักการนี้ใช้ในการให้ความร้อนอุปกรณ์เช่น เตาแม่เหล็กไฟฟ้า กาต้มน้ำ เครื่องทำน้ำอุ่น เครื่องชุบแข็ง เครื่องหลอมพลาสติกและเครื่องหลอมแก้วเป็นต้น

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในส่วนของวงจรกำลังได้แก่ วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรแบบสามระดับ และวงจรแบบสวิตช์ตัวเดียว นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการสับสวิตช์เพื่อลดการสูญเสียในตัวอุปกรณ์อันได้แก่ การสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) การสวิตช์ขณะกระแสเป็นศูนย์ (ZCS) และการสวิตช์ขณะแรงดันและกระแสเป็นศูนย์ (ZVZCS) โหลดที่ใช้มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันทั้งโหลดเรโซแนนท์แบบอนุกรม โหลดเรโซแนนท์แบบขนานและโหลดแบบกึ่งเรโซแนนท์ การควบคุมกำลังทางไฟฟ้าในแต่ละวงจรสามารถทำได้หลากหลายวิธีได้แก่การควบคุมด้วยความถี่ การปรับมุมเฟสและการควบคุมด้วยจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์

จากการที่กิจกรรมโรงงานอุตสาหกรรม ร้านอาหารและตามอาคารบ้านเรือนที่พักอาศัยมีการใช้พลังงานความร้อนจำนวนมาก การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนับเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นวัตกรรมใหม่นี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาประสิทธิภาพการให้ความร้อนเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนในรูปแบบอื่นๆ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางการลดใช้พลังงานในอนาคตที่จำเป็นได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** กระแสไหลวน, อินเวอร์เตอร์, โหลดเรโซแนนท์

## Abstract

Induction heating innovative is high performance heat up than traditional heating . Such as heating coils gas using and heat in other forms. The induction heating reference magnetic induction principle.. By entering high frequency alternating current to the coil to generate a magnetic field to hold the material to be heat related . This material must be qualified Ferromagnetic materials. Induce eddy currents in the material is a closed path. And the loss due to eddy currents . The cause heat to build up. Current induction heating is used in a variety of heating induction such as induction cooker ,

kettle, hot shower. Hardening machine, plastic and glass melting etc.. Induction heating is developed through ongoing research . In terms of power or inverter circuit viz half bridge inverter ,full bridge inverter,Three- level circuits , A single switch circuit , This has developed to reduce switching losses viz zero voltage switching (ZVS), zero current switching (ZCS) and the zero voltage and zero current switching (ZVZCS) , which is also loaded with different features such as the serial resonant load, The parallel resonant load and quasi- resonant load. The control electrical power to each circuit can be a variety of ways viz the frequency adjusting. The phase-shift angle control And controlled by the pulse density modulation. The use of thermal energy in industry,restaurant, mall, and residential have energy consumption is high. Induction heating has developed a process that makes heat efficiency and it is important to develop better performance due to heat in other forms. It is also an approach to reduce the energy needed in the future as well.

**Keyword:** Eddy current, Inverter, Resonant Load,

**บทนำ**

มีการพัฒนานวัตกรรมในการให้ความร้อนมาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันเช่น การใช้แก๊สในการให้ความร้อน การให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน และการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำ หากพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียในประเด็นปริมาณพลังงานที่ใช้ ความสะดวกสบายในการใช้งาน ความเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิในการให้ความร้อน ต้นทุนการผลิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพในการให้ความร้อนแล้ว แต่ละรูปแบบจะมีลักษณะของระบบการทำงานที่มีส่วนดีและส่วนเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้นจะมีข้อดีที่มากกว่าแบบการใช้แก๊สและขดลวดความร้อน

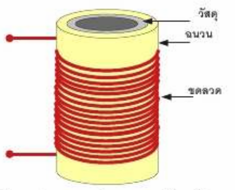
ระบบเหนี่ยวนำความร้อนส่วนใหญ่ที่ผ่านมาสร้างขึ้นด้วยวงจรควบคุมที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยาก แต่ในปัจจุบันจะลดรูปลงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีศักยภาพที่สูงมากขึ้น ทั้งในเรื่องของขนาด หน่วยความจำ ความรวดเร็ว คำสั่งในการทำงานและฟังก์ชันในการใช้งานมาควบคุมการทำงานวงจรกำลังมีขนาดเล็กลง จากการพัฒนาการออกแบบวงจร ส่งผลให้การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

**หลักการเหนี่ยวนำความร้อน**

เมื่อนำขดลวดมาพันรอบกับวัสดุที่ถูกหุ้มฉนวนแล้ว จะมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง ผลการทำงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิดของวัสดุ การเลือกใช้วัสดุจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต่อไป

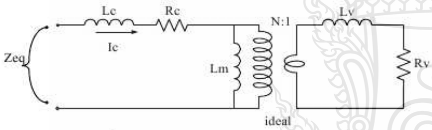
เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังภาพที่ 1 ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับวัสดุ ถ้าวัสดุมีคุณสมบัติเป็นสาร Ferromagnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับวัสดุจะทำให้เกิดกระแสไหลวนเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลทำให้เกิดความร้อนมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นกับวัสดุโดยตรง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดที่เป็นวัสดุจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลง ดังภาพที่ 2 โดยวัสดุทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวดเพียง 1 รอบ ทางด้านปฐมภูมิมีขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L_c$ ) ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $R_c$ ) ซึ่งค่า Magnetizing Inductance ( $L_m$ ) เมื่อรวมความต้านทานของวัสดุ ( $R_v$ ) และ

Leakage Inductance ( $L_v$ ) ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับทางด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม $Z_{eq}$ ประกอบด้วย $R_{eq}$ และ $L_{eq}$ ดังภาพที่ 3

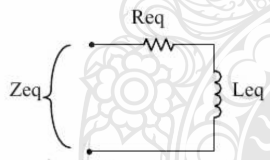



**ภาพที่ 1** ตัวอย่างการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดวัสดุนี้สามารถเขียนแทนด้วยวงจรเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า $L_{eq}$ และความต้านทานเทียบเท่า $R_{eq}$




**ภาพที่ 2** วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลง




**ภาพที่ 3** อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวด

ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดวัสดุสามารถเขียนแทนด้วยวงจรอนุกรมเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า และความต้านทานเทียบเท่าสามารถ

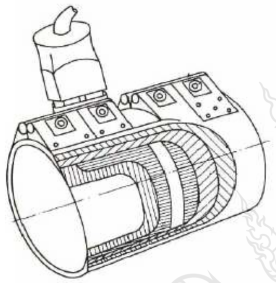
## อุตสาหกรรมพลาสติกกับการใช้ความร้อน

อุตสาหกรรมในปัจจุบันและอดีตที่ผ่านมายังคงใช้ความร้อนโดยอาศัยแก๊สและขดลวดความร้อนเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่นการหลอมแก้วในบางโรงงานยังอาศัยความร้อนที่ได้จากแก๊สหุงต้ม การหลอมพลาสติกในโรงงานอุตสาหกรรม[1] ยังคงใช้ขดลวดความร้อนในการหลอม นอกจากนี้อุปกรณ์ตามอาคารบ้านเรือน ร้านอาหารหรือสถานประกอบการ ยังคงใช้ขดลวดความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆเช่น เครื่องทำน้ำอุ่น กาต้มน้ำ กระทะไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ใช้ขดลวดความร้อนแบบเดิม

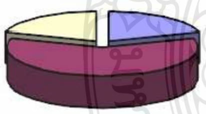
อุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญ มีโรงงานกระจายอยู่ทั่วประเทศรวมทั้งสิ้นกว่า 4,276 แห่ง ตั้งแต่โรงงานตึกแถวไปจนถึงโรงงานขนาดใหญ่ ในปี พ.ศ. 2544-2546 มีปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกประมาณ 2.5 ล้านตันต่อปี มีการใช้แรงงานจำนวนมากประมาณ 169,026 คน และอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกกว่า 1 ล้านคน มีมูลค่าการส่งออกถึง 1.3 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี พ.ศ 2546 หรือคิดเป็นร้อยละ 40 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ และมีมูลค่าการนำเข้าผลิตภัณฑ์พลาสติก เม็ดพลาสติกและเครื่องจักรที่สูงมากเช่นเดียวกัน อุตสาหกรรมพลาสติกมีอัตราการเติบโตในปี พ.ศ. 2546 ถึงร้อยละ 6 ในการผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยการผลิตหลักอย่างหนึ่ง จึงเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เครื่องแปรรูปพลาสติก จะใช้ฮีตเตอร์แบบเข็มขัด (Band Heaters) รัดรอบบาเรล และบริเวณดาย มีทั้งเฟสเดียว และ 3 เฟส ดังภาพที่ 4(ก) โดยทั่วไปจะมี heater 4-6 ชุด แบ่งเป็น กลุ่มหน้า กลุ่มกลาง กลุ่มท้าย ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้มักเป็นแบบแผ่น ขนาด 1,000 - 1,500 วัตต์/แผ่น ลวดฮีตเตอร์ (Heater): เรียกว่า ลวด Nikrothal 80 หรือ R80 โดยส่วนผสมของนิเกิล 80% และโครเมียม 20% สามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติเหนียว และทนความร้อนได้สูงถึง 1400 องศาเซลเซียส หุ้มอยู่รอบกระบอก การควบคุมอุณหภูมิมักเป็นแบบปิดเปิด (ON-OFF) อุณหภูมิที่ตั้งอยู่ในช่วง 170-200 ℃ ขึ้นอยู่กับชนิดพลาสติก แต่ละกลุ่มจะมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่เรียกว่า เธอร์โมสตัทซ์ ( Thermostat ) ซึ่งสามารถปรับตั้งอุณหภูมิของแต่ละกลุ่มได้ ความละเอียดไม่ควรเกิน 10 องศาเซลเซียส สำหรับการควบคุมความร้อนที่ดีสามารถจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ เมื่อ

พิจารณาไฟฟ้าที่ป้อนให้ฮีตเตอร์หุ้มบาเรลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความยาว 1 เมตร อุณหภูมิผิว 140 °C พบว่า เป็นส่วนของการหลอมพลาสติกเพียงร้อยละ 10-20 และสะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ ร้อยละ 60 ที่เหลือร้อยละ 20 เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิววัสดุ ความร้อนปริมาณนี้นอกจากสิ้นเปลืองพลังงาน แล้วยังทำให้พื้นที่ทำงานร้อนขึ้น การหุ้มฉนวนภายนอกกระบอกพลาสติกสามารถช่วยลดการทำงานของ Heater ไฟฟ้าลงได้เทียบเป็นการประหยัดได้ ประมาณ 20%



**ก.** ลักษณะฮีตเตอร์




**ข.** สัดส่วนพลังงานความร้อน

**ภาพที่ 4** ฮีตเตอร์เข็มขัด

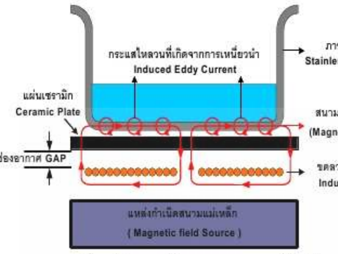
ปัจจุบันได้มีการนำหลักการเหนี่ยวนำความร้อนมาใช้กับการหลอมพลาสติกซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมได้สูงถึง 60 โดยอุปกรณ์ยังคงมีราคาที่สูงกว่าขดลวดความร้อนโดยทั่วไป แต่มีความคงทนในการใช้งานที่มากกว่า

## การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนกับเตาหุงต้ม

เตาหุงต้มหรือกระทะไฟฟ้าเป็นเครื่องใช้ทำอาหารที่มีใช้แทบจะทุกครัวเรือน ตามร้านอาหารและหอพัก และนับว่าเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้พลังงานค่อนมาก

การเกิดความร้อนของกระทะไฟฟ้า อาศัยความร้อนจากขดลวดความร้อนที่วางทาบกับก้นกระทะ ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนจากขดลวดความร้อนสู่ภาชนะ ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนจึงค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง ร้านอาหาร ในห้างสรรพสินค้าใช้เตาแม่เหล็กไฟฟ้าแทนที่เตาแบบเดิม เนื่องจากการประหยัดพลังงานและใช้งานได้สะดวก อีกทั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายในต้นทุน เนื่องจากเตาแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถยกตัวภาชนะออกจากเตาได้ จึงง่ายต่อการทำความสะอาด ซึ่งแตกต่างจากเตาแบบขดลวดที่ภาชนะถูกยึดติดกับเตา ทำให้การทำความสะอาดนั้นยุ่งยากและเกิดคาบสกปรกซึ่งเป็นผลเสียต่อวงจรภายในกระทะไฟฟ้านั้นอีกด้วย

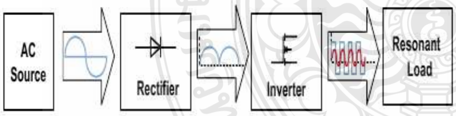
จากภาพที่ 5 เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (Magnetic flux) กับภาชนะหุงต้ม ที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferromagnetic ทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ในเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียและเกิดความร้อนขึ้นที่ภาชนะหุงต้ม และจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ภายในภาชนะหุงต้ม ทำให้น้ำร้อนได้ในที่สุด ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งานและ มีประสิทธิภาพต่อการทำความร้อนสูง




**ภาพที่ 5** โครงสร้างของกระทะไฟฟ้า

## หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 6 รายละเอียดประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ เพื่อป้อนให้กับวงจรเรียงกระแส ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านเอาท์พุตจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อกรองไฟกระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูง โดยใช้เพาเวอร์ไอจีบีที (Insulated gate bipolar transistor) เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ เพื่อจ่ายให้กับชุดโหลดเรโซแนนท์ต่อไป

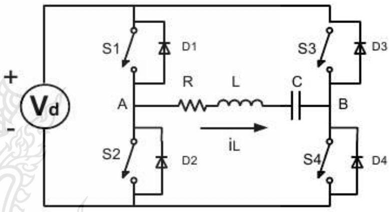



**ภาพที่ 6** หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

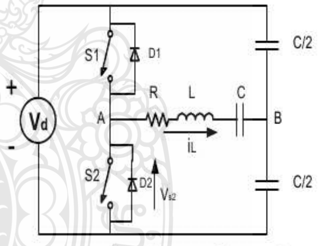
(เว้นบรรทัด ฟอนต์ 8)

## วงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูงส่วนใหญ่นิยมใช้ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และฮาล์ฟบริดจ์ดังภาพที่ 7 ส่วนในเตาแม่เหล็กไฟฟ้า นิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบสวิตซ์ตัวเดียว ข้อแตกต่างกันแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ ($V_{AB}$) จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ กระแสผ่านโหลด ($i_L$) เป็นรูปคลื่นซายด์ดังภาพที่ 8 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์ดังภาพที่ 8 (ข) ทำหน้าที่เหมือนฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แต่จะมีสวิตซ์ $S_1$ และ $S_2$ ทำงานสลับกันเมื่อวัดแรงดันตกคร่อมสวิตซ์ ($V_{S2}$) จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ $+V_d$ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด($i_L$ ) เป็นรูปคลื่นซายน์ดังภาพที่ 8 (ข) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมากกว่าฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และเนื่องจากให้กำลังไฟฟ้ามากจึงต้องสามารถรับแรงดันและกระแสที่มีปริมาณมากขึ้น

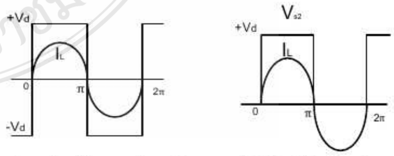



(ก) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์




(ข) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

**ภาพที่ 7** วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์




(ก) ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (ข)ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

**ภาพที่ 8** คลื่นแรงดันและกระแสโหลดของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์

## โหลดเรโซแนนท์

สำหรับโหลดเรโซแนนท์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไปเช่น เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องหลอมโลหะ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องเชื่อมความถี่สูง จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ ( Zero current switch : ZCS ) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ ( Zero voltage switch : ZVS ) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจร เรโซแนนท์ คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนท์กระแสในวงจรมีค่ามากส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ L-C ในวงจรที่เลือกใช้ก็เช่นกันจะต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมและชนิดขนาน ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน คือ

1. **เรโซแนนท์อนุกรมมีข้อดีคือสร้าง**ง่ายราคาถูก สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าดีซีได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเร็กติฟายเออร์โดยไม่ต้องมีวงจรปรับแรงดัน กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับควบคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์ **และมีข้อเสียคือ** ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้ ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลด ได้ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ที่สวิตช์ให้เลื่อนออกจากความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ค่อยเป็นซายน์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกเกิดขึ้นตามมา

2. **เรโซแนนท์แบบขนานมีข้อดี**คือ ขณะป้อนวงจรเพื่อขับสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์วงจรโหลสามารถเปิดวงจรออกได้ สามารถทนทนการลัดวงจรที่โหลดได้ อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์จึงมีค่า peak คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ **ข้อเสีย** ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าดีซีได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรคติฟายเออร์ แต่ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตด์ควบคุมจำเป็นต้องมี coke เนื่องจากเป็น constant current **และ**วงจรมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีcokeและวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

## แนวทางการพัฒนาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในประเทศไทย

ปัจจุบันการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนในไทยนั้นพบเพียงในส่วนของอุตสาหกรรมการหลอมแก้วเพียงบางแห่งเท่านั้นซึ่งน้อยมาก ส่วนมากจะพบในการใช้งานในกระทะแม่เหล็กไฟฟ้า และในอุตสาหกรรมการหลอมพลาสติกยังไม่มีการนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางพบเพียงโรงงานส่วนน้อยเท่านั้น เนื่องจากข่าวสารทางด้านเทคโนโลยีในไทยนั้นจะไม่ครอบคลุมไปถึงอุตสาหกรรมที่สำคัญในไทย แต่จะเน้นไปทางอุปกรณ์สื่อสาร อุปกรณ์ไอที รองลงมาจะเป็นเครื่องมือหรือนวัตกรรมทางการเกษตร และในส่วนของอุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อนในการหลอมนั้นแทบจะไม่มีข่าวสารที่กระจายได้ทั่วถึงให้ตามโรงงานอุตสาหกรรมได้รับรู้ข้อมูลเสียเลย

อุตสาหกรรมอย่างหนึ่งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในประเทศจีนนั้นคือการหลอมพลาสติกเพื่อผลิตเม็ดพลาสติก ได้มีการเปลี่ยนแปลงจากขดลวดความร้อนมาเป็นแบบขดลวดเหนี่ยวนำอย่างแพร่หลายแล้ว ดังที่กล่าวไปว่าประสิทธิภาพที่ดีกว่า ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านการลงทุน แต่หากในประเทศไทยนั้น พบเพียงส่วนน้อยมากๆ เนื่องจากการขาดข่าวสารทางด้านไอทีที่ได้กล่าวไปแล้ว นอกเหนือจากนั้นยังขาดนักลงทุนที่จะสร้างเครื่องมือเหล่านี้มาจำหน่ายในท้องตลาดอีกทั้งผู้ที่มีความรู้ความสามารถในการสร้างยังคงมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ด้วยปัญหาเหล่านี้ จึงเกิดการตั้งบริษัทที่มาจากประเทศจีนมาลงทุนในประเทศไทย ซึ่งมีเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่พร้อมที่จะติดตั้งและบริการให้กับโรงงานอุตสาหกรรมในไทยขึ้นแล้ว ซึ่งอนาคตอาจจะมีผู้ผลิตที่เป็นของคนไทยก็เป็นได้

## เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2548). **คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติก.** กรุงเทพฯ: โครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535.

[2] จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว. (2554). เครื่องชุบแข็งผิวโลหะด้วยวิธีการเหนี่ยวนำความร้อน. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี.**

[3] ยงยุทธ นาราษฎร์; และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ . (2551). "**การควบคุมกำลังไฟฟ้าของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ด้วยจำนวนพัลส์ PDM สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง**" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และมหาวิทยาลัยศรีปทุม นครนายก. หน้า 469-472.

[4] สิทธิโชค สินรัตน์. (2545). **การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้า ด้วยความถี่.** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[5] Tremblay, Gregory E. (2010). **Investigation of Injection molding Performance using Induction barrel heating**. SABIC Innovative Plastics, Pittsfield, MA Bruce F. Taylor, Xaloy Corporation, New Castle, PA

[6] Vriya, P., Thomas, T. (2000). **Power Transfer Characteristics of a Phase-Shift Controlled ZVS Inverter for the Application of Induction Heating**. IPECTokyo Conf.Rec.

[7] Grajales, L., Sabate, J. A., Wang, K R., Tabisz, W. A. and Lee, F. C. (1993). **Design of a 10 kW Phase - Shift Controlled Series A Resonant Inverter for Induction Heating Proc of Industry Applications Society**.Canada: Toront o, 843-849

[8] N. Yongyuth, P. Viriya; & K. Matsuse, (2007). "**Analysis of a Full-Bridge Inverter for Induction Heating Using Asymmetrical Phase-Shift Control under ZVS and NON-ZVS Operation,**" in Proc. Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2007), Bangkok, Thailand, November 2007, pp. 476-482.

40th Anniversary ENGINEERING RMUTT
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8
4-6 พฤศจิกายน 2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
TREC 8
Thunya Power Co.,Ltd.
บ้านสินทรัพย์
ptt Group
IRPC
RMUTT IRD

**รายนามคณะกรรมการดำเนินงานการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8**
**(The 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-8))**

ด้วยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย กำหนดให้มีการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 (The 8th Thailand Renewable Energy for Conference:TREC-8) ระหว่างวันที่ 4 – 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่แวดวงวิชาการ และแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ด้านการวิจัย อีกทั้งเป็นการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านการวิจัยร่วมกับเครือข่ายการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากภายนอก

เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อย มีประสิทธิภาพและบรรลุวัตถุประสงค์ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการดำเนินงานการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ดังนี้

**1. ที่ปรึกษาโครงการ**

| | | |
|---|---|---|
| 1.1 พลเอก อนันตพร | กาญจนรัตน์ | ประธานที่ปรึกษา |
| 1.2 ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ | รัตนเดโช | ที่ปรึกษา |
| 1.3 ศ.ดร.ทนงเกียรติ | เกียรติศิริโรจน์ | ที่ปรึกษา |
| 1.4 ผศ.ดร.วิรชัย | โรยนรินทร์ | ที่ปรึกษา |

**2. คณะกรรมการอำนวยการ**

| | |
|---|---|
| 2.1 อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | ประธานกรรมการ |
| 2.2 รองอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด) | กรรมการ |
| 2.3 รองอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภัทรา โพธิ์พ่วง) | กรรมการ |
| 2.4 รองอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรศักดิ์ ตระกูลชีวพานิตต์) | กรรมการ |
| 2.5 รองอธิการบดี (นายวิชัย พยัคฆโส) | กรรมการ |
| 2.6 รองอธิการบดี (นายวิรัช โหตระไวศยะ) | กรรมการ |
| 2.7 รองอธิการบดี (นายพงศ์พิชญ์ ต่วนภูษา) | กรรมการ |
| 2.8 รองอธิการบดี (นางวนิดา ปอน้อย) | กรรมการ |
| 2.9 ผู้ช่วยอธิการบดี (รองศาสตราจารย์สุจิระ ขอจิตต์เมตต์) | กรรมการ |
| 2.10 ผู้ช่วยอธิการบดี (รองศาสตราจารย์ณฐา คุปตัษเฐียร) | กรรมการ |
| 2.11 ผู้ช่วยอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพบูลย์ แย้มเผื่อน) | กรรมการ |
| 2.12 ผู้ช่วยอธิการบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งอรุณ รังรองรัตน์) | กรรมการ |
| 2.13 ผู้ช่วยอธิการบดี (นายวิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร) | กรรมการ |
| 2.14 ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา | กรรมการและเลขานุการ |

**3. คณะกรรมการดำเนินงาน**

| | |
|---|---|
| 3.1 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ | ประธานกรรมการ |
| 3.2 รองคณบดีฝ่ายบริหารและวางแผน | กรรมการ |
| 3.3 รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย | กรรมการ |
| 3.4 รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา | กรรมการ |
| 3.5 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรชัย โรยนรินทร์) | กรรมการ |
| 3.6 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี อริยวิริยะนันท์) | กรรมการ |
| 3.7 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาติ สนธิสมบัติ) | กรรมการ |
| 3.8 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์คำ) | กรรมการ |

| | |
|---|---|
| 3.9 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลชาติ จุลเพ็ญ) | กรรมการ |
| 3.10 หัวหน้าสำนักงานคณบดี | กรรมการ |
| 3.11 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา | กรรมการ |
| 3.12 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า | กรรมการ |
| 3.13 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล | กรรมการ |
| 3.14 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ | กรรมการ |
| 3.15 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ | กรรมการ |
| 3.16 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม | กรรมการ |
| 3.17 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ | กรรมการ |
| 3.18 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเกษตร | กรรมการ |
| 3.19 หัวหน้าโครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ | กรรมการ |
| 3.20 หัวหน้าโครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ | กรรมการ |
| 3.21 ผู้ช่วยคณบดี (ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี ศรีนนท์ฉัตร) | กรรมการและเลขานุการ |
| 3.22 หัวหน้าสำนักงานบัณฑิตศึกษา | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**4. คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ**

| | | |
|---|---|---|
| 4.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี | อริยวิริยะนันท์ | ประธานกรรมการ |
| 4.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล | ทองอินทร์ดำ | กรรมการ |
| 4.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรชัย | โรยนรินทร์ | กรรมการ |
| 4.4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี | ศรีนนท์ฉัตร | กรรมการ |
| 4.5 ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง | ปลั่งกลาง | กรรมการ |
| 4.6 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย | แดงเอม | กรรมการ |
| 4.7 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภวิทย์ | ลวณะสกล | กรรมการ |
| 4.8 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภานุ | ประทุมนพรัตน์ | กรรมการ |
| 4.9 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย | ต่อสกุล | กรรมการ |
| 4.10 ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ | กิมะพงศ์ | กรรมการ |
| 4.11 ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมศักดิ์ | แก่นทอง | กรรมการ |
| 4.12 ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ | ภวสุปรีย์ | กรรมการ |
| 4.13 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรุณศิริ | จักรบุตร | กรรมการ |
| 4.14 นายณฐภัทร | พันธ์คง | กรรมการ |
| 4.15 นายวีระศักดิ์ | ละอองจันทร์ | กรรมการ |
| 4.16 นางหมิง | จิ๋ง | กรรมการ |
| 4.17 นายมนูศักดิ์ | จานทอง | กรรมการ |
| 4.18 นายชัยภพ | ศิระวรกุล | กรรมการ |
| 4.19 นางสาวกุลวดี | สังข์สนิท | กรรมการ |
| 4.20 นายฉัตรชัย | วีระนิติสกุล | กรรมการ |
| 4.21 นายเกียรติศักดิ์ | แสงประดิษฐ์ | กรรมการและเลขานุการ |
| 4.22 นางสาวเมทิกา | หมั่นทองสุขพร | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 4.23 นางสาวเกวลี | โพธิ์ทอง | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**5. คณะกรรมการฝ่ายพิธีการจัดการประชุม**

| | | |
|---|---|---|
| 5.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี | ศรีนนท์ฉัตร | ประธานกรรมการ |
| 5.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทอดเกียรติ | ลิมปิทีปราการ | กรรมการ |
| 5.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัณณธร | ศลิษฎ์ธนวัฒน์ | กรรมการ |
| 5.4 นายวีระ | คมปรียารัตน์ | กรรมการ |

II

| | | |
|---|---|---|
| 5.5 นายวิเชียร | อูปแก้ว | กรรมการ |
| 5.6 นายจักรกฤษ | อ่อนชื่นจิตร | กรรมการ |
| 5.7 นายสถาพร | ทองวิค | กรรมการ |
| 5.8 นายพฤศยน | นินทนาวงศา | กรรมการ |
| 5.9 ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุณย์ฤทธิ์ | ประสาทแก้ว | กรรมการและเลขานุการ |
| 5.10 นางสาวปิยวรรณ | แน่นนอก | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 5.11 นางสาวปัทมาภรณ์ | ประดิษฐ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 5.12 นางสาวศศิประภา | รัตนพันธ์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**6. คณะกรรมการฝ่ายลงทะเบียนและต้อนรับ**

| | | |
|---|---|---|
| 6.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล | ทองอินทร์คำ | ประธานกรรมการ |
| 6.2 นายณรงค์ชัย | โอเจริญ | กรรมการ |
| 6.3 นางกุลยา | สารีชีวิน | กรรมการ |
| 6.4 นายศิริชัย | เตรียมล้ำเลิศ | กรรมการ |
| 6.5 นายนที | ศรีสวัสดิ์ | กรรมการและเลขานุการ |
| 6.6 นางปรางทอง | โอเจริญ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 6.7 นายมรกต | ประเสริฐ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 6.8 นางสาวณัฐนันท์ | คงเพ็ชรศักดิ์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**7. คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ**

| | | |
|---|---|---|
| 7.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรชัย | โรยนรินทร์ | ประธานกรรมการ |
| 7.2 นายอโณทัย | ผลสุวรรณ | กรรมการ |
| 7.3 นายชัยยะ | ปราณีตพลกรัง | กรรมการ |
| 7.4 นายสมควร | แววดี | กรรมการ |
| 7.5 ผู้ช่วยศาสตราจารย์องอาจ | แสดใหม่ | กรรมการ |
| 7.6 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจักษ์ | อ่างบุญตา | กรรมการและเลขานุการ |
| 7.7 นางสาวธนาวดี | เนตรกรรม | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 7.8 นางสาวกรุณา | แสดใหม่ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 7.9 นางสาวโชติกา | วงศ์อามาตญ์กา | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**8. คณะกรรมการฝ่ายการงานเลี้ยงรับรอง**

| | | |
|---|---|---|
| 8.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลชาติ | จุลเพ็ญ | ประธานกรรมการ |
| 8.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนวย | เรืองวารี | กรรมการ |
| 8.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ | หาชานนท์ | กรรมการ |
| 8.4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐสิทธ์ | พัฒนะอิ่ม | กรรมการ |
| 8.5 นายศักดิ์ชัย | จันทรศรี | กรรมการ |
| 8.6 นายปราโมทย์ | พูนนายม | กรรมการ |
| 8.7 นางสาวสุมนมาลย์ | เนียมหลาง | กรรมการและเลขานุการ |
| 8.8 นางสาวบุษราภรณ์ | จิตจำเนียร | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 8.9 นางสาวมยุรี | แหวนครุฑ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| 8.10 นางสาวนฤภร | เธียรศิริพรชัย | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

### 9. คณะกรรมการฝ่ายประเมินผล

| | | |
|---|---|---|
| 9.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาติ | สนธิสมบัติ | ประธานกรรมการ |
| 9.2 นายพัฒณ์รพี | สุนันทพจน์ | กรรมการ |
| 9.3 นายวินัย | จันทร์เพ็ง | กรรมการและเลขานุการ |
| 9.4 นางสาวอัญชลี | สีมอ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

### 10. คณะกรรมการฝ่ายการเงินและบัญชี

| | | |
|---|---|---|
| 10.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราชญ์ | อัศวนรากุล | ประธานกรรมการ |
| 10.2 นางสาวเมธ์รัฐญา | เจตน์คุณาวัฒน์ | กรรมการ |
| 10.3 นางสาวกานต์ศริษฐา | โพธิ์ศรี | กรรมการ |
| 10.4 นางสาวนนุช | เทียมวรรณ์ | กรรมการ |
| 10.5 นางรัศมิ์ลภัส | อัศวนรากุล | กรรมการ |
| 10.6 นางสาวฐิตาภัสร์ | สิทธิอัมพลวุฒิ | กรรมการและเลขานุการ |

### 11. คณะกรรมการพิจารณาบทความ

| | | |
|---|---|---|
| 11.1 ศ.ดร.ทนงเกียรติ | เกียรติศิริโรจน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 11.2 ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ | รัตนเดโช | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 11.3 ศ.ดร.สัมพันธ์ | ฤทธิเดช | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 11.4 รศ.ดร.สิงห์ทอง | พัฒนเศรษฐานนท์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 11.5 รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ | **ภูมิกิตติพิชญ์** | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.6 ผศ.ดร.กชศร | หัสโรค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.7 ผศ.ดร.จักรี | ศรีนนท์ฉัตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.8 ผศ.ดร.เจนศักดิ์ | เอกบูรณะวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.9 ผศ.ดร.นัฐพร | ไชยญาติ | มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |
| 11.10 ผศ.ดร.บุญยัง | ปลั่งกลาง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.11 ผศ.ดร.บุณยฤทธิ์ | ประสาทแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.12 ผศ.ดร.พัฒนพล | มีนา | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 11.13 ผศ.ดร. ยุทธนา | ทองท้วม | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 11.14 ผศ.ดร.วิรชัย | โรยนรินทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.15 ผศ.ดร.วารุณี | อริยวิริยะนันท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.16 ผศ.ดร.สรพงษ์ | ภวสุปรีย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.17 ผศ.ดร.โสรัตน์ | มงคลมะไฟ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.18 ผศ.ดร.อำนวย | เรืองวารี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11.19 ดร.ชาญวิทย์ | บุญช่วย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.20 ดร.ธนิท | เรืองรุ่งชัยกุล | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 11.21 ดร.ประจวบ | อินระวงศ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 11.22 ดร.ประสพโชค | โห้ทองคำ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.23 ดร.พิสิษฏ์ | มณีโชติ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 11.24 ดร.มนต์ชัย | พินิจจิตรสมุทร | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 11.25 ดร.มนตรี | สมดุลยกนก | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.26 ดร.รัฐศักดิ์ | พรหมมาศ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.27 ดร.รวิภา | ยงประยูร | มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง |
| 11.28 ดร.วิเชียร | อูปแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |

| | | |
|---|---|---|
| 11.29 ดร.วรจิตต์ | เศรษฐพรรค์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ |
| 11.30 ดร.ศักดิ์ชาย | เพ็ชรตรา | มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ |
| 11.31 ดร.ศุภกิจ | วรศิลป์ชัย | ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ |
| 11.32 ดร.สันติ | ไทยยืนวงษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.33 ดร.สำเนียง | องสุพันธ์กุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11.34 ดร.สุบิน | หินจันทร์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ |
| 11.35 ดร.สหัถยา | ทองสาร | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 11.36 ดร.หทัยทิพย์ | นิลสนธิ | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ |
| 11.37 ดร.อนันต์ | พงศ์ธรกุลพานิช | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 11.38 ดร.อนุสรณ์ | แสงประจักษ์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 11.39 ดร.อำพล | อาภาธนากร | สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) |
| 11.40 ผศ.บัญญัติ | นิยมวาส | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 11.41 อาจารย์วราคม | วงศ์ชัย | มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง |
| 11.42 อาจารย์อดิศร | ฌมยา | มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง |
| 11.43 อาจารย์พุฒิพงศ์ | เกิดพิพัฒน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |

**12.คณะกรรมการพิจารณานวัตกรรมด้านพลังงานสู่ชุมชน**

| | | |
|---|---|---|
| 12.1 คุณโกศล | แสงทอง | ประธานกลุ่มรวมใจตามรอยพ่อ จ.เพชรบุรี |
| 12.2 คุณดรุณพร | กมลพัส | นักวิชาการอิสระ |
| 12.3 คุณพุทธพร | ประวาลพฤกษ์ | นักวิชาการอิสระ |
| 12.4 คุณพิสาร | หมื่นไกร | นักวิชาการอิสระ |
| 12.5 คุณวิสูตร์ | ยังพลขันธ์ | นักวิชาการอิสระ |
| 12.6 คุณสุภรัตน์ | ฤทธิชัย | นักวิชาการอิสระ |
| 12.7 นายวสัน | ดอนชัย | นายก อบต.ท่ามะนาว จ.ลพบุรี |

## สารบัญ


| | | |
|---|---|---|
| ES 001 | การออกแบบและพัฒนาเครื่องคั่วพริกด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติ<br>มนตรี น่วมจิตร์, จงกล สุภารัตน์ และ ศิริชัย ต่อสกุล<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | 176-179 |
| ES 002 | การออกแบบและพัฒนาเครื่องบดผสมน้ำพริกกึ่งอัตโนมัติ<br>ไพฑูรย์ พูลสุขโข, ชวลิต อินปัญโญ และ ศิริชัย ต่อสกุล<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | 180-183 |
| ES 003 | การออกแบบและพัฒนาเครื่องบรรจุน้ำพริกแบบกึ่งอัตโนมัติระบบนิวแมติก<br>ศิริชัย ต่อสกุล และ กุณฑล ทองศรี<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | 184-187 |
| ES 004 | การนำความร้อนทิ้งกลับคืนของระบบปรับอากาศสำหรับผลิตน้ำร้อนโดยใช้ถังเก็บน้ำร้อนแบบคู่<br>ชำนาญ แจ้งสว่าง และ นัฐพร ไชยญาติ<br>มหาวิทยาลัยแม่โจ้ | 188-191 |
| ES 005 | การทดสอบประสิทธิภาพการหลอมพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน<br>สำหรับการหลอมรีไซเคิลพลาสติกชนิดความหนาแน่นสูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอี<br>จีระศักดิ์ วงศา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | 192-195 |
| ES 006 | การประเมินการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของโรงงานเซรามิคของจังหวัดลำปาง<br>แบบ 3 มิติ: พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม<br>สายธาร ประสงค์ความดี, ณัฐวุฒิ ดุษฎี และ นัฐพร ไชยญาติ<br>มหาวิทยาลัยแม่โจ้ | 196-198 |
| ES 007 | การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนในการหลอมพลาสติกรีไซเคิล<br>วันชัย ทรัพย์สิงห์ และ จีระศักดิ์ วงศา<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | 199-202 |
| ES 008 | การวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตข้าวแคบ<br>กรณีศึกษา : กลุ่มวิสาหกิจชุมชนการผลิตข้าวแคบยางกะไดใต้ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์<br>ชไมพร นันติะสี [1], ศิรินุช จินดารักษ์[1] และ พัฒนโชค สายอ้าย[2]<br>[1] มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>[2] มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย | 203-206 |
| ES 009 | การศึกษาสมรรถนะระบบสูบน้ำบาดาลพลังงานแสงอาทิตย์ณ ศูนย์บริการวิชาการที่ 3 จังหวัดมหาสารคาม<br>วุฒิศาสตร์ โชคเกื้อ, สิทธิพร พรมเหลา และ ศาตตรา ศิริแก้ว<br>มหาวิทยาลัยมหาสารคาม | 207-210 |
| ES 010 | ระบบควบคุมการเปิด-ปิดไฟภายในห้องแบบอัตโนมัติ<br>ฉวีวรรณ ดวงทาแสง, อิสระ แสนโคก, ศุภชัย ฤทธิ์เจริญวัตถุ และ สุภกร หาญสูงเนิน<br>มหาวิทยาลัยมหาสารคาม | 211-214 |
| ES 011 | การควบคุมความสว่างภายในห้องอัตโนมัติบนพื้นฐานของค่ามาตรฐานเพื่อการประหยัดพลังงาน<br>พุฒิพงศ์ เกิดพิพัฒน์, สุทธี ทับทองดี, เสาวลักษณ์ แสงแก และ อนุสรณ์ สาธุเสน<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ | 215-218 |

ES005

# การทดสอบประสิทธิภาพการหลอมพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน สำหรับการหลอมรีไซเคิลพลาสติกชนิดความหนาแน่นสูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอี

Performance Tests of Melting the Plastic by Induction Heating for Melting Recycled High-density Polyethylene with a Class E Inverter Circuit

**จีระศักดิ์ วงศา* และวันชัย ทรัพย์สิงห์**

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email : wanchai.s@en.rmutt.ac.th

## บทคัดย่อ

*บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนในการหลอมพลาสติกด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอีที่พิกัดกำลังไฟฟ้าอินพุตขนาด 1 กิโลวัตต์ การทดสอบหาประสิทธิภาพด้วยการคำนวณพลังงานเอาท์พุตของขดลวดความร้อนแบบรัดท่อเปรียบเทียบกับพลังงานเอาท์พุตของขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบการหลอมพลาสติกชนิดความหนาแน่นสูงที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าที่กำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากันการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อใช้เวลาในการหลอม 15 นาที 10 วินาที คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเท่ากับ 233.85 วัตต์ มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 23.39 % และการหลอมด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนใช้เวลาในการหลอมเพียง 4 นาที 50 วินาที คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตเท่ากับ 733.79 วัตต์ นั่นคือมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 73.38 % แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ จากผลการทดสอบสามารถนำหลักการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอีนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการหลอมพลาสติกเพื่อประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายได้ต่อไป*

**คำสำคัญ**: *ขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ การหลอมพลาสติก*

## Abstract

This article presents an application of the principle of induction heating to melt the plastic with the class E inverter circuit rated power input of 1 kW. Performance testing by computing with power output of band heater compared to the power output of the induction heater. Test results of melting high density polyethylene at temperature of 150 °c with equal power input. Melting by band heater takes 15 minutes 10 seconds equal to 233.85 watts output power, efficiency 23.39%. And melting by an induction heater take 4 minutes 50 seconds equal to 733.79 watts output efficiency 73.38%. Shows that the efficiency of induction heater had better performance than band heater. The result can be to applied the induction heating class E inverter circuit for industrial melting plastic to save energy and reduce costs.

**Keywords:** *band heater, induction heater, plastic melting*

## 1. บทนำ

การให้ความร้อนด้วยหลักการเหนี่ยวนำนั้นเป็นนวัตกรรมที่มีประสิทธิภาพสูงในการให้ความร้อน จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นในเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ (Induction Cooker) มีการนำมาใช้ในเครื่องชุบแข็ง เครื่องทำน้ำอุ่น เป็นต้น ในส่วนของการหลอมพลาสติกในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในประเทศไทยนั้น การหลอมจะใช้ขดลวดความร้อนแบบเดิม นั่นคือขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ซึ่งจากรายงานผลการสำรวจโรงงานอุตสาหกรรมของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่าการใช้ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อมีประสิทธิภาพในการทำความร้อนเพียงร้อยละ 10-20 เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นประเด็นปัญหาที่สำคัญเพื่อลดอัตราการใช้พลังงานและเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องหลอมพลาสติกโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งการทดสอบนั้นจะทดสอบเปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงและเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ ว่าประสิทธิภาพการทำความร้อนของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ามากมายเพียงใด

งานวิจัยนี้จึงเป็นการทดสอบถึงประสิทธิภาพในการหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อนด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอีซึ่งมีข้อดีคือวงจรมีขนาดเล็กเนื่องจากใช้อุปกรณ์ในการสวิตช์เพียงตัวเดียว จึงเป็นการประหยัดงบประมาณในการสร้างและลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้าง เพื่อที่จะเป็นข้อมูลที่สำคัญให้แก่ผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทยที่มีอยู่จำนวนมาก ในการเปลี่ยนมาใช้ระบบเหนี่ยวนำความร้อน เพื่อลดต้นทุนการผลิต ลดการใช้พลังงานให้กับประเทศชาติได้อีกด้วย

## 2. การหลอมพลาสติกรีไซเคิล

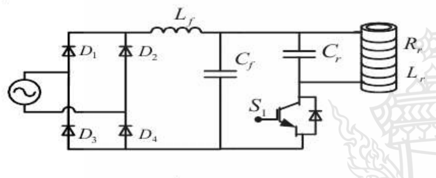
อุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญของไทย ในปี พ.ศ.2557 มีผู้ประกอบการกระจายอยู่ทั่วประเทศทั้งสิ้นกว่า 4,804 แห่ง มีปริมาณการส่งออกถึง 1.5 ล้านตันต่อปี มีปริมาณการส่งออกใน 5 เดือนแรกของปี 2557 (ม.ค. –พ.ค.) ถึง 5,581.49 ล้านเหรียญสหรัฐหรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 6 ของมูลค่าการส่งออกทั้งประเทศ [1]

ในส่วนของการรีไซเคิลพลาสติกเริ่มต้นด้วยการแยกพลาสติกชนิดต่างๆ ออกจากกัน เนื่องจากพลาสติกต่างชนิดกันมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่น ความแข็ง เมื่อพลาสติกแต่ละชนิดถูกแยกออกจากกันแล้ว จะถูกบีบให้แบนแล้วมัดรวมกันเป็นก้อน เพื่อแยกส่งไปยังโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลที่โรงงานพลาสติกแต่ละชนิดจะถูกนำมาบดให้เป็นชิ้นเล็ก และล้างทำความสะอาดในบ่อน้ำขนาดใหญ่ ในขั้นตอนนี้ฝุ่นและสิ่งสกปรกจะถูกกำจัดออกไป หลังจากนั้นชิ้นพลาสติกจะถูกทำให้แห้งโดยการตากแดดหรือใช้อากาศร้อน จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการหลอม

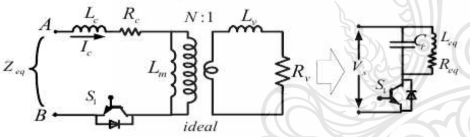
ชิ้นพลาสติกผ่านเครื่องอัดรีด (extruder) ออกมาเป็นเส้น ก่อนตัดให้เป็นเม็ดเล็กๆบรรจุลงกล่อง ซึ่งในส่วนของการหลอมนั้นจะใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ (Band Heaters) รัดรอบบาเรลและบริเวณดาย พลังงานที่ใช้ในส่วนของการหลอมพลาสติก พบว่าใช้เพียงร้อยละ 10-20 สะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ ร้อยละ 60 ที่เหลือร้อยละ 20 เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิวบาเรล[1]

## 3. การเหนี่ยวนำความร้อน

หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ($L_r R_r$ ) ดังรูปที่ 1 ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับบาเรล เมื่อบาเรลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferromagnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับบาเรลจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ในบาเรลเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บาเรล และจะถ่ายเทความร้อนไปยังพลาสติกที่อยู่ภายในบาเรล ทำให้พลาสติกร้อนได้ในที่สุด[2]




รูปที่ 1 วงจรกำลัง




รูปที่ 2 วงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงและวงจรอนุกรมเทียบเท่า

จากรูปที่ 1 เป็นวงจรหลักในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอี [3] โดยรับไฟกระแสสลับ 220V 50Hz เข้าสู่วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองสัญญาณ ($L_f$ , $C_f$ ) แล้วสวิตช์ $S_1$ จะทำการสับสวิตช์ความถี่สูงเพื่อจ่ายให้กับโหลดต่อไป จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงดังรูปที่ 2 โดยโหลดบาเรลทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวดเพียง 1 รอบ โดยมี

- Leakage Inductance ของบาเรล ( $L_v$ )
- ความต้านทานของบาเรล ( $R_v$ )

ส่วนขดลวดทางด้านปฐมภูมิสามารถแทนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำโดยมี

- Leakage Inductance ของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $L_c$ )
- ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ ( $R_c$ )
- Magnetizing Inductance ( $L_m$ )

ซึ่งค่า $L_m$ มีค่าน้อย เมื่อรวม $R_v$ และ $L_v$ ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับทางด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม $Z_{eq}$ ประกอบด้วย $R_{eq}$ และ $L_{eq}$ ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลนี้สามารถเขียนแทนด้วยวงจรเทียบเท่าดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า $L_{eq}$ และความต้านทานเทียบเท่า $R_{eq}$ ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลสามารถเขียนแทนด้วยวงจรอนุกรมเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า และความต้านทานเทียบเท่าสามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$R_{eq} = Rc + N^2 Rv \tag{1}$$

เมื่อ $R_{vp} = N^2 R_v$ จะได้

$$R_{eq} = R_c + R_{vp} \tag{2}$$

$$L_{eq} = L_c + N^2 L_v \tag{3}$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

$R_c$ คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหรือขดลวดเหนี่ยวนำ

$R_v$ คือ ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ

$L_c$ คือ Leakage Inductance ทางด้านปฐมภูมิ

$L_v$ คือ Leakage Inductance ทางด้านทุติยภูมิ

$R_{vp}$ คือ ความต้านทานของโหลดบาเรลทางด้านปฐมภูมิ

กำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$P_c = I_c^2 R_c \tag{4}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในโหลดบาเรลมีค่าเท่ากับ

$$P_v = I_v^2 R_v \tag{5}$$

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิจะได้

$$P_v = I_c^2 R_{vp} \tag{6}$$

เนื่องจาก $I_v = NI_c$ (7)

โดยที่ $I_c$ คือ กระแสในโหลดบาเรล

$I_v$ คือ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ

ดังนั้นประสิทธิภาพของโหลดบาเรลสามารถหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_v}{P_v + P_c} \tag{8}$$

$$\eta = \frac{I_v^2 R_v}{I_v^2 R_v + I_c^2 R_c} \tag{9}$$

$$\eta = \frac{I_v^2 R_v}{\left[\frac{I_v^2}{N^2}\right]\left[R_v N^2\right] + I_c^2 R_c} \tag{10}$$

$$\eta = \frac{I_v^2 R_{vp}}{\left[I_c^2 . R_{vp}\right] + I_c^2 R_c} \tag{11}$$

$$\eta = \frac{R_{vp}}{R_{vp} + R_c} \tag{12}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + Rc / Rvp} \tag{13}$$

ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยกระแสไหลวนในโหลดบาเรลที่บริเวณชั้นผิวด้านในที่มีความลึกเท่ากับ $\delta$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของบาเรลดังสมการ

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \tag{14}$$

โดยที่ $\rho$ คือสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะ ($\Omega \cdot m$)
$f$ คือความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)
$\mu_r$ คือความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

ดังนั้น ความต้านทานที่ผิวของโหลดบาเรลในย่านความถี่สูง $Rv$ มีค่าดังนี้

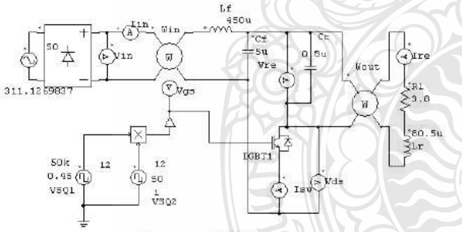
$$Rv = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4\pi^2} \times 10^{-7} \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \tag{15}$$

นำสมการ 15 แทนค่าในสมการที่ 5 จะได้กำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของโหลดบาเรล $P_v$ ดังนี้

$$P_v = I_v^2 R_v = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot (NI_c)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \tag{16}$$

จากสมการที่ 15 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของบาเรล ( $R_v$ ) จะแปรผันโดยตรงกับสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ( $\rho$ ) ของบาเรล ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของบาเรล( $\mu_r$ ) และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ ( $f$ ) ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ (16) จะได้ว่าการเพิ่มของเพาเวอร์เอาท์พุต ( $P_v$ ) ของบาเรลสามารถเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มความถี่ ( $f$ ) ของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำและแอมป์-เทอร์น ( $N.I_c$ ) ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

## 4. การออกแบบ




รูปที่ 3 วงจรกำลังที่ใช้ในการออกแบบ

ในส่วนของการออกแบบดังรูปที่ 3 ขดลวดได้ใช้ขดลวดทองแดงเบอร์ 33 SWG ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 200 องศาเซลเซียส จำนวน 28 เส้น พันตีเกลียวเพื่อชดเชยผลอันเกิดจากสกินเอฟเฟค (Skin Effect ) ที่เกิดขึ้นกับการไหลของกระแสในขดลวดทองแดงขณะทำงานที่ความถี่สูงและเพียงพอกับปริมาณกระแสที่ไหลขณะทำงานที่พิกัดสูงสุด (~20 $A_{rms}$ ) ออกแบบฟอร์มขดลวดเป็นทรงกลมดังรูปที่ 4 (ง) จากนั้นจึงนำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม ดังสมการ $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ แล้วจึงทำการทดสอบโดยการค่อยๆปรับค่าแรงดันอินพุตขึ้นทีละน้อย เพื่อป้องกันความเสียหายให้กับอุปกรณ์ แล้วจึงทำการเก็บผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเก็บผล

| Parameter Expand | Parameter | Value |
|---|---|---|
| Input voltage | Vin | 311.13 Vpk |
| Capacitor resonant | Cr | 0.8 μF |
| Equivalent resistor with work piece | Req | 3.8 Ω |
| Equivalent inductor | Leq | 80.5 μH |
| Switching frequency | Fs | 30-60 kHz |
| Duty cycle | D | 0.45 |

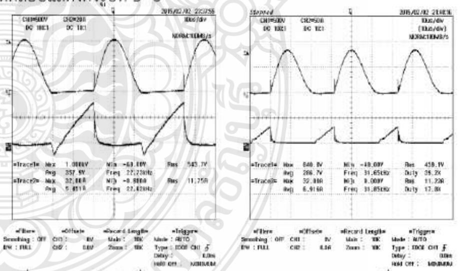
ก) วงจรควบคุมและวงจรขับ ข) วงจรกำลัง

ค) ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ ง) ขดลวดเหนี่ยวนำ

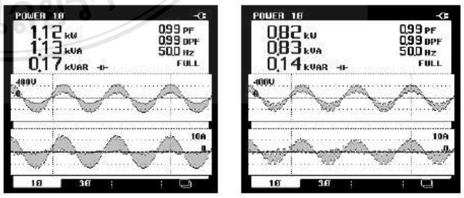
รูปที่ 4 วงจรที่ใช้ในการออกแบบจริง

## 5. การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบจริงเนื่องจากกระแสของโหลดมีปริมาณสูงจึงเลือกใช้ IGBT ขนาด 50 A ,1200 V เบอร์ IXYZ120BD30N 2 ตัวต่อต่อขนานกันดังรูปที่ 4 (ข) และใช้ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ขนาด 0.01 uF ต่อขนานกันเพื่อลดความเคียดในตัวเก็บประจุ จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้วาริแอคค่อยๆปรับแรงดันอินพุตขึ้น และปรับความถี่ให้เหมาะสม จะได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 -6



รูปที่ 5 ผลการวัดรูปคลื่น $V_{sw}$ and $I_{sw}$, f =22.73 kHz, และความถี่ 31.65 kHz



รูปที่ 6 ผลการกำลังไฟฟ้าอินพุตของ induction heater ที่ความถี่ =22.73 kHz, และความถี่ 31.65 kHz

การทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนและขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนมีขนาดใกล้เคียงกันที่ 1 กิโลวัตต์ดังรูปที่ 6 มาใช้หลอมกับพลาสติก HDPE ปริมาณ 1000 $mm^3$ และหาค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพลาสติก HDPE สามารถหาได้จาก

$$P_{out,total} = 1900.\frac{(T_2 - T_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (17)$$

โดยที่ $P_{out,total}$ คือ กำลังงานเอาท์พุตที่เปลี่ยนมาจากพลังงานความร้อนของพลาสติก HDPE (W)

$T_1$ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของพลาสติก ($°C$)

$T_2$ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของพลาสติก ($°C$)

$t_1$ คือ เวลาที่เริ่มต้นทำงาน (sec)

$t_2$ คือ เวลาที่สิ้นสุดทำงาน (sec)

1900 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของพลาสติก HDPE( J/kg.K)

$$\%\eta_{total} = \frac{P_{out,total}}{P_{in}} \times 100 \quad (18)$$

โดยที่ $\%\eta_{total}$ คือ ประสิทธิภาพรวมระบบ

ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อซึ่งใช้เวลา 15นาที 10 วินาที ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 38°C จนถึง 150 °C เท่ากับ

$$P_{out,total} = 1900.\frac{(150-38)}{(910)} = 233.85 \text{ วัตต์}$$

$$\%\eta_{total} = \frac{233.85}{1000} \times 100 = 23.39 \text{ เปอร์เซนต์}$$

และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำซึ่งใช้เวลา 4 นาที 50 วินาที มีเท่ากับ

$$P_{out,total} = 1900.\frac{(150-38)}{(290)} = 733.79 \text{ วัตต์}$$

$$\%\eta_{total} = \frac{733.79}{1000} \times 100 = 73.38 \text{ เปอร์เซนต์}$$

## 6. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบเวลาในการหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อใช้เวลา 15นาที 10 วินาที ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 38°C จนถึง 150 °C คิดเป็นกำลังเอาท์พุตได้เท่ากับ 233.85 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพได้ 23.39 % จากนั้นทดสอบหลอมด้วยขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนใช้เวลาในการหลอมทั้งสิ้น 4 นาที 50 วินาทีคิดเป็นกำลังเอาท์พุตได้เท่ากับ 733.79 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพได้ 73.38 % เห็นได้ว่าประสิทธิภาพของขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดความร้อนแบบรัดท่อ จากผลการทดสอบสามารถนำหลักการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์คลาสอีนี้ ไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการหลอมพลาสติกที่มีอยู่มากมายในประเทศไทย เพื่อที่จะเป็นการช่วยประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายได้ต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในการมอบทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, “คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติก,” โครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535, มกราคม 2548, หน้า 47-48.

[2] สิทธิโชค สินรัตน์, “การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2545, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[3] จีระศักดิ์ วงศา, “เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนคลาสอี”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2552, มหาวิทยาลัยธนบุรี.

ES007

# การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนในการหลอมพลาสติกรีไซเคิล

The Application of Induction Heating to Melting recycled plastic

วันชัย ทรัพย์สิงห์ และจีระศักดิ์ วงศา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email : wanchai.s@en.rmutt.ac.th

**บทคัดย่อ**

*บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกในส่วนของการหลอมด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งทดสอบหลอมพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต(PET) โดยหลอมด้วยขดลวดความร้อนแบบรัดท่อเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบพบว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อใช้กำลังไฟฟ้าถึง 315.33 หน่วยต่อวันและขดลวดเหนี่ยวนำใช้กำลังไฟฟ้าในการหลอม 117.30 หน่วยต่อวัน สามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้ถึง 198.03 หน่วยต่อวัน และมีประสิทธิภาพถึง 72.16% ในขณะที่ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อมีประสิทธิภาพเพียง 26.84% เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการจริง*

**คำสำคัญ:** *ขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ การหลอมพลาสติก*

**Abstract**

*This article presents the optimization process of melting the plastic recycle with the principle of induction heating. The test with melting high density polyethylene (HDPE) and polyethylene terephthalate (PET). By melting by band heater compared with the induction heater. The test results showed that a band heater has power to 315.33 kWh/day ,and the induction heater power consumption of 117.30 kWh/day. It can reduce power consumption by up to 198.03 kWh/day, 72.16% of efficiency. While band heater has effective 26.84% when compared to the amount of real power required to heat it.*

**Keywords:** *Induction heater, Band heater, Plastic recycle*

## 1. บทนำ

ในกระบวนการหลอมพลาสติกในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้ฮีตเตอร์แบบเข็มขัดหรืออีกชื่อหนึ่งคือฮีตเตอร์กระบอก ( Band Heater ) [1] เป็นในการให้ความร้อน ซึ่งสัดส่วนการใช้พลังงานในส่วนนี้พบว่าพลังงานที่เป็นส่วนของการหลอมพลาสติกใช้เพียงร้อยละ 10-20 และสะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ถึงร้อยละ 60 ที่เหลือร้อยละ 20 เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิวของบาเรล ความร้อนปริมาณนี้นอกจากสิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังทำให้พื้นที่ทำงานร้อนขึ้น [1]

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้นถูกนำมาใช้ในเครื่องมือต่างๆ มากมายเนื่องจากประสิทธิภาพในการให้ความร้อนที่ดีกว่าขดลวดความร้อน จึงเป็นประเด็นหลักในการดำเนินงานวิจัย โดยการออกแบบและสร้างเครื่องหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อน เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการทำความร้อนทั้งสองแบบเพื่อทดสอบอัตราการประหยัดพลังงานที่จะเป็นประโยชน์แก่โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศสืบต่อไป

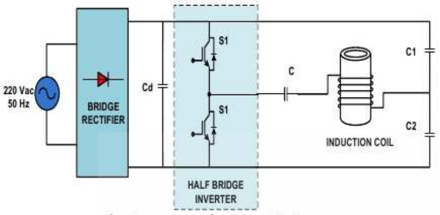
## 2. การหลอมพลาสติกรีไซเคิล

อุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญของไทย ในปี พ.ศ.2546 มีโรงงานกระจายอยู่ทั่วประเทศทั้งสิ้นกว่า 4,276 แห่ง มีปริมาณการผลิต 2.5 ล้านตันต่อปี มีปริมาณการส่งออกถึง 1.3 ล้านเหรียญสหรัฐหรือคิดเป็นร้อยละ 40 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ [1]

ในส่วนของการรีไซเคิลพลาสติกเริ่มต้นด้วยการแยกพลาสติกชนิดต่างๆ ออกจากกัน เนื่องจากพลาสติกต่างชนิดกันมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่น ความแข็ง ความนิ่ม ความใส เมื่อพลาสติกแต่ละชนิดถูกแยกออกจากกันแล้ว จะถูกบีบให้แบนแล้วมัดรวมกันเป็นก้อน เพื่อแยกส่งไปยังโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลที่โรงงานพลาสติกแต่ละชนิดจะถูกนำมาบดให้เป็นชิ้นเล็ก และล้างทำความสะอาดในบ่อน้ำขนาดใหญ่ ในขั้นตอนนี้ฝุ่นและสิ่งสกปรกจะถูกกำจัดออกไป หลังจากนั้นชิ้นพลาสติกจะถูกทำให้แห้งโดยการตากแดดหรือใช้อากาศร้อน จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการหลอมชิ้นพลาสติกผ่านเครื่องอัดรีด (extruder) ออกมาเป็นเส้น ก่อนตัดให้เป็นเม็ดเล็กๆบรรจุลงกล่อง ซึ่งในส่วนของการหลอมนั้นจะใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ (Band Heaters) รัดรอบบาเรลและบริเวณดาย โดยทั่วไปจะมี heater 4-6 ชุด แบ่งเป็น กลุ่มหน้า กลุ่มกลาง กลุ่มท้าย ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้มักเป็นแบบแผ่นขนาด 1,000 -1,500 วัตต์/แผ่น ลวดฮีตเตอร์ (Heater) ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส โดยมีคุณสมบัติเหนียวและทนความร้อน ซึ่งหุ้มอยู่รอบกระบอกสกรูหรือบาเรล การควบคุมอุณหภูมิมักเป็นแบบปิดเปิด (ON-OFF) อุณหภูมิที่ตั้งอยู่ในช่วง 170-200 °C ขึ้นกับชนิดพลาสติก ในส่วนของพลังงานที่ใช้ในการหลอมนั้นใช้เพียงร้อยละ 10-20 สะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ร้อยละ 60 ที่เหลือร้อยละ 20 เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิวบาเรล [1]

## 3. การเหนี่ยวนำความร้อน

วงจรพื้นฐานโดยทั่วไปในการออกแบบของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง โดยใช้ไฟจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และทำการสับสวิตช์ความถี่สูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงนี้ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับบาเรล เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction coil) ดังรูปที่ 1 ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับบาเรล ถ้าบาเรลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferromagnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับบาเรลจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ในบาเรลเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บาเรล และจะถ่ายเทความร้อนไปยังพลาสติกที่อยู่ภายในบาเรลทำให้พลาสติกร้อนได้ในที่สุด [2]

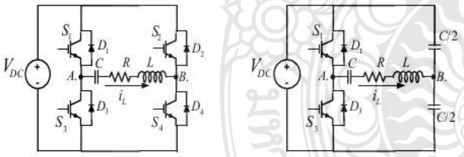



รูปที่ 1 ลักษณะการเหนี่ยวนำความร้อนในบาเรล

ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับบาเรล ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน มีประสิทธิภาพต่อการทำความร้อนสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นกับบาเรลโดยตรง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดบาเรลจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกัน

### 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันสองประเภทคืออินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และอินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) ตามลำดับสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์จะมีคู่สวิตช์ $S_1, S_4$ และ $S_2, S_3$ ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูง เมื่อวัดแรงดันเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์ ($V_{AB}$) จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_{DC}$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_{DC}$ กระแสผ่านโหลด($i_L$ )เป็นรูปคลื่นไซน์ ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์ดังรูปที่ 2 (ข) ทำหน้าที่เหมือนฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แต่จะมีสวิตช์ $S_1$ และ $S_2$ ทำงานสลับกันเมื่อวัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์($V_{S2}$) จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ $+V_{DC}$ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด ($i_L$ ) เป็นรูปคลื่นไซน์ [3]




(ก) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ (ข) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์

### 3.2 โหลดเรโซแนนท์

สำหรับโหลดเรโซแนนท์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไป จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ ( Zero current switch : ZCS ) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ ( Zero voltage switch : ZVS ) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนท์ คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนท์กระแสในวงจรมีค่ามากส่งผลให้แรงดันของวงจรมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ L-C ในวงจรที่เลือกใช้ก็เช่นกันจะต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมและชนิดขนาน ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน และมีคุณสมบัติสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนท์

| คุณสมบัติ | วงจรอนุกรม RLC | วงจรขนาน RLC |
|---|---|---|
| ความถี่เรโซแนนท์ $f_r$ | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ |
| แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R | สูงสุดที่ $f_r$ | คงที่ที่ $V_o$ |
| กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R | คงที่ที่ $V_o / R$ | ต่ำสุดที่ $f_r$ |
| ค่า Q (Quality factor) | $Q = \frac{2\pi f_R L}{R}$ | $Q = \frac{R}{2\pi f_R L}$ |
| ค่าแบนด์วิดช์, BW | $BW = \frac{f_R}{Q}$ | $BW = \frac{f_R}{Q}$ |
| ค่า Impedance ที่จุดต่ำกว่า $f_r$ | Capacitive | Inductive |
| ค่า Impedance ที่จุดเหนือกว่า $f_r$ | Inductive | Capacitive |
| ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า R | เพิ่มค่า R, ค่า BW เพิ่ม | เพิ่มค่า R,ค่า BWลด |
| ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า L/C | เพิ่มค่า L/C, ค่า BW ลด | เพิ่มค่า L/C,ค่า BWลด |

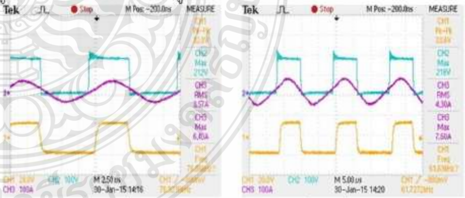
## 4. การออกแบบ

การออกแบบและการควบคุมในห้องทดสอบนั้นอาจใช้ TL494 ในการสร้างสัญญาณ pwm ก่อน จากนั้นหากได้ความถี่ที่เสถียรแล้วจะควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A ด้วยการปรับความถี่ วงจรกำลังจะรับแรงดันจากแหล่งจ่าย 1 เฟส 220 V 50Hz ผ่านวงจรเรียงกระแส จากนั้นใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มคลื่นทดสอบดังรูปที่ 2 โหลดที่ใช้เป็นแบบเรโซแนนท์ชนิดอนุกรม นั่นคือตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งเกี่ยวคล้องกับบาเรลดังรูปที่ 3

ก) ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ข) ชุดทดสอบ

รูปที่ 3 วงจรจริงที่ใช้ในการออกแบบในห้องทดลอง

ในการออกแบบนั้นจะทดสอบในห้องทดลองก่อนดังรูปที่ 3 โดยการค่อยๆปรับเพิ่มแรงดันอินพุตและปรับความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งได้ทำการวัดรูปคลื่นของวงจรนั้นแสดงดังรูปที่ 4




ก) $V_{dc}$ ,$I_L$ ที่ความถี่ 76.86 kHz ข) $V_{dc}$, $I_L$ ที่ความถี่ 61.69 kHz

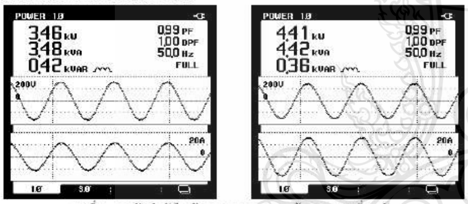
รูปที่ 4 แรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านโหลด

ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำได้เลือกใช้ลวดทองแดงขนาด 22 AWG จำนวน 25 เส้นมาพันตีเกลียวกันเพื่อลดค่าการสูญเสียเนื่องจากความถี่สูง และหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ทดสอบกับบาเรลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. มีความหนา 4 ซม. ยาว 90 ซม. หุ้มด้วยฉนวนเซรามิคไฟเบอร์ซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูงและช่วยลดการสูญเสียความร้อน การปรับความถี่ในรูป

ที่ 5 ก) จะใช้ความถี่ในการสับสวิตช์ที่ 76.86 kHz และรูปที่ 4 ข) ใช้ความถี่ที่ 61.69 kHz พบว่าเมื่อความถี่ลดลงค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของโหลด ($I_L$) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.57 Arms เป็น 4.30 Arms ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งการออกแบบในห้องทดลองนั้นต้องการเพียงให้สามารถทำอุณหภูมิให้สูงถึง 300 °C (อุณหภูมิในการหลอมพลาสติกแต่ละชนิดอยู่ที่ 100-300 °C [1]) หลังจากทดลองแล้วนั้น จึงจะนำไปติดตั้งในระบบงานจริง

## 5. การทดสอบ

จากการออกแบบที่ห้องทดลองก่อนที่จะนำไปติดตั้งกับงานจริง ในส่วนของงานจริงนั้นจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าดังรูปที่ 6 บาเรลจะมีขนาดที่ยาวขึ้นถึง 2.3 เมตร โดยการทดสอบงานจริงนั้นจะหาค่าความต้องการพลังงานจริง(ได้จากการคำนวณ)ดังสมการที่ 1 จากนั้นเก็บผลการทดสอบจากฮีตเตอร์แบบเดิม(แบบรัดท่อ)ว่าใช้พลังงานเท่าไหร่เปรียบเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์แบบเหนี่ยวนำซึ่งอาศัยหลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยเก็บผลการใช้งานฮีตเตอร์แบบรัดท่อจำนวน 6 วัน แต่ละวันเครื่องจะทำงาน 23 ชั่วโมงแล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละวันว่าใช้พลังงานเท่าไหร่ หลังจากนั้นได้ทำการติดตั้งระบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบใหม่และทำการวัดกำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 5 จากนั้นทำการเก็บผลค่าพลังงานที่ใช้เป็นเวลา 6 วัน แล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละวันเพื่อนำมาเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด และมีประสิทธิภาพที่ดีเพิ่มขึ้นหรือไม่




รูปที่ 5 การวัดกำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

(ก) เดิมใช้ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ (ข) ขดลวดเหนี่ยวนำที่ติดตั้งแล้วเสร็จ

รูปที่ 6 ก่อนและหลังติดตั้งการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

## 6. ผลการทดสอบ

การทดสอบนั้นได้ใช้พลาสติกชนิด HDPEและ PET มาใช้หลอมโดยฮีตเตอร์แบบรัดท่อมีกำลังการผลิตเม็ดพลาสติก HDPE และ PET เฉลี่ยที่ 1,700และ1,100kg/วัน ตามลำดับ ใช้ไฟเฉลี่ยที่ 242.67 หน่วย/วัน และ 387.75 หน่วย/วัน ตามลำดับ เมื่อติดตั้งเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนประสิทธิภาพสูงจะมีการใช้พลังงานลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 98 หน่วย/วัน และ 136.93 หน่วย/วัน ตามลำดับ

การคำนวณหาพลังงานที่ต้องการใช้ในการหลอม

$$Q = m \times s \times dT \qquad (1)$$

เมื่อ Q : ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ (J)

m : มวลของพลาสติก (g)

s : ความร้อนจำเพาะของพลาสติก HDPE=1.9,PET=1.35 (J/g°C)

dT : ค่าความแตกต่างอุณหภูมิที่ใช้งาน (°C)

(1) <u>พลังงานที่ใช้จริงของพลาสติก HDPE ต่อวันมีค่าเท่ากับ</u>

$Q = 1,700,000 \times 1.90 \times (122-45)$

$= 259.683 \times 10^6$ J

คิดเป็นค่าพลังงานต่อชั่วโมงเท่ากับ $307.519 \times 10^6 / 23$

$= 11.29 \times 10^6$ J, หรือ 3.14 kWh

(2) <u>พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก HDPEจากฮีตเตอร์แบบรัดท่อ</u>

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 242.67 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ

242.67 kWh /23 ชม.= 10.55 กิโลวัตต์ ( kW )

ประสิทธิภาพของระบบฮีตเตอร์ มีค่าเท่ากับ

3.14 / 10.55 = 0.2976

(3) <u>พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก HDPE จากเครื่องเหนี่ยวนำ</u>

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 98 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ

98 kWh /23 ชม. = 4.26 กิโลวัตต์ ( kW )

นั่นคือ ประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนมีค่าเท่ากับ

3.14/4.26 = 0.7371

(4) <u>พลังงานที่ใช้จริงของพลาสติก PET ต่อวันมีค่าเท่ากับ</u>

$Q = 1,100,000 \times 1.35 \times (280-45)$

$= 348.975 \times 10^6$ J

คิดเป็นค่าพลังงานต่อชั่วโมงเท่ากับ $348.975 \times 10^6 / 23$

$= 15.17 \times 10^6$ J, หรือ 4.21 kWh

(5) <u>พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก PET จากฮีตเตอร์แบบรัดท่อ</u>

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 387.75 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ

387.75 kWh /23 ชม.= 16.86 กิโลวัตต์ ( kW )

ประสิทธิภาพของระบบฮีตเตอร์ มีค่าเท่ากับ

4.21 / 16.86 = 0.2497

(6) <u>พลังงานที่ใช้หลอมพลาสติก PET จากเครื่องเหนี่ยวนำ</u>

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 136.39 หน่วย ( kWh ) / วัน

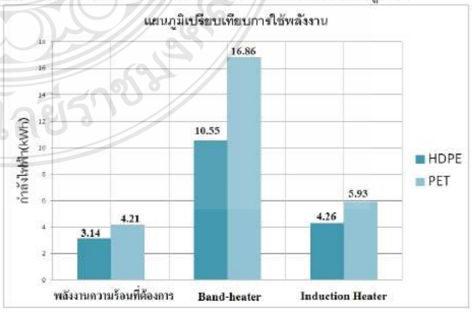
ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ

136.39 kWh /23 ชม. = 5.93 กิโลวัตต์ ( kW )

นั่นคือ ประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนมีค่าเท่ากับ

4.21/5.93 = 0.7099

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภูมิเปรียบเทียบการใช้กำลังงานของฮีตเตอร์แต่ละชนิด

นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยระหว่างเม็ดพลาสติก HDPE และ PET จะได้ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการเท่ากับ (3.14+4.21)/2 = 3.68 kWh
ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าฮีตเตอร์แบบรัดท่อ (10.55+16.86)/2 = 13.71 kWh
ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าฮีตเตอร์แบบเหนี่ยวนำ (4.26+5.93)/2 = 5.10 kWh

## 7. สรุป

จากการทดสอบเปรียบเทียบพบว่าฮีตเตอร์แบบรัดท่อใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยถึง 13.71 kWh หรือ 315.33 หน่วย/วัน และฮีตเตอร์แบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเพียง 5.10 kWh หรือ 117.3 หน่วย/วัน เท่านั้น หมายถึงว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำนั้นดีกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ เมื่อเฉลี่ยต่อชั่วโมงแล้วสามารถลดกำลังไฟฟ้าได้ถึง 8.61 kWh ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเทียบกับพลังงานที่ต้องการจริงในการหลอมเฉลี่ย 3.68 kWh จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 72.16 % ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนที่มีประสิทธิภาพเพียง 26.84 % เนื่องด้วยอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทยนั้นมีจำนวนมาก หากมีการเปลี่ยนมาใช้ระบบการเหนี่ยวนำความร้อนแทนที่การใช้ขดลวดความร้อนแบบเดิมจะสามารถช่วยในการประหยัดพลังงานให้กับประเทศและลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตได้มากยิ่งขึ้นอีกต่อไป

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในการมอบทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

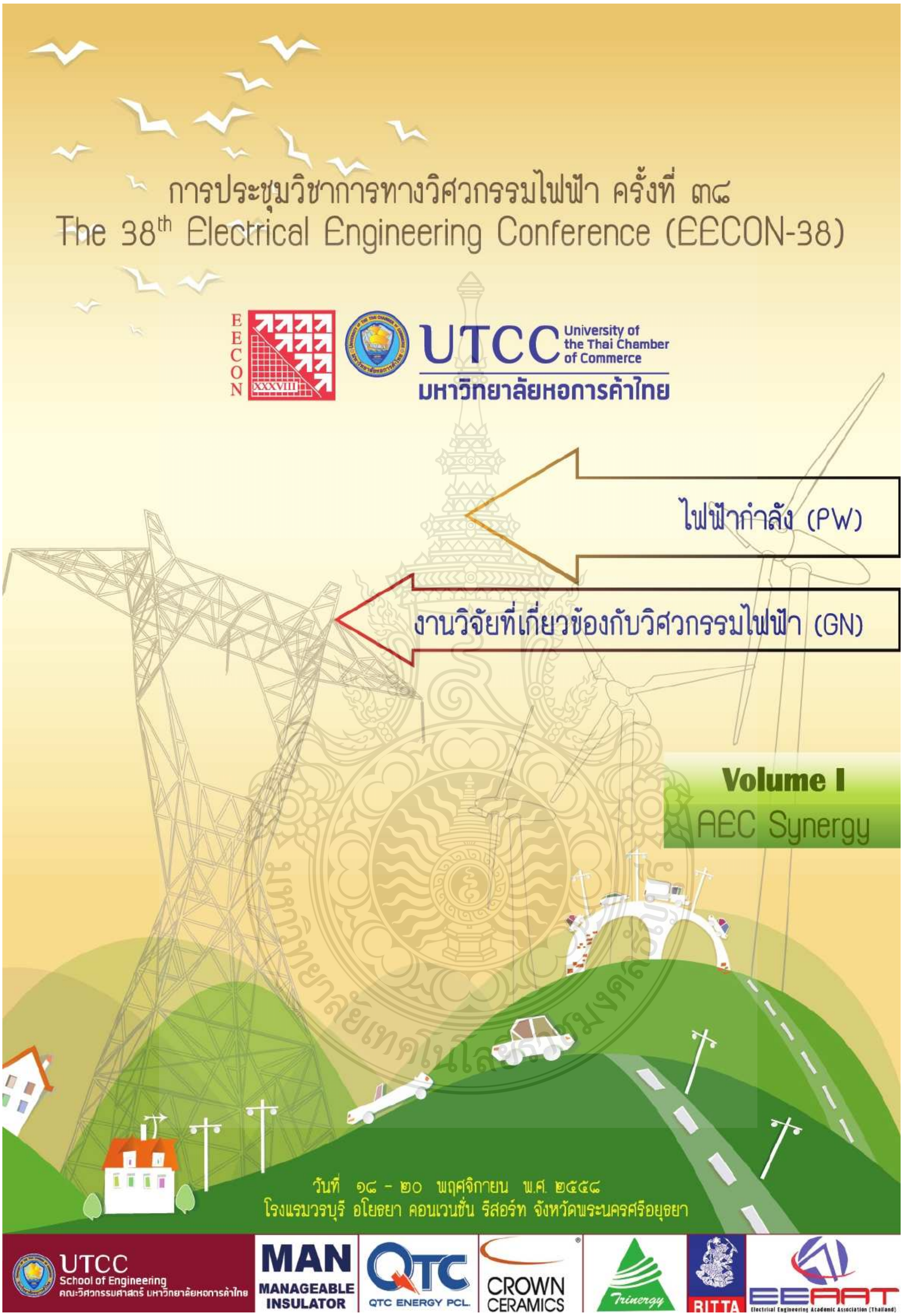
[1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, "คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติก," โครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535, มกราคม 2548, หน้า 47-48.

[2] จีระศักดิ์ วงศา, "เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนคลาสอี". วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2552, มหาวิทยาลัยธนบุรี.

[3] สิทธิโชค สินรัตน์, "การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่". วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2545, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี
งานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

นายจีระศักดิ์ วงศา
กำลังศึกษาต่อภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี
งานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง


การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘
The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38)
EECON
XXXVIII
UTCC University of the Thai Chamber of Commerce
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ไฟฟ้ากำลัง (PW)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
Volume I
AEC Synergy
วันที่ ๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๘
โรงแรมวรบุรี อโยธยา คอนเวนชั่น รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
UTCC
School of Engineering
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
MAN
MANAGEABLE
INSULATOR
QTC ENERGY PCL.
CROWN
CERAMICS
Trinergy
BITTA
EEAAT
Electrical Engineering Academic Association (Thailand)

**ศ.ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

**ศ.ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร**

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย**

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**รศ.ดร.อธิคม ฤกษบุตร**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

**ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**ผศ.เดชา วิไลรัตน์**

มหาวิทยาลัยมหิดล

**ผศ.พินิจ เทพสาธร**

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

**อ.ธนวิชญ์ ชุลิกาวิทย์**

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

| | |
|---|---|
| **ผศ.ดร.ศุภเชษฐ์ อินทร์เนตร** | **มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย** |

## ผู้แทนสถาบันกรรมการสามัญ

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.วันชัย ฉิมฉวี | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| อ.บุญช่วย ทรัพย์มนชัย | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ผศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| อ.ยศนัย ศรีอุทัยศิริวงศ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| อ.ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| ผศ.ดร.สาคร โพธิ์งาม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| อ.ดร.ไกรสร ไชยซาววงค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.ประมินทร์ อาจฤทธิ์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| ผศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| อ.ดร.สมมาตร แสงเงิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ผศ.ดร.ศุภชัย วรพจน์พิศุทธิ์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| ผศ.วันชัย จันไกรผล | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| อ.ดร.สุพรรณ ทิพย์ทิพากร | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| ผศ.ดร.ยงยุทธ นาราษฎร์ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| อ.ดร.จักรพงษ์ สุธาภุชกุล | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| ดร.ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร | ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ |
| ผศ.ดร.วรการ วงศ์สายเชื้อ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| รศ.บุญเลิศ สื่อเฉย | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| อ.สุธี รุกขพันธุ์ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.อดิรักษ์ กาญจนหฤทัย | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| ผศ.ดร.มุฑิตา สงฆ์จันทร์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| อ.ดร.มณฑล นาวงษ์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| ผศ.ปฏิภาณ เกิดลาภ | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย |
| ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| อ.ณรงค์ นันทกุศล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| อ.ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| รศ.ดร.เชวศักดิ์ รักเป็นไทย | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| รศ.ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| รศ.ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| ผศ.ดร.ภัควัฒน์ จันทร์ตรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |

## ผู้แทนสถาบันกรรมการสมทบ

| | |
|---|---|
| รศ.ดร.สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| อ.ดร.ทัศนัย ภาธรรัตน์ | มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ |
| ผศ.ดร.กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| อ.ปิยะนัฐ ใจตรง | มหาวิทยาลัยธนบุรี |

## สาขาไฟฟ้ากำลัง (PW)

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.วันชัย ฉิมฉวี | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ศ.ดร.อิสระชัย งามหรู | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผศ.ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วาณิชย์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| รศ.ดร.ตฤณ แสงสุวรรณ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| รศ.ดร.กีรติ ชยะกุลคีรี | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| อ.ดร.ธรรมวฤทธิ์ สิงหวิลัย | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รศ.บุญเลิศ สื่อเฉย | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| ผศ.ดร.สมบูรณ์ นุชประยูร | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| รศ.อำนาจ สุขศรี | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ดร.วิวัฒน์ ทิพจร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| รศ.ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| อ.ดร.เชิดชัย ประภานวรัตน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.ดร.ธีรธรรม บุณยะกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| อาจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| อ.ดร.คมสันติ์ ดาโรจน์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ผศ.ดร.บงกช สุขอนันต์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ผศ.ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| ผศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| ผศ.ดร.บุญเรือง มะรังศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตรโยม | มหาวิทยาลัยสยาม |
| รศ.ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| ผศ.ดร.จงลักษณ์ พาหะซา | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| ผศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| ผศ.ดร.นันทิยา ชัยบุตร | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| ผศ.ดร.วิญญู แสวงสินกสิกิจ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| ผศ.ธนากร น้ำหอมจันทร์ | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย |

## สาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.เกษม อุทัยไขฟ้า | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผศ.เจิดสกุล โสภาวนิตย์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ผศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ผศ.วันชัย จันไกรผล | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| ผศ.ดร.ชัชวาลย์ เยรบุตร | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| ผศ.ชูเกียรติ พงษ์พานิช | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| ผศ.ดร.ปานหทัย บัวศรี | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| ผศ.ดร.อุเทน คำน่าน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| อ.ดร.พินิจ ศรีธร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| ผศ.ดร.สาคร โพธิ์งาม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| อ.ดร.ประชา คำภักดี | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ผศ.ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| อ.ยุทธนา จงเจริญ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| ผศ.ดร.กองพล อารีรักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| รศ.ดร.ไพบูลย์ นาคมหาชลาสินธุ์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ผศ.ดร.ยงยุทธ นาราษฎร์ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| อ.ดร.สายชล ชุดเจือจีน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| ดร.ดำรงค์ อมรเดชาพล | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| ผศ.ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| ผศ.อนุชิต เจริญ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| อ.ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |

## สาขาไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.สันต์ชัย รัตนนนท์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.วาทิต เบญจพลกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| รศ.ดร.ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| รศ.ดร.พงศธร เศรษฐีธร | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รศ.ดร.อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| ผศ.ธราดล โกมลมิศร์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| ผศ.ดร.อาคม แก้วระวัง | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| อ.ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| ผศ.ดร.พินิจ กำหอม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ศ.ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.สาวัสดิ์ บุญยเวศ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| อ.ดร.กำพล วรดิษฐ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| อ.ดร.ประสิทธิ์ นครราช | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| อ.ดร.อธิพงศ์ สุริยา | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ผศ.ดร.วิกลม ธีรภาพขจรเดช | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| อ.ดร.ชัยพร เขมะภาตะพันธ์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| รศ.ดร.สมชาติ โชคชัยธรรม | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| อ.พล.ท.ดร.สมพงษ์ ตุ้มสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| ผศ.นิพนธ์ ทางทอง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| ผศ.ดร.ภัควัฒน์ จันทร์ตรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| อ.ดร.ปกรณ์ ยุบลโกศล | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |

## สาขาระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.ศุภเชษฐ์ อินทร์เนตร | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ศ.ดร.วันชัย ริ้วรุจา | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผศ.ดร.สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| อ.ดร.เชาวลิต มิตรสันติสุข | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| อ.ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ผศ.ดร.นิมิต บุญภิรมย์ | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| อ.ดร.พัฒนาช พัฒนะศรี | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รศ.ดร.เดชา พวงดาวเรือง | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| ผศ.ดร.บุญศรี แก้วคำอ้าย | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| ผศ.ดร.อานุภาพ มีสมบูรณ์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| รศ.ดร.โกศล โอพารไพโรจน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| ผศ.ดร.วันจักร์ เล่นวารี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.สุขสันติ์ นุ่นงาม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.วีระชัย มาลยเวช | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| อ.ดร.กฤชชัย วิถีพานิช | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| ผศ.ดร.มงคล ปุษยตานนท์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| ผศ.ดร.มุฑิตา สงฆ์จันทร์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| ผศ.ดร.กองพัน อารีรักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| ผศ.ดร.ศุภชัย วรพจน์พิศุทธิ์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ผศ.ดร.สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| ผศ.ดร.ปรีชา สาคะรังค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| อ.ณธรรม เกิดสำอางค์ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |

## สาขาอิเล็กทรอนิกส์ (EL)

| | |
|---|---|
| ผศ.สุภนันท์ ตันวรรณรักษ์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ผศ.ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.ดร.อำนวย เรืองวารี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ผศ.ดร.สัญญา คุณขาว | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| อ.ดร.สุรโชค ธนพิทักษ์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| ผศ.ดร.นิภาภณธ์ ศิริพล | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| อ.ดร.สถาพร พรพรหมลิขิต | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| ผศ.ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| ผศ.ดร.สมชาย ศรีสกุลเดียว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| ผศ.ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.บัลลังก์ เนียมมณี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.ธีรยศ เวียงทอง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ผศ.ศิริพงษ์ ฉายสินธ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| ผศ.ดร.ขนิษฐา แก้วแดง | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| รศ.ดร.ภาณุมาส คำสัตย์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| ผศ.ดร.สุวิทย์ กิระวิทยา | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| รศ.ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| ผศ.วิภาวัลย์ นาคทรัพย์ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| ผศ.สุภณ พลสิงห์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| รศ.นภัทร วัจนเทพินทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| ผศ.โกศล นิธิโสภา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |

**สาขาการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)**

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.วรินทร์ วงษ์มณี | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| รศ.ดร.สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผศ.ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| รศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| รศ.ดร.ปรีชา กอเจริญ | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| อ.ดร.พรชัย ชันยากร | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| ผศ.สมศักดิ์ สิริโปราณานนท์ | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| รศ.ดร.นิพนธ์ ธีรอำพน | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| รศ.ดร.วิระสิทธิ์ อิ่มถวิล | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ดร.นพดล มณีเฑียร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| อ.ดร.ประจวบ อินระวงศ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| รศ.ดร.บัณฑิต ทิพากร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| ผศ.ดร.วิไลพร แซ่ลี้ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รศ.ดร.พีระพล ยุวภูษิตานนท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ผศ.ดร.วรการ วงศ์สายเชื้อ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| รศ.ดร.พรชัย พฤกษ์ภัทรานนต์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| ผศ.ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| รศ.ดร.บงการ หอมนาน | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| รศ.ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| อ.ดร.ทัศนัย พลอยสุวรรณ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| ดร.ธนาทิพย์ จันทร์คง | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| รศ.ดร.สมเกียรติ อุดมหรรษากุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| ผศ.ดร.วิศาล พัฒน์ชู | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| อ.ธีรยุทธ จันทร์แจ่ม | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |

## สาขาโฟโตนิกส์ (PH)

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.ธานัท รุ่งศิรธนะ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| รศ.ดร.สุริภณ สมควรพาณิชย์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| อ.ดร.พิสุทธิ์ รพีศักดิ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| อ.ดร.วิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| อ.เอกชัย ดีศิริ | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| รศ.ดร.ภูมินท์ กิระวานิช | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| รศ.สิริวิช ทัดสวน | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| ผศ.ดร.อุกฤษฏ์ มั่นคง | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| รศ.ดร.นันทกานต์ วงศ์เกษม | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| อ.ดร.สมมาตร แสงเงิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| ผศ.ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| รศ.ดร.วันชัย ไพจิตรโรจนา | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

| | |
|---|---|
| ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ มานิตพรสุทธ์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| อ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผศ.ดร.อาภรณ์ ธีรมงคลรัศมี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| อ.ดร.กิตติวัณณ์ นิ่มเกิดผล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ผศ.เพชร นันทิวัฒนา | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| ผศ.ดร.เชง เลิศมโนรัตน์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| ผศ.ดร.สมเกียรติ เพียงพรานทอง | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| ผศ.ดร.บุญยิ่ง เจริญ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ดร.นพดล มณีเฑียร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| ผศ.ดร.ฑีฆพันธุ์ เจริญพงษ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ จันทร์จรัสจิตต์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| รศ.บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| ผศ.ดร.วรพล พงษ์เพ็ชร | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| รศ.ดร.นภดล อุชายภิชาติ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ผศ.ดร.สุพจน์ สุขโพธารมณ์ | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## สาขาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

| | |
|---|---|
| ผศ.ณัฏฐชา พฤกษ์กานนท์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ผศ.ดร.สุรินทร์ กิตติธรกุล | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผศ.ดร.วันเฉลิม โปรา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| รศ.ดร.มงคล รักษาพัชรวงศ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| อ.ดร.ศิริชัย เตรียมล้ำเลิศ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| อ.ดร.วนายุทธ์ แสนเงิน | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| อ.ดร.ก่อพร พันธุ์ยิ้ม | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| ผศ.น.อ.ไชโย ธรรมรัตน์ ร.น. | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| รศ.ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| อ.ดร.ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกูล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| อ.ดร.ถนอมศักดิ์ โสภณ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| รศ.ดร.ธำรงรัตน์ อมรรักษา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.วรา วราวิทย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ผศ.ดร.ธันวา ศรีประโมง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ผศ.ดร.สมภพ รอดอัมพร | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รศ.ดร.ณัฏฐา จินดาเพ็ชร์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| อ.ดร.สุรเดช จิตประไพกุลศาล | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| อ.ดร.ณรงค์เดช กีรติพรานนท์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| ผศ.ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| ดร.พรเทพ โรจนวสุ | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| อ.ดร.จักรพงษ์ สุธาภุชกุล | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| อ.ธัชกร อ่อนบุญเอื้อ | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย |

**สาขางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)**

| | |
|---|---|
| ผศ.ณัฐพร ฤทธิ์นุ่ม | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รศ.ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| ผศ.พศวีร์ ศรีโหมด | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |
| ผศ.ดร.อารณีย์ พันกะหรัด | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| ผศ.วิชัย แซ่ลี่ | มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| รศ.ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| รศ.กิตติพงษ์ ตันมิตร | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| อ.ดร.ยุพดี หัตถสิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| ผศ.ดร.กฤติเดช บัวใหญ่ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ไชยยันต์ สุวรรณชีวะศิริ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รศ.ดร.สุเจตน์ จันทรังษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| ผศ.พินิจ เทพสาธร | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| ผศ.ดร.สุชิน ไตรรงค์จิตเหมาะ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| อ.ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| ผศ.ดร.พนัส นัถฤทธิ์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| อ.ดร.มนฑล นาวงษ์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| ผศ.ดร.อนันท์ อุ่นศิวิไลย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| รศ.ณรงค์ บวบทอง | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ผศ.ไวยพจน์ ศุภบวรเสถียร | มหาวิทยาลัยสยาม |
| อ.ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| รศ.ดร.เชวศักดิ์ รักเป็นไทย | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| อ.สุธี รุกขพันธุ์ | มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| ผศ.ทง ลานธารทอง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| ผศ.ปฏิภาณ เกิดลาภ | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย |

## คณะที่ปรึกษา

| | |
|---|---|
| รศ.ดร.เสาวณีย์ ไทยรุ่งโรจน์ | อธิการบดี |
| ผศ.ดร.พนารัช ปรีดากรณ์ | รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ |
| ผศ.ดร.ธนวรรธน์ พลวิชัย | รองอธิการบดีฝ่ายวิจัย |
| ผศ.แน่งน้อย ใจอ่อนน้อม | รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร |
| รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา | รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา |
| รศ.ดร.วันชัย รัตนวงษ์ | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ |

## คณะกรรมการดำเนินการ ฝ่ายสถาบันเจ้าภาพ

| | | |
|---|---|---|
| ผศ.ดร.ศุภเชษฐ์ อินทร์เนตร | ประธานคณะกรรมการดำเนินการ | |
| ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ มานิตพรสุทธ์ | กรรมการ | ฝ่ายบทความวิชาการ |
| ผศ.ดร.ธานัท รุ่งศิรธนะ | กรรมการ | ฝ่ายประสานสัมพันธ์และต่างประเทศ |
| ผศ.ดร.วันชัย ฉิมฉวี | กรรมการ และ ผู้ช่วยเลขานุการ | ฝ่ายจัดหาผู้สนับสนุน |
| ผศ.ดร.สันต์ชัย รัตนนนท์ | กรรมการ | ฝ่ายการเงินและลงทะเบียน |
| ผศ.ณัฐพร ฤทธิ์นุ่ม | กรรมการ และ เลขานุการ | ฝ่ายสถานที่ จัดเลี้ยง และขนส่ง |
| ผศ.ดร.เกษม อุทัยไขฟ้า | กรรมการ | ฝ่ายนิทรรศการและของที่ระลึก |
| อ.ภคพงศ์ อมรกุล | กรรมการ | ฝ่ายประชาสัมพันธ์และสนเทศ |
| อ.อภิวัฒน์ แสงโนรี | กรรมการ | ฝ่ายต้อนรับและกิจกรรม |
| คุณ ธันยกร เจนภาษา | ผู้ช่วยเลขานุการ | |

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายบทความวิชาการ**

ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ มานิตพรสุทธ์ ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.วรินทร์ วงษ์มณี
ผศ.ดร.สุวรรณี อัศวกุลชัย
อ.ไชยยศ นุตล
คุณ เบญญาทิพย์ ศรีเจริญ
คุณ นพพร จันเพ็ง
คุณ วิติศักดิ์ จิตต์ไพบูลย์

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายประสานสัมพันธ์และต่างประเทศ**

ผศ.ดร.ธานัท รุ่งศิรธนะ ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.วัชรวี จันทรประกายกุล
อ.ดร.มณิสรา บารมีชัย
อ.ชนิตร์นันทน์ กุลทนันท์
คุณ อรรถพร รอดวิจิตร

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายจัดหาผู้สนับสนุน**

ผศ.ดร.วันชัย ฉิมฉวี ประธานอนุกรรมการ
อ.ดร.ประพันธ์ศักดิ์ บูรณะประภา
อ.น.ท.ดร.ยุทธพงษ์ ปลื้มภิรมย์
อ.ดร.นันทิ สุทธิการนฤนัย
อ.ดร.พงษ์ธนา วณิชย์กอบจินดา
คุณ ธันยกร เจนภาษา
คุณ ฐิติรัตน์ สุขเกษม

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายการเงินและลงทะเบียน**

ผศ.ดร.สันต์ชัย รัตนนนท์ ประธานอนุกรรมการ
อ.ดร.วัฒนชัย พฤกษ์กานนท์
ผศ.ณัฏฐชา พฤกษ์กานนท์
คุณ สมพร สำอางค์ศรี

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายสถานที่ จัดเลี้ยง และขนส่ง**

ผศ.ณัฐพร ฤทธิ์นุ่ม ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์
อ.พัชรี จันทนบุบผา
คุณ อัฏฐ์วุฒิ ไหวพริบ

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายนิทรรศการและของที่ระลึก**

ผศ.ดร.เกษม อุทัยไขฟ้า ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร
อ.เดวิช บรรเทา
อ.ดร.ธรณินทร์ สัจวีริยทรัพย์
คุณ อนุสรณ์ กาลดิษฐ์

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายประชาสัมพันธ์และสนเทศ**

อ.ภคพงศ์ อมรกุล ประธานอนุกรรมการ
ผศ.สุภนันท์ ตันวรรณรักษ์
ผศ.รจนาฎ ไกรปัญญาพงศ์
คุณ เรวัตร์ พิศเกาะ

**คณะอนุกรรมการดำเนินการ**
**ฝ่ายต้อนรับและกิจกรรม**

อ.อภิวัฒน์ แสงโนรี ประธานอนุกรรมการ
อ.ดร.รวินกานต์ ศรีนนท์
ผศ.เฉลิมชนม์ ไวศยดำรง
อ.ดร.ปิยะเนตร นาคสีดี
คุณ สุภมาส แฟงสม

**GN07** **เรือสำรวจควบคุมด้วยสมาร์ทโฟนเพื่อหาตำแหน่งไฟรั่ว** **241**
นิศรุต พันธ์ศิริ และ สุชิน ไตรรงค์จิตเหมาะ

**GN08** **การพัฒนากระบวนการหลอมพลาสติกรีไซเคิลด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน** **245**
จีระศักดิ์ วงศา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์

**GN09** **Study on Promoting the Development of Net-zero Energy Buildings in Thailand** **249**
Aumnad Phdungsilp and Monthon Nawong

**GN10** **การควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ PWM เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกริดเอซีด้วย TMS320F28335** **253**
ถาวร หินซุย, วิโรจน์ แสงธงทอง และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

**GN11** **รถประหยัดพลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สำหรับการแข่งขัน Shell Eco-marathon 2014-15** **257**
สุนทร เจียมตน, วิเชษฐ์ บุญหวาน, ธวัชชัย พวงสุวรรณ, ณรงค์เดช กีรติพรานนท์ และ ยุทธนา จงเจริญ

**GN12** **Design and Analysis of Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell for Electromagnetic Compatibility Test in National Institute of Metrology (Thailand)** **261**
Sarinya Pasakawee, Vitawat Sittakul and Sirivat Hongthong

**GN13** **การพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ก๊าซเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์** **265**
วาทินี โลหะญาณจารี, ดิรณา จันทโรทัย, นิติการ นิ่มสุข และประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล

**GN14** **การออกแบบและสร้างวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส** **269**
ประสพโชค โห้ทองคำ

**GN15** **การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนเหล็กโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ** **273**
ประสพโชค โห้ทองคำ

**GN16** **การศึกษาเปรียบเทียบชนิดสัญญาณอ้างอิง SPWM และHIPWM วงจรอินเวอร์เตอร์ไดโอดแคลมป์ 5 ระดับ** **277**
ชัยวัฒน์ แพงพันธุ์ และ วันชัย ทรัพย์สิงห์

**GN17** **การออกแบบ Nd: YAG เลเซอร์กำลังสูงที่มีลำแสงขนาดเล็ก** **281**
วรวัตร เปียงชมภู และ วีรชัย อัศวเมธาพันธ์

**GN18** **การวิเคราะห์เปรียบเทียบประเมินผลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาชนิด 3 เฟส และ 1 เฟส** **285**
ศักดิ์นรินทร์ ศรีบุญเรือง และ บุญยัง ปลั่งกลาง

**GN19** **การพัฒนาสื่อการจำลองวงจรสายส่งแบบไมโครสตริปด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น** **289**
กัญญวิทย์ กลิ่นบำรุง, พิชิต อ้วนไตร, วารินี วีระสินธุ์ และ สมศักดิ์ อรรคทิมากูล

# การพัฒนากระบวนการหลอมพลาสติกรีไซเคิลด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน

## Development of Recycled Plastic Melting Process by the Principle of Induction Heating

จีระศักดิ์ วงศา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี wanchai.s@en.rmutt.ac.th



**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของการหลอมพลาสติกรีไซเคิลในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกโดยใช้ขดลวดแบบเหนี่ยวนำความร้อนแทนที่ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ การทดสอบใช้พลาสติกชนิด HDPE มาทดสอบ โดยการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนแบบรัดท่อเปรียบเทียบกับขดขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบพบว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนเท่ากับ 29.76% ส่วนขดลวดแบบเหนี่ยวนำให้ประสิทธิภาพมากถึง 73.71% ซึ่งการใช้ขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำมาแทนที่สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 6.29 กิโลวัตต์-ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ

**คำสำคัญ:** ขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก

**Abstract**

This article presents the optimization of the melting of plastics recycled in manufacturing plastics resin process by using induction heater replaced band heater. Using high density polyethylene, tested by comparing the power consumption of the band heater compared to the induction heater. The results showed band heater has efficiency of 29.76% and Induction heater has efficiency up to 73.71%. Which can reduce energy consumption up to 6.29 kWh. Shows that the efficiency of the induction heating has better performance than band heating.

**Keywords:** Induction heater, Band heater, Manufacturing plastics resin process

## 1. บทนำ

ในกระบวนการหลอมพลาสติกเพื่อใช้ฉีดขึ้นรูปหรือใช้ในการผลิตเม็ดพลาสติกนั้น ส่วนใหญ่ความร้อนที่ใช้ในการหลอมได้มาจากขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ (Band-heater) ซึ่งสัดส่วนในการใช้พลังงานพบว่าพลังงานที่เป็นส่วนใช้ในการหลอมใช้เพียงร้อยละ 10-20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่น้อยและมีประสิทธิภาพต่ำ [1]

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น ถูกนำมาใช้ในเครื่องมือต่างๆ มากมายเช่น การชุบแข็ง การสร้างเตาแม่เหล็กไฟฟ้า (Induction cooker) การสร้างเครื่องทำน้ำอุ่นแบบเหนี่ยวนำ เป็นต้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการให้ความร้อนที่ดีกว่าขดลวดความร้อน อีกทั้งหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อน การนำขดลวดความร้อนแบบเหนี่ยวนำมาใช้ในการหลอมพลาสติก จึงเป็นประเด็นหลักในการดำเนินงานวิจัย การออกแบบและสร้างเครื่องหลอมพลาสติกแบบเหนี่ยวนำความร้อน เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการทำความร้อนทั้งสองแบบ โดยการทดสอบนั้นได้ออกแบบและติดตั้งในโรงงานจริง เพื่อทดสอบอัตราการประหยัดพลังงานที่จะเป็นประโยชน์แก่โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศสืบต่อไป

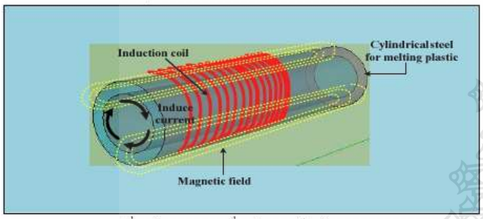
## 2. การหลอมพลาสติกรีไซเคิล

อุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญของไทย ในปี พ.ศ.2557 มีผู้ประกอบการกระจายอยู่ทั่วประเทศทั้งสิ้นกว่า 4,804 แห่ง มีปริมาณการส่งออกถึง 1.5 ล้านตันต่อปี มีปริมาณการส่งออกใน 5 เดือนแรกของปี 2557 (ม.ค. –พ.ค.) ถึง 5,581.49 ล้านเหรียญสหรัฐหรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 6 ของมูลค่าการส่งออกทั้งประเทศ

ในส่วนของการรีไซเคิลพลาสติกเริ่มต้นด้วยการแยกพลาสติกแต่ละชนิด ออกจากกัน เนื่องจากพลาสติกต่างชนิดกันมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่น ความใส จากนั้นจะถูกนำมาบดให้เป็นชิ้นเล็กและล้างทำความสะอาด หลังจากนั้นชิ้นพลาสติกจะถูกทำให้แห้งโดยการตากแดดหรือใช้อากาศร้อน และเข้าสู่ขั้นตอนการหลอมชิ้นพลาสติกผ่านเครื่องอัดรีด (extruder) ออกมาเป็นเส้น ก่อนตัดให้เป็นเม็ดเล็กๆ บรรจุลงกล่อง การหลอมเดิมนั้นใช้ฮีตเตอร์แบบรัดท่อ (Band Heaters) รัดรอบบาเรลและบริเวณดาย มีทั้งเฟสเดียวและ 3 เฟส ดังรูปที่ 7(ก) โดยทั่วไปจะมี heater 4-6 ชุด แบ่งเป็น กลุ่มหน้า,กลุ่มกลาง,กลุ่มท้าย ขนาดแผ่นละ 1,000 -1,500 วัตต์/แผ่น อุณหภูมิที่ตั้งขึ้นอยู่กับชนิดพลาสติก พลังงานที่ใช้ในการหลอมฮีตเตอร์ที่หุ้มบาเรลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ความยาว 1 เมตร อุณหภูมิผิว 140 °C ใช้พลังงานในการหลอมเพียง 10-20% สะสมความร้อนในแท่งบาเรลและแม่พิมพ์ 60% ที่เหลือ 20% เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผิวบาเรล การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนโดยการหุ้มฉนวนเซรามิคไซเบอร์ภายนอกกระบอกพลาสติกความหนา 1-1.5 นิ้ว สามารถช่วยลดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าลงได้ เทียบเป็นการประหยัดได้ ประมาณ 20% [1]

## 3. การเหนี่ยวนำความร้อน

หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction coil) ดังรูปที่ 1 ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับบาเรล ถ้าบาเรลเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferromagnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับบาเรลจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ในบาเรลเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บาเรล และจะถ่ายเทความร้อนไปยังพลาสติกที่อยู่ภายในบาเรล ทำให้พลาสติกร้อนได้ในที่สุด



รูปที่ 1 ลักษณะการเหนี่ยวนำความร้อนในบาเรล

ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับบาเรล ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน มีประสิทธิภาพต่อการทำความร้อนสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นกับบาเรลโดยตรง สามารถคำนวณหาพลังงานที่ต้องการใช้ในการหลอมได้ดังสมการที่ 1 โดยนำค่าเฉลี่ย 6 วันในการผลิตเม็ดพลาสติก 1,775 กิโลกรัม มาคิดคำนวณ

$$Q = m \times s \times dT \qquad (1)$$

เมื่อ Q : ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ (J)

m : มวลของพลาสติก (g) (ในการเก็บผลได้ 1,775 กิโลกรัม)

s : ค่าความจุจำเพาะของพลาสติก HDPE=1.90 (J/g°C)

dT : ค่าความแตกต่างอุณหภูมิที่ใช้งาน (°C)

ดังนั้น พลังงานที่ใช้จริงต่อวันมีค่าเท่ากับ

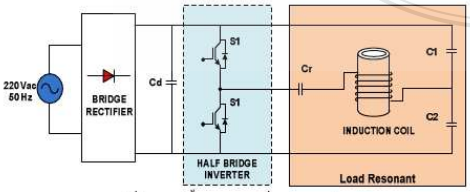
$$Q = 1,775,000 \times 1.90 \times (122-45)$$

$$= 259.683 \times 10^{6}\ J$$

คิดเป็นค่าพลังงานต่อชั่วโมงเท่ากับ $307.519 \times 10^{6} / 23$

$$= 11.29 \times 10^{6}\ J$$

$$= 3.14\ kWh$$

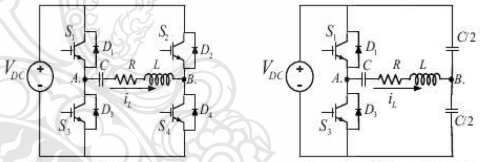


รูปที่ 2 วงจรพื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน

จากรูปที่ 2 เป็นวงจรพื้นฐานโดยทั่วไปในการออกแบบของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง โดยใช้ไฟจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต เข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และทำการสับสวิตช์ความถี่สูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงนี้ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับบาเรล

### 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปนิยมใช้กันสองประเภทคืออินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และอินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์จะมีคู่สวิตช์ $S_1, S_4$ และ $S_2, S_3$ ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูง เมื่อวัดแรงดันเอาท์พุตอินเวอร์เตอร์($V_{AB}$) จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_{DC}$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_{DC}$ กระแสผ่านโหลด($i_L$)เป็นรูปคลื่นไซน์ ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์ดังรูปที่ 3(ข) ทำหน้าที่เหมือนฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แต่จะมีสวิตช์ $S_1$ และ $S_2$ ทำงานสลับกันเมื่อวัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์($V_{S2}$) จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ $+V_{DC}$ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด ($i_L$) เป็นรูปคลื่นไซน์ [2]



(ก) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ (ข) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

รูปที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์

### 3.2 โหลดเรโซแนนท์

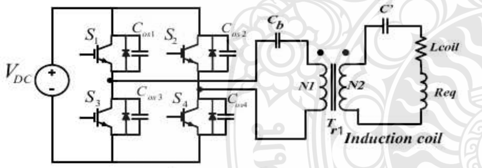
สำหรับโหลดเรโซแนนท์ที่ดีคือลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ ( Zero current switch : ZCS ) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ ( Zero voltage switch : ZVS ) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนท์ คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนท์กระแสในวงจรมีค่ามากส่งผลให้แรงดันของวงจรมีค่ามากขึ้นด้วย สำหรับวงจรเรโซแนนท์ที่มีค่า Q สูง ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ L-C ในวงจรที่เลือกใช้ก็เช่นกันจะต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์อนุกรมและชนิดขนาน ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน และมีคุณสมบัติสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนท์

| คุณสมบัติ | วงจรอนุกรม RLC | วงจรขนาน RLC |
|---|---|---|
| ความถี่เรโซแนนท์ $f_r$ | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ |
| แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R | สูงสุดที่ $f_r$ | คงที่ที่ $V_o$ |
| กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R | คงที่ที่ $V_o / R$ | ต่ำสุดที่ $f_r$ |
| ค่า Q (Quality factor) | $Q = \frac{2\pi f_R L}{R}$ | $Q = \frac{R}{2\pi f_R L}$ |
| ค่าแบนด์วิดช์, BW | $BW = \frac{f_R}{Q}$ | $BW = \frac{f_R}{Q}$ |
| ค่า Impedance ที่จุดต่ำกว่า $f_r$ | Capacitive | Inductive |
| ค่า Impedance ที่จุดเหนือกว่า $f_r$ | Inductive | Capacitive |
| ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า R | เพิ่มค่า R, ค่า BW เพิ่ม | เพิ่มค่า R,ค่า BWลด |
| ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า L/C | เพิ่มค่า L/C, ค่า BW ลด | เพิ่มค่า L/C,ค่า BWลด |

## 4. การออกแบบ

การออกแบบวงจรกำลังใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 4 โหลดที่ใช้เป็นแบบเรโซแนนท์ชนิดอนุกรม การควบคุมนั้นควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A ด้วยการปรับความถี่ โดยจะรับแรงดันจากแหล่งจ่าย 1 เฟส 220 V 50Hz ผ่านวงจรเรียงกระแส จากนั้นตัวสวิตช์ $S_1$- $S_4$ จะทำหน้าที่สับสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยที่ $S_1$กับ $S_4$ จะทำงานพร้อมกันแล้ว $S_2$กับ$S_3$ จะทำงานพร้อมกัน สลับไปมาด้วยความถี่สูงทำให้เกิดแรงดันกระแสสลับความถี่สูงป้อนให้กลับโหลดเรโซแนนท์อนุกรม คือตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งเกี่ยวคล้องกับบาเรลดังรูปที่ 5

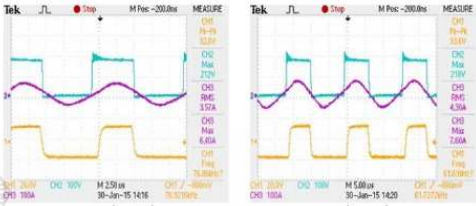



รูปที่ 4 วงจรกำลังที่ใช้ในการออกแบบ

*ก)วงจรกำลังในการออกแบบ* *ข)วงจรควบคุม pic16f877a*

รูปที่ 5 วงจรจริงที่ใช้ในการออกแบบในห้องทดลอง

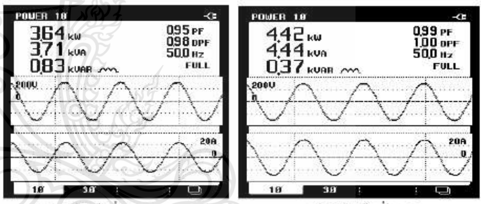
ในการออกแบบนั้นจะทดสอบในห้องทดลองก่อนดังรูปที่ 5 โดยการค่อยๆปรับเพิ่มแรงดันอินพุตและปรับความถี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานแล้วจึงจะนำไปติดตั้งในงานจริงซึ่งจะมีขนาดของบาเรลยาวกว่า




ก) $V_{ds}$ และ $I_L$ ที่ความถี่ 76.86 kHz ข) $V_{ds}$ และ $I_L$ ที่ความถี่ 61.69 kHz

รูปที่ 6 แรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านโหลด

ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำได้เลือกใช้ลวดทองแดงขนาด 22 AWG จำนวน 25 เส้นมาพันตีเกลียวกันเพื่อลดค่าการสูญเสียเนื่องจากความถี่สูงและหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ทดสอบกับบาเรลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. มีความหนา 4 ซม. ยาว 90 ซม. หุ้มด้วยฉนวนเซรามิคไฟเบอร์ซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูงและช่วยลดการสูญเสียความร้อน การปรับความถี่ในรูปที่ 6 ก) จะใช้ความถี่ในการสับสวิตช์ที่ 76.86 kHz และรูปที่ 6 ข) ใช้ความถี่ที่ 61.69 kHz พบว่าเมื่อความถี่ลดลงจะทำให้เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนท์ ทำให้กระแสสูงขึ้นและเกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น




ก) กำลังไฟฟ้าที่ 3.64 kw ข) กำลังไฟฟ้าที่ 4.42 kw

รูปที่ 7 การวัดกำลังไฟฟ้า แรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านโหลด

การการออกแบบในห้องทดลองนั้นต้องการเพียงให้สามารถทำอุณหภูมิให้สูงถึง 300 °C โดยทำอุณหภูมิได้ถึงภายในเวลา 3 นาที (อุณหภูมิในการหลอมพลาสติกแต่ละชนิดอยู่ที่ 100-300 °C [1]) หลังจากทดลองแล้วนั้น จึงจะนำไปติดตั้งในระบบงานจริงและทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในช่วงต่างๆ โดยติดตั้ง 5 ชุด ชุดละ 1000 วัตต์ แล้วทำการทดสอบเก็บผลการใช้พลังงาน ซึ่งจะคงที่ความถี่แล้วใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temp. Controller) แบบเปิด-ปิด (On-Off) มาช่วยในการควบคุมหลังจากนั้นทำการวัดกำลังไฟฟ้ารวมซึ่งสามารถวัดได้ดังรูปที่ 6

## 5. การทดสอบ

ในส่วนของการติดตั้งจริงนั้นจะมีขนาดเครื่องหลอมที่ใหญ่กว่าดังรูปที่ 8 บาเรลจะมีขนาดที่ยาวขึ้นถึง 2.3 เมตร โดยการทดสอบนั้นจะเปรียบเทียบกับพลังงานจริงดังสมการที่ 1 (3.14 kwh) จากนั้นเก็บผลการทดสอบจากฮีตเตอร์แบบเดิม(แบบรัดท่อ) เปรียบเทียบกับการใช้ฮีตเตอร์แบบเหนี่ยวนำ โดยเก็บผลการใช้งานฮีตเตอร์แบบรัดท่อจำนวน 6 วันแล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละวันว่าใช้พลังงานเท่าไหร่ หลังจากนั้นได้ทำการติดตั้ง

ระบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบใหม่แล้วทำการเก็บผลค่าพลังงานที่ใช้เป็นเวลา 6 วันแล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละวันเพื่อนำมาเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด และมีประสิทธิภาพที่ดีเพิ่มขึ้นหรือไม่

## 6. ผลการทดสอบ

การทดสอบนั้นได้ใช้พลาสติกชนิด HDPE มาใช้หลอมโดยฮีตเตอร์แบบรัดท่อมีกำลังการผลิตเฉลี่ยที่ 1,700kg / วัน ใช้ไฟเฉลี่ยที่ 242.67 หน่วย/วัน และเมื่อติดตั้งเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนประสิทธิภาพสูงจะมีการใช้พลังงานลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 98 หน่วย/วัน ด้วยกำลังการผลิต เฉลี่ย 1,850kg / วัน

(ก) เดิมใช้ขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ (ข) ขดลวดเหนี่ยวนำที่ติดตั้งแล้วเสร็จ

รูปที่ 8 ก่อนและหลังติดตั้งการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

1) <u>พลังงานที่ใช้จากฮีตเตอร์แบบรัดท่อ</u>

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 242.67 หน่วย ( kWh ) / วัน

ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ

242.67 kWh /23 ชม.= 10.55 กิโลวัตต์ ( kW )

นั่นคือ ประสิทธิภาพของระบบฮีตเตอร์ มีค่าเท่ากับ

3.14 / 10.55 = 0.2976 หรือ 29.76%

2) <u>พลังงานที่ใช้จากเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน</u>

ค่าเฉลี่ยจากการเก็บผล = 98 หน่วย ( kWh ) / วัน

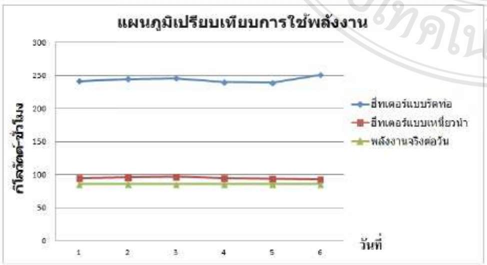
ดังนั้นอัตรากำลังงานต่อเนื่องเฉลี่ยคือ

98 kWh /23 ชม. = 4.26 กิโลวัตต์ ( kW )

นั่นคือ ประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนมีค่าเท่ากับ

3.14 / 4.26 = 0.7371 หรือ 73.71%

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 9




รูปที่ 9 แผนภูมิเปรียบเทียบการใช้กำลังงานของฮีตเตอร์แต่ละชนิดในแต่ละวัน

## 7. สรุป

จากการทดสอบเปรียบเทียบพบว่าฮีตเตอร์แบบรัดท่อใช้กำลังไฟฟ้าถึง 10.55 kWh หรือ 242.67 หน่วย/วัน และฮีตเตอร์แบบขดลวดเหนี่ยวนำใช้กำลังไฟฟ้าเพียง 4.26 kWh หรือ 98 หน่วย/วัน เท่านั้น หมายถึงว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำนั้นดีกว่าขดลวดความร้อนแบบรัดท่อ เมื่อเฉลี่ยต่อชั่วโมงแล้วสามารถลดกำลังไฟฟ้าได้ถึง 6.29 kWh คิดเป็นประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเทียบกับพลังงานที่ต้องการจริงในการหลอม 3.14 kWh จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 73.71% ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขดลวดความร้อนที่มีประสิทธิภาพเพียง 29.76 % เนื่องด้วยอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทยนั้นมีจำนวนมาก หากมีการเปลี่ยนมาใช้ระบบการเหนี่ยวนำความร้อนแทนที่การใช้ขดลวดความร้อนแบบเดิมจะสามารถช่วยในการประหยัดพลังงานให้กับประเทศและลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตได้มากยิ่งขึ้นอีกต่อไป

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในการมอบทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, "คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ประเภทผลิตภัณฑ์พลาสติก," โครงการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่นอกเหนือจากโรงงานควบคุมตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535, มกราคม 2548, หน้า 47-48.

[2] สิทธิโชค สินรัตน์, "การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่", วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. 2545, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นายจีระศักดิ์ วงศา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธนบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี

ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ - นามสกุล** | นายจีระศักดิ์ วงศา |
| **วัน เดือน ปีเกิด** | 4 เมษายน 2531 |
| **ที่อยู่** | 62 หมู่ 3 ต.พระธาตุ อ.เชียงกลาง จ.น่าน |
| **การศึกษา** | |
| พ.ศ. 2552 | สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยธนบุรี |
| **ประสบการณ์การทำงาน** | |
| พ.ศ. 2550 – 2552 | เจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน | อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธนบุรี |
| **เบอร์โทรศัพท์** | 080-636-6628 |
| **อีเมล์** | jeerasakthailand@gmail.com |