



เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนแบบฮาฟบริดจ์  
(Half Bridge Induction Heater)

โดย

นายณัฐพล	บุญวิเศษ รหัสนักศึกษา	B4910121
นายกิตติพงษ์ ปักกะสีนัง	รหัสนักศึกษา	B4910114
นายอระยะ ประทุมวงศ์	รหัสนักศึกษา	B4910251

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2552

โครงการ เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนแบบฮาร์ฟบริดจ์

(Half bridge Induction Heater)

จัดทำโดย

นายณัฐพล บุญวิเศษ

นายกิตติพงษ์ ปักกะสีนัง

นายอริยะ ประทุมวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาคการศึกษาที่

3/ 2552

### บทคัดย่อ

การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำคือการสร้างความร้อนโดยการใช้กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบนขดลวด จากนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลใน โลหะที่นำไปใกล้ขดลวดตัวนำ ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นบน โลหะจะสร้างความร้อนขึ้น และจากความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำนี้เป็นทางเลือกหนึ่งของการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ ในเรื่องการสร้างความร้อนภายในระยะเวลาอันสั้น มีชุดวงจรขนาดเล็ก ไม่ก่อให้เกิดเสียงดังและมลพิษที่เหมือนกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสามารถสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นได้โดยง่าย มีความสะดวกรวดเร็ว สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลาย โดยเฉพาะในทางอุตสาหกรรมที่ต้องการหลอมเหล็กขึ้นรูป การเชื่อมหรืองานอื่น ๆ ที่ใช้ความร้อน ซึ่งผู้จัดทำได้ศึกษาถึงระยะเวลาในการให้ความร้อน รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้เหนี่ยวนำโลหะ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสที่วงจรใช้สร้างความร้อน และผลของความร้อนที่เกิดขึ้นต่อขดลวดเหนี่ยวนำ

## กิตติกรรมประกาศ

จากการที่คณะจัดทำรายงานได้รับมอบหมายให้ทำโครงการเรื่อง Half bridge Induction Heater ส่งผลให้คณะจัดทำรายงานได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆเป็นอย่างมาก อาทิเช่น การใช้เครื่องมือวัด , การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าความถี่สูง รวมถึงการแก้ปัญหาต่างๆในการทำโครงการ บัดนี้โครงการดังกล่าวพร้อมทั้งรายงานได้สำเร็จลงแล้ว ทั้งนี้ด้วยความร่วมมือและสนับสนุนจากบุคคลต่างๆ ดังนี้

- 1.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภณ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)
- 2.นายสำราญ สันทาลุณย์ (พี่บัณฑิตศึกษา)
- 3.นายสุกิจ บุญมี

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็น  
ที่ปรึกษาในการทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนที่บุคลากรที่ดูแลห้องปฏิบัติการ  
โทรคมนาคม 1 ที่อำนวยความสะดวกในการให้ยืมเครื่องออสซิลโลสโคป ซึ่งข้าพเจ้า  
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย



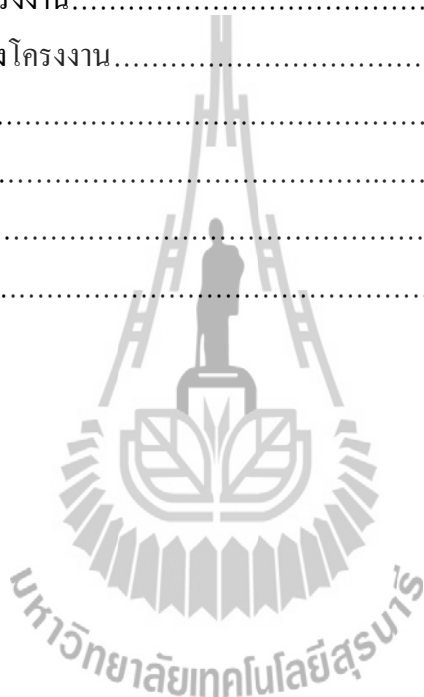
นายณัฐพล	บุญวิเศษ
นายกิตติพงษ์	ปีกกะสีนัง
นายอรยะ	ประทุมวงศ์

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญรูป.....	ง
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงาน.....	2
1.4 ระยะเวลาการดำเนินการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.8 Half bridge induction heating คืออะไร.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1กล่าวนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีในส่วนของวงจรเรียงกระแส.....	5
2.3 ทฤษฎีในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	6
2.4 พื้นฐานทฤษฎีการเหนี่ยวนำ.....	8
2.5ทฤษฎีในส่วนของวงจรเพาเวอร์มอสเฟต.....	18
บทที่ 3 การออกแบบ.....	20
3.1 วงจรจ่ายกำลังไฟและวงจรเรียงกระแส.....	22
3.2 วงจรสร้างสัญญาณขับ.....	25
3.3 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต.....	26
3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์.....	27
3.5 ข้อระวังในการดำเนินงาน.....	31

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	32
4.1 การทดสอบการทำงาน.....	32
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 สรุปและอภิปรายผล.....	42
5.2 ข้อดีของ โครงการ.....	42
5.3 ข้อจำกัดของโครงการ.....	43
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	43
ประวัติผู้เขียน.....	44
บรรณานุกรม.....	45
ภาคผนวก.....	93



## สารบัญภาพ

รายการ	หน้า
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
รูปที่ 2.1 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....6	
(ข.) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก	
(ค.) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ	
รูปที่ 2.2 CNV-4 วงจรพื้นฐานของฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....6	
รูปที่ 2.3 CNV-6 (บน) ขณะ Q1 นำกระแส (ล่าง) ขณะ Q2 นำกระแส.....7	
รูปที่ 2.4 วงจรเรโซแนนซ์.....8	
รูปที่ 2.5 (a) แสดงการทดลองของเออร์สเตด	
รูปที่ 2.5 (b) เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลเข้า.....9	
รูปที่ 2.6 (ก.) ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านกระแสไหลเข้าไป ในหน้ากระดาษ (ข.) กระแสไหลออกจากหน้ากระดาษ (ค.) แสดงการใช้กฎมือขวาของตัวนำ.....9	
รูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด.....10	
รูปที่ 2.8 วงจรการทดลองหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....10	
รูปที่ 2.9 แสดงการหาฟลักซ์สนามแม่เหล็ก.....11	
รูปที่ 2.10 กัลวานอมิเตอร์กระดิก เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากขดลวด.....12	
รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากการเคลื่อนที่ของขดลวดที่เคลื่อนที่.....14	
รูปที่ 2.12 การสร้างฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อให้มีขนาดคงเดิมเสมอ.....15	
รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กเข้า-ออก.....16	
รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กบนรางขนานในสนามแม่เหล็ก.....17	
รูปที่ 2.15 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET).....18	
<b>บทที่ 3 การออกแบบ</b>	
รูปที่ 3.1 อธิบายวงจรการทำงานของอุปกรณ์.....20	
รูปที่ 3.2 บล็อกแสดงในส่วนของวงจรจ่ายกำลังไปและวงจรเรียงกระแส.....22	
รูปที่ 3.3 วงจรจ่ายกำลังแรงดันต่ำ.....23	
รูปที่ 3.4 วงจรจ่ายกำลังแรงดันต่ำ แบบจริงจากงาน.....23	
รูปที่ 3.5 วงจรจ่ายกำลังไฟแรงดันสูง.....24	
รูปที่ 3.6 วงจรจ่ายกำลังไฟแรงดันสูง แบบจริงจากงาน.....24	
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า C และ R ที่เหมาะสม.....25	

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รายการ	หน้า
รูปที่ 3.8 ชุดสร้างสัญญาณขับ.....	25
รูปที่ 3.9 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต.....	26
รูปที่ 3.10 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตแบบจริงจากงาน.....	26
รูปที่ 3.11 บล็อกแสดงในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	27
รูปที่ 3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์.....	27
รูปที่ 3.13 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจริงจากงาน.....	28
รูปที่ 3.14 วงจรเซอร์กิตทั้งหมดของโครงการ.....	29
รูปที่ 3.15 รูปงานที่ประกอบเสร็จแล้ว 1.....	30
รูปที่ 3.16 รูปงานที่ประกอบเสร็จแล้ว 2.....	30
รูปที่ 3.17 รูปงานที่ประกอบเสร็จแล้ว 3.....	31
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	
รูปที่ 4.1 Input ที่ขา 12 ของ TL494.....	32
รูปที่ 4.2 แสดงการวัดสัญญาณที่ขา 9 และขา 10 ของไอซี TL494.....	33
รูปที่ 4.3 สัญญาณที่ได้จากขา 9 และขา 10 ของ TL494.....	33
รูปที่ 4.4 input ของ IR2110 ขา 10 และ 12.....	34
รูปที่ 4.5 สัญญาณ Output จากขา 7 และ 1 ของ IR2110.....	34
รูปที่ 4.6 สัญญาณจากQ1 และQ2.....	35
รูปที่ 4.7 แสดงวงจรเมื่อมีการป้อนไฟ 15 VDC ให้กับวงจร.....	35
รูปที่ 4.8 สัญญาณ Output.....	36
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการสร้างความร้อนจาก L2.....	37
รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบวงจร วัดกระแสที่นำไปให้เกิดความร้อน.....	37
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 30 KHz.....	38
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 34 KHz.....	39
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 40 KHz.....	39
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 45 KHz.....	40
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 50 KHz.....	40
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ความถี่ต่างๆ.....	41

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 กล่าวนำ

ในอดีตการได้รับพลังงานความร้อนส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้ ซึ่งมาจากการเผาเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ เช่น ไม้ ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น แต่ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีก้าวหน้ามากขึ้น มนุษย์รู้จักการสร้างพลังงานความร้อนให้เกิดขึ้นด้วยวิธีการที่แตกต่างออกไปจากในอดีต ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกสบายให้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบกว่าการสร้างความร้อนแบบเก่าในหลาย ๆ เรื่อง เช่น ในเรื่องของสภาพแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นการรู้จักใช้ประโยชน์จากความร้อนได้พิภพ การใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานนิวเคลียร์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำเป็นเทคโนโลยีแบบหนึ่งที่น่าสนใจ

การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำคือการสร้างความร้อนโดยการใช้กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบนขดลวด จากนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะที่นำไปใกล้ลวดตัวนำ ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นบนโลหะจะสร้างความร้อนขึ้น และจากความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเทคโนโลยีการสร้างความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้เป็นทางเลือกหนึ่งของการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพในเรื่องการสร้างความร้อนภายในระยะเวลาอันสั้น มีชุดวงจรขนาดเล็ก ไม่ก่อให้เกิดเสียงดังและมลพิษที่เหมือนกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสามารถสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นได้โดยง่าย มีความสะดวกรวดเร็วสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลาย โดยในส่วนหัวข้อนี้จะกล่าวถึง



## 1.2. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของวงจรและอุปกรณ์
- 2) เพื่อลดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดก๊าซพิษต่าง ๆ
- 3) เพื่อให้เห็นประโยชน์ของการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำให้มากขึ้น
- 4) เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในอนาคตของการสร้างความร้อนที่เกิดขึ้น

## 1.3. ขอบเขตงาน

- 1) ลักษณะโครงสร้างจะเป็นแบบฮาร์ฟบริดจ์ (Half bridge series resonant converter)
- 2) ใช้ไอซี TL 494 ในการสร้างสัญญาณขับ ปรับระดับความร้อนด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ และใช้ไอซี IR 2110 ในการขับเพาเวอร์มอสเฟต
- 3) ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนจะมีรูปทรงกระบอกเส้นลวดทองแดง
- 4) วัสดุที่นำมาใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำในการทดลองจะเป็น โลหะ
- 5) ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V

## 1.4 ระยะเวลาการดำเนินการ

รวมระยะเวลาในการดำเนินงาน 12 เดือน



## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ช่วยลดสภาวะโลกร้อน
- 2) ช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม
- 3) สามารถประยุกต์ทฤษฎีมาปฏิบัติได้จริง และส่งเสริมการใช้พลังงานความร้อนเป็นทางเลือกใหม่ ลดมลพิษ และลดปัญหาก๊าซพิษได้
- 4) ส่งเสริมใช้พลังงานที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและธรรมชาติ ตลอดจนคำนึงการใช้พลังงานทางเลือก

## 1.7 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันปัญหาเรื่องภาวะเรือนกระจก ( Green house effect) มีผลกระทบต่อโลกเป็นอย่างมาก เพราะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ เพื่อต้องการได้พลังงานความร้อน ทำให้เกิดก๊าซพิษต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกขึ้น ส่งผลให้เกิดภัยธรรมชาติมากมายทั้งก่อให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน ผู้จัดทำจึงตระหนักและเห็นความสำคัญของปัญหาจึงได้จัดทำโครงการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำไม่ก่อให้เกิดก๊าซพิษ ระยะเวลาในการทำงานสั้นสามารถให้ความร้อนโดยใช้เวลาเพียงเล็กน้อย ด้วยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กซึ่งทำให้เกิดกระแสขึ้นบนโลหะที่อยู่ใกล้ตัวเหนี่ยวนำ โดยกระแสที่เกิดขึ้นนี้เองที่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้วการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำเป็นทางเลือกใหม่ของการให้ความร้อนอีกด้วย

## 1.8 Half bridge induction heating คืออะไร

Half bridge induction heating คือ การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ หลักการทำงานจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการให้กระแสไฟฟ้าสลับที่มีความถี่สูงไหลผ่านขดลวดและก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เมื่อใส่ชิ้นเหล็กเข้าไปในสนามแม่เหล็กนี้ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะนั้น โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด เนื่องจากว่าโลหะทุกชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในโลหะจึงทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในวงจรเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นไฟฟ้าตามบ้านเรือนที่มีขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต จะต้องผ่านวงจรที่สร้างสัญญาณไฟฟ้า ความถี่สูงก่อน ซึ่งจะมีมอสเฟต 2 ตัวสลับกันทำงาน ในการสร้างสัญญาณ จึงเรียกว่า half bridge induction heating

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

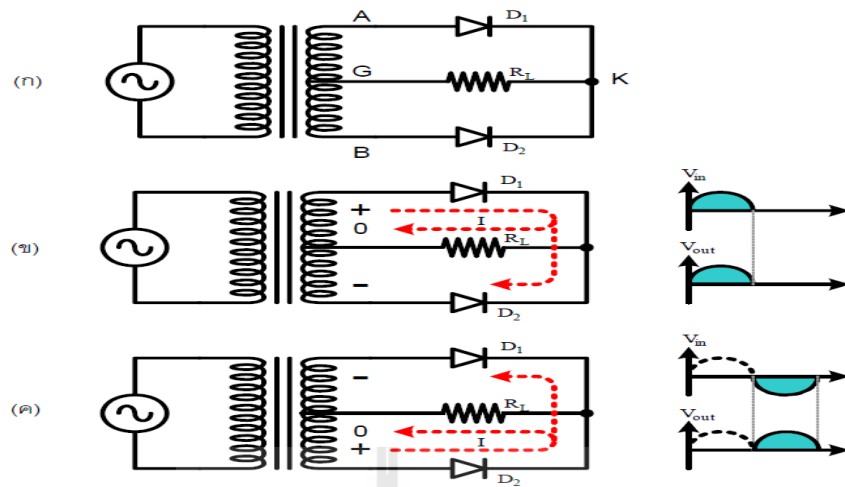
#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างและออกแบบวงจรให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ โดยจะกล่าวถึงวงจรการเรียงกระแสจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงหลักการของการอินเวอร์เตอร์หรือคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นส่วนของการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยจะตรงข้ามกับส่วนแรก ซึ่งเป็นส่วนที่จะทำการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้เกิดขึ้น เพื่อส่งให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดที่ทดลอง ถัดมาจะเป็นเรื่องของ การเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) ที่ขึ้นในวงจรกระแสสลับ ต่อมาจะกล่าวถึงพื้นฐานด้านทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีของไมเกลฟาราเดย์ กฎของเลนส์ ว่าสามารถเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นบนขดลวดได้อย่างไร ส่วนสุดท้ายจะเป็นเรื่องของวงจรเพาเวอร์มอสเฟต

#### 2.2 ทฤษฎีในส่วนของวงจรเรียงกระแส

##### 2.2.1 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ต่อเป็นวงจรดังรูป 2 (ก) พิจารณารูป 2 (ข) ถ้าอินพุตเป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้ว + ผ่านไดโอด  $D_1$  แบบไบอัสตรงไปถึงกราวด์ ขณะที่กระแสไม่สามารถผ่านไดโอด  $D_2$  ได้ เนื่องจากเป็นไบอัสกลับ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่  $R_L$  ได้ ด้านขวาของ  $R_L$  เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย พิจารณารูป 2 (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ กระแสไหลจากขั้ว + ผ่านไดโอด  $D_2$  แบบไบอัสตรงไปถึงกราวด์ ขณะที่กระแสไม่สามารถผ่านไดโอด  $D_1$  ได้ เนื่องจากเป็นไบอัสกลับ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่  $R_L$  ได้ ด้านขวาของ  $R_L$  เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้ายเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าไม่ว่าขั้วของไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ทางด้านขวาของตัวต้านทาน  $R_L$  เป็นบวกเสมอเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก  $R_L$  จึงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 0.35 เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.1 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

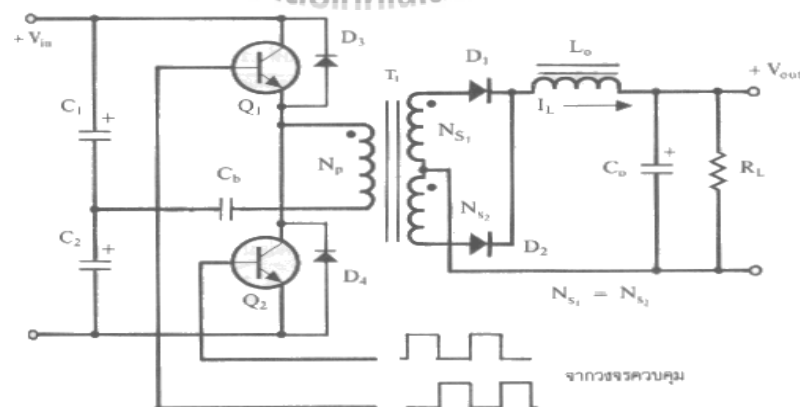
(ข.) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก

(ค.) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ

## 2.3 ทฤษฎีในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์

### 2.3.1 วงจรฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

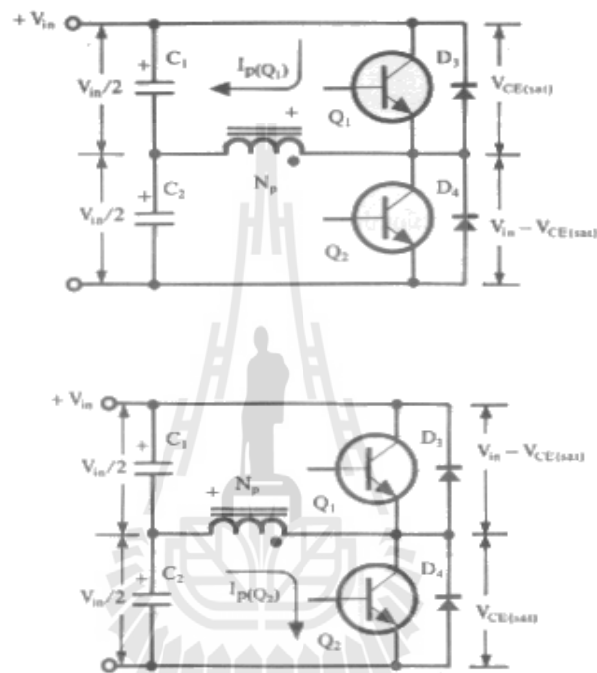
ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จัดอยู่ในตระกูลเดียวกับพุลสคอนเวอร์เตอร์ แต่ลักษณะการจัดวงจรจะทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียงค่าแรงดันอินพุตเท่านั้น ทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้มีราคาถูก และหาได้ง่ายกว่า และลดข้อจำกัดเมื่อใช้กับระบบแรงดันไฟสูงได้มาก รวมทั้งยังไม่มีปัญหาการไม่สมมาตรของฟลักซ์ในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงได้ด้วย



รูปที่ 2.2 CNV-4 วงจรพื้นฐานของฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

วงจรพื้นฐานของ ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูป CNV-4 การทำงานเป็นดังต่อไปนี้ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ต่ออนุกรมกันอยู่ทางด้านอินพุตเพื่อ

แบ่งครึ่งแรงดัน แรงดันตกคร่อม  $C_1$  และ  $C_2$  จึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อินพุต เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะสลับกันทำงานคนละครึ่งคาบเวลาเช่นเดียวกับพุ่ม-พุลคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาวงจร จะพิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุ  $C_b$  ต่ออยู่ในวงจร โดยให้ปลายของขดไพรมารี  $N_p$  ที่ต่ออยู่กับ  $C_b$  นั้นต่อโดยตรงเข้ากับจุดต่อระหว่างตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ดังแสดงในรูป CNV-5



รูปที่ 2.3 CNV-6 (บน) ขณะ  $Q_1$  นำกระแส (ล่าง) ขณะ  $Q_2$  นำกระแส

เมื่อ  $Q_1$  เริ่มนำกระแส และ  $Q_2$  ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม  $Q_2$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{ce(sat)}$  ส่วนแรงดันตกคร่อมของไพรมารี  $N_p$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{c1} - V_{ce(sat)}$  หรือมีค่าเท่ากับ  $V_{in}/2 - V_{ce(sat)}$  นั่นเอง ในทำนองเดียวกัน เมื่อ  $Q_2$  นำกระแส และ  $Q_1$  ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม  $Q_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{ce(sat)}$  เช่นเดียวกัน แรงดันตกคร่อมที่ขดไพรมารี  $N_p$  ก็ยังคงมีค่าเท่ากับ  $V_{in}/2 - V_{ce(sat)}$  เนื่องจาก  $V_{ce(sat)}$  มีค่าประมาณ 0.5-1 โวลต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อม  $Q_1$  และ  $Q_2$  ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้น ผลของการทำงานของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  ที่ด้านเซคันดารีจะมีลักษณะเดียวกันกับพุ่ม-พุลคอนเวอร์เตอร์

### 2.3.2 วงจรความถี่เรโซแนนซ์

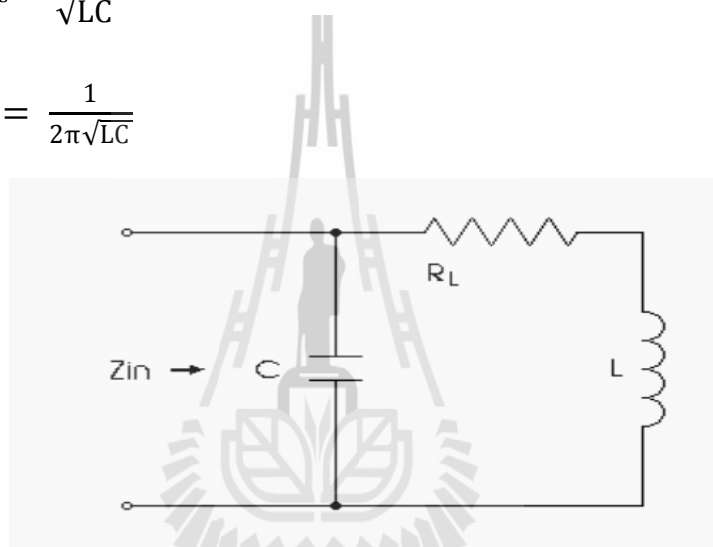
การเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) จะเกิดขึ้นในวงจรกระแสสลับ เมื่อความถี่ของวงจรเท่ากับความถี่ของการเรโซแนนซ์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

ดังนั้นความถี่เชิงมุมของการสั่นพ้องจะมีค่าเป็น

$$\omega_{\text{res}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



รูปที่ 2.4 วงจรเรโซแนนซ์

เมื่อเกิดการสั่นพ้องกระแสของวงจรจะมีค่าสูงสุด

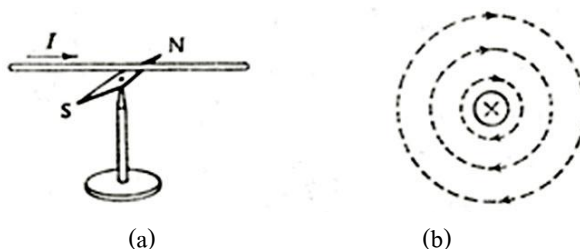
$$I_{\text{max}} = \frac{V}{R}$$

## 2.4 พื้นฐานทฤษฎีการเหนี่ยวนำ

### 2.4.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้า

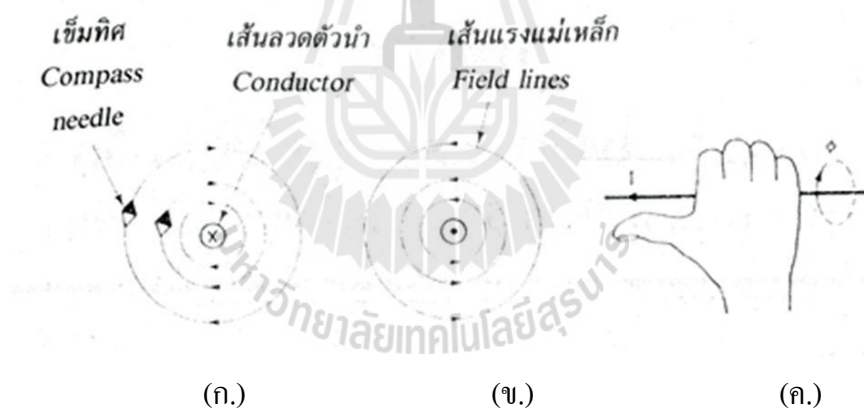
เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบตัวนำนั้นปรากฏการณ์นี้ค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อเออร์สเตด (Oersted) ณ กรุงโคเปนเฮเกนเมื่อปี ค.ศ. 1820 เขาพบว่าเมื่อเอาเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านไปวางเหนือเข็มทิศเข็มทิศจะบ่ายเบนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ ดังรูปที่ 2.5 (a) ถ้าเรามองตามความยาวของตัวนำที่มีกระแสไหลเข้า (ไหลจากตัวเราเข้าไปในกระดาษ) ดังแสดงด้วย

เครื่องหมายกากบาท ดังรูปที่ 2.5 (b) สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา และเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) รอบตัวนำสามารถเขียนแทนได้ด้วยเส้นประวงกลม



รูปที่ 2.5 (a) แสดงการทดลองของเออร์สเตด รูปที่ 2.5 (b) เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลเข้า

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบเส้นลวดตัวนำ และทิศทางกระแสในเส้นลวดตัวนำ สามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวาของตัวนำ ( Right hand rule for conductor) คือ ถ้าให้มือขวากำรอบเส้นลวดตัวนำ โดยให้หัวแม่มือชี้ทิศทางกระแสปลายนิ้วทั้งสี่ที่กำรอบตัวนำจะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ



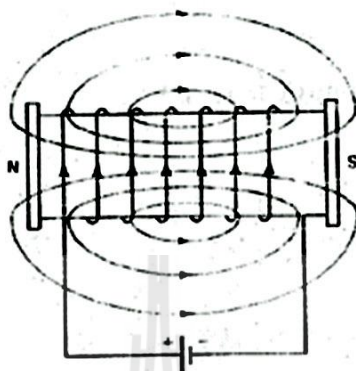
รูปที่ 2.6 (ก.) ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านกระแสไหลเข้าไปในหน้ากระดาษ (ข.) กระแสไหลออกจากหน้ากระดาษ (ค.) แสดงการใช้กฎมือขวาของตัวนำ

#### 2.4.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวด (Magnetic field around a coil)

ถ้าเราพันขดลวดรอบแกนเหล็กดังรูปข้างล่าง และต่อปลายขดลวดเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ แกนเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็กและมีคุณสมบัติคล้ายกับแม่เหล็กถาวร ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเขียนแทนด้วยหัวลูกศร โดยปลายของแกนเหล็กด้านซ้ายจะเป็นขั้วเหนือ และปลายด้านขวาจะเป็นขั้วใต้ ถ้ากลับทิศทางกระแสในขดลวดหรือกลับขั้วแบตเตอรี่ จะทำให้ทิศทางของ



สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปหรือขั้วแม่เหล็กด้านซ้ายจะเปลี่ยนเป็นขั้วใต้ และด้านขวาจะเปลี่ยนเป็นขั้วเหนือนั่นเอง

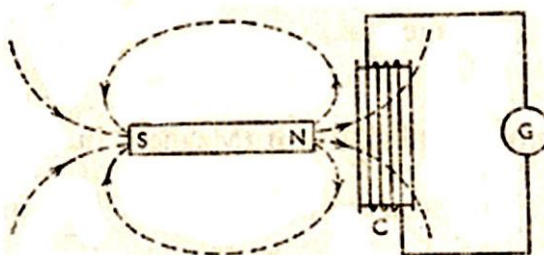


รูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด

เมื่อทราบทิศทางกระแสในขดลวด เราสามารถหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้กฎมือขวาของขดลวด ซึ่งกล่าวว่า ให้กำขดลวดด้วยมือขวา โดยให้นิ้วทั้งสี่ที่กำขดลวดชี้ทิศทางกระแสในขดลวด นิ้วหัวแม่มือซึ่งยื่นออกไปขนานกับแกนของขดลวดจะชี้ไปทางขั้วเหนือ

#### 2.4.3 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ค้นพบหลักสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับกัลป์วานมิเตอร์ G ดังรูปข้างล่าง แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลป์วานมิเตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางหนึ่ง แสดงว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลป์วานมิเตอร์จะกลับมายังที่ศูนย์ตามเดิม ผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับขดลวด C



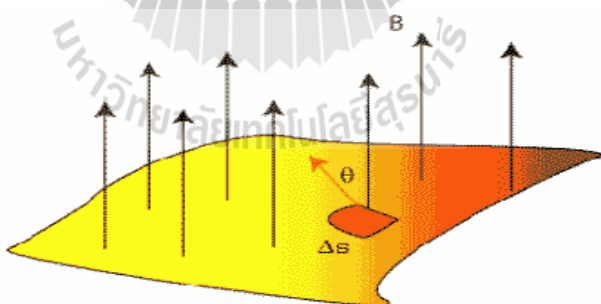
รูปที่ 2.8 วงจรการทดลองหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ถ้าเราจับขั้วแม่เหล็กถ้าขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ออกห่างจากขดลวด C เข็มของกัลป์วานอ มิเตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรก แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นใน ขดลวด C มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ กัน จะพบว่ายิ่งมีความเร็วมาก เข็มของกัลป์วานอ มิเตอร์ก็ยิ่งบ่ายเบนมาก ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดก็ต้องมากขึ้นด้วย ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

1. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำ จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในลวดตัวนำ
2. ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กและขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
3. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดหรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

#### 2.4.4 ฟลักซ์แม่เหล็ก

คือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดตั้งฉากกับพื้นที่นั้น ๆ มีค่าเท่ากับผลคูณของสนามแม่เหล็กกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กนั้น โดยฟลักซ์แม่เหล็กเป็นปริมาณสเกลาร์



รูปที่ 2.9 แสดงการหาฟลักซ์สนามแม่เหล็ก

จากรูป การหาฟลักซ์สนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ทำมุม  $\theta$  กับพื้นที่เล็กๆ  $dA$  เวกเตอร์  $d\vec{A}$  เป็นเวกเตอร์พื้นที่ มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ โดยฟลักซ์สนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$d\phi_B = B dA \cos\theta \quad (1)$$

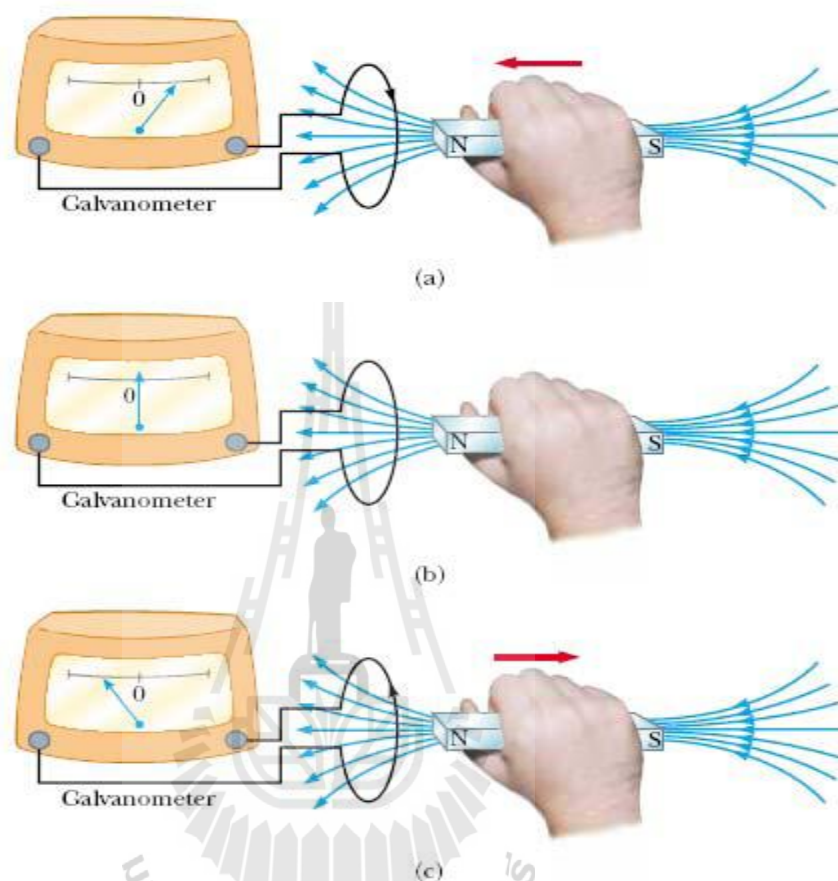
เราสามารถเขียนสมการ (1) ให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$d\phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

เพราะฉะนั้นฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่ A มีค่าเท่ากับ

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

### 2.4.5 กฎของฟาราเดย์



รูปที่ 2.10 กัลวานอมิเตอร์กระดิก เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากขดลวด

ที่มา : Raymond A. Serway 2002:853

จากรูป จะเห็นขดลวดตัวนำขดเป็นรูปร่างกลมและสัมผัสเชื่อมต่อกับกัลวานอมิเตอร์ ซึ่งเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้อยู่ที่ 0 เราจะนำขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ เคลื่อนเข้าหาขดลวดวงกลม เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกระดิก ไปในทิศทางหนึ่ง และเมื่อแท่งแม่เหล็กหยุดกับที่เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะชี้ที่ 0 หลังจากนั้นเมื่อเคลื่อนแท่งแม่เหล็กออกจากขดลวดวงกลม เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะกระดิกไปทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรก แสดงว่าเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำและ เมื่อนำขั้วแม่เหล็กขั้วใต้เคลื่อนเข้าหาขดลวดวงกลมเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกระดิกไปทิศทางตรงกันข้ามกับการนำขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือเคลื่อนเข้าหาขดลวดวงกลมและเมื่อเคลื่อนแท่งแม่เหล็กออก เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกระดิกไปทิศทางตรงกันข้ามกับตอนเคลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าและถ้าให้ แท่งแม่เหล็กอยู่กับที่ และเคลื่อนขดลวดวงกลมแทนผลที่ได้จะเหมือนกันแสดงว่า ไม่ว่าจะเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็ก หรือเคลื่อนที่ขดลวดตัวนำ จะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวดเสมอกระแสที่เกิดขึ้นนี้เรา

เรียกว่า กระแสเหนี่ยวนำ (induced current) ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electromotive force)

ฟาราเดย์ (Michael Faraday ค.ศ. 1791-1867) ได้สรุปผลการทดลองนี้เป็นกฎเรียกว่า "กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)"

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ผ่านวงรอบปิดใดๆ ต่อเวลา จะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงรอบปิดนั้น และสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$V = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4)$$

เครื่องหมายลบเกิดจากกฎของเลนส์ (Lenz's law) แสดงทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดต้านกับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ในกรณีขดลวดวงกลมมี N รอบ สามารถเขียนสมการ (4) ได้

$$V = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (5)$$

จากสมการ (3) กรณีที่เวกเตอร์  $\vec{B}$  กับ  $d\vec{A}$  ทำมุมกัน  $0^\circ$

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\phi_B = BA$$

เนื่องจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กมีส่วนประกอบคือสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  และพื้นที่  $A$  ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของปริมาณใดๆ ปริมาณหนึ่ง ย่อมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กด้วย ฉะนั้นสมการ (5) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V = -N \frac{AdB}{dt} \quad (6)$$

สมการ (6) เป็นกรณีของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง แต่ขดลวดวงกลมมีพื้นที่คงที่ หรือ

$$V = -N \frac{BdA}{dt} \quad (7)$$

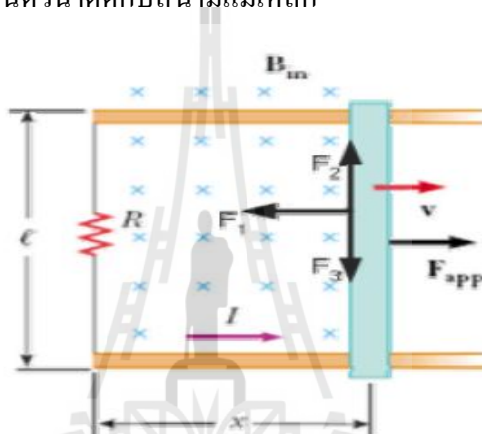
สมการ (7) เป็นกรณีที่สนามแม่เหล็กมีขนาดคงที่ แต่พื้นที่ขดลวดวงกลมเปลี่ยนแปลงตามเวลา แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำในกรณีนี้จะถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า transformer emf

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (emf) เกิดขึ้นได้โดยเงื่อนไขดังนี้

- ขนาดของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนกับเวลา
- พื้นที่ซึ่งถูกปิดล้อมด้วยขดลวดเปลี่ยนกับเวลา
- มุมระหว่างเวกเตอร์สนามแม่เหล็กกับเวกเตอร์พื้นที่เปลี่ยนกับเวลา
- การเปลี่ยนแปลงร่วมกันในทั้งสามข้อดังกล่าว

#### 2.4.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

พิจารณาการเคลื่อนตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากการเคลื่อนที่ของขดลวดสี่เหลี่ยม

จากรูป เรากำหนดขดลวดสี่เหลี่ยมออกจากสนามแม่เหล็กที่มีขนาดสม่ำเสมอซึ่งก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทิศตามเข็มนาฬิกาในกรณีนี้ จะเกิดแรงกระทำต่อลวด 3 แรง คือ  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก  $\Phi$  ที่อยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยม

$$\phi_B = BA = B\ell x$$

เราสามารถหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จากสมการ (4)

$$V = -\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{-dB\ell x}{dt} = \frac{-B\ell dx}{dt} = B\ell v \quad (8)$$

เมื่อ  $-\frac{dx}{dt}$  เป็นความเร็วที่ดึงขดลวดออกจากสนามแม่เหล็ก เราเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการดึงตัวนำผ่านสนามแม่เหล็กว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่กระแสไฟฟ้าภายในขดลวดตัวนำคือ

$$I = \frac{V}{R} = \frac{B\ell v}{R}$$

เมื่อ R คือความต้านทานภายในขดลวดตัวนำ

แรงที่เกิดจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำผ่านสนามแม่เหล็ก  $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$  แต่ ทิศทางตรงกันข้ามจะหักล้างกันหมดไป แต่แรง  $\vec{F}_1$  จะเป็นแรงที่พยายามด้านการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ

$$F_1 = i\ell B \sin 90^\circ = \frac{B^2 \rho^2 v}{R}$$

กำลังที่ใช้ดึงขดลวดสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ

$$P = F_1 v = \frac{B^2 \rho^2 v^2}{R} = \left(\frac{B\ell v}{R}\right)^2 R = i^2 R \quad (9)$$

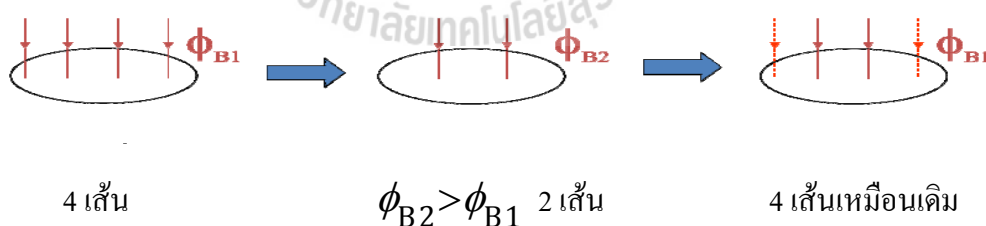
#### 2.4.7 กฎของเลนซ์

กฎของฟาราเดย์  $\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt$  แสดงให้เห็นว่า emf เหนี่ยวนำและการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์มีเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ตรงข้ามกัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นความจริงทางฟิสิกส์ที่รู้จักกันรูปของ กฎของเลนซ์ ซึ่งกล่าวว่า

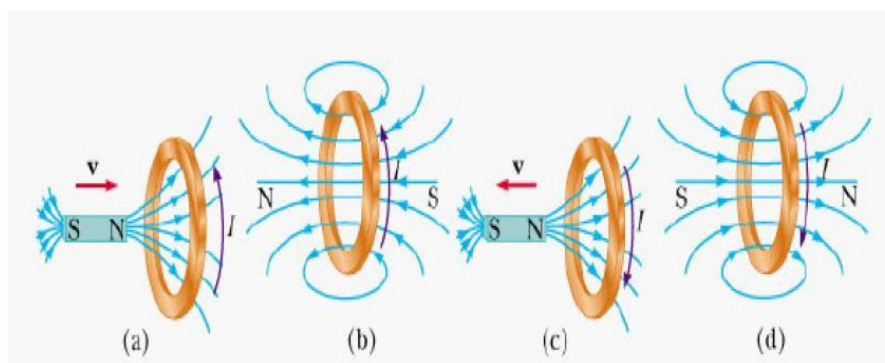
“ขั้วของ emf เหนี่ยวนำซึ่งทำให้เกิดกระแสจะผลิตฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีทิศตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กผ่านพื้นที่ปิดเนื่องจากวงกระแส (a current loop)”

นั่นคือ กระแสเหนี่ยวนำมีแนวโน้มที่จะรักษาฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านวงจรไม่ให้เปลี่ยนแปลง (เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน)

กฎของเลนซ์ เป็นกฎสำหรับใช้ดูทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรปิด กล่าวได้ว่า “ทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรปิดหนึ่งเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจรมันเปลี่ยนแปลง จะมีทิศที่จะทำให้นั้นสร้างสนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็กให้คงเดิมเสมอ” เช่น



รูปที่ 2.12 การสร้างฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อให้มีขนาดคงเดิมเสมอ

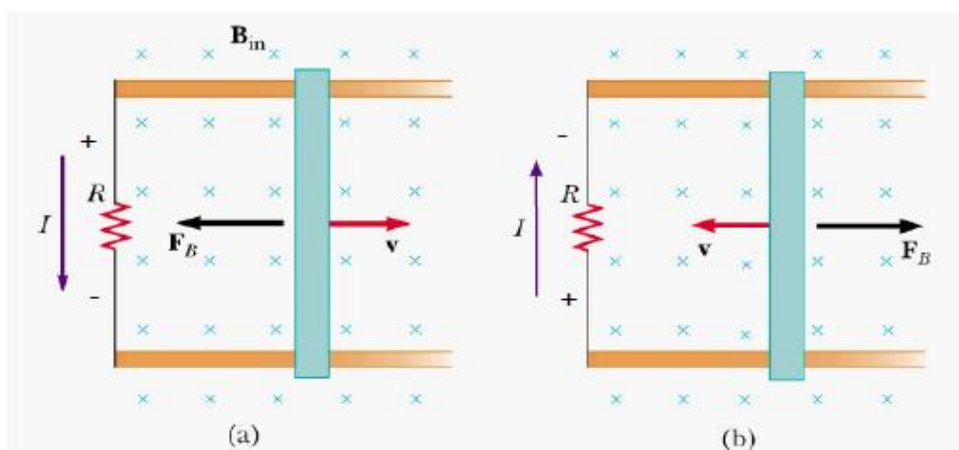


เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้น      เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกลดลง

รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กเข้า-ออก

รูป (a) เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาห่วงตัวนำที่หยุดนิ่งกระแสเหนี่ยวนำมีทิศดังรูป ( b) กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีทิศไปทางซ้ายด้านการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอกทางด้านขวามือที่เพิ่มขึ้น ( c) เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกจากห่วงตัวนำที่หยุดนิ่งกระแสเหนี่ยวนำมีทิศดังรูป ( d) กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีทิศไปทางขวาด้านการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอกทางด้านขวามือที่ลดลง

พิจารณากรณีที่แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาห่วง โลหะ เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปทางขวาเข้าหาห่วง ดังรูป ( a) ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งพุ่งผ่านลูปมีค่าเพิ่มขึ้นเทียบกับเวลา ในการหักล้างการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านขวากระแสเหนี่ยวนำจะต้องสร้างฟลักซ์ที่พุ่งไปทางด้านซ้ายดังรูป (b) ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำจะมีทิศทางดังแสดงในรูป นั่นคือเส้นสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำต่อต้านการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็ก คล้ายกับว่าขั้วแม่เหล็กผลักกัน สรุปได้ว่าพื้นผิวทางด้านซ้ายของลูปกระแสเป็นขั้วเหนือและผิวด้านขวาเป็นขั้วใต้ ถ้าแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปทางซ้ายออกห่างห่วงดังรูป (c) ฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ปิดมีทิศไปทางขวามือลดลงเมื่อเทียบกับเวลา ขณะนั้นกระแสเหนี่ยวนำในลูปมีทิศดังรูป ( d) เนื่องจากทิศของกระแสแบบนี้ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางเดียวกับ ฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอก ในกรณีนี้ ผิวด้านซ้ายของลูปเป็นขั้วใต้และผิวด้านขวามือของลูปเป็นขั้วเหนือ



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กบนรางขนานในสนามแม่เหล็ก

ต่อมาพิจารณาเมื่อเคลื่อนตัวนำแท่งโลหะในสนามแม่เหล็ก รูป ( a) แท่งตัวนำเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาของรางตัวนำที่ขนานกัน โดยมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกขนาดสม่ำเสมอพุ่งผ่านฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ปิดของลูปจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจากกฎของเลนส์พบว่ากระแสเหนี่ยวนำต้องมีทิศวนเข็มนาฬิกา ( b) เมื่อแท่งเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายกระแสเหนี่ยวนำจะมีทิศตามเข็มนาฬิกา

เพื่อให้เข้าใจกฎของเลนส์ให้พิจารณาตัวอย่างที่แท่งตัวนำเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาของรางขนาน โดยมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกขนาดสม่ำเสมอพุ่งผ่าน

- เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา ดังรูป ( a) ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ล้อมรอบด้วยวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา กฎของเลนส์แสดงให้เห็นว่ากระแสเหนี่ยวนำมีทิศซึ่งทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่มันผลิตออกมาต่อต้านเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกมีทิศเพิ่มขึ้นในทิศที่พุ่งเข้าไปในกระดวย ถ้ากระแสเหนี่ยวนำต้องการต้านการเปลี่ยนแปลงนี้ มันจะต้องผลิตฟลักซ์แม่เหล็กที่มีทิศพุ่งออกจากกระดวย ดังนั้น กระแสเหนี่ยวนำจะต้องมีทิศวนเข็มนาฬิกา (สามารถใช้กฎมือขวาในการหาทิศได้)

- เมื่อแท่งตัวนำเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย ดังรูป ( b) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกที่ผ่านพื้นที่ปิดของลูปจะลดลงตามเวลา เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้าไปในกระดวย กระแสเหนี่ยวนำต้องมีทิศตามเข็มนาฬิกาถ้ากระแสเหนี่ยวนำต้องการที่จะผลิตฟลักซ์แม่เหล็กที่มีทิศพุ่งเข้าไปในกระดวยเช่นกัน

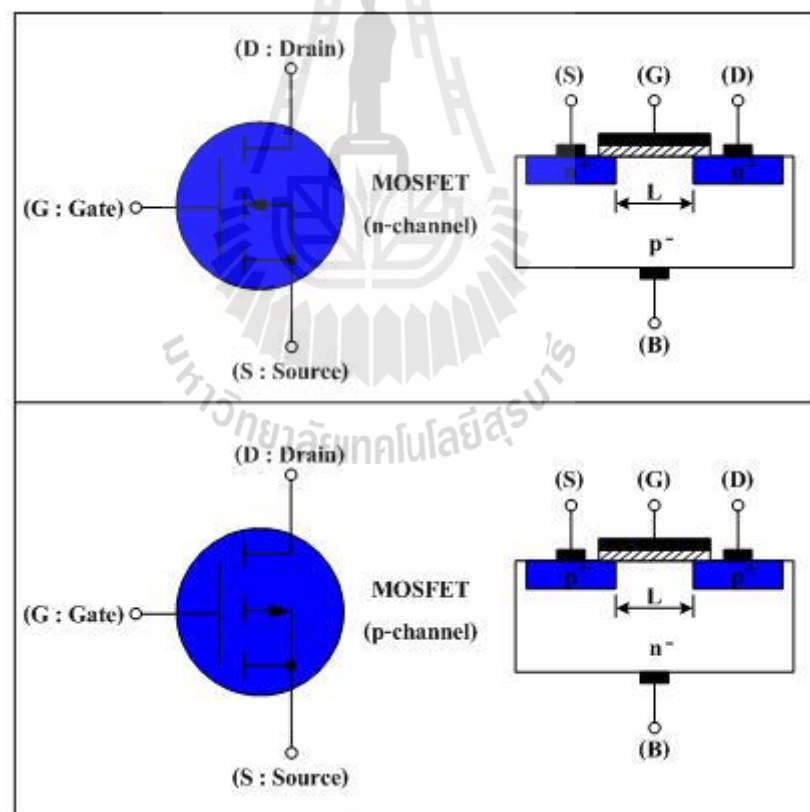


## 2.5 ทฤษฎีในส่วนของวงจรเพาเวอร์มอสเฟต

### 2.5.1 MOSFET ประกอบด้วยสามส่วน คือ

- **GATE** เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
- **SOURCE** เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ
- **DRAIN** เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ

### 2.5.2 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET)



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET)

จากในรูปที่ 2.15 จะเห็นถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์มอสเฟต( MOSFET) โดยอุปกรณ์มอสเฟต(MOSFET) นั้นจะแบ่งตามโครงสร้างได้เป็น 2 ชนิด คือ มอสเฟต(MOSFET) ชนิด n-channel และมอสเฟต(MOSFET) ชนิด p-channel โดยจะเห็นว่ามอสเฟต(MOSFET) ทั้ง

สองชนิดนั้นจะมีขาที่ต่อออกมาใช้งานหลักๆ อยู่ทั้งหมด 3 ขา ด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย ขาเกต ( G : Gate), ขาเดรน ( D : Drain) และขาซอร์ส ( S : Source) ส่วนอีกขาที่เห็นจากโครงสร้างนั้นก็คือ ขาเบส ( B : Base) ซึ่งจะถูกต้องเข้ากับขาซอร์ส ( S : Source) ดังนั้นในการนำมาใช้งานเราจะเห็นขาของอุปกรณ์มอสเฟต ( MOSFET) เพียง 3 ขาเท่านั้น แต่ในส่วนของการทำงานที่จะนำอุปกรณ์มอสเฟต ( MOSFET) ไปใช้งานและการทำให้อุปกรณ์มอสเฟต ( MOSFET) นี้สามารถที่จะทำงานได้นั้นหรือสามารถที่จะนำกระแสได้นั้น เราก็จะต้องทำการกำหนดค่าของแรงดันให้มีความที่เหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างของ มอสเฟต ( MOSFET) นั้นๆ ซึ่งเราจะเรียกว่า การไบแอส ( Bias) ให้กับอุปกรณ์มอสเฟต ( MOSFET) สามารถที่จะทำงานตามที่เราต้องการ โดยลักษณะของการไบแอส อุปกรณ์มอสเฟต ( MOSFET) นั้นก็คือการป้อนแรงดันให้กับขาเกต ( G : Gate) เพื่อใช้ในการควบคุมการไหลของกระแส โดยสามารถที่จะแบ่งออกได้ตามชนิดของอุปกรณ์มอสเฟต ( MOSFET) ดังนี้

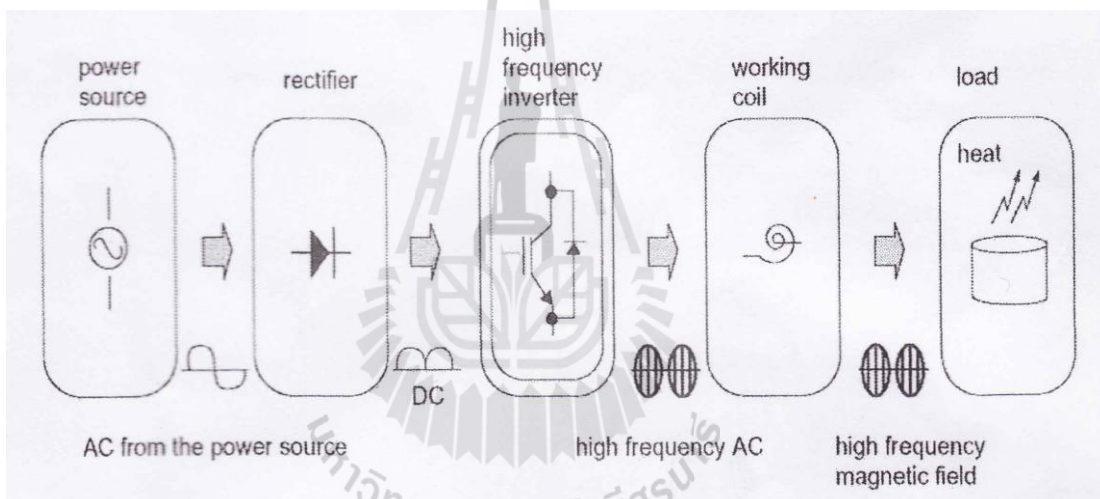
- 1.) มอสเฟต ( MOSFET) ชนิด n-channel ถ้าเราทำการกำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกต มีค่าน้อย ก็จะส่งผลให้ขาเดรน ( D) และขาซอร์ส ( S) ไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้าเราทำการกำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกต มีค่ามาก ก็จะส่งผลให้ขาเดรน ( D) และขาซอร์ส ( S) มีกระแสไหลผ่าน ได้
- 2.) มอสเฟต ( MOSFET) ชนิด p-channel ถ้าเราทำการกำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกต มีค่ามาก ก็จะส่งผลให้ขาเดรน ( D) และขาซอร์ส ( S) ไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่ถ้าเราทำการกำหนดค่าของแรงดันที่ขาเกต มีค่าน้อย ก็จะส่งผลให้ขาเดรน ( D) และขาซอร์ส ( S) มีกระแสไหลผ่าน ได้

### บทที่ 3

#### การออกแบบ

จากการศึกษาข้อมูล ทฤษฎีการทำงานของระบบ ต่อไปจะเริ่มทำการออกแบบชิ้นงาน โดยในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการออกแบบชิ้นงาน และข้อควรระวังในการทำงาน

ก่อนที่จะทำการออกแบบ วงจรในโปรเจกต์นี้ จะ กล่าวถึงการทำงานของวงจรแบบแยกส่วนย่อยๆตาม บล็อกไดอะแกรมของวงจรอินดักชันฮีต ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญๆ 5 ส่วนดังในรูป ซึ่งอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 อธิบายวงจรการทำงานของอุปกรณ์

ในส่วนของการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากภายนอก เช่น AC 220V เป็นต้น และวงจรเรียงกระแส เพื่อเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นจะส่งไฟฟ้ากระแสตรงไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่สูงส่งไปยังขดลวดเหนี่ยวนำสร้างความร้อน ผลที่เกิดขึ้นกับขดลวดคือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูง ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดความร้อนกับวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนในลักษณะสกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect) ขึ้นนั่นเอง โดยขั้นตอนแรกเราจะทำการออกแบบวงจร โดยจะแบ่งเป็นส่วนย่อยๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

## 1) วงจรจ่ายกำลังไฟ

วงจรจ่ายไฟเลี้ยงจะมี 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะได้จากไดโอดบริดจ์ DB1 ในลักษณะฟลูเวฟเรกติไฟร์ กำลังไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปฟิลเตอร์ด้วย C11, C12 และ L1 และเรกติไฟร์แบบฟลูเวฟด้วย D1, D2 และเรกูลเลต IC2 ให้เท่ากับ 15V แรงอันที่ได้ส่วนนี้จะจ่ายให้กับ IC1 (วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณขับ) IC3 (วงจรเพาเวอร์มอสเฟส) และพัดลมระบายความร้อน

## 2) วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะประกอบด้วยเพาเวอร์มอสเฟส Q1 และ Q2 ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจากไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 155 VDC ให้กับตัวเหนี่ยวนำ L2 เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงขึ้น ในโครงการนี้เราทำการเลือก Q - IRFP450 โดยมรคุณสมบัตริ์ทั่วไปดังต่อไปนี้

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ ในช่วงเวลาแรกสมมุติให้ Q1 ได้รับไบอัส เป็นผลให้กระแสไหลผ่านขาเดรน (D) ไปยังขาซอร์ส (S) และเข้าไปในตัวเหนี่ยวนำ L2 (Working Coil) แล้วมาถึงแทปกกลางของตัวเก็บประจุ C13, C14 (เป็นสัญญาณด้านบวกเมื่อพิจารณาจุด A เทียบจุด B)

เมื่อ Q1 ได้รับไบอัสในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนดแล้ว Q1 ก็จะหยุดทำงานอีกช่วงเวลาหนึ่งที่เรียกว่าเดดไทม์ (Dead-Time) เพื่อไม่ต้องการให้ Q1, Q2 ทำงานพร้อมกัน (การทำงานพร้อมกันของ Q1 และ Q2 จะเกิดการลัดวงจรระหว่างไฟเลี้ยง 155 V ที่จะทำให้เกิดอันตรายขึ้น) และเมื่อผ่านช่วงเวลาเดดไทม์ไปแล้ว Q2 ได้รับไบอัส ก็จะทำให้กระแสไหลผ่าน L2 อีกครั้งแต่ในทิศทางตรงกันข้ามกับ Q1 (เป็นสัญญาณด้านลบเมื่อพิจารณาจุด A เทียบจุด B) แล้วก็จะเป็นเวลาเดดไทม์อีกครั้ง

อนึ่งในช่วงเวลาที่ Q1, Q2 และคาบเวลาเดดไทม์นี้เราจะนำมาพิจารณาในรูปของความถี่จาก  $f=1/T$  ซึ่งความถี่ที่ได้นี้จะต้องเป็นความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำ L2 ตัวเก็บประจุ C13, C14 ด้วย เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานไปยังโหลดได้ดีที่สุด ส่วนสัญญาณขับเพาเวอร์มอสเฟสนี้จะได้จากไอซีควบคุมสัญญาณขับ และวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟสต้องการควบคุมให้พลังงานที่เอาต์พุตเป็นไปตามที่กำหนด

### 3) วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณขับ

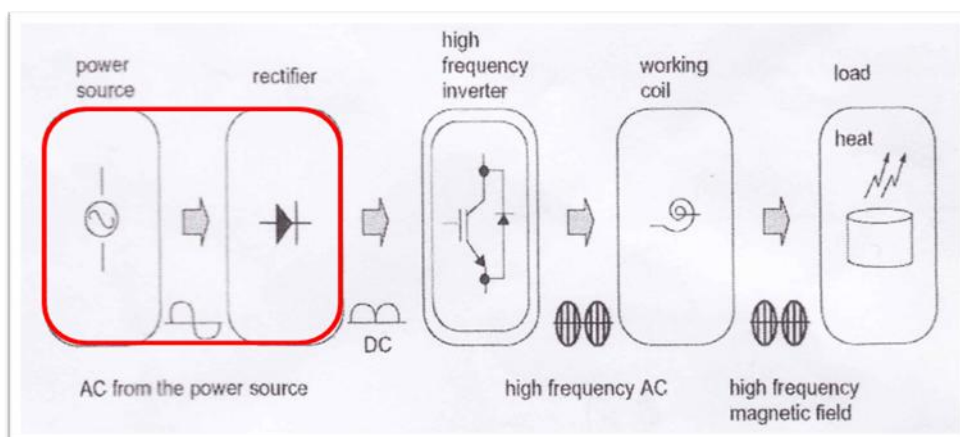
วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณขับนี้จะใช้ไอซีเบอร์ TL494 ในการสร้างสัญญาณ การทำงานของไอซีในโครงการนี้คือ รับไฟเลี้ยงที่ขา 12 และกราวด์ที่ขา 7 ส่วนขา 8 และขา 11 เป็นขา คอลเล็กเตอร์ ที่ต่อกับไฟเลี้ยงเช่นกัน ทั้งนี้ก็เพราะต้องการให้เป็นสัญญาณออกมาที่ขาอิมิตเตอร์ ที่ขา 9 และ ขา 10 เพื่อส่งให้กับวงจร ขับเพาเวอร์มอสเฟต ที่ขา 14 จะเป็นขาแรงดันไฟเลี้ยงอ้างอิง 5 V แรงดันนี้จะต่อเข้ากับขา 13 เพื่อต้องการให้ ทำงานแบบพุชพูลปกติ นอกจากนี้ยังต่อผ่านตัวต้านทาน R10 ไปยังขา 2 และ 15 ซึ่งเป็นขาอินเวอร์ต ติง โดยต้องการให้ขาทั้งสองมีแรงดันมากกว่าขา 1 และ 16 ซึ่งเป็นขานอนอินเวอร์ตติง จะเป็นผลให้ วงจรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier) ทั้งสองภายในทำงานตลอด

### 4) สร้างสัญญาณขับและวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

ส่วนของวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตนี้จะใช้ไอซีเบอร์ IR2110 เพื่อให้สัญญาณที่ได้เหมาะสม โดยไอซีเบอร์ IR2110 นี้สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟเดียวในการขับเพาเวอร์มอสเฟตได้ทั้งสองตัว สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์ได้ โดยเพาเวอร์มอสเฟตตัวบน Q1 (High-Side Switch) ส่วนตัวล่าง Q2 (Low-Side Switch) จะใช้ไฟเลี้ยงของแหล่งจ่ายได้เลย

ต่อไปจะเป็นการออกแบบวงจรทั้งหมดตามที่ได้อธิบายการทำงานมาโดยจะทำการออกแบบที ละส่วนดังต่อไปนี้

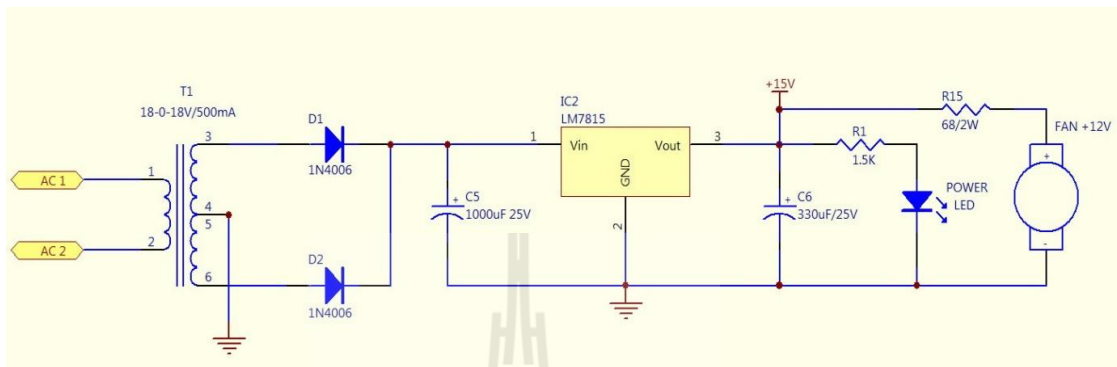
#### 3.1 วงจรจ่ายกำลังไฟและวงจรเรียงกระแส



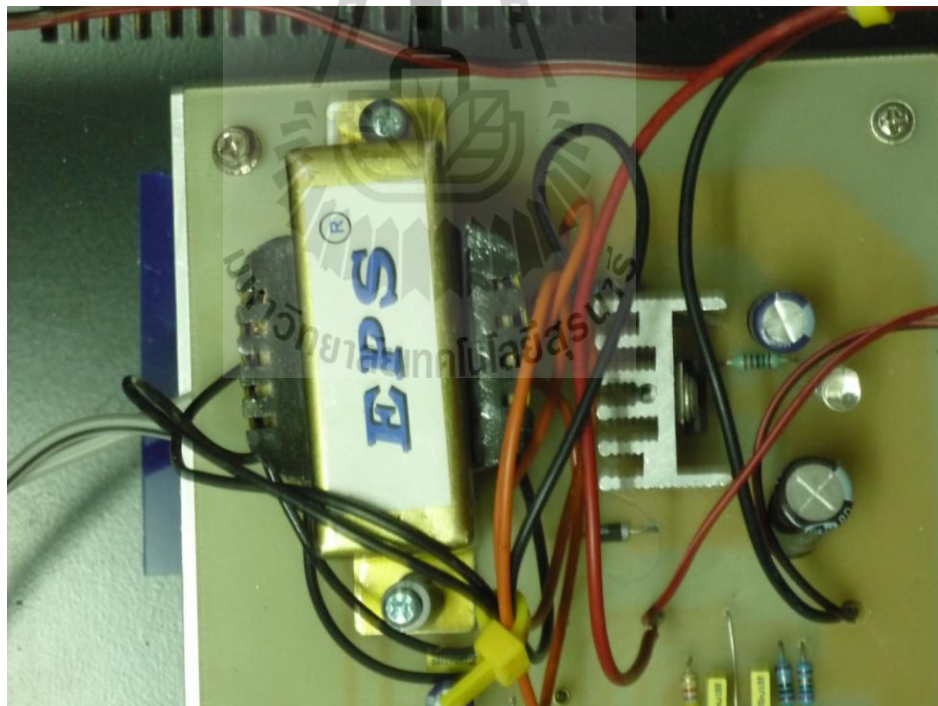
รูปที่ 3.2 บล็อกแสดงในส่วนของวงจรจ่ายกำลังไฟและวงจรเรียงกระแส

ส่วนที่แรกเราจะทำการออกแบบในส่วนของวงจรจ่ายกำลังไฟและวงจรเรียงกระแส โดยวงจรจ่ายกำลังไฟจะแบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้

### 1) วงจรจ่ายกำลังแรงดันต่ำ



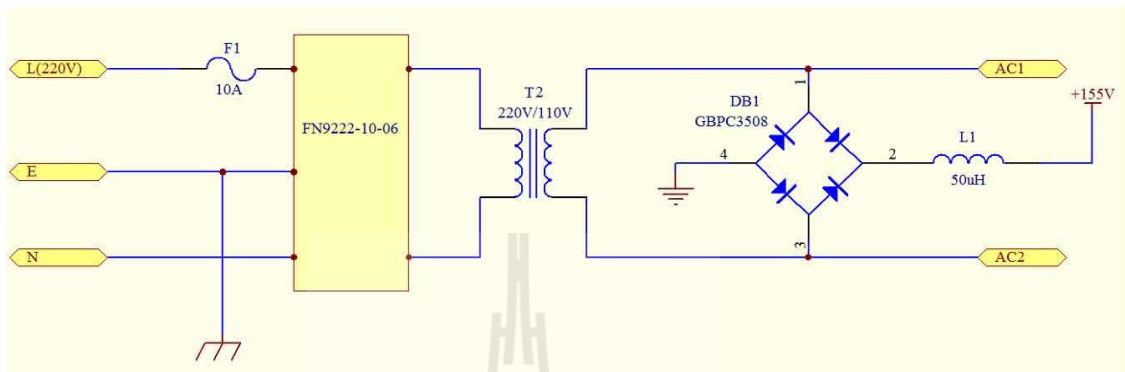
รูปที่ 3.3 วงจรจ่ายกำลังแรงดันต่ำ



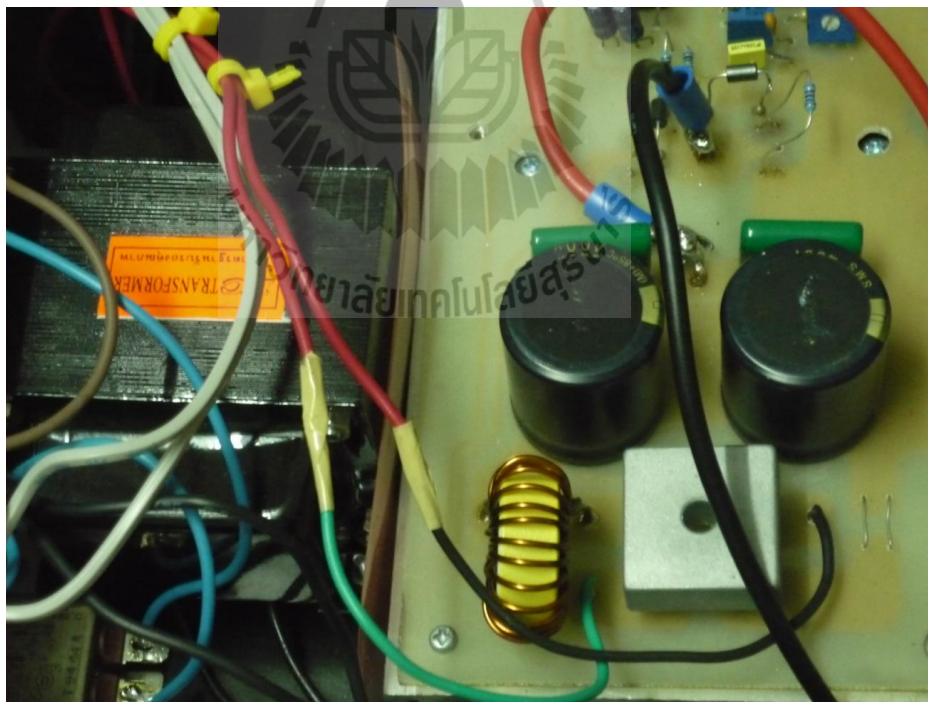
รูปที่ 3.4 วงจรจ่ายกำลังแรงดันต่ำ แบบจริงจากงาน

## 2) วงจรจ่ายกำลังไปแรงดันสูง

โดยส่วนนี้จะจ่ายไปเข้าหม้อแปลงแล้วแปลงไฟจาก 220VAC เป็น 110VAC ก่อนแล้วจึงจ่ายให้กับ DB1 ต่อไป



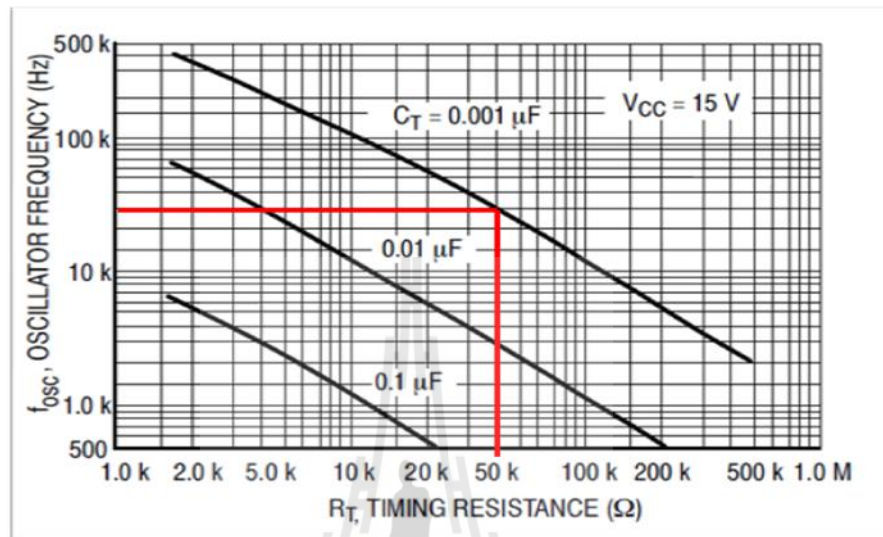
รูปที่ 3.5 วงจรจ่ายกำลังไฟแรงดันสูง



รูปที่ 3.6 วงจรจ่ายกำลังไฟแรงดันสูง แบบจริงจากงาน

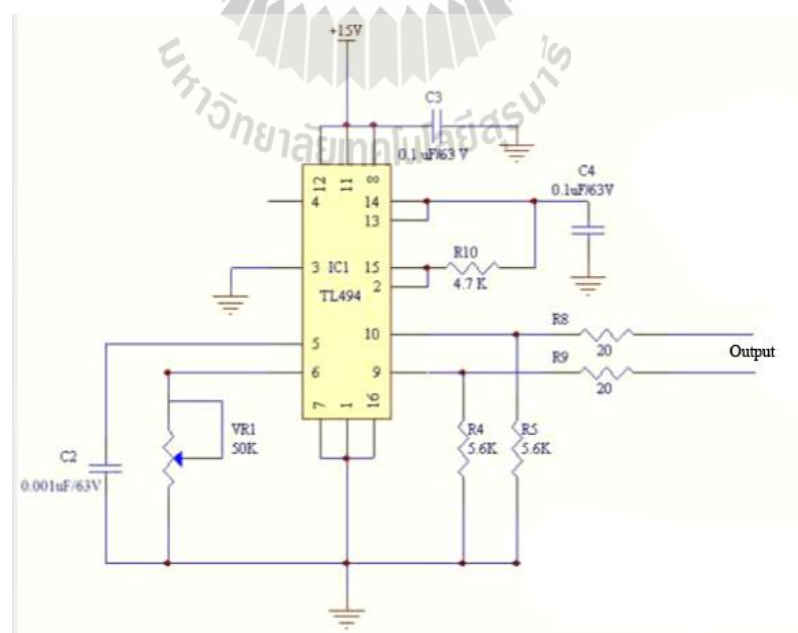
### 3.2 วงจรสร้างสัญญาณขับ

ในการออกแบบในส่วนนี้จะต้องเลือกค่า R และ C ที่จะสามารถทำให้ TL494 ทำงานได้ โดยสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจากกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า C และ R ที่เหมาะสม

ในการสร้างงานครั้งนี้เราได้เลือกค่า  $R = 50 \text{ K}$  และ  $C = 0.001 \mu F$

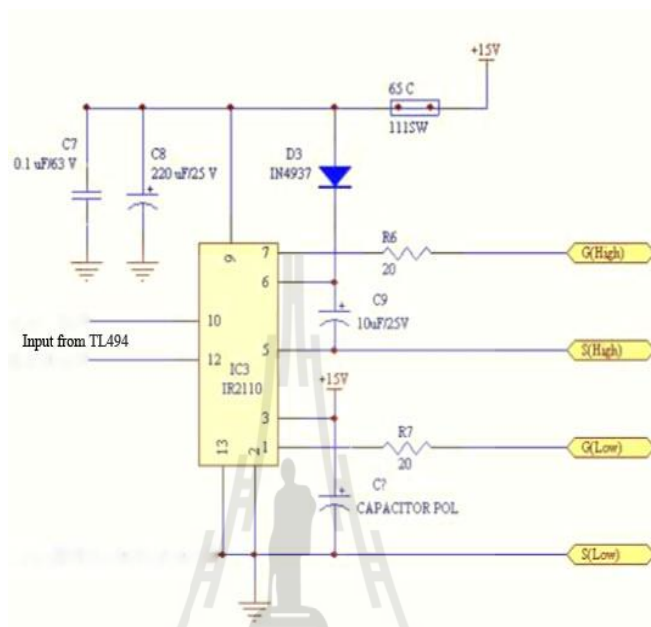


รูปที่ 3.8 ชุดสร้างสัญญาณขับ

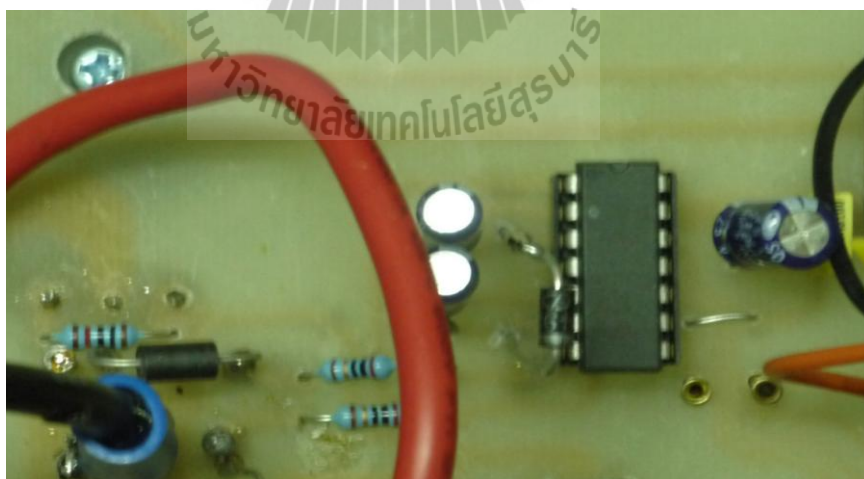


### 3.3 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

โดยในการออกแบบวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตนี้ผู้ออกแบบได้เลือกไอซีเบอร์ IR2110 ใช้ในการขับสัญญาณเพาเวอร์มอสเฟต

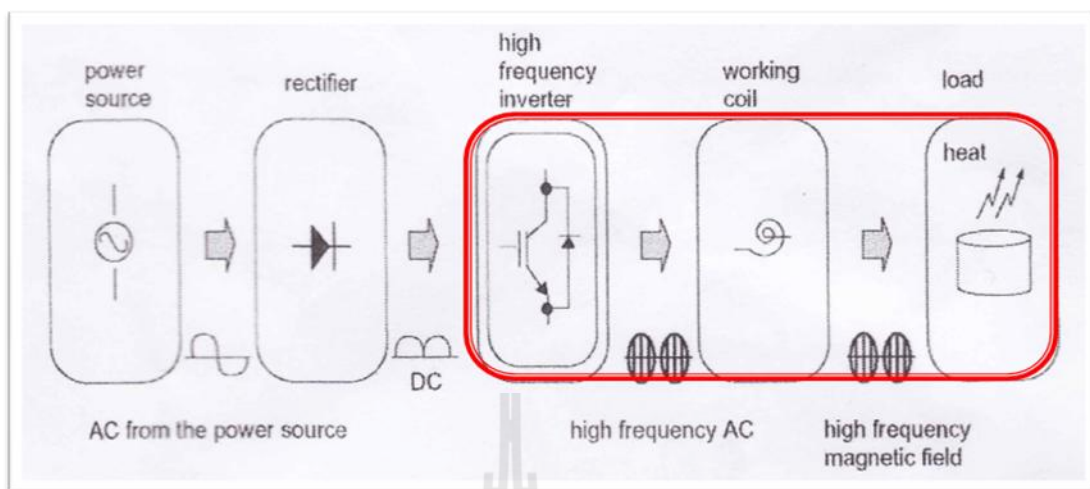


รูปที่ 3.9 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต



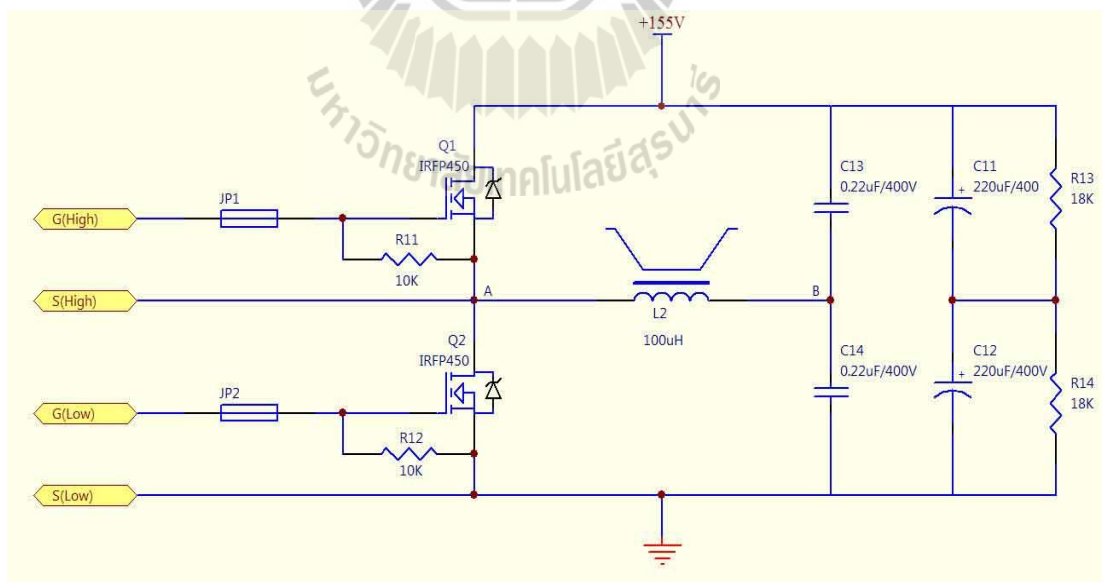
รูปที่ 3.10 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตแบบจริงจากงาน

### 3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.11 บล็อกแสดงในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์

ส่วนสุดท้ายในการออกแบบคือ วงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรใช้ขับสัญญาณจากเพาเวอร์มอสเฟตส่งให้กับขดลวดเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน รูปแบบวงจรที่ใช้เป็นวงจรฮาร์ฟบริดจ์ โดยมีวงจรเซอร์กิตตามรูปที่



รูปที่ 3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์

โดยในส่วนนี้จะต้องมีการคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์เพื่อให้วงจรเกิดการถ่ายโอนพลังงานได้สูงสุด สามารถคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ได้จาก

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 \times 10^{-6} \times 0.22 \times 10^{-6}}}$$

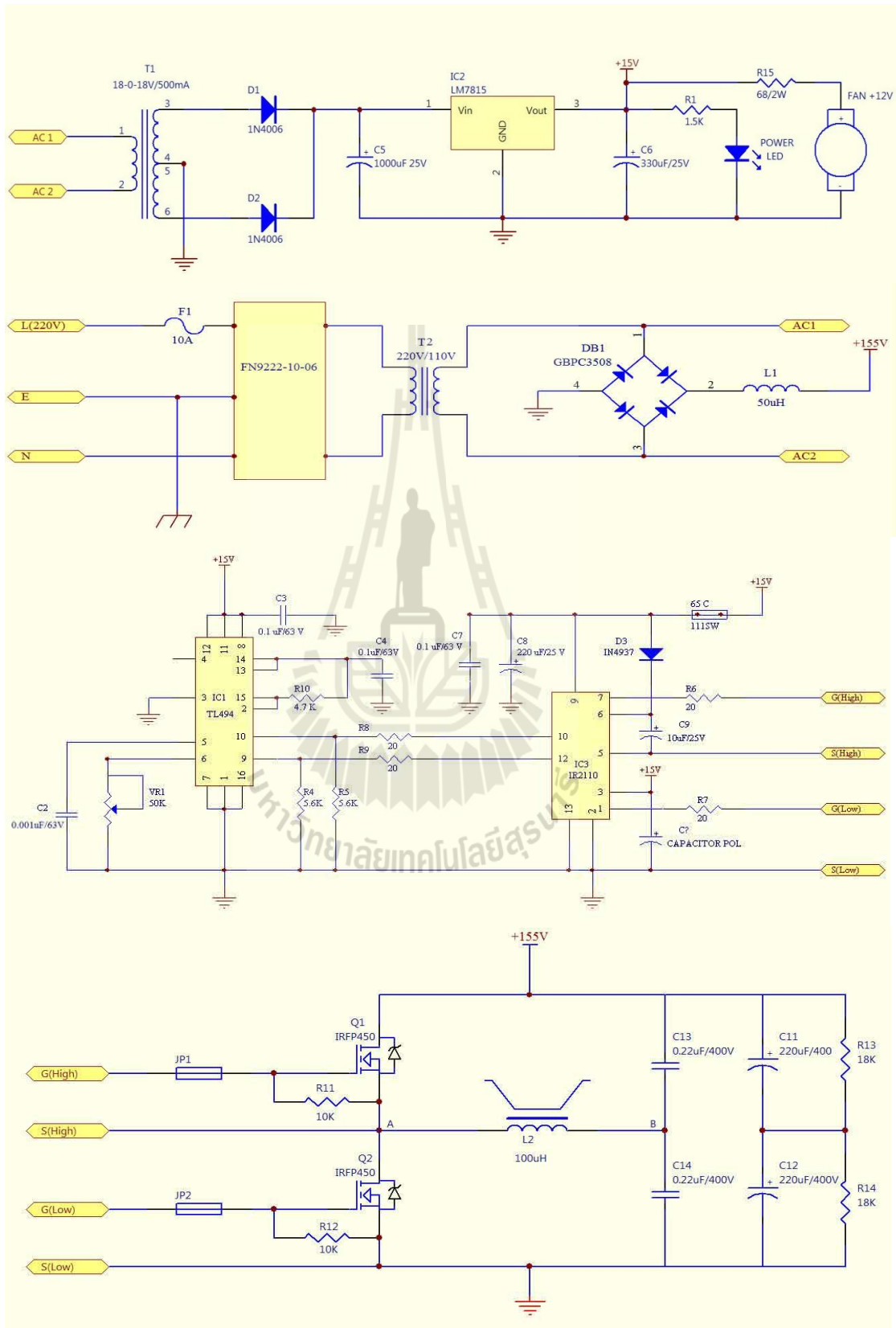
$$f = 33.93 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$f \cong 34 \text{ kHz}$$

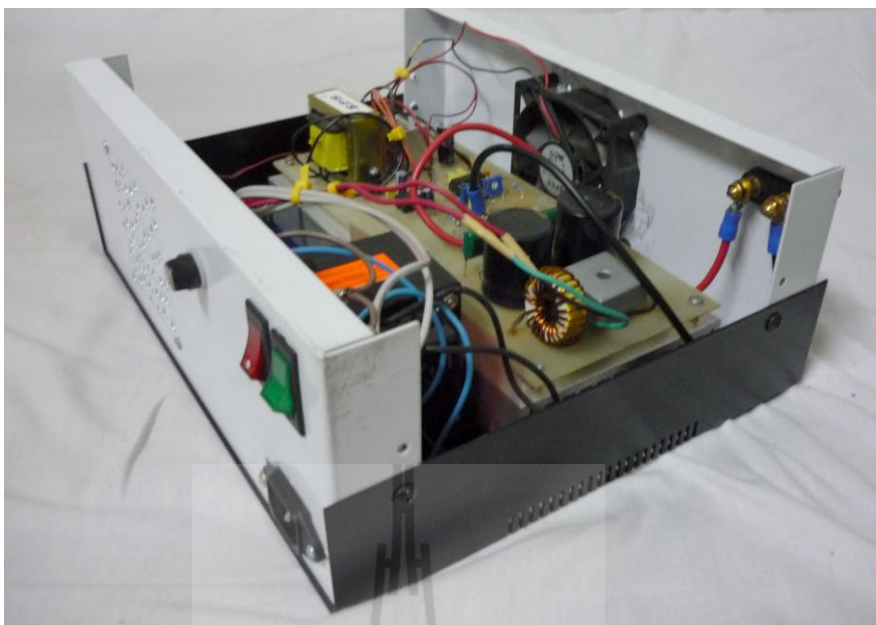


รูปที่ 3.13 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจริงจากงาน

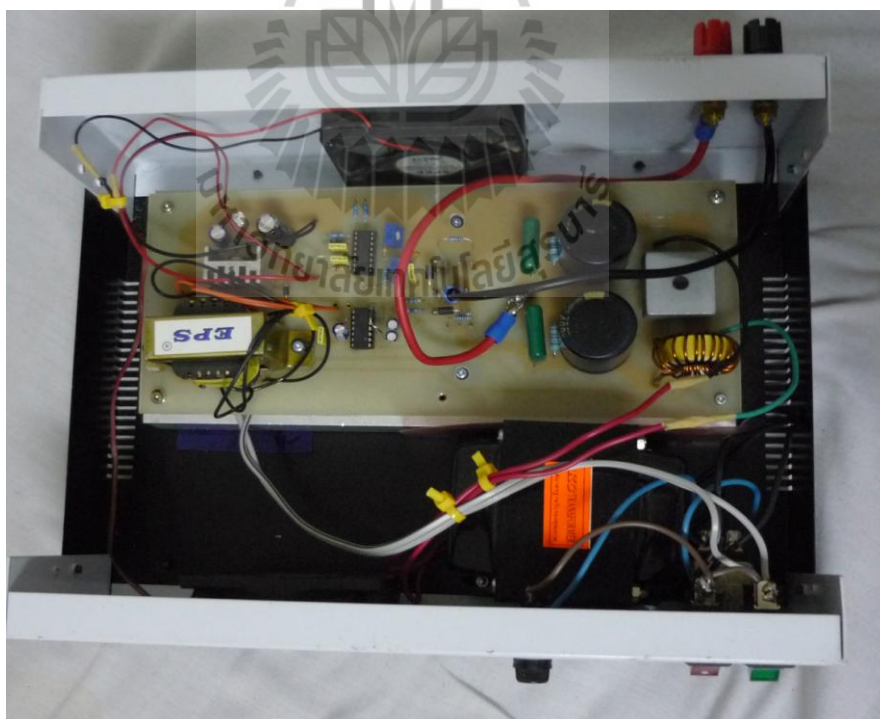
รูปข้างล่างแสดงถึงวงจรทั้งหมดที่ทำการออกแบบมางานครั้งนี้โดยจะมี 4 ส่วนหลักๆ



รูปที่ 3.14 วงจรเซอร์กิตทั้งหมดของโครงการ



รูปที่ 3.15 รูปงานที่ประกอบเสร็จแล้ว 1



รูปที่ 3.16 รูปงานที่ประกอบเสร็จแล้ว 2



รูปที่ 3.17 รูปงานที่ประกอบเสร็จแล้ว 3

### 3.5 ข้อระวังในการดำเนินงาน

1. ในการการทำงานจริงนี้ต้องให้ความสำคัญในการประกอบวงจรที่ต้องต่อเข้ากับแรงดันที่ค่อนข้างสูงและจะเป็นส่วนที่ต้องจ่ายกระแสที่สูงพอสมควรจึงต้องระมัดระวังที่อาจจะเกิดจากไฟฟ้าได้
2. ในการต่อตัวเก็บประจุลงในวงจรแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ต้องทำการต่อให้เกิดขั้วเพื่อมิให้เกิดการพังหรือเสียหายของอุปกรณ์ได้
3. การวางตำแหน่งของขาเพาเวอร์มอสเฟตและการยึดแผ่นวงจรพิมพ์เข้ากับฮีตซิงค์เพื่อมิให้เกิดความร้อนมากและทำให้อุปกรณ์พังหรือเสียหายได้
4. ในการทำการต่ออุปกรณ์ควรพึงมีสติในการทำงาน เพราะอาจเกิดอันตรายจากไฟฟ้าช็อตหรือไฟฟ้าลัดวงจรได้
5. ควรศึกษาถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ก่อนลงมือปฏิบัติจริง เนื่องจากอาจทำให้อุปกรณ์ชำรุดหรือวงจรพังเสียหายได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากบทที่ 3 เมื่อเราได้ทำการออกแบบชิ้นงานแล้ว และประกอบเป็นชิ้นงานขึ้นมา ต่อไปนี้เราจะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของงานที่ออกแบบมาว่าจะทำงานได้จริงหรือไม่ วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับทฤษฎี

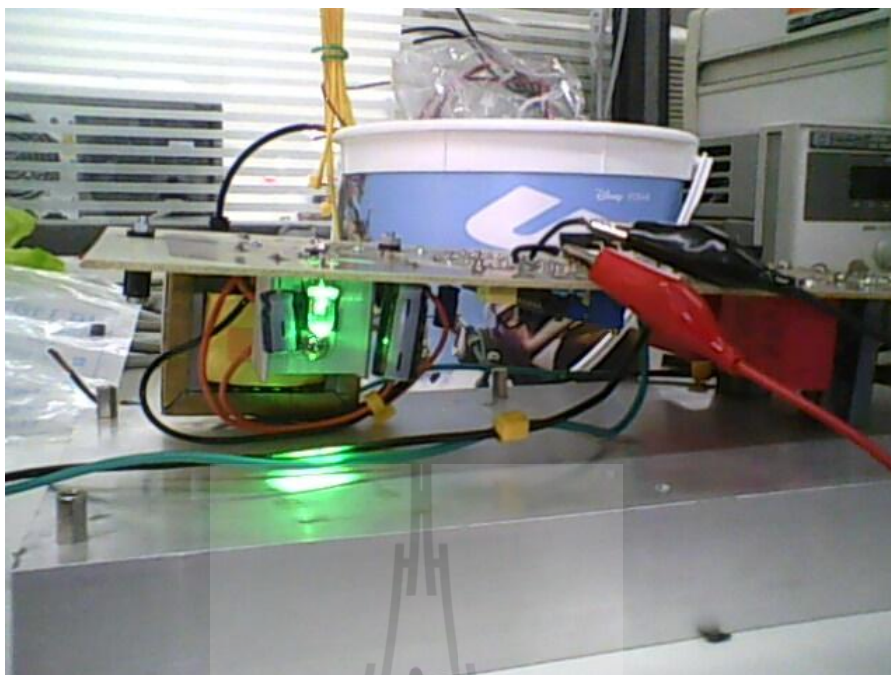
#### 4.1 การทดสอบการทำงาน

1. ในส่วนแรกจะเป็นการทดสอบชุดสร้างสัญญาณขับและวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟส โดยยังไม่ต้องป้อนไฟในส่วนของไฟแรงดันสูง 220V เพื่อทดสอบการทำงานที่ละส่วน
2. ทำการป้อนแรงดัน 15V DC ที่ขา 12 และกราวด์ที่ขา 7 ของ TL494
3. ใช้ Oscilloscope จับสัญญาณ input ที่ขา 12 เทียบกับกราวด์ได้สัญญาณดังรูปที่ 4.1



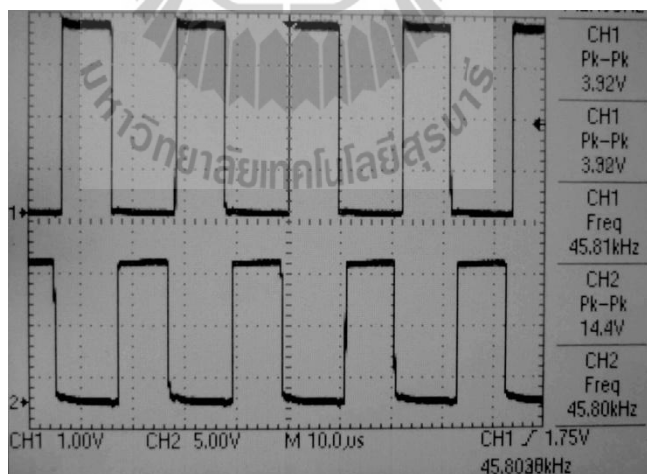
รูปที่ 4.1 Input ที่ขา 12 ของ TL494

4. ทำการวัดสัญญาณ Output ที่ได้โดยใช้ Oscilloscope จับที่ขา 9 และ 10 ซึ่งเป็น Output ของ IC TL494 สัญญาณที่ได้จะต้องเป็นสัญญาณ Pulse และต้องกลับเฟสกัน



รูปที่ 4.2 แสดงการวัดสัญญาณที่ขา 9 และขา 10 ของไอซี TL494

เมื่อทำการวัดสัญญาณจากขา 9 และ 10 ของ IC TL494 ได้กราฟลักษณะดังรูปที่ 4.3 โดยเริ่มแรกปรับความถี่ไว้ที่ 45 KHz โดยปรับที่ VR1 จากกราฟที่ได้แสดงว่าวงจรทำงานตามปกติ

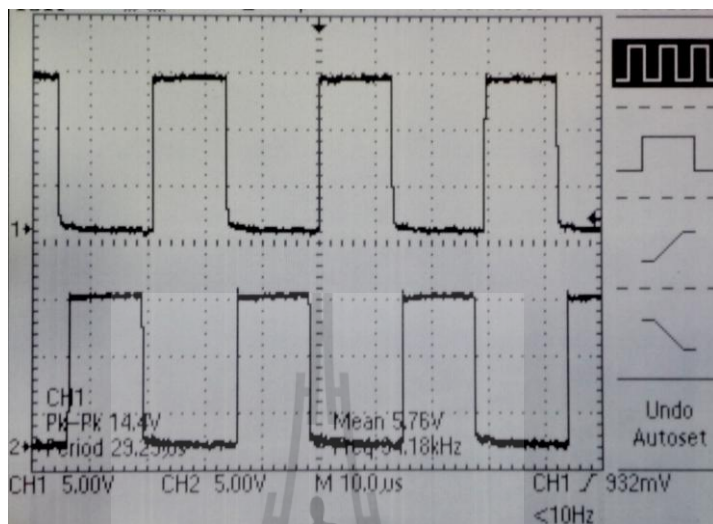


รูปที่ 4.3 สัญญาณที่ได้จากขา 9 และขา 10 ของ TL494

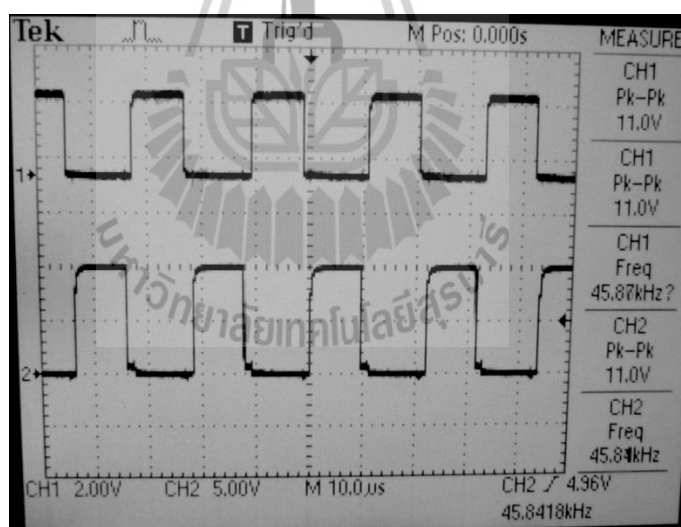
5. เมื่อทำการทดสอบการทำงานของชุดสร้างสัญญาณขับและวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตเสร็จแล้ว เราจะทำการตรวจสอบการทำงานของ IC3 IR2110 โดยวัดสัญญาณที่ input ที่ขา 10 และ 12 ของ IR2110 จากนั้นทำการวัดสัญญาณที่ขา 1 และ ขา 7 ของ IC3 IR2110 ซึ่งเป็น Output ของ



IR2110 สัญญาณที่ได้จะต้องเหมือนกับสัญญาณที่วัดได้จากขา 9 และขา 10 ของ TL494 โดยสัญญาณที่วัดได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

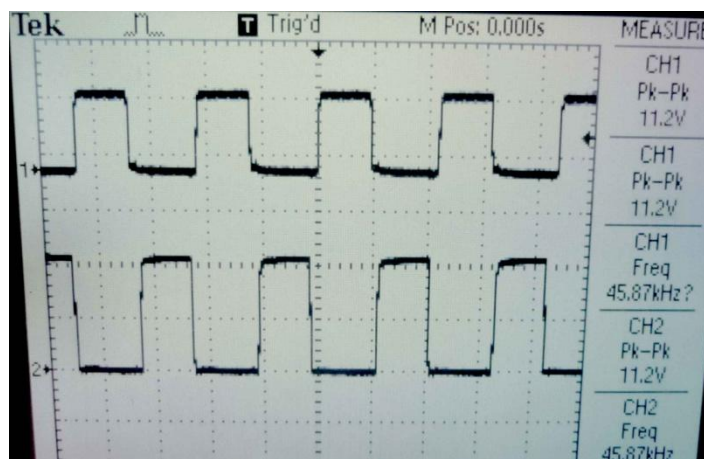


รูปที่ 4.4 input ของ IR2110 ขา 10 และ 12



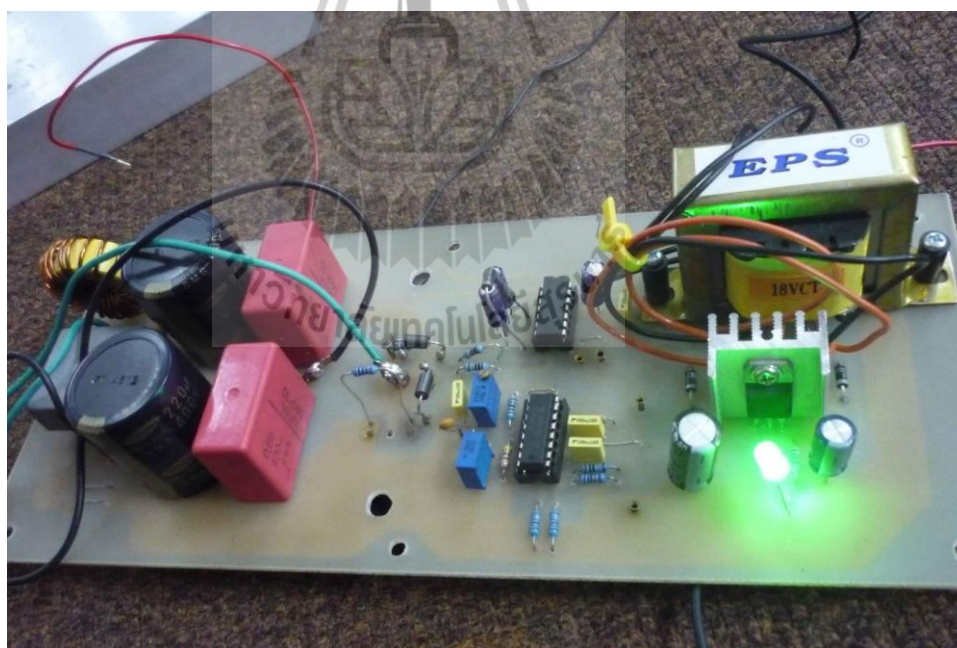
รูปที่ 4.5 สัญญาณ Output จากขา 7 และ 1 ของ IR2110

6. ทำการทดสอบเพาเวอร์มอสเฟต โดยใช้ Oscilloscope จับที่ขอซอร์ส (S) เทียบกับกราวด์ของ Q1 เพื่อเป็นการทดสอบสัญญาณขับเพาเวอร์มอสเฟตด้านบน ส่วนด้านล่าง Q2 ก็ทดสอบปกติ โดย สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะและเฟดที่ตรงกับสัญญาณที่ได้จาก IC1 TL494



รูปที่ 4.6 สัญญาณจาก Q1 และ Q2

จากรูป 4.6 สัญญาณที่ได้จาก Q1 และ Q2 มีลักษณะเหมือนกันกับสัญญาณที่ได้จาก ขา 9 และขา 10 ของ IC1 TL494 เมื่อวัดสัญญาณได้ตามทฤษฎีแสดงว่าวงจรในส่วนของคุณสร้างสัญญาณขับและวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟสสามารถทำงานได้ตามปกติ เราจึงจะทำการทดสอบวงจรต่อไป



รูปที่ 4.7 แสดงวงจรเมื่อมีการป้อนไฟ 15 VDC ให้กับวงจร

7. ต่อไปจะเป็นการทดสอบในส่วนของแรงดันสูง โดยจ่ายไป AC 220V ให้กับวงจร วงจรจ่ายกำลังไฟมีสองส่วนคือ ส่วนแรกคือไดโอดบริดจ์ DB1 กำลังไฟที่ได้จะถูกนำไปฟิลเตอร์ด้วย C11, C12 และ L1 จากนั้นกำลังไฟส่วนนี้ก็จะจ่ายให้ Q1 Q2 ส่วนที่สองได้จาก T1 ดังต่อไปนี้

ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้วารีแอกเป็นแหล่งกำเนิดโดยเราจะค่อยๆปรับวารีแอกจนถึง 110V โดยยังไม่ต้องผ่านหม้อแปลง T2 ก่อนที่จะป้อนไปให้กับวงจร แล้วทำการปรับ VR1 ให้ได้ ความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ ซึ่งคำนวณแล้วได้ค่าความถี่เรโซแนนท์ได้เท่ากับ 34 KHz

8. ทำการปรับความถี่เรโซแนนซ์ตามที่คำนวณได้ โดยใช้ Oscilloscope จับที่ขา 9 หรือขา 10 ป้อน ไฟเฉพาะส่วนของวงจรจับเพาเวอร์มอสเฟต แล้วทำการปรับ VR1 โดยค่อยๆปรับไปเรื่อยๆ จนได้ค่าความถี่ที่คำนวณไว้

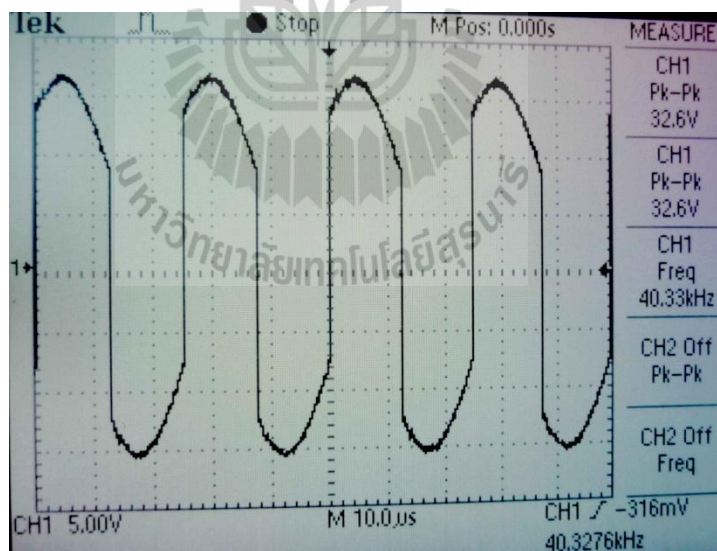
9. ทำการต่อโหลด L2 ตามที่เรากำหนดไว้ คือ  $100\mu\text{H}$  โดยโหลดชุนนี้จะทำโดยการพัน เส้นลวดทองแดงเบอร์ 16 ตามจำนวนรอบที่คำนวณได้ แล้วใช้เครื่องวัดค่าที่ได้ ถ้ายังไม่ตรงกับที่ คำนวณไว้ให้แก้ไขเรื่อยๆจนได้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด

10. ป้อนไฟ 110 V จากวารีแอก โดยค่อยๆปรับขึ้นจนถึง 110 V

11. ใช้ DMM วัดกระแส Input ได้เท่ากับ 0.9 A

12. ค่อยๆลดไฟลงเรื่อยๆจนเป็น 0 V บันทึกค่ากระแสที่ได้

13. ทำการป้อนไป 110 V ให้วงจรอีกครั้ง แต่ครั้งนี้ให้ตั้งไฟไว้ที่ 110 V AC วัดกระแสที่ Input ใน ขณะเดียวกันก็ใช้ Oscilloscope จับสัญญาณ output ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัญญาณ Output

14. ทดสอบอีกครั้ง โดยครั้งนี้จะทำการจับเวลาที่ทำให้ตะปูเกิดความร้อนทำการจ่ายไฟ 110VAC ให้กับวงจรแล้วจับเวลา เวลาที่ทำให้ตะปูร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.9 ใช้เวลาไปทั้งหมด ประมาณ 30 วินาที กระแสที่ใช้ในการสร้างความร้อนประมาณ 0.9 A



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการสร้างความร้อนจาก L2

เมื่อทดสอบแล้วว่าวงจรสามารถทำงานได้ปกติ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนได้จริงตามทฤษฎี ต่อไปจะเป็นการวัดเพื่อเปรียบเทียบเมื่อเราทำการเปลี่ยนความถี่ที่ค่าอื่นแล้วทำการวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในระดับความถี่ต่างๆ

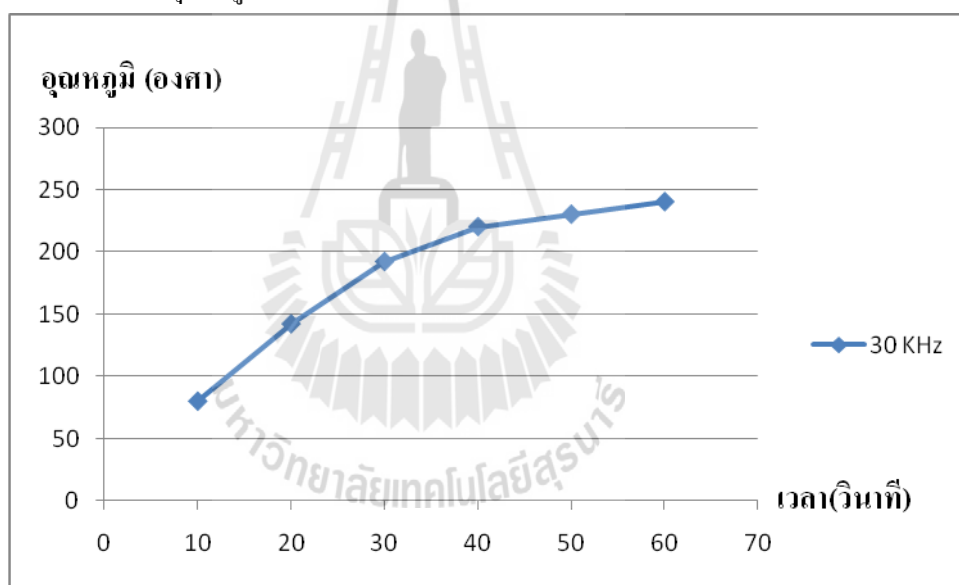


รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบวงจร วัดกระแสที่นำมาให้เกิดความร้อน

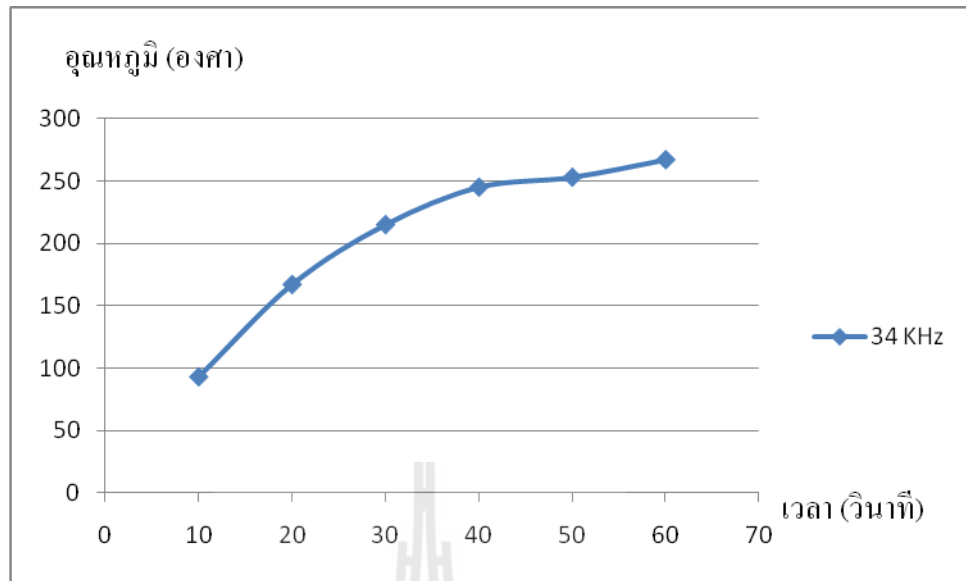
ตารางเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ได้กับความถี่

Time Frequency	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	I (A)
30 KHz	80 °C	142 °C	192 °C	220 °C	230 °C	240 °C	1.05
34 KHz	93 °C	167 °C	215 °C	245 °C	253 °C	267 °C	0.9
40 KHz	40 °C	100 °C	122 °C	148 °C	153 °C	179 °C	0.5
45 KHz	40 °C	60 °C	99 °C	124 °C	153 °C	179 °C	0.45
50 KHz	40 °C	58 °C	96 °C	110 °C	131 °C	145 °C	0.3

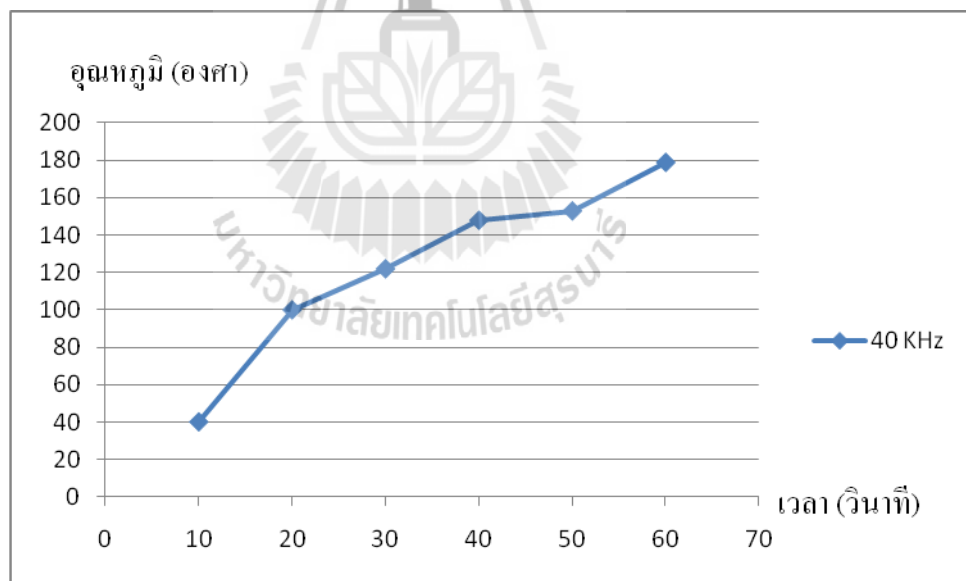
กราฟระหว่าง อุณหภูมิกับเวลา



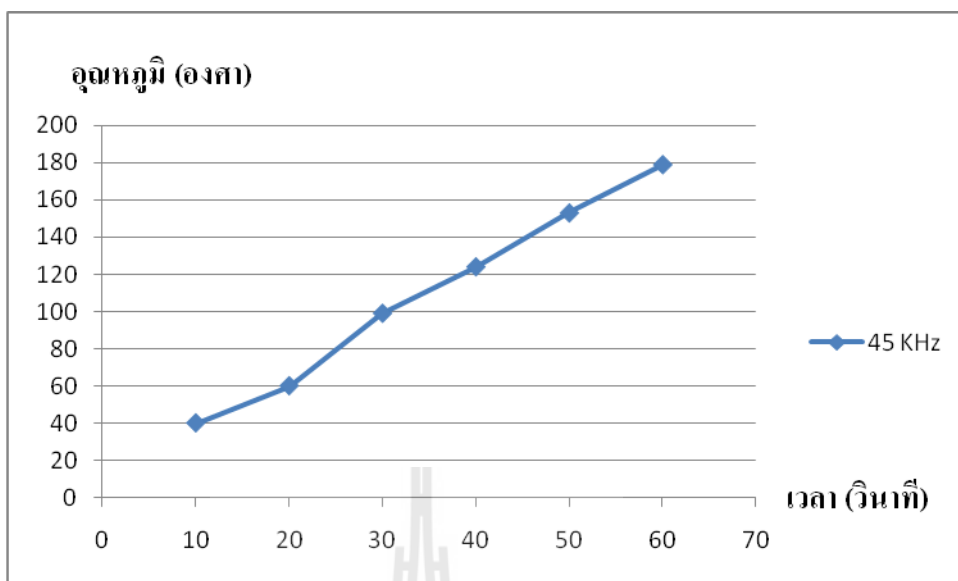
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 30 KHz



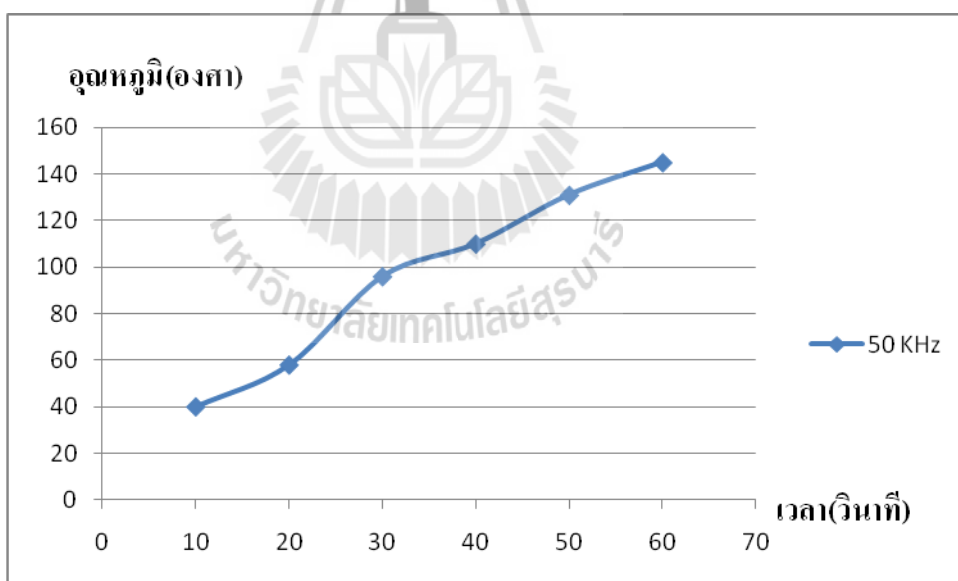
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 34 KHz



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 40 KHz

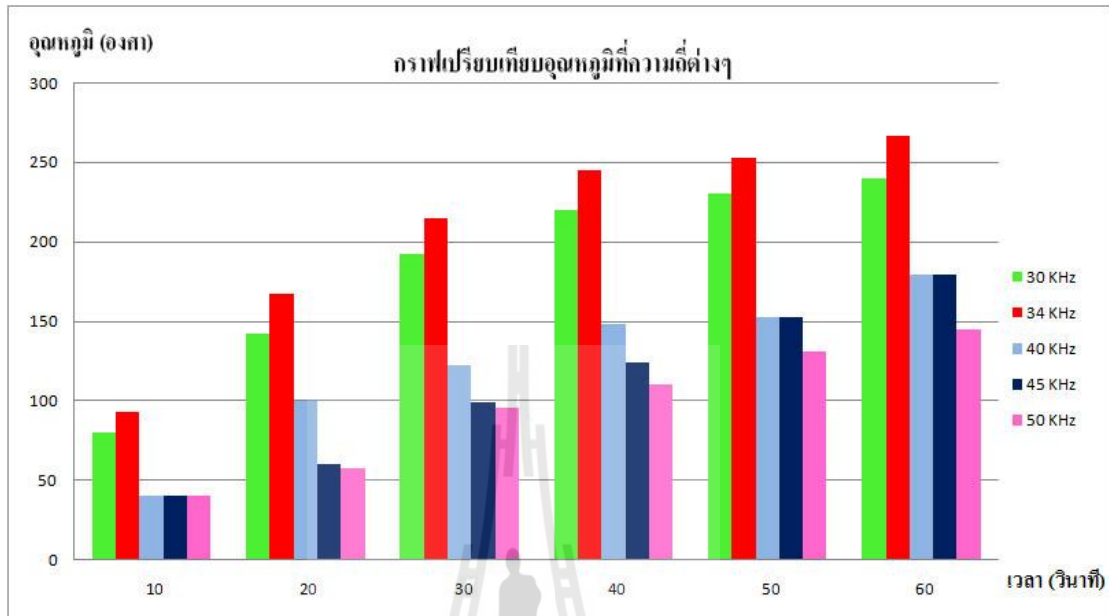


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 45 KHz



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 50 KHz

กราฟแสดงการเปรียบเทียบที่ค่าความถี่ต่างๆระหว่างอุณหภูมิกับเวลา



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ความถี่ต่างๆ





## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผล

จากการดำเนินงานทดสอบการทำงานของเครื่อง half bridge induction heating สามารถสรุปการทำงานได้ดังต่อไปนี้

- 1 ในการทดสอบใช้ขดลวดเบอร์ 16 พันเป็นทรงกระบอก แกนอากาศ มีค่า  $100\mu\text{H}$  โดยที่วงจรทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์
- 2 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับลวดเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนมีค่าเท่ากับ 99 W
- 3 เวลาที่ใช้ในการทำให้เกิดความร้อนคือ 30 วินาที
- 4 แรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรเท่ากับ 110 VAC
- 5 วงจรจะทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานได้สูงสุด
- 6 ที่ความถี่บางค่าอาจวัดค่ากระแสที่ทำให้เกิดความร้อนได้มากกว่าแต่ระยะเวลาในการให้ความร้อนก็ยังคงมากกว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานได้น้อยกว่าถึงจะดึงกระแสอินพุตมากแต่กำลังที่เอาต์พุตก็ยังคงมีค่าน้อย เพราะเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ

เรโซแนนซ์ หรือทำการเปลี่ยนค่าโหลดเป็นค่าอื่นที่ไม่ใช่ค่าที่คำนวณไว้ พบว่าวงจรจะเกิดการมิตแมทหรือไม่เกิดเรโซแนนซ์ วงจรจะดึงกระแสมากเกินไปจนอาจทำให้เกิดความเสียหายในตัววงจรได้ วงจรจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์หรืออุปกรณ์เช่น C และ L2 ต้องเรโซแนนซ์กับความถี่ ทั้งนี้การทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา

#### 5.2 ข้อดีของโครงการ

1. ออกแบบง่าย เพราะเป็นวงจรขนาดเล็กไม่มีความซับซ้อนมาก
2. ประหยัดไฟ ลดปัญหาเครื่องใช้ไฟฟ้าที่กินไฟจนเกินไป เพราะกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับลวดเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนมีค่าเท่ากับ 99 W
3. เนื่องจากเป็นวงจรขนาดเล็ก จึงสามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวก
4. ง่ายต่อการตรวจสอบข้อผิดพลาดในการทำงานของวงจร
5. ช่วยลดปัญหาโลกร้อน เนื่องจากการสร้างความร้อนไม่ได้เกิดจากการเผาไหม้

### 5.3 ข้อจำกัดของโครงการ

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบในโครงการนี้จำกัดแรงดันประมาณ 110 VAC เนื่องจากถ้าป้อนแรงดันสูงเกินไปอาจจะทำให้อุปกรณ์ภายในวงจรบางส่วนพังได้
2. ข้อจำกัดเรื่องการนำไปใช้งานจริง เนื่องจากโหลดที่ออกแบบเป็นทรงกระบอก จะให้ความร้อนได้เฉพาะโลหะที่อยู่ในทรงกระบอกเท่านั้น
- 3 ในการปรับความถี่เพื่อทำการเปรียบเทียบนั้นไม่สามารถปรับค่าที่แตกต่างกันมากเกินไป เนื่องจากถ้าทำการปรับความถี่ที่แตกต่างจากความถี่เรโซแนนซ์มากเกินไป วงจรจะดังกระแสมากกว่าปกติ อาจจะทำให้อุปกรณ์ในวงจรเกิดความเสียหายได้

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำไปพัฒนาให้วงจรมีขนาดเล็กลง เพื่อทางการค้าสามารถนำไปทำเป็นเครื่องให้กำเนิดความร้อนที่ใช้ตามบ้านเรือนได้
2. ควรพัฒนาให้เกิดความหลากหลายทางอุปกรณ์ เช่น อาจนำหลักการนี้ไปทำเอาตบหรืออาจเป็นเตาหลอมได้ โดยใช้ทฤษฎีนี้เป็นต้นแบบ

## ประวัติผู้เขียน



1.นายณัฐพล บุญวิเศษ รหัสนักศึกษา B4910121 เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ หมู่ 15 บ้านหนองยูง ตำบลหนองแวง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนพลาญชัยพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



2.นายกิตติพงษ์ ปังกะสินัง รหัสนักศึกษา B4910114 เกิดเมื่อวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ หมู่ 1 บ้านขามป้อม ตำบลขามป้อม อำเภอลำปำ จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน วาปีปทุม อำเภอ วาปี จังหวัดมหาสารคาม ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



3.นายอรรถ ประทุมวงศ์ รหัสนักศึกษา B4910251 เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ หมู่ 3 บ้านหนองพลวง มะนาว ตำบลโพธิ์กลาง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนมหิศราธิบดี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บรรณานุกรม

ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย , สนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่1, 2545.

วิริยะ พิเชฐจำเริญ, เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์. ซีเอ็ดยุคเข็่น จำกัด มหาชน

สันติ อัครศรีพงษ์ธร , สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่2, 2530.

อุดมศักดิ์ ยิ่งยืน, Power Electronics I, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Robert L.Boysletad and Louis Nashelsky, Electronic Devices and Circuit Theory, Pearson Prentice Hall,Ninth Edition,2549

ข้อมูล Website

มอสเฟต

<http://wara.com/article-801.html>

<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B9%80%E0%B8%9F%E0%B8%95>

เรียงกระแส

<http://www.neutron.rmutphysics.com/physicsboard/forum/index.php?topic=689.0>

<http://203.158.100.139/charud/scibook/Labphysics2/08rectifier.pdf>

ฟาราเดย์

<http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/vichaipage/chap4.>

<http://physics.science.cmu.ac.th/courses/207102/slide9.files/frame.htm>

[http://www.physics.kku.ac.th/~sprajakk/files/GenPhysII/Electromagnetic\\_I.pdf](http://www.physics.kku.ac.th/~sprajakk/files/GenPhysII/Electromagnetic_I.pdf)

<http://www.oknation.net/blog/wasan50291216/2009/08/27/entry-3>

[http://www.sci.nu.ac.th/physics/elearning/IntroductoryPhysics/Thanya/ch11\\_EM8\\_MagneticInduction.ppt](http://www.sci.nu.ac.th/physics/elearning/IntroductoryPhysics/Thanya/ch11_EM8_MagneticInduction.ppt)

วงจรรินเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์

<http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/power/inverter/>

<http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/power/converter/>

<http://www.ubmthai.com/leksoundsmf3/index.php?topic=1538.msg9501>

วงจรเรโซแนนซ์

[http://physics.kku.ac.th/ac\\_cai/3\\_15Thai/3\\_15.html](http://physics.kku.ac.th/ac_cai/3_15Thai/3_15.html)

[http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_6/5.html#22011.png](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_6/5.html#22011.png)

[http://eng.siamu.ac.th/eng\\_doc/course\\_152212\\_13.ppt](http://eng.siamu.ac.th/eng_doc/course_152212_13.ppt)



