

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ
INDUCTION COOKING



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 61833

วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาหุงต้มเหนียวนำ
INDUCTION COOKING



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61833
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549

.....
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาหุงต้มเหนียวน้ำ
INDUCTION COOKING

โดย

นายประสิทธิ์ ชวัชไพฑูลย์
นายศุภชัย อภิรักษ์เมธวงศ์
นายสุกรีข กสิณขจร
นายอนุชา สว่างแสง



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร กิณเวศ
อาจารย์ชัยทัต มณีอิทร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ
INDUCTION COOKING

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|------------------|--------------|----------|
| 1. นาย ประสิทธิ์ | ธวัชไพบูลย์ | รหัสประจำตัว | 45015111 |
| 2. นาย สุกชัย | อภิรักษ์เมธาวงศ์ | รหัสประจำตัว | 45015123 |
| 3. นาย สุกรีช | กลั่นขจร | รหัสประจำตัว | 45015126 |
| 4. นาย อนุชา | สง่าแสง | รหัสประจำตัว | 45015129 |


อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. วิจิตร คิณเรศ


อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. ชัยทัต นสีอินทร์

เตาหุงต้มเหนียวน้ำ

นายประสิทธิ์	ธวัชไพโรบลย์
นายศุภชัย	อภิรักษ์เมธาวงศ์
นายสุกรีช	กลินขจร
นายอนุชา	สง่าแสง
รศ.ดร.วิจิตร	กิลเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.ชัยทัต	มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

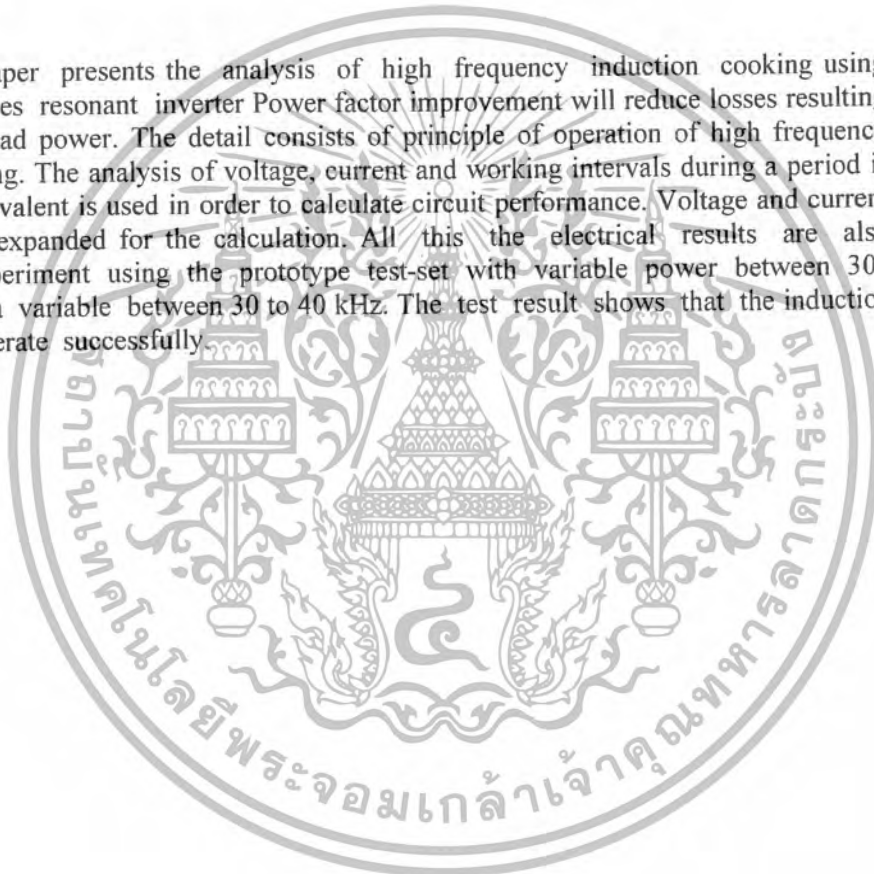
บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนียวน้ำความถี่สูงด้วยฮาล์ฟบริดจ์ อินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ พร้อมปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ จะช่วยให้ลดการสูญเสียทางด้านอินพุตส่งผลให้โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุด รายละเอียดจะประกอบด้วยหลักการการทำงานของเตาหุงต้มเหนียวน้ำความถี่สูง พร้อมกับวิเคราะห์หาสมการแรงดันและกระแสในจังหวะการทำงานต่างๆของวงจรในช่วง 1 ไซเคิล ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์หาวงจรเทียบเท่า เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าปริมาณไฟฟ้าต่างๆของวงจร โดยการแตกองค์ประกอบของฮามอนิกส์ของแรงดัน และกระแสช่วยในการคำนวณ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีนี้ ยังได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้เครื่องต้นแบบที่สามารถปรับระดับกำลังไฟฟ้าจาก 300-1200วัตต์ โดยการปรับความถี่จากค่า 30-40 กิโลเฮิร์ต ซึ่งปรากฏว่าเตาหุงต้มเหนียวน้ำทำงานได้เป็นอย่างดี

INDUCTION COOKING

Prasit Tawatpiboon
 Supachai Apirakmathavong
 Sukrit Klinkhajon
 Anucha Sangasaeng
 Assc.Prof.Dr.Vijit Kinares Advisor
 Chaitad Mameein Advisor
 2004

ABSTRACT

This paper presents the analysis of high frequency induction cooking using half-bridge series resonant inverter. Power factor improvement will reduce losses resulting in maximum load power. The detail consists of principle of operation of high frequency induction heating. The analysis of voltage, current and working intervals during a period is given. The equivalent is used in order to calculate circuit performance. Voltage and current harmonics are expanded for the calculation. All this the electrical results are also verified by experiment using the prototype test-set with variable power between 300 to 1200 kW at a variable between 30 to 40 kHz. The test result shows that the induction cooker can operate successfully.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิจิต กิณเรศ และ อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ ที่ได้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์มากเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งเป็นที่สุด

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร. วิจิต กิณเรศ ที่ได้ให้โอกาสในการทำหัวข้อโครงการวิจัย และ อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยเป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความมีเมตตาของท่านทั้งสองเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณพี่ ป.โท ที่ให้ความสนับสนุนตลอดจนเพื่อนๆในกลุ่มที่คอยหุ้มเทแรงกายและแรงใจ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นผู้สนับสนุนและคอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ ดูแลงานวิจัยสำเร็จสมตามตั้งใจ บุญคุณของท่านทั้งสองที่ประเสริฐ และยิ่งใหญ่จนหาที่เปรียบมิได้ ยิ่งใหญ่กว่าท้องฟ้า มหาสมุทรหลายเท่าเท่านัก

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยชิ้นนี้คณะผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกๆท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นาย ประสิทธิ์	ธวัชไพญญ์
นาย ศุภชัย	อภิรักษ์เมธาวงศ์
นาย อนุชา	สง่าแสง
นาย สุกรีช	กัตินขจร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.3 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 พื้นฐานของการเกิดความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	4
2.3 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน	10
2.3.1 โหลดเรโซแนนท์	10
2.3.2 อินเวอเตอร์	12
2.3.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอเตอร์เรโซแนนท์ชนิดอนุกรม	13
2.4 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนท์อนุกรม	18
2.5 สรุป	21
บทที่ 3 การวิเคราะห์หลักการการทำงานและการออกแบบวงจร	23
3.1 บทนำ	23
3.2 วงจร EMI Filter	24

3.3	ลักษณะวงจร EMI Filter	24
3.4	หลักการของวงจร EMI Filter	26
3.5	วงจรเรียงกระแส (Rectifier)	27
3.5.1	หลักการทำงาน	27
3.5.2	การออกแบบวงจรเรียงกระแส	33
3.5.3	การออกแบบไดโอด	34
3.5.4	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L_r)	35
3.6	อินเวอร์เตอร์	35
3.6.1	หลักการทำงาน	35
3.6.2	วงจรเดคโทม์	36
3.6.3	วงจรขับเคลื่อน (Gate Drives)	37
3.6.3	วงจรขับเคลื่อน (Gate Drives)	38
3.6.5	การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจากทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์จนถึงทางด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์	39
3.6.6	การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจากทางด้านอินพุทของแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจนถึงด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์	42
3.6.7	กำลังไฟฟ้าทางอินพุท P_{in} และเอาต์พุท P_o ประสิทธิภาพ η และค่าตัวประกอบกำลังทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า PF	42
3.6.8	รูปคลื่นการทำงานตามส่วนต่างๆของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อกับแรงดันไฟตรงจากวงจรเรียงกระแสที่ไม่ใส่ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน	43
3.6.9	การออกแบบวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์	45
3.7	ไอบีเจที (Insulate Gate Bipolar Transistor ; IGBT)	46
3.7.1	โครงสร้างของไอจีบีที	47
3.7.2	สถานะนำกระแส	48
3.7.3	สถานะหยุดนำกระแส	49
3.7.4	วงจรสมมูลของ IGBT	50
3.8	ชุดวงจรโพลคริโซแนนซ์	51
3.8.1	การออกแบบวงจร	52
3.8.2	วงจรควบคุม	55
3.8.3	วงจรป้องกันไฟรั่ว	57
3.9	พลังงานความร้อน	57
3.10	กระบวนการที่ปริมาตรคงที่	58

3.11 การถ่ายเทความร้อน	58
3.11.1 พื้นที่ผิว	58
3.11.2 แคลลอรี่	58
3.11.3 ความร้อนจำเพาะ	59
3.12 พลังงานและกำลังไฟฟ้า	60
บทที่ 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์	61
4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) PIC18F458	61
4.2 PIC	61
4.3 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit)	62
4.4 หน่วยความจำ	63
4.4.1 หน่วยความจำโปรแกรม	63
4.4.2 หน่วยความจำข้อมูลแรม	64
4.4.3 หน่วยความจำข้อมูลอีพรอม	64
4.5 รีจิสเตอร์ (register)	65
4.6 รีจิสเตอร์ตัวนับโปรแกรมหรือโปรแกรมเคาน์เตอร์ (PC)	65
4.7 สแต็คในไมโครคอนโทรลเลอร์	65
4.8 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	65
4.9 ความเร็วของ PIC	66
4.10 สถาปัตยกรรมของ PIC	66
4.11 สถาปัตยกรรมและโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของ PIC	68
4.12 Configuration word : รีจิสเตอร์กำหนดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC	72
4.13 โมดูลไทมเมอร์เคาน์เตอร์ของ PIC	74
4.13.1 Timer0	74
4.13.2 Timer1	74
4.13.3 Timer2	75
4.13.4 Timer3	76
4.13.5 Prescaler	76
4.13.6 วอตช์ด็อกไทมเมอร์ (Watchdog timer : WDT)	76
4.14 โมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกของ 18F458	77
4.14.1 หลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	77

4.14.2	CNCON รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก	78
4.14.3	โหมดการทำงานของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก	78
4.14.4	แรงดันอ้างอิงของโมดูลเปรียบเทียบแรงดัน	79
4.14.5	ส่วนเอาต์พุตของโมดูลเปรียบเทียบแรงดัน	80
4.14.6	ส่วนอินพุตอะนาล็อกของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	80
4.15	โมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงภายใน PIC18F458	81
4.16	การทำงานในโหมดเปรียบเทียบข้อมูล	82
4.16.1	การทำงานในโหมด PWM	83
4.16.2	คาบเวลาของสัญญาณ	84
4.16.3	การสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้โมดูล CCP1	85
4.16.4	การทำงานในโหมดตรวจจับสัญญาณ	86
4.17	การอินเทอร์รัปต์เบื้องต้น	87
4.17.1	การอินเทอร์รัปต์ในขณะที่ทำงานปกติ	87
4.17.2	การอินเทอร์รัปต์เมื่ออยู่ในโหมดสลีปหรือโหมดประหยัดพลังงาน	87
บทที่ 5	การสร้างวงจรเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ	88
5.1	บทนำ	88
5.2	การออกแบบและสร้างวงจรกำลัง	89
5.2.1	วงจรเรียงกระแส (Rectifier)	89
5.2.2	วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)	89
5.2.3	ชุดวงจรโพลครाइแมนซ์	89
5.3	การออกแบบและสร้างวงจรควบคุม	92
5.3.1	การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับกระแสอินพุต	92
5.3.2	การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับแรงดันอินพุต	92
5.3.3	การออกแบบและสร้างวงจรขับไอจีบีที	93
5.3.4	การออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์	96
5.3.5	การออกแบบและสร้างซอฟต์แวร์	98
5.4	การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร	103
5.4.1	วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์ และอื่นๆ	103
5.4.2	วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรขับ	105
บทที่ 6	การทดสอบและผลการทดสอบ	106
6.1	บทนำ	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดสอบเพื่อปรับค่าการทำงานของวงจรให้เหมาะสม	106
6.2.1 การทดสอบหาระยะ Gap ระหว่างขดลวดกับกันภาชนะ	106
6.2.2 การทดสอบหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ปรับปรุงกระแสด้านอินพุต	108
6.3 การทดสอบเพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่อง	123
6.3.1 การตรวจสอบรูปคลื่นตามส่วนต่างๆของวงจร	123
6.3.2 การตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่อง	126
6.4 การเปรียบเทียบค่าที่ทดสอบได้กับค่ามาตรฐาน	141
6.4.1 ภาชนะกันเบน	141
6.4.2 ภาชนะกันโค้ง	146
6.5 การเปรียบเทียบค่าของเตาเหนี่ยวนำกับเตาประเภทอื่น	148
6.5.1 ภาชนะกันเบน	148
6.5.2 ภาชนะกันโค้ง	153
บทที่ 7 วิจัยและพัฒนาเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ	157
7.1 จุดเด่นของโครงการ	158
7.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอในการปรับปรุง	159
7.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	159
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในภาชนะหุงต้ม ที่ความถี่ 30 kHz	9
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ ชนิดอนุกรมและขนาน	11
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์และรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ ในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน	12
ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนของการออกแบบจะต้องกำหนดคุณสมบัติการทำงานของ เตาหุงต้มก่อนโดยที่กำหนดไว้ มีดังต่อไปนี้	24
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ของสมการ v_{RL} และ i_o	41
ตารางที่ 3.3 สมการสำหรับ Mode I และ Mode II	41
ตารางที่ 3.4 สมการสำหรับ Mode III และ Mode IV	41
ตารางที่ 3.5 ความจุความร้อนจำเพาะของสารทางชนิด	59
ตารางที่ 4.1 ชนิดของ PIC	66
ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แต่ละตระกูล	67
ตารางที่ 5.1 ชนิดของของขดลวดเหนี่ยวนำและองค์ประกอบขดลวดเรโซแนนซ์	91
ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะกั้นแบบวัสดุ Stainless Steel 18-8	109
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะกั้นแบบวัสดุ Stainless Steel 18-10	111
ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะกั้น ใ้กิ่งวัสดุ Stainless Steel 18-10	113
ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะกั้นแบบวัสดุ Stainless Steel 18-8	116
ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะกั้นแบบวัสดุ Stainless Steel 18-10	119
ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะกั้น ใ้กิ่งวัสดุ Stainless Steel 18-10	121
ตารางที่ 6.7 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบบชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.	128
ตารางที่ 6.8 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบบชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.	128

ตารางที่ 6.9 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.	128
ตารางที่ 6.10 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบนชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm	128
ตารางที่ 6.11 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบนชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24 cm.	128
ตารางที่ 6.12 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm	131
ตารางที่ 6.13 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm	132
ตารางที่ 6.14 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.	132
ตารางที่ 6.15 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm.	133
ตารางที่ 6.16 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24 cm.	133
ตารางที่ 6.17 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.	136
ตารางที่ 6.18 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นโค้งชนิดอลูมิเนียม ขนาด 36 cm.	136
ตารางที่ 6.19 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นโค้งชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.	137
ตารางที่ 6.20 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของภาชนะกั้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.	137
ตารางที่ 6.21 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของภาชนะกั้นโค้งชนิดอลูมิเนียม ขนาด 36 cm	138
ตารางที่ 6.22 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของภาชนะกั้นโค้งชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.	138
ตารางที่ 6.22 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.	149
ตารางที่ 6.23 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.	150
ตารางที่ 6.24 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm	151
ตารางที่ 6.25 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.	154

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการให้ความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง	4
รูปที่ 2.2 วงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำกับภาชนะ	5
รูปที่ 2.3 อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะ	6
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของภาชนะหุงต้ม	8
รูปที่ 2.5 เส้นกราฟแสดงการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะจากตารางที่ 2.1	9
รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง	10
รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์โร โชนแนชชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์	13
รูปที่ 2.8 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของอินเวอร์เตอร์โร โชนแนชชนิดฟูลบริดจ์	13
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตซ์ต่างๆ	14
รูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตซ์ต่างๆ	14
รูปที่ 2.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ	15
รูปที่ 2.12 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ	15
รูปที่ 2.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวน ไซเคิลต่างๆ	17
รูปที่ 2.14 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวน ไซเคิลต่างๆ	18
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง	18
รูปที่ 3.1 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ	23
รูปที่ 3.2 ลักษณะการต่อ LC ฟิวเตอร์เพื่อลดสัญญาณรบกวน	25
รูปที่ 3.3 ลักษณะการทำงานของวงจร EMI Filter	26
รูปที่ 3.4 ชนิดของวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส แบบต่าง	27
รูปที่ 3.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อ ไม่ใส่ตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันเอาต์พุท	29
รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อ ใส่ตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันเอาต์พุท	29
รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และรูปคลื่นกระแส แรงดันในการวิเคราะห์หลักการ	30
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่า DPF ,PF ของกระแสอินพุท เมื่อค่าคาปาซิเตอร์เปลี่ยนไป	32

รูปที่ 3.9 กราฟแสดงค่า THDi ของกระแสอินพุทเมื่อค่าพาซีเตอร์เปลี่ยนไป	32
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสด้านเข้าวงจรเรียงกระแส ขณะมีการทำงานของ วงจรอิน-เวอร์เตอร์	33
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสด้านเข้าวงจรอิน-เวอร์เตอร์ ขณะมีการทำงานของ วงจรอินเวอร์เตอร์	33
รูปที่ 3.12 วงจรเรียงกระแสที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้	34
รูปที่ 3.13 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดกึ่งบริดจ์	36
รูปที่ 3.14 สัญลักษณ์ขั้วเกท S_1 และ S_2 ที่มีการประวิงเวลา	36
รูปที่ 3.15 วงจรแยกกราวด์และวงจรขั้วเกทสำหรับควบคุม S_1 และ S_2	37
รูปที่ 3.16 วงจรเตาहुงัด้มเหนี่ยวนำความถี่สูงในการวิเคราะห์หลักการทำงาน	38
รูปที่ 3.17 การหาค่าเฉลี่ยแรงดันไซน์เต็มคลื่นในแต่ละช่องย่อย	39
รูปที่ 3.19 โหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วงค่าเฉลี่ย	41
รูปที่ 3.19 รูปคลื่นและการทำงานของวงจรเมื่อ $f_s = f_r$	42
รูปที่ 3.20 รูปคลื่นและการทำงานของวงจรเมื่อ $f_s > f_r$	43
รูปที่ 3.21 ลักษณะ โมดูล ไอจีบีทีและแผ่นระบายความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย	45
รูปที่ 3.22 สัญลักษณ์และการเรียกชื่อขาของ IGBT	46
รูปที่ 3.23 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT	47
รูปที่ 3.24 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส	47
รูปที่ 3.25 วงจรสมมูลของ IGBT	49
รูปที่ 3.26 วงจรเรโซแนนซ์และโฮล	50
รูปที่ 3.27 รูปทรงของขดลวดเหนี่ยวนำของภาชนะกั้นโค้ง และแบน	52
รูปที่ 3.28 วงจรขดลวดเหนี่ยวนำของภาชนะกั้นโค้ง และแบน	53
รูปที่ 3.29 ฟังก์ชันการหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์	54
รูปที่ 3.30 วงจรควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	55
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักเบื้องต้นของ ไมโครคอนโทรลเลอร์	61
รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบหลักของชิพไมโครคอนโทรลเลอร์	62
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมการทำงานพื้นฐานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สถาปัตยกรรม แบบฮาร์วาร์ด	67
รูปที่ 4.5 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458	69
รูปที่ 4.6 ชิพตระกูล PIC18FXXX 40 ขา	70
รูปที่ 4.7 กรณีการใช้คริสตัลเป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา	71
รูปที่ 4.8 กรณีการต่อ RC จากภายนอกเพื่อกำหนดความถี่ในโหมดสัญญาณนาฬิกา แบบ RC และ RCIO	72
รูปที่ 4.9 กรณีการต่อเพื่อใช้โหมดสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก	73
รูปที่ 4.10 ไดอะแกรมของวอตซ์ค็อกไทเมอร์	75

รูปที่ 4.11	ไดอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของวงจรเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก	76
รูปที่ 4.12	แสดงไดอะแกรมของการทำงานในโหมดต่างๆ ของ โมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458	78
รูปที่ 4.12	วงจรส่วนเอาต์พุตของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก	79
รูปที่ 4.13	วงจรว่านอินพุตของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก	80
รูปที่ 4.14	ไดอะแกรมการทำงานของโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงภายใน PIC18F458	80
รูปที่ 4.15	ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล CCP ในโหมดเปรียบเทียบข้อมูล	81
รูปที่ 4.16	ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล CCP เพื่อสร้างสัญญาณ PWM	82
รูปที่ 5.1	วงจรถักและวงจรควบคุมของหุงต้มเหนี่ยวนำ	87
รูปที่ 5.4	ขั้นตอนการออกแบบขดลวดสำหรับหม้อก้นแบน	88
รูปที่ 5.5	ขั้นตอนการออกแบบขดลวดสำหรับหม้อก้นโค้ง	90
รูปที่ 5.6	บล็อกไดอะแกรมและวงจรใช้งานจริงของวงจรตรวจจับกระแสอินพุต	91
รูปที่ 5.7	บล็อกไดอะแกรมและวงจรใช้งานจริงของวงจรตรวจจับแรงดันอินพุต	92
รูปที่ 5.8	ลักษณะการจับไอจีบีทีแต่ละตัว	93
รูปที่ 5.9	วงจรจับไอจีบีทีแต่ละตัว	93
รูปที่ 5.10	สัญญาณควบคุมด้านอินพุตของไอซี HCPL316	94
รูปที่ 5.11	วงจรถูกคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	95
รูปที่ 5.12	วงจรรีบค่าและแสดงผล	96
รูปที่ 5.13	ขบวนการของโปรแกรมหลัก	97
รูปที่ 5.14	ขบวนการของโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM	100
รูปที่ 5.15	หลักการสร้างสัญญาณ PWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์	100
รูปที่ 5.16	วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์	103
รูปที่ 5.17	วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรจับ	104
รูปที่ 6.1	ค่ากำลังงานเอาต์พุตเมื่อระยะ Gap เปลี่ยนแปลง ของภาชนะชนิดก้นแบน วัสดุแบบ Stainless Steel 8-18	106
รูปที่ 6.2	ค่ากำลังงานเอาต์พุตเมื่อระยะ Gap เปลี่ยนแปลง ของภาชนะชนิดก้นแบน วัสดุแบบ Stainless Steel 18-10	106
รูปที่ 6.3	ค่ากำลังงานเอาต์พุตเมื่อระยะ Gap เปลี่ยนแปลง ของภาชนะชนิดก้นโค้ง วัสดุแบบ Stainless Steel 18-10	107
รูปที่ 6.6	ขบวนการออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำ	115
รูปที่ 6.5	กระแสและแรงดันอินพุตของภาชนะก้นแบน	122
รูปที่ 6.6	กระแสและแรงดันเอาต์พุตของภาชนะก้นแบน	123
รูปที่ 6.8	กระแสและแรงดันเอาต์พุตของภาชนะก้นโค้ง	125
รูปที่ 6.9	ชนิดของภาชนะที่จะใช้ทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงาน	127
รูปที่ 6.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้ากับกำลังงาน อินพุตเมื่อภาชนะเป็น Stainless Steel แบบต่างๆ	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง THD _r กับกำลังงานอินพุตเมื่อภาชนะเป็น Stainless Steel แบบต่างๆ	129
รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น	133
รูปที่ 6.13 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100°C	133
รูปที่ 6.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพพร้อมกับภาชนะชนิดต่างๆ	134
รูปที่ 6.15 ชนิดของภาชนะที่จะใช้ทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงาน	135
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้ากับกำลังงานอินพุต	136
รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง THD _r กับกำลังงานอินพุต	137
รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น	139
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100°C	139
รูปที่ 6.20 กราฟแสดงประสิทธิภาพพร้อม	140
รูปที่ 6.21 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.	141
รูปที่ 6.22 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.	141
รูปที่ 6.25 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.	142
รูปที่ 6.26 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.	142
รูปที่ 6.25 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.	143
รูปที่ 6.26 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.	143
รูปที่ 6.27 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.	144
รูปที่ 6.28 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.	144
รูปที่ 6.29 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.	145
รูปที่ 6.30 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm. ขณะทำงานที่ 300 วัตต์	145
รูปที่ 6.31 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm. ขณะทำงานที่ 600 วัตต์	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.32 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นไค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm. ขณะทำงานที่ 1200 วัตต์	146
รูปที่ 6.33 เตาไฟฟ้าที่จะนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ	147
รูปที่ 6.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นของเตาทั้ง 2 ชนิด	151
รูปที่ 6.35 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100 °C	151
รูปที่ 6.36 กราฟแสดงประสิทธิภาพโดยรวม	152
รูปที่ 6.37 เตาไฟฟ้าที่จะนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ	152
รูปที่ 6.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นของเตาทั้ง 2 ชนิด	154
รูปที่ 6.39 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100 °C	154
รูปที่ 6.40 กราฟแสดงประสิทธิภาพโดยรวม	155



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนด้วยวิธีการเหนี่ยวนำความถี่สูง ขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ โดยที่เตาหุงต้มเหนี่ยวนำนั้นจะถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้กับภาชนะก้นโค้งและก้นแบน โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนควบคุมการทำงานทั้งหมด

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ได้มีการพัฒนามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในปัจจุบันนี้การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่นเตาหลอมโลหะ เตาชุบแข็งที่ผิวโลหะ และเริ่มมีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ภายในครัวเรือน เช่นเตาอบ เตาไฟฟ้าเป็นต้น

เตาไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ทั่วไปนั้นจะให้ความร้อนด้วยสวดร้อน เมื่อทำการใช้งานเสร็จแล้วอาจจะเกิดอันตรายต่อผู้ใช้ เพราะยังคงมีความร้อนที่อุณหภูมิสูงอยู่ ผู้ใช้จึงจำเป็นต้องระมัดระวังในการใช้เตาไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเป็นเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Cooking) ขึ้น โดยอาศัยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อให้ใช้ได้ทั้งหม้อและกระทะจึงสะดวกต่อการนำไปใช้ในครัวเรือน และเมื่อทำการใช้เสร็จแล้วนั้นเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่เกิดอันตรายต่อผู้ใช้เนื่องจากไม่มีความร้อนที่เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เตาไฟฟ้าโดยให้ความร้อน โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวดด้วยกระแสและแรงดันที่ความถี่สูงจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวนในหม้อหรือกระทะ ทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณก้นหม้อหรือกระทะ โดยทั่วไปการให้ความร้อนจากขดลวดเหนี่ยวนำ ปกติการควบคุม (Control) จะเป็นวงจร Half-Bridge หรือ Full-Bridge Inverter ที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics Device) ตามความเหมาะสมโดยอาศัยการควบคุมความถี่ (Frequency Control Based Power Control) เป็นหลัก

การควบคุมด้วยความถี่สูงนั้น จะสามารถลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้ และต้องการกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งจะใช้อิพบีเจที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT) เป็นสวิตช์และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งการกำหนดสัญญาณของชุดควบคุมที่ใช้หลักการ PWM มาขับ IGBT

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง ซึ่งอาศัยการเกิดกระแสไหลวนที่ก้นภาชนะหุงต้ม ทำให้อาหารนั้นร้อนหรือเดือดได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว โดยใช้หลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่ภาชนะวางอยู่ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ก้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาชนะ ทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่ก้นภาชนะเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นภาชนะหุงต้ม และถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารในภาชนะ ทำให้อาหารนั้นร้อนและเดือดในที่สุด ซึ่งในทางทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้า การเกิดกระแสไหลวนและฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) จะเป็นกำลังสูญเสียในเครื่องจักรกล แต่ในทางกลับกันกระแสไหลวนจะนำมาใช้ประโยชน์ในการทำให้ความร้อนกับอาหาร ถ้ากระแสไหลวนยิ่งมากก็จะทำให้อาหารนั้นร้อนในระยะเวลาสั้น

1.3 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

1.3.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้า เมื่อตัวแปรต่างๆ มีการปรับเปลี่ยนไปไม่ว่าจะเป็นจำนวนเส้นลวดตีเกลียวของขดลวดเหนี่ยวนำ ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม และคาปาซิเตอร์ ซึ่งตัวแปรต่างๆ เหล่านี้จะเป็นองค์ประกอบในการออกแบบเตาหุงต้มเหนี่ยวนำที่สำคัญ

1.3.3 สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เช่น อิมพีแดนซ์ Quality Factor มุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสเอาต์พุต และกำลังไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ที่ปรับเปลี่ยนไป

1.3.4 สามารถรู้หลักการเรโซแนนซ์การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และการวิเคราะห์การทำงานของระบบ

1.3.5 สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางด้านอินพุทแหล่งจ่ายการไฟฟ้า และเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์ ของแรงดันดีซีคงที่และไม่คงที่ในเตาหุงต้มเหนี่ยวนำได้ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งเรื่องได้ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงและหลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ

บทที่ 3 การวิเคราะห์หลักการทำงานและการออกแบบวงจร คุณสมบัติทางไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของส่วนต่างๆ ของวงจรของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ คุณสมบัติอินพุทและเอาต์พุทของวงจรเรียงกระแส (V_d) คงที่และไม่คงที่ในเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ และวงจรอินเวอร์เตอร์ และการป้องกันต่างๆ ของวงจร เพื่อทำการออกแบบส่วนต่างๆของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลที่จะนำไปใช้งานในส่วนของเตาหุงต้มไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

บทที่ 5 เป็นการทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำโดยการทดสอบโดยใช้ภาชนะหุงต้มแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเตาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูง และเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำ
- 1.5.2 ศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์ โซแนนท์แบบต่างๆที่สามารถนำมาใช้กับเตาหุงต้มเหนียวนำ
- 1.5.3 ออกแบบวงจรรวมและขดลวดเหนียวนำ
- 1.5.4 ทดสอบพร้อมทั้งเก็บข้อมูล เพื่อพัฒนาระบบให้ดีขึ้น
- 1.5.5 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลให้สอดคล้องกับทฤษฎี
- 1.5.6 เขียนและพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำเครื่องต้นแบบที่ได้จากการวิจัย นำไปพัฒนาผลิตเพื่อใช้ในครัวเรือน และลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ



บทที่ 2

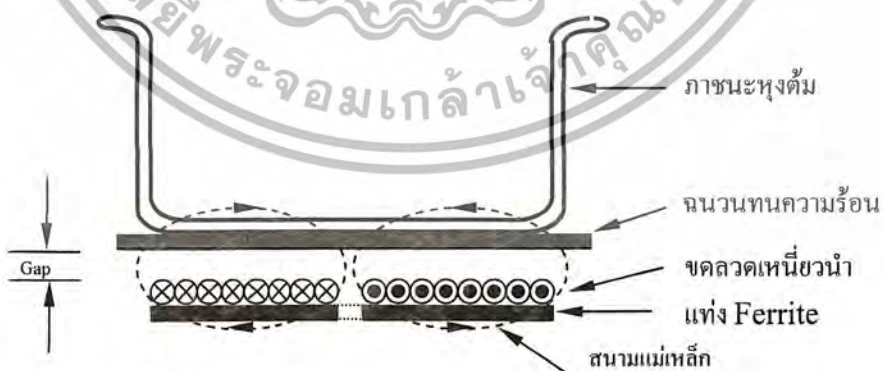
ทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำความถี่สูง การพิจารณาวงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำในลักษณะของหม้อแปลง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ชุดโพลทฤษฎีหุงต้มได้ง่ายขึ้น สำหรับโพลทฤษฎีหุงต้มที่ใช้วัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นวัสดุของภาชนะหุงต้มแต่ละชนิดจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาและการออกแบบลักษณะการพันขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้เหมาะสมกับโพลทฤษฎีหุงต้มนั้นๆ และการพิจารณาหลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ซึ่งจะพิจารณาในส่วน ของโครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำจะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส เปรียบเทียบวงจรอินเวอร์เตอร์ ฟูลบริดจ์และฮาร์ฟบริดจ์ เปรียบเทียบ โหลดรีโซแนนซ์ทั้งแบบอนุกรมและขนาน และการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวิธีต่างๆ กัน

2.2 พื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง โดยอาศัยการแสโพลทฤษฎีในภาชนะหุงต้ม ทำให้หุงต้มได้เร็วในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะมีหลักการพิจารณาเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อหาความสัมพันธ์และความต้านทานเทียบเท่าต่างๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุของภาชนะแต่ละชนิด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาเลือกใช้ภาชนะหุงต้มให้เหมาะสมกับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำต่อไป

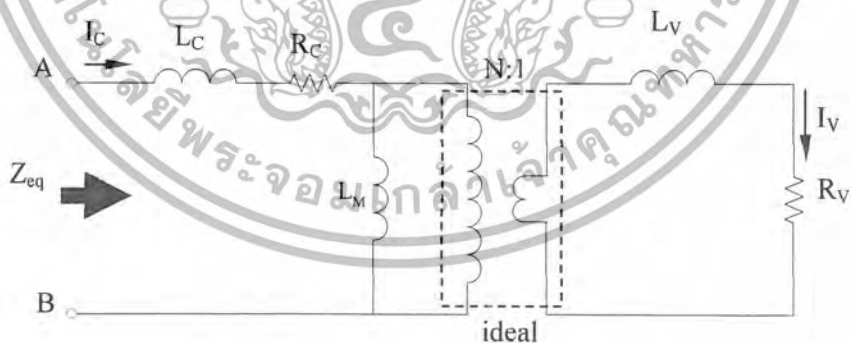


รูปที่ 2.1 หลักการให้ความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

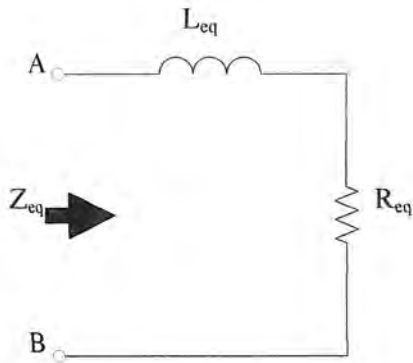
หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จากรูปที่ 2.1 เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้อุปกรณ์บรรจุ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวค้อง (Magnetic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flux) กับอุปกรณ์บรรจุ ถ้าอุปกรณ์บรรจุเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro Magnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์บรรจุจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ในอุปกรณ์บรรจุเป็นเส้นทางปิด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นของภาชนะ และจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ภายในภาชนะ ทำให้น้ำเดือดได้ในที่สุด ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ จะไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะ ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน เตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้จะมีประสิทธิภาพในการหุงต้มสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาชนะจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง โดยสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.2 โดยภาชนะทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวดเพียง 1 รอบ โดยมี Leakage Inductance ของภาชนะ L_V และความต้านทานของภาชนะ R_V ส่วนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ สามารถแทนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมี Leakage Inductance ของขดลวดเหนี่ยวนำ L_C ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ R_C และ Magnetizing Inductance L_M ซึ่งมีค่าน้อย และเมื่อรวม R_V และ L_V ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม Z_{eq} ประกอบด้วย R_{eq} และ L_{eq} ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้น ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาชนะนี้สามารถเขียนแทนด้วยวงจรเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์เทียบเท่า L_{eq} และความต้านทานเทียบเท่า R_{eq}



รูปที่ 2.2 วงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำกับภาชนะ



รูปที่ 2.3 อิมพีแดนซ์เทียบเท่าของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาระ

ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาระสามารถเขียนแทนด้วยวงจรรูปเทียบเท่า ซึ่งประกอบด้วย อินดักแตนซ์เทียบเท่า และความต้านทานเทียบเท่าสามารถหาค่าได้ดังสมการข้างล่าง

$$R_{eq} = R_C + N^2 R_V \quad (2.1)$$

เมื่อ $R_{vp} = N^2 R_C$ จะได้ $R_{eq} = R_C + R_{vp} \quad (2.2)$

$$L_{eq} = L_C + N^2 L_V \quad (2.3)$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ
 R_C คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหรือขดลวดเหนี่ยวนำ
 R_V คือ ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิหรือ โหลดภาระ
 L_C คือ Leakage Inductance ทางด้านปฐมภูมิ
 L_V คือ Leakage Inductance ทางด้านทุติยภูมิ
 R_{vp} คือ ความต้านทานทางด้านปฐมภูมิของ โหลดภาระหุงต้ม

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$P_C = I_C^2 R_C \quad (2.4)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในโหลดภาระหุงต้มมีค่าเท่ากับ

$$P_V = I_V^2 R_V \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาทางด้านปฐมภูมิจะได้

$$P_V = I_V^2 R_{vp} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก $I_V = N I_C$ (2.7)

โดยที่ I_C คือ กระแสในโพลคาขนะหุงต้ม
 I_V คือ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำ

ดังนั้น ประสิทธิภาพของโพลคอปกรณ์ภาชนะสามารถหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_V}{P_V + P_C} \quad (2.8)$$

$$= \frac{I_V^2 R_V}{I_V^2 R_V + I_C^2 R_C} \quad (2.9)$$

$$= \frac{I_V^2 R_V}{\left[\frac{I_V^2}{N^2} \left[R_V N^2 \right] + I_C^2 R_C \right]} \quad (2.10)$$

$$= \frac{I_C^2 R_{VP}}{\left[I_C^2 \left[R_{VP} \right] + I_C^2 R_C \right]} \quad (2.11)$$

$$= \frac{R_{VP}}{R_{VP} + R_C} \quad (2.12)$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{R_C}{R_{VP}}} \quad (2.13)$$

ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยกระแสไหลวนในโพลคาขนะหุงต้มที่บริเวณชั้นผิวนอกของภาชนะหุงต้มที่มีความลึกเท่ากับ δ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของภาชนะหุงต้มดังสมการ

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

โดยที่ ρ คือ สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะ ($\Omega \cdot m$)
 f คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)
 μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

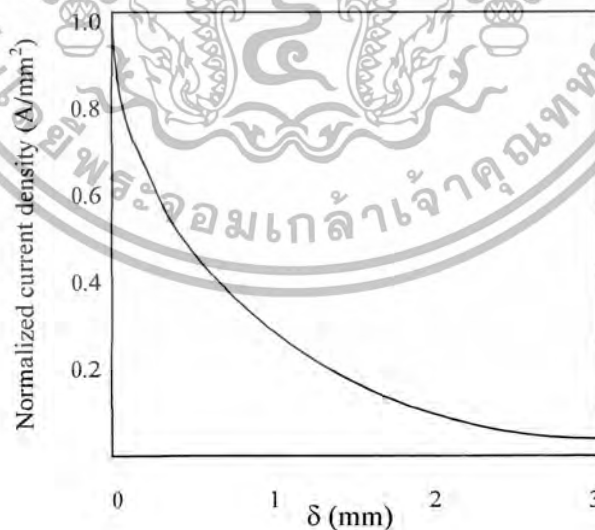
ดังนั้นความต้านทานที่ผิวของโพลีเอทิลีนสูง R_V มีค่าดังนี้

$$R_V = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (2.15)$$

แทนค่าสมการ (2.15) ใน (2.5) จะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลีเอทิลีนสูง P_V ดังนี้

$$P_V = I_V^2 R_V = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} (NI_C)^2 \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (2.16)$$

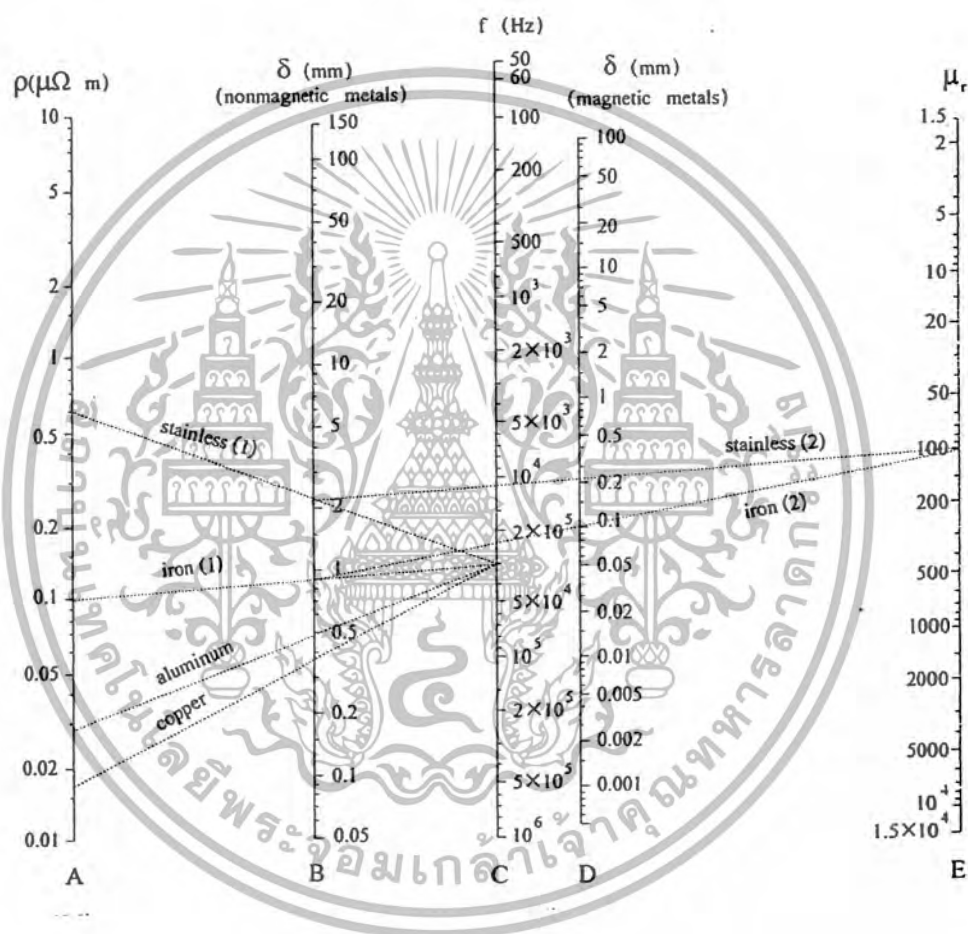
จากสมการ (2.15) จะเห็นได้ว่าความต้านทานของโพลีเอทิลีนสูง R_V จะแปรผันโดยตรงกับสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ ของโพลีเอทิลีนสูง ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ_r และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ f ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ จากสมการ (2.16) จะเห็นว่า การเพิ่มของเพาเวอร์เอาต์พุต P_V ของโพลีเอทิลีนสูงสามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่ f ของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำและแอมแปร์-เทอรัน $N \cdot I_c$ ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะความลึกจากผิวด้านนอกของโพลีเอทิลีนสูง จะเห็นได้ว่ากระแสมีความหนาแน่นสูงสุดที่ผิวด้านนอกของโพลีเอทิลีนสูงและจะลดลงเมื่อระยะความลึกมากขึ้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของโพลีเอทิลีนสูง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในภาชนะหุงต้มที่ความถี่ 30 kHz

Material	iron	stainless	aluminum	copper
Resistivity ($\Omega \cdot m$): ρ	9.8×10^{-8}	60×10^{-8}	28×10^{-8}	1.7×10^{-8}
Relative permeability: μ_r	100	100	1	1
Skin depth (mm) : δ	0.909	0.225	0.486	0.378
Surface resistivity (Ω): R_V	11×10^{-4}	27×10^{-4}	0.575×10^{-4}	0.448×10^{-4}



กรณีใช้วัสดุสาร Non Magnetic

ลากเส้นจากตำแหน่งบนสเกล ρ : A ไปยังตำแหน่งบนสเกล f : C และอ่านค่าที่ได้บนสเกล ρ : B

กรณีใช้วัสดุสาร Ferro Magnetic

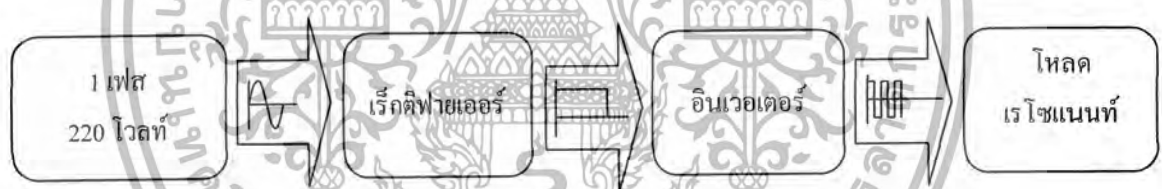
ลากเส้นระหว่างตำแหน่งบนสเกล ρ : A และสเกล f : C จะได้จุดตัดกับตำแหน่งบนสเกล ρ : B จากนั้นลากเส้นระหว่างจุดนี้กับตำแหน่งบนสเกล μ_r : E จะได้จุดตัดใหม่ที่ตำแหน่งบนสเกล D อ่านค่า δ ที่ได้ตำแหน่งจุดตัดนี้

รูปที่ 2.5 เส้นกราฟแสดงการหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะจากตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุ้มด้วยวัสดุต่างๆ กัน ที่ความถี่ 20 kHz จะเห็นได้ว่า วัสดุที่ทำด้วยสาร non-magnetic เช่น อลูมิเนียมและทองแดง มีค่าสภาพความต้านทาน ρ และค่าซึมซาบแม่เหล็ก μ_r ต่ำมากเมื่อเทียบกับสแตนเลสและเหล็ก ซึ่งทำด้วยสาร ferro-magnetic สามารถกำหนดได้ตามสมการที่ (2.16) คือเพิ่มความถี่ในขดลวดเหนี่ยวนำและเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

2.3 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

สำหรับโครงสร้างของเตาหุ้มเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.6 รายละเอียดประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับชุดเรกติไฟเออร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อกรองไฟกระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูง โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์เพื่อจ่ายให้กับชุดโพลดิโธแนนท์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของเตาหุ้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.3.1 โพลดิโธแนนท์

สำหรับโพลดิโธแนนท์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไป เช่น เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องหลอมโลหะ เตาหุ้มเหนี่ยวนำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องเชื่อมความถี่สูงจะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ คือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์ เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ (Zero Current Switch : ZCS) หรือ สวิตช์ต่อวงจรที่แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switch : ZVS) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนซ์ คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนซ์กระแสในวงจรมีค่ามาก ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่ามากด้วย สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ที่มีค่า Q สูง ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูง และ L-C ในวงจรเรโซแนนซ์ที่เลือกใช้ก็เช่นกัน จะต้องมีความถี่ขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและชนิดขนาน ทั้งสองชนิดนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 และมีโครงสร้างของจอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์โพลดิโธแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดอนุกรมจะใช้แหล่งจ่ายชนิดแรงดันคงที่ (Constant Voltage Source) เนื่องจากต้องใช้คาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อกรองแรงดันให้เรียบแล้วจ่ายให้กับอิน-เวอเตอร์ สำหรับลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นสแควร์และกระแสจะเป็นรูปคลื่นซายน์ ส่วนอินเวอร์เตอร์โพลครโซแนนซ์ขนาน จะมีลักษณะที่ตรงข้ามกันคือ จะเป็นชนิด

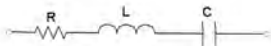
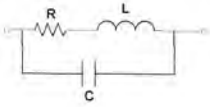

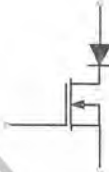


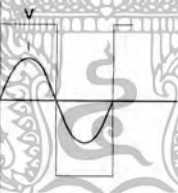
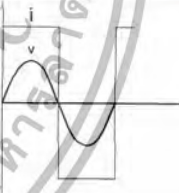
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์โพลครโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

วงจรอินเวอร์เตอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
เรโซแนนซ์อนุกรม	<ul style="list-style-type: none"> - โครงสร้างง่ายและราคาถูก - สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์โดยไม่ต้องมีการปรับแรงดัน - กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับความคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโพลครโซแนนซ์จะเปิดวงจรออกไม่ได้ - ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โพลครได้ - ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่สวิตซ์ให้เลื่อนห่างออกจากความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ก่อเป็นซายน์ ซึ่งมีผลให้มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นตามมา
เรโซแนนซ์ขนาน	<ul style="list-style-type: none"> - ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์วงจรโพลครสามารถเปิดวงจรออกได้ - สามารถทนการลัดวงจรที่โพลครได้ - อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่า Peak ングที่ ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ แต่ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตซ์ควบคุม - จำเป็นต้องมี Choke เนื่องจากเป็น Constant Current - มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมี Choke และวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุทให้กับอินเวอร์เตอร์

แหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) เนื่องจากต้องใช้อินดักเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อกรองกระแสให้เรียบแล้วจ่ายให้กับอินเวอเตอร์ ส่วนลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นซายน์ในขณะที่รูปคลื่นกระแสจะเป็นรูปสแควร์ ในกรณีเดาหุงต้มเหี่ยวเวลานั้นเหมาะที่จะใช้กับวงจรอิน-เวอเตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม เนื่องจากต้องการกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก วงจรควบคุมไม่ซับซ้อน และมีขนาดเล็กเหมาะที่จะใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

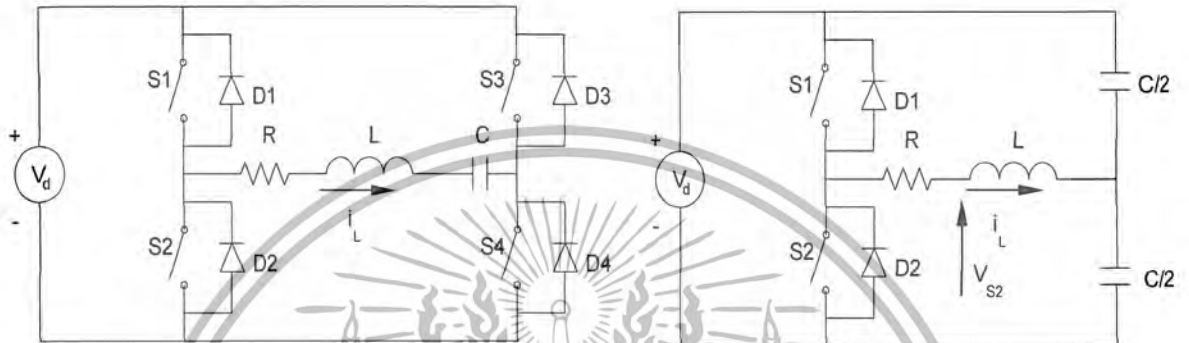
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์และรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์โวลเทจโหมดชนิดอนุกรมและขนาน

Inverter	Series Resonant	Parallel Resonant
Load		
Switch		
Source		
Output Waveform		

2.3.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จากที่กล่าวมาแล้วโหลดเตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้จะเป็นวงจรโวลเทจโหมดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม โดยมีวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรโวลเทจโหมดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมนี้ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และฮาร์ฟบริดจ์ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 2.7 (a) และ 2.7(b) ตามลำดับ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 2.7 (a) จะมีคู่สวิตช์ S_1, S_4 และ S_2, S_3 ทำงานสลับกันเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เมื่อวัดแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ และกระแสไหลผ่านโหลด (i_L) เป็นรูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.7 (a) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาร์ฟบริดจ์ดังรูปที่ 2.7 (b) ทำหน้าที่เหมือนกับฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แต่จะมีสวิตช์ S_1 และ S_2 ทำงานสลับกัน เมื่อวัดแรงดันตกคร่อม

สวิทช์ (V_{S2}) จะได้ค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ $+V_d$ และค่าแรงดันต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด (i_L) เป็นรูปคลื่นซายน์ดังรูปที่ 2.7 (b) จะเห็นได้ว่าวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เป็น 4 เท้าตัว จะเห็นได้ว่าฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ให้กำลังไฟฟ้าได้มาก ซึ่งจะต้องสามารถรับแรงดันและกระแสที่มีปริมาณมากได้ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์กับกรณีเตาหุงต้ม โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำนี้จะถูกจำกัดเนื้อที่ของแผ่นขดลวดให้มีขนาดเท่ากับกันของภาชนะในครัวเรือน



(a) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์

(b) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์



(a) อินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์

(b) อินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์

รูปที่ 2.8 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์

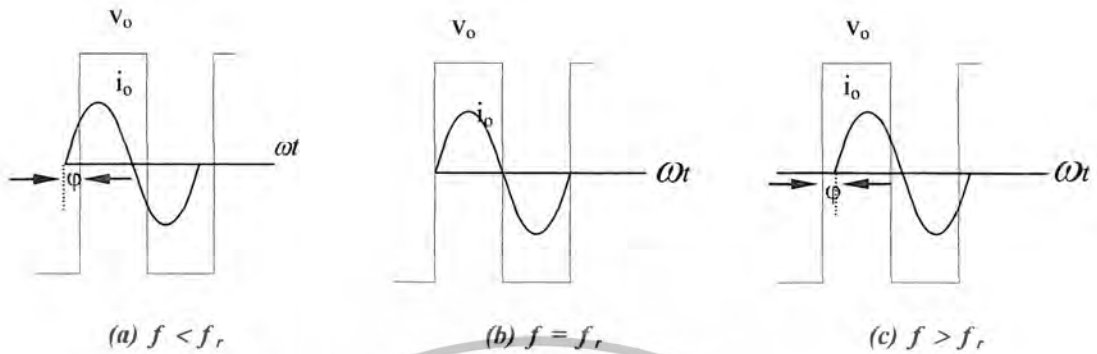
2.3.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม สามารถควบคุมได้ 3 แบบ คือ

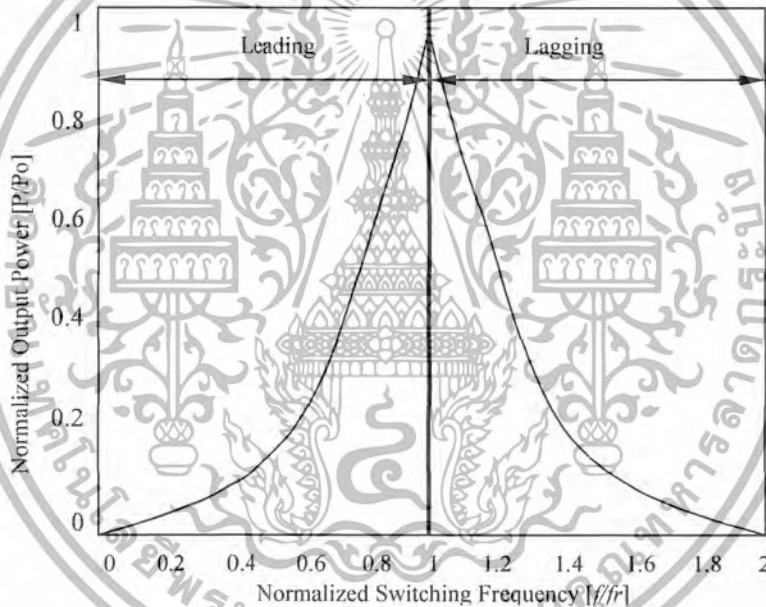
- 1) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่
- 2) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift
- 3) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Pulse-Density-Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.1 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับความถี่ : f



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตซ์ต่างกัน

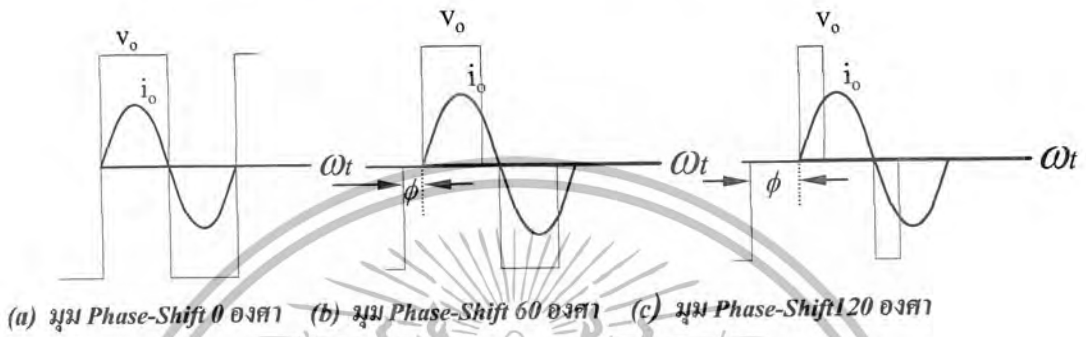


รูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้เอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตซ์ต่างกัน

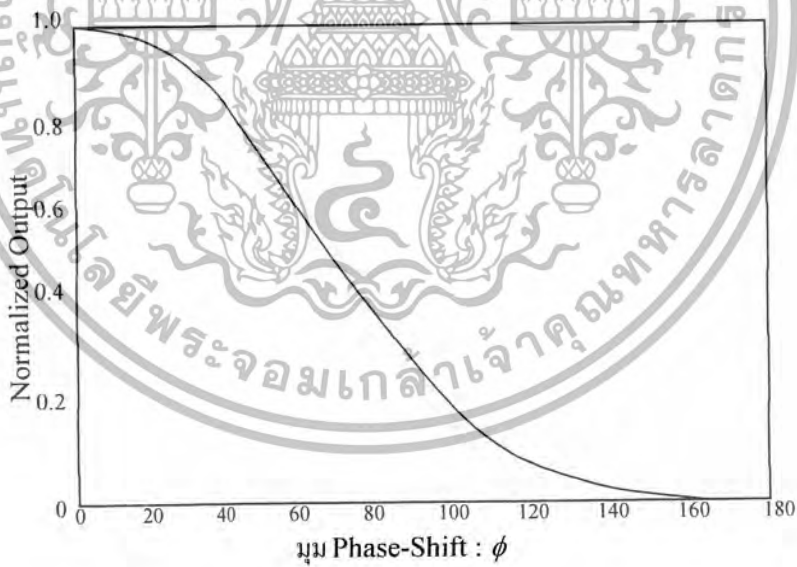
การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้ในกรณีนี้ สามารถทำได้โดยปรับความถี่สวิตซ์ของวงจรอิน-เวอเตอร้ โดยจะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่โหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สวิตซ์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ดังรูปที่ 2.9 (a) และรูปที่ 2.9 (c) จะได้กระแสที่มีปริมาณสูงสุด ดังนั้น เมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้เอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์กับค่าความความถี่สวิตซ์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ และจะได้กำลังไฟฟ้ลดต่ำลงที่ความถี่สวิตซ์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ การควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับความถี่นี้จะมีข้อดีคือ ระบบควบคุมไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัด คือจะมีการสูญเสียที่ตัวสวิตซ์และเมื่อปรับความถี่สวิตซ์ให้มี

ค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้กระแสเพิ่มขึ้นจากลักษณะคลื่นซายน์มากขึ้น ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นตามมาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ค่า Q ของวงจรเร-โซแนนซ์มีค่าต่ำลง

2.3.3.2 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift : ϕ



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ

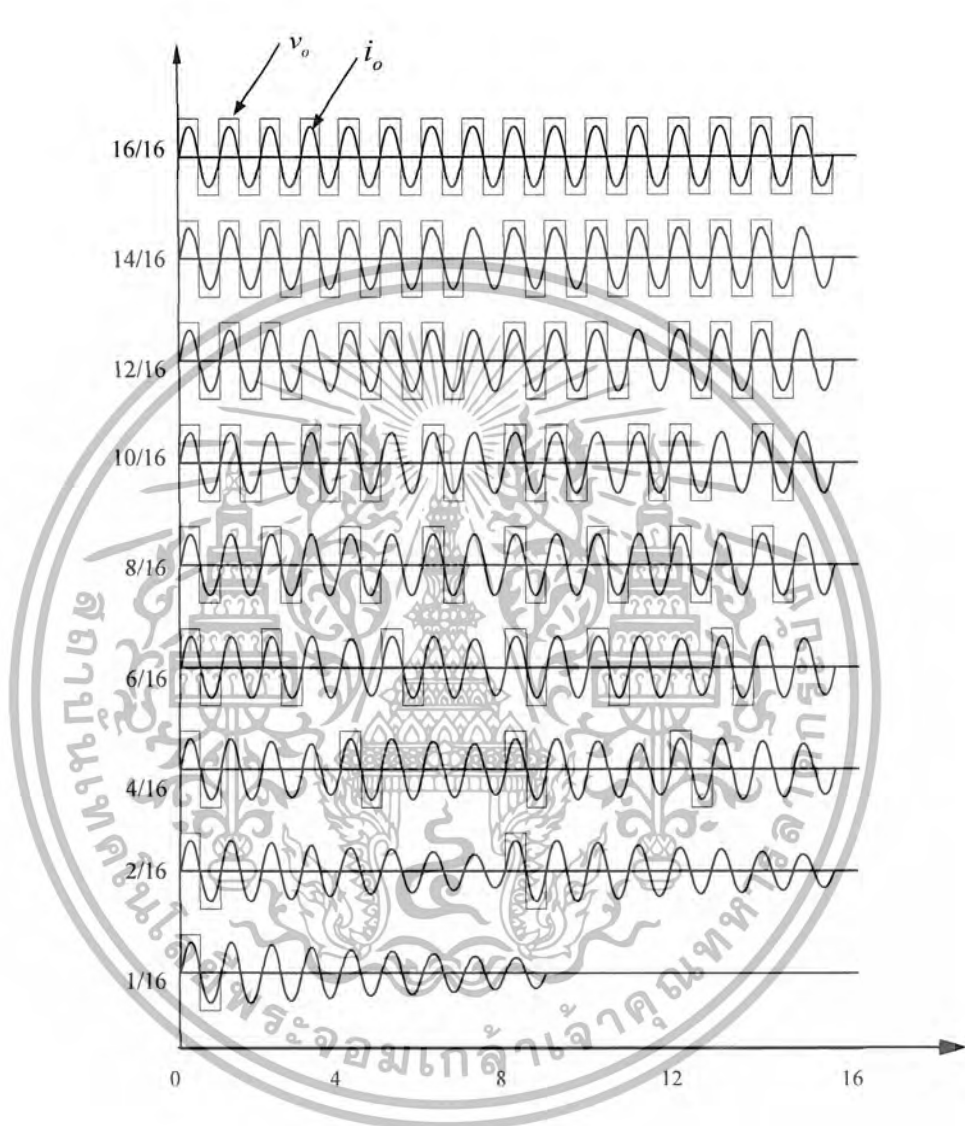


รูปที่ 2.12 กำลังไฟฟ้เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ

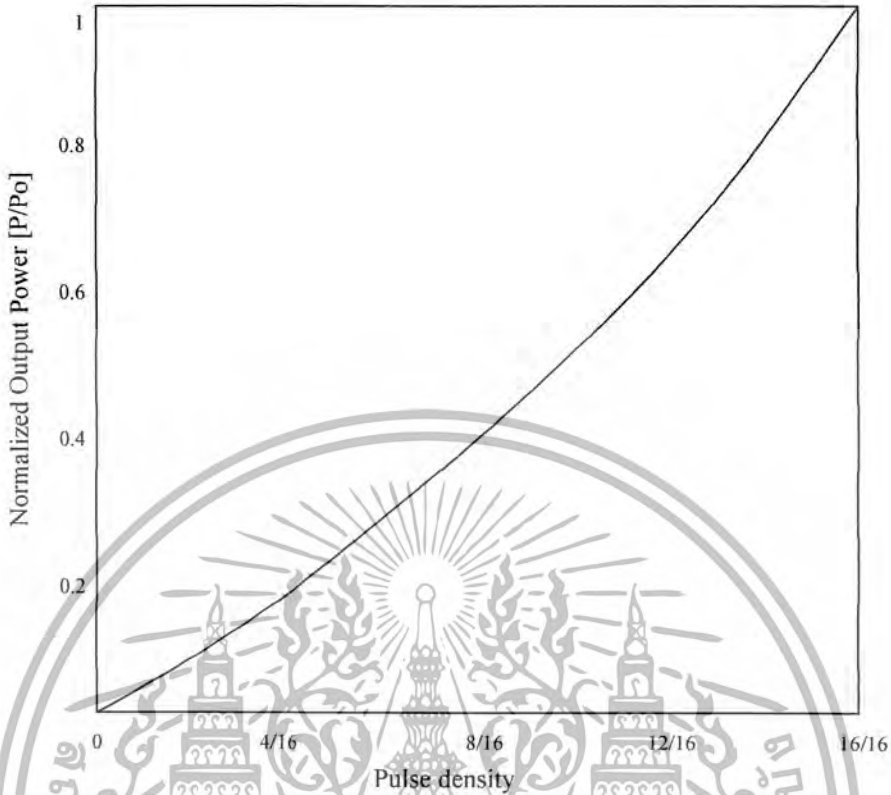
การควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift จะเป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณกึ่งหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ให้ซ้อนทับสัญญาณอีกกึ่งหนึ่งเป็นบางส่วนตามขนาดของมุม Phase-Shift โดยที่ความถี่สวิตช์ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ตำแหน่ง ZVS เสมอ ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ เช่น ที่มุม Phase-Shift 0 องศา ดังรูปที่ 2.11 (a) จะได้ปริมาณกระแสมากที่สุด และเมื่อปรับมุม Phase-Shift เพิ่มขึ้นเป็น 60 องศา และ 120 องศา ดังรูปที่ 2.11 (b) และรูปที่ 2.11 (c) ตามลำดับ ปริมาณกระแสจะลดต่ำลงเรื่อยๆ ดังนั้น เมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 2.12 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับมุม Phase-Shift มากขึ้น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะลดลงเรื่อยๆ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift นี้มีข้อด้อย คือ เมื่อปรับมุม Phase-Shift มากขึ้น จะมีผลทำให้กระแสจ่ายโหลดทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปจากคลื่นไซน์มากขึ้น ซึ่งข้อด้อยนี้สามารถปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นได้โดยการเลือกค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์ให้มีค่าสูงขึ้น

2.3.3.2 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธี Pulse-Density-Modulation

การควบคุมด้วยวิธีนี้เป็นกรปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการลดจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์ของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากจำนวนมากไปหาน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีการปรับเปลี่ยนจาก 16 ไซเคิล ไปจนถึง 1 ไซเคิล กระแสไหลผ่านโหลดจะมีปริมาณมากที่สุดเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลลดลง ดังนั้น เมื่อนำมาเขียนกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะปรับจำนวนไซเคิลเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ไปจะได้ดังรูปที่ 2.14 โดยจะเห็นได้ว่าที่จำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จะมีค่ามากที่สุดและจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปรับจำนวนไซเคิลลดลง การควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีนี้จะมีข้อด้อย คือ ระดับกำลังไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนค่าไปจะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง แต่จะเป็นไปทีละ step ซึ่งมีทั้งหมด 16 step ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการปรับลดกำลังไฟฟ้ลงไปถึงระดับต่ำๆ จะมีผลทำให้กระแสที่จ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์ จะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ที่ไม่คงที่ แต่ระดับ peak ของคลื่นไซน์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่



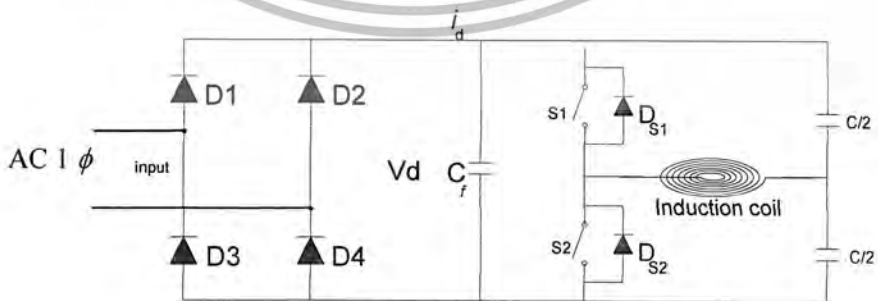
รูปที่ 2.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ



รูปที่ 2.14 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ

2.4 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ในวงจรโซแนนซ์อนุกรม

จากรูปที่ 1 ซึ่งเป็นโครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้มสามารถแทนด้วยความต้านทานเทียบเท่าและอินดักแตนซ์เทียบเท่า ซึ่งกลายมาแล้วในบทที่ 1 และสามารถพิจารณาเป็นวงจรเทียบเท่าเรซินที่มี R L_{eq} และ C ต่ออนุกรมกันและค่าตัวแปรอื่นๆ ของวงจรโซแนนซ์อนุกรมคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

ความถี่เรโซแนนท์ (ω_0)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}C}} \quad (2.17)$$

characteristic impedance (Z_0)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L_{eq} = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (2.18)$$

loaded quality factor (Q_L)

$$Q_L = \frac{\omega_0 L_{eq}}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{Z}{R} = \frac{\sqrt{L_{eq}/C}}{R} \quad (2.19)$$

unloaded quality factor (Q_0)

$$Q_0 = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (2.20)$$

อินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะเป็น

$$\begin{aligned} Z &= R + j \left(\omega L_{eq} - \frac{1}{\omega C} \right) = R \left[1 + j Q_L \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \right] \\ &= Z_0 \left[\frac{R}{Z_0} + j \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \right] = Z e^{j\varphi} = R + jX_{eq} \end{aligned} \quad (2.21)$$

จะได้

$$\begin{aligned} Z &= R \sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2} = Z_0 \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2} \\ &= Z_0 \sqrt{\frac{1}{Q_L^2} + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\varphi = \arctan \left[Q_L \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \right] \quad (2.23)$$

$$R = Z \cos \varphi \quad (2.24)$$

$$X = Z \sin \varphi \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.26)$$

เมื่อ $R = R_{eq} + R_{DS(ON)}$
 L คืออินดักแตนซ์เทียบเท่า
 C คือคาปาซิเตอร์เรโซแนนท์
 φ คือมุมต่างเฟสของแรงดันและกระแส

แรงดันอินพุทของวงจรเรโซแนนซ์ เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยมี Function ดังนี้

$$v_{s2} = \begin{cases} V_d & \text{if } 0 < \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{if } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.27)$$

จากอนุกรมฟูเรียร์จะได้สมการแรงดันกรอมตัว S2 ดังนี้

$$v_{s2} = V_d + \frac{2V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{2n} \sin n\omega t \quad (2.28)$$

ค่ามูลฐานของแรงดัน v_{s2} คือ

$$v_{s2,1} = V_{\max} \sin \omega t \quad (2.29)$$

ซึ่งจะได้ขนาดของยอดคลื่นแรงดันเป็น

$$V_{\max} = \frac{2V_d}{\pi} \approx 0.637V_d \quad (2.30)$$

จะได้สมการกระแสไหล i_L ดังนี้

$$i_L = I_{\max} \sin(\omega t - \theta) \quad (2.31)$$

โดยที่

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{Z} = \frac{2V_d}{Z} = \frac{2V_d \cos \theta}{\pi R} = \frac{2V_d}{\pi Z_0 \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (2.32)$$

จะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอเตอร์ที่ได้คือ

$$P_{\text{Req}} = \frac{I_{\text{m}}^2 R_{\text{eq}}}{2} = \frac{2V_d^2 R_{\text{eq}} \cos^2 \theta}{\pi^2 R^2} = \frac{2V_d^2 R_{\text{eq}}}{\pi^2 R^2 \left[1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (2.33)$$

เมื่อ $f = f_0$

$$P_{\text{Req}} = \frac{2V_d^2 R_{\text{eq}}}{\pi^2 R^2} \quad (2.34)$$

2.5 สรุป

จากทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูง ดังได้กล่าวมาแล้วนี้ สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้ทำอุปกรณ์ภาชนะ ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุนั้น ไม่ว่าจะเป็นสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ ของอุปกรณ์ภาชนะ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ_r ความลึกผิว δ สภาพความต้านทานของอุปกรณ์ภาชนะ R_v จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ N และความถี่กระแสไฟฟ้าสลับที่ป้อนขดลวดเหนี่ยวนำ f ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานเทียบเท่า และอินดักแตนซ์เทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนไป โดยที่อุปกรณ์ภาชนะที่ทำด้วยสาร non-magnetic เช่น อลูมิเนียมและทองแดงจะมีค่าสภาพความต้านทานของอุปกรณ์ภาชนะ R_v ต่ำมากเมื่อเทียบกับภาชนะที่ทำด้วยสาร ferro-magnetic เช่น สแตนเลสและเหล็ก เป็นต้น โดยจะมีความแตกต่างกันถึงประมาณ 50 เท่า ดังนั้น เมื่อวัสดุที่ทำด้วยสาร non-magnetic มาใช้เป็นอุปกรณ์ภาชนะจะทำให้มีกระแสแอมแปร์เกินไป เป็นผลให้ชุดอินเวอเตอร์เสียหายได้ ขณะเดียวกันถ้าจะเลือกอุปกรณ์ภาชนะบรรจุที่ทำด้วยสาร **ferro-magnetic** ก็จะทำให้กระแสความถี่สูงจากวงจรอินเวอเตอร์มีขนาดลดลงได้มาก
2. เตาหุงต้มเหนี่ยวนำเหมาะที่จะใช้กับวงจรอินเวอเตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการหุงต้มมีไม่มากนัก วงจรควบคุมไม่ซับซ้อนและมีขนาดเล็กเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

3. ชุดอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมที่เหมาะสมกับเตาหุงต้มเหนียวน่าจะเป็นอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ เนื่องจากสามารถรับแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าได้โดยตรง โดยใช้ขดลวดเหนียวน่าของเตาหุงต้มเพียงชั้นเดียว
4. สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้า จะเลือกใช้วิธีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย วงจรไม่ซับซ้อน ต่างจากวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุม Phase-Shift ซึ่งไม่สามารถใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ได้เนื่องจากวงจรนี้มีสวิตช์เพียง 2 ตัว และมีเพียงกึ่งเดียว ต่างจากวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมี 2 กิ่งและสามารถควบคุมการทำงานด้วยวิธี Phase-Shift ได้ ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Pulse-density-Modulation เนื่องจากวงจรควบคุมมีความซับซ้อนมาก ถ้านำมาใช้แล้วจะทำให้โครงสร้างของเตาหุงต้มเหนียวน่ามีขนาดใหญ่
5. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค้แปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอิมพีแดนซ์ (Z) Quality factor (Q) มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส (ϕ) และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (Pout) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์



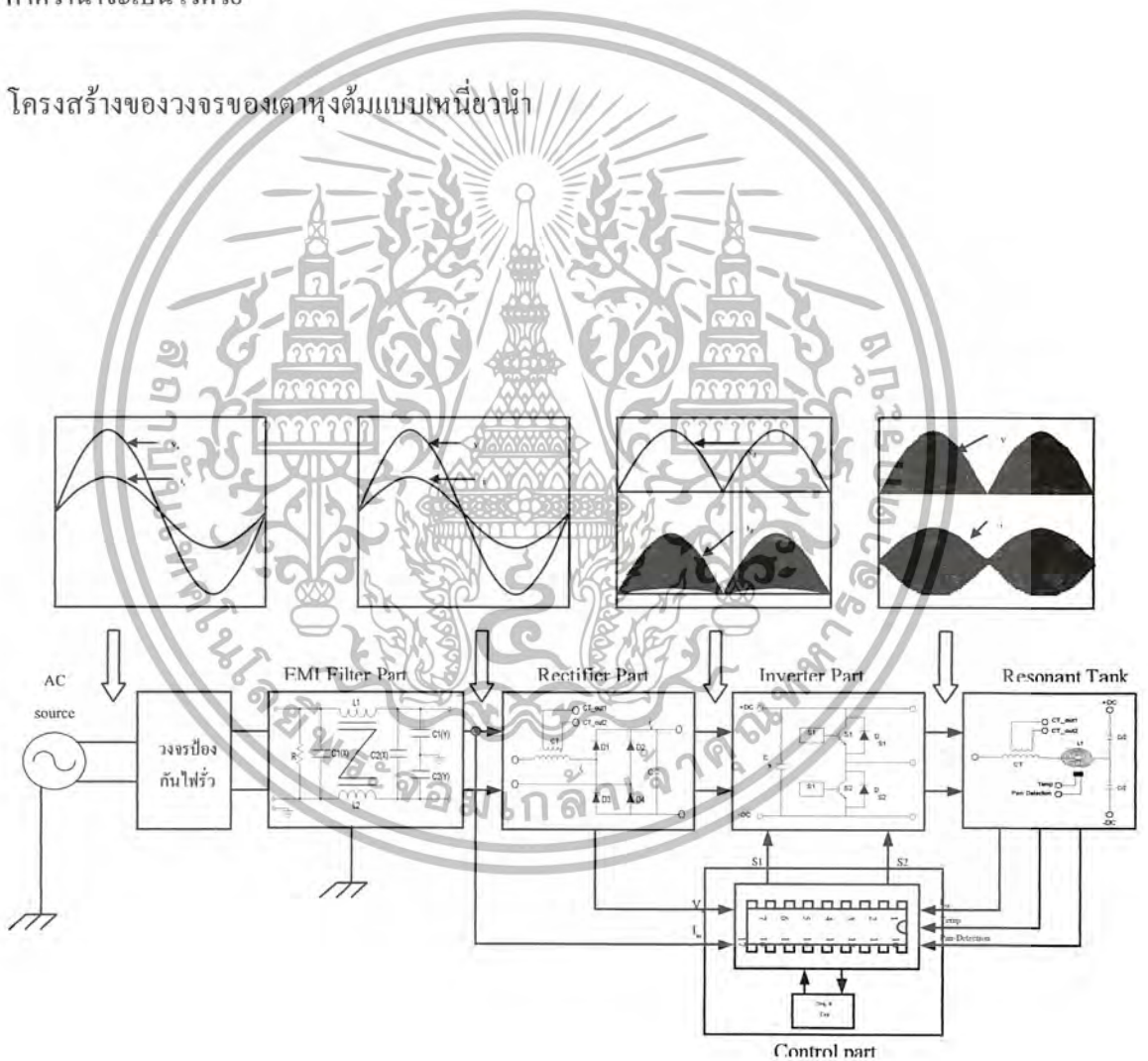
บทที่ 3

การวิเคราะห์หลักการทำงานและการออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นส่วนการออกแบบ และการวิเคราะห์หลักการทำงานวงจร เพื่อนำไปสู่การสร้างทั้งวงจรควบคุมและวงจรกำลัง โดยรายละเอียดภายในได้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการออกแบบส่วนต่างๆ ของวงจรเตาหุงต้ม และเครื่องทำน้ำอุ่น รวมทั้งได้นำเสนอแนวความคิดรูปลักษณะของเครื่องต้นแบบที่ คาดว่าน่าจะเป็นไว้ด้วย

โครงสร้างของวงจรของเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.1 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนของการออกแบบจะต้องกำหนดคุณสมบัติการทำงานของเตาหุงต้มก่อนโดยที่กำหนดไว้มีดังต่อไปนี้

1. พิกัดกำลังไฟฟ้า	1.2kW
2. ระบบไฟฟ้าป้อนเข้า	220 V \pm 10% 50 Hz
3. มีระบบการป้องกันคือ 3.1 ป้องกันแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าสูงเกิน 3.2 ป้องกันแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำเกิน 3.3 ป้องกันกระแสด้านเข้าสูงเกิน 3.4 ป้องกันกระแสด้านออกสูงเกิน 3.5 ป้องกันไฟรั่ว และไฟดูด 3.6 ป้องกันอุณหภูมิสูงเกิน 3.7 ป้องกันการทำงานขณะไร้ภาชนะ	242 V 198 V $\approx \geq 6.5 A_{rms}$ $\approx \geq 27.5 A_{Peak}$
4. สามารถใช้งานได้กับภาชนะก้นแบนและโค้ง	
5. กระแสด้านเข้าใกล้เคียงชานัน และมีตัวประกอบกำลังสูง	
6. ปรับความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง นุ่มนวล	
7. ควบคุมด้วยระบบดิจิทัล	
8. ส่งสัญญาณเตือนขณะทำงานผิดพลาด พร้อมแสดงผล	

ตามคุณสมบัติที่ระบุไว้ข้างบน สามารถนำมาออกแบบวงจร และเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.1 โดยสามารถแยกพิจารณาการออกแบบได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

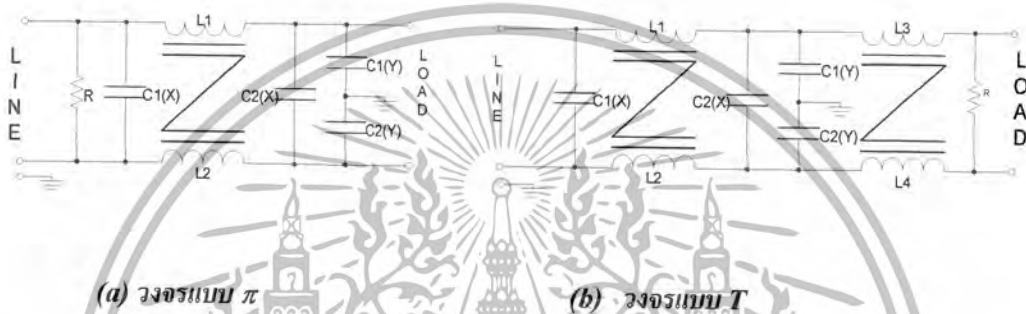
3.2 วงจร EMI Filter

ในการทำงานของเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยมีการทำงานในลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสและความถี่สูงๆ อย่างฉับพลัน ด้วยการทำงานดังกล่าวทำให้มีการสร้างสัญญาณรบกวน (Noise) ขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของระบบวงจรตัวเองหรือระบบใกล้เคียงเกิดการผิดพลาด ถ้าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่มากเกินไปกว่าอุปกรณ์หรือระบบจะรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ลักษณะวงจร EMI Filter

ดังนั้นอินเวอเตอร์จำเป็นต้องมีวงจรฟิลเตอร์เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่จะออกไปภายนอกให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ วิธีการลดสัญญาณรบกวนที่จะออกไปภายนอกที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป คือการต่อ LC ฟิลเตอร์กันอยู่ที่อินพุทกับระบบแรงดันไฟสลับ เพื่อลดสัญญาณรบกวนทั้งโหมดความแตกต่างและ โหมดร่วม การต่อวงจร LC ฟิลเตอร์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น แบบพาย (π) หรือ แบบที (T) ดังรูปที่ 3.2 (a) และ 3.2 (b) ตามลำดับ แต่ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้คือ แบบ π เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า ประหยัด และมีวงจรที่ง่าย



(a) วงจรแบบ π

(b) วงจรแบบ T

รูปที่ 3.2 ลักษณะการต่อ LC ฟิลเตอร์เพื่อลดสัญญาณรบกวน

การกำหนดค่าอุปกรณ์ต้องให้แน่ใจว่า ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่การทำงานของอินเวอเตอร์ ตัวต้านทาน R ที่ต่ออยู่ในวงจรมีไว้เพื่อให้ตัวเก็บประจุชนิด “X” คายประจุทิ้งไปได้ ตามมาตรฐานความปลอดภัยทั้งไปกำหนดค่า ถ้าค่าตัวเก็บประจุชนิด “X” มีค่าตั้งแต่ 0.1 ไมโครฟารัดขึ้นไป ตัวต้านทาน R จะต้องมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{t}{2.21C} \tag{3.1}$$

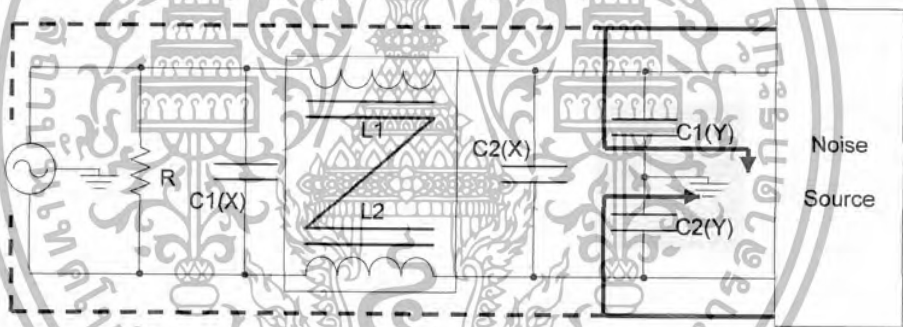
โดยกำหนดให้ t มีค่าเท่ากับ 1 วินาที และ C คือ ผลรวมของค่าตัวเก็บประจุชนิด “X” ในวงจรฟิลเตอร์เป็นฟารัด

ประสิทธิภาพในการลดสัญญาณรบกวนของวงจร LC ฟิลเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างอิมพีแดนซ์ระหว่างอินพุทของฟิลเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟสลับ และค่าความแตกต่างอิมพีแดนซ์ระหว่างเอาต์พุทของฟิลเตอร์กับอินพุทของอินเวอเตอร์ โดยถ้าค่าความแตกต่างของอิมพีแดนซ์มีค่ามาก อัตราลดทอนสัญญาณรบกวนจะเป็นไปได้มากด้วย

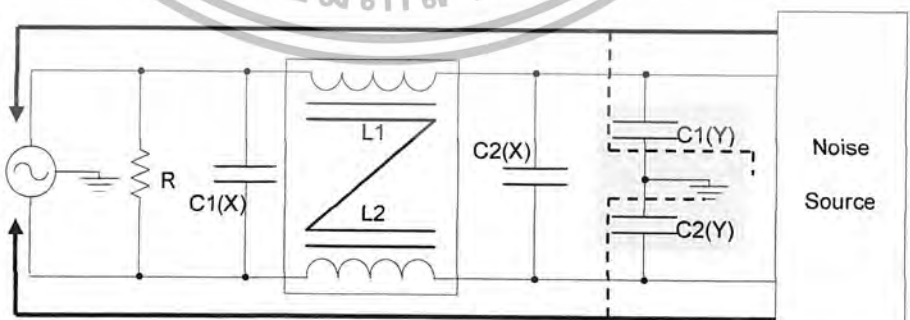
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ วงจรฟิลเตอร์แบบพาย (รูปที่ 3.2 (a)) ซึ่งมีส่วนประกอบและคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

3.4 หลักการของวงจร EMI Filter

ตามรูปที่ 3.2 (a) ตัวเก็บประจุ $C(X)$ ที่อยู่ในวงจรจะมีผลในการลดทรานเซียนต์ $C_1(X)$ จะลดทรานเซียนต์ที่เกิดในสายไฟสลับไม่ให้ผ่านเข้าหาวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วน $C_2(X)$ จะลดทรานเซียนต์ที่เกิดจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่ให้ผ่านไปยังกระแสไฟสลับได้ วงจรฟิลเตอร์จะเป็นส่วนป้องกันสัญญาณความถี่สูงจากอินเวอร์เตอร์ส่งผ่านเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายไฟภายนอก ดังนั้นจากลักษณะของวงจรเมื่อมีสัญญาณความถี่สูงกว่าในย่านการทำงานของวงจรที่ถูกกำหนดให้ผ่านได้ (Cutoff Frequency) โดยจะกำหนดไว้ให้มีความมากกว่า 9 เท่าของความถี่ไลน์ ที่ไม่เกินความถี่ตามมาตรฐานกำหนดของแต่ละประเภทอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ส่งผ่านมาจากวงจรอินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถผ่านออกสู่ภายนอกได้เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์ L_1 หรือ L_2 มีค่าสูงมาก ($X_L = 2\pi fL$) สัญญาณความถี่สูงดังกล่าวจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ $C_1(Y)$ หรือ $C_2(Y)$ เข้าสู่ระบบกราวด์แทนเพราะค่าคาปาซิแตนซ์มีค่าต่ำลง ($X_C = 1/(2\pi fL)$) ซึ่งแสดงให้เห็นเส้นทางที่ไหลของสัญญาณความถี่สูงและค่าได้ตามรูปที่ 3.3 (a) และ 3.3 (b) ตามลำดับ



(a) การทำงานของวงจรเมื่อเกิดความถี่สูง



(b) การทำงานของวงจรเมื่อเกิดความถี่สูง

รูปที่ 3.3 ลักษณะการทำงานของวงจร EMI Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

3.5.1 หลักการทำงาน

ในส่วนของวงจรนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายโหลดที่ต้องการ ไดโอดประเภทนี้จะเป็นชนิด Rectifier diode ที่ไม่จำเป็นต้องมีความไวในการทำงานสูงนัก ถ้าพิกัดกำลังของโหลดมีค่าสูงๆ ไดโอดที่จะนำมาใช้จะต้องมีพิกัดสูงด้วย ซึ่งไดโอดเหล่านี้จะถูกรเรียกว่า ไดโอดกำลัง (Power diode) รูปแบบวงจรจะถูกแบ่งตามชนิดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า คือ ชนิดสามเฟส และหนึ่งเฟส เนื่องจากในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้รับไฟฟ้าด้านอินพุทขนาด 220 V 1 เฟส ดังนั้นวงจรเรียงกระแสจึงใช้เป็นชนิดหนึ่งเฟส ซึ่งรูปแบบของวงจรเรียงกระแสชนิดนี้ยังสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier) และวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier) ดังแสดงตาม รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชนิดของวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส แบบต่าง

ตามรูปที่ 3.4 (a) เป็นวงจรเรียงกระแสชนิดครึ่งคลื่น ซึ่งจะใช้ไดโอดเพียง 1 ตัว ส่วนรูปที่ 3.4 (b) เป็นวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว คือ D_1 , D_2 , D_3 , และ D_4 จากวงจรทั้ง

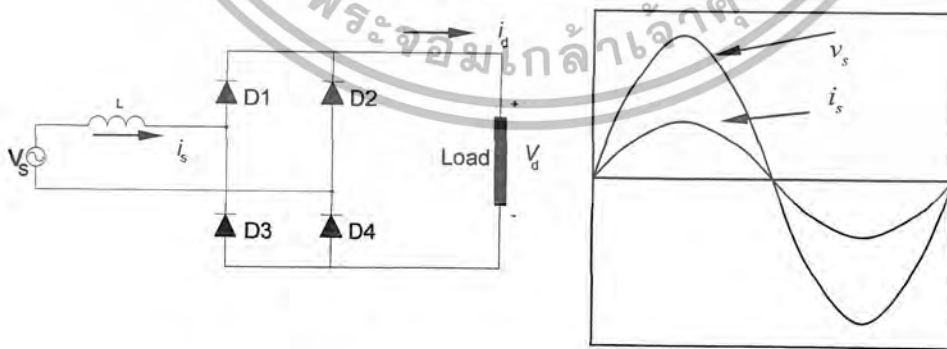
2 จะเห็นได้ว่า วงจรแบบครึ่งคลื่นจะประหยัดอุปกรณ์ และง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยทางด้านโหลดต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่อนข้างราบเรียบ ในการทำให้แรงดันนั้นเรียบได้จะใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Capacitor) ต่อขนานด้านเอาต์พุต ตามรูปที่ 3.4 (c) และ 3.4 (d) แสดงรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของวงจรทั้ง 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมีแรงดันเอาต์พุตขณะที่ยังไม่ใส่ตัวเก็บประจุมีความถี่เป็น 2 เท่าของแรงดันเอาต์พุตแบบครึ่งคลื่น (เมื่อความถี่ของแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากัน) ซึ่งเป็นไปตามหลักการทํางานของวงจรดังกล่าว เมื่อต่อตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันเอาต์พุตให้เรียบขึ้น จะพบว่าริปล (Ripple : ผลต่างของแรงดันเอาต์พุตต่ำสุดกับสูงสุด ตามสมการที่ 3.2) ของแรงดันจะมีค่าน้อยกว่า นั่นคือแรงดันมีความราบเรียบมากกว่า (ตัวเก็บประจุมีขนาดเท่ากัน) แต่ถ้าต้องการกรองให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรครึ่งคลื่นให้มีความราบเรียบเท่ากับแบบเต็มคลื่นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้วงจรเรียงกระแสมีราคาสูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นให้คุณภาพแรงดันเอาต์พุตดีกว่าแบบครึ่งคลื่น แต่ใช้อุปกรณ์และวงจรมีความซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากการทํางานของโหลดโดยส่วนใหญ่ต้องการคุณภาพของแรงดันที่ดี อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบทั้งราคาและขนาดของตัวเก็บประจุกันไดโอดที่เพิ่มเข้ามาพบว่าการเพิ่มไดโอดประหัดมากกว่า เพราะฉะนั้นวงจรเรียงกระแสที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปจึงเป็นแบบเต็มคลื่น

ในการทำให้คุณภาพของแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสให้ดีขึ้น ก็คือเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุขึ้น แต่การเพิ่มก็จะมีขีดจำกัดเนื่องด้วยราคาของตัวเก็บประจุนั้นค่อนข้างแพง อีกทั้งเมื่อพิจารณาทางด้านอินพุต พบว่าการทำงานของวงจรเรียงกระแสขณะที่ต่อตัวเก็บประจุเข้าไปจะทำให้กระแสไลน์ด้านอินพุตผิดเพี้ยนไป เพราะเนื่องจากวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้ตามรูปที่ 3.5 และ 3.6 เปรียบเทียบกัน

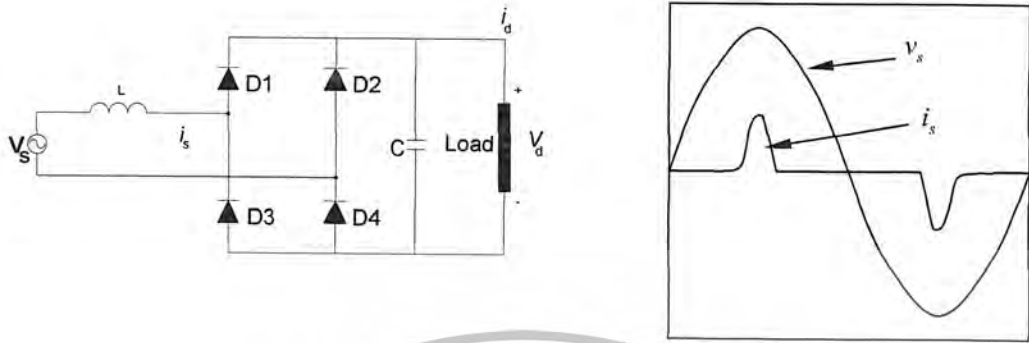
$$V_{ripple} = \sqrt{V_{O,rms}^2 - V_{O,avg}^2} \tag{3.2}$$



(a) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น
เมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุ

(b) รูปคลื่นกระแสและแรงดันอินพุต

รูปที่ 3.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อไม่ใส่ตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันเอาต์พุต

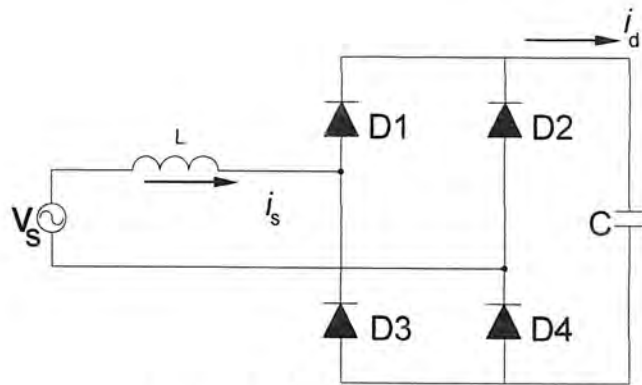


(a) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อใส่ตัวเก็บประจุ (b) รูปคลื่นกระแสและแรงดันอินพุท

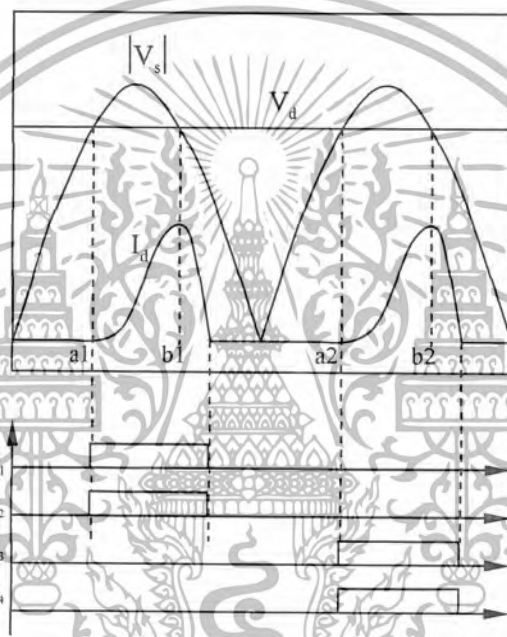
รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเมื่อใส่ตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันเอาต์พุท

ตามรูปที่ 3.5 เป็นวงจรเรียงกระแสที่ไม่ใส่ตัวเก็บประจุจะเห็นได้ว่ากระแสและแรงดันทางอินพุทเมื่อไหลลงเป็นความต้านทาน จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์มีเฟสตรงกัน (In phase) โดยไม่มีความผิดเพี้ยนและมีตัวประกอบกำลังที่ดี แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูป 3.6 ที่ใส่ตัวเก็บประจุ จะพบว่ากระแสจะมีความผิดเพี้ยนไปและมีค่าตัวประกอบกำลังแย่ง ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานตามรูปที่ 3.7 ได้ดังนี้

1. ตามรูปที่ 3.7 (b) กรณีที่แรงดันอินพุทเป็นซีกบวก เมื่อแรงดัน $|V_s|$ มากกว่าแรงดันเอาต์พุท V_d (ที่จุด a1) จะทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 ทำงานนำกระแส ส่งผลให้มีกระแส I_d ไหลเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด (ที่จุด b1) ต่อมาเมื่อแรงดันเอาต์พุท V_d มากกว่าแรงดัน $|V_s|$ ทำให้กระแส I_d ไหลลดลงจนค่าเป็นศูนย์จึงทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 หยุดนำกระแส
2. และในกรณีที่แรงดันอินพุทเป็นซีกลบ การทำงานจะเหมือนกับซีกบวก แต่เป็นการทำงานของ D_3 และ D_4 แทน D_1 และ D_2



(a) วงจรรูปคลื่นเพื่อใช้วิเคราะห์หลักการทำงาน



(b) รูปคลื่นกระแส แรงดัน อินพุตและเอาต์พุต

รูปที่ 3.7 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และรูปคลื่นกระแส แรงดันในการวิเคราะห์หลักการทำงาน

ตามหลักการทำงานดังกล่าวจะพบว่าเมื่อตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ยิ่งขึ้นจะทำให้การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุตมีค่ามากขึ้นตาม ซึ่งสามารถวิเคราะห์และตรวจสอบได้จาก ค่า THD_i, DPF และค่า PF ที่มีค่าตามสมการ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับและแสดงให้เป็นได้จากกราฟรูปที่ 3.8 และ 3.9

$$THD_i = \frac{I_{dis}}{I_{s1}}$$

$$= \frac{\sqrt{I_s^2 + I_{S1}^2}}{I_{S1}}$$

$$= \sqrt{\sum_{h=1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}}\right)^2} \tag{3.3}$$

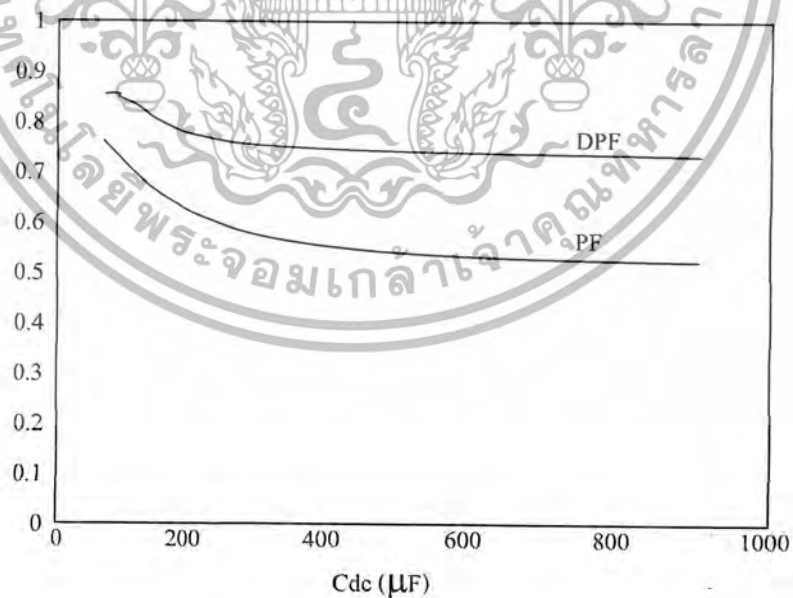
โดยที่ I_{S1} คือ ขนาดของกระแสที่ความถี่หลัก (A)
 I_{sh} คือ ขนาดของกระแสที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ (A)

$$DPF = \cos \phi_1 \tag{3.4}$$

โดยที่ $\cos \phi_1$ คือ ค่าตัวประกอบกำลังขององค์ประกอบหลัก

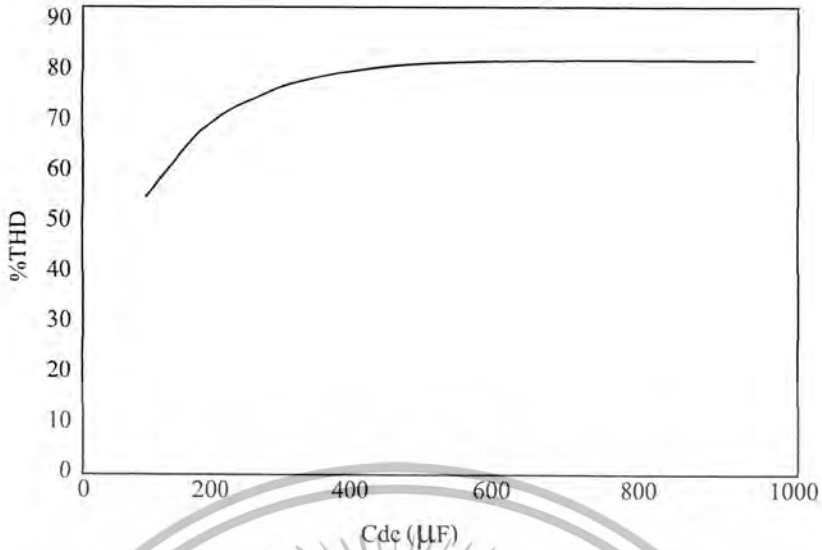
$$PF = \frac{I_{S1} DPF}{I_s}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} DPF \tag{3.5}$$



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่า DPF, PF ของกรรเสอินพุท เมื่อค่าคาปาซิเตอร์เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงค่า THDi ของกระแสอินพุทเมื่อค่าคาปาซิเตอร์เปลี่ยนไป

ตามกราฟรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุให้มีขนาดเพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่า DPF และค่า PF จะลดลง (ค่าดีที่สุดจะเท่ากับ 1) ส่วนค่า THDi จะเพิ่มขึ้น (ค่าดีที่สุดจะเท่ากับ 0) นั่นหมายความว่าการใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้กระแสอินพุทผิดเพี้ยนไป อีกทั้งราคายังแพงอีกด้วย

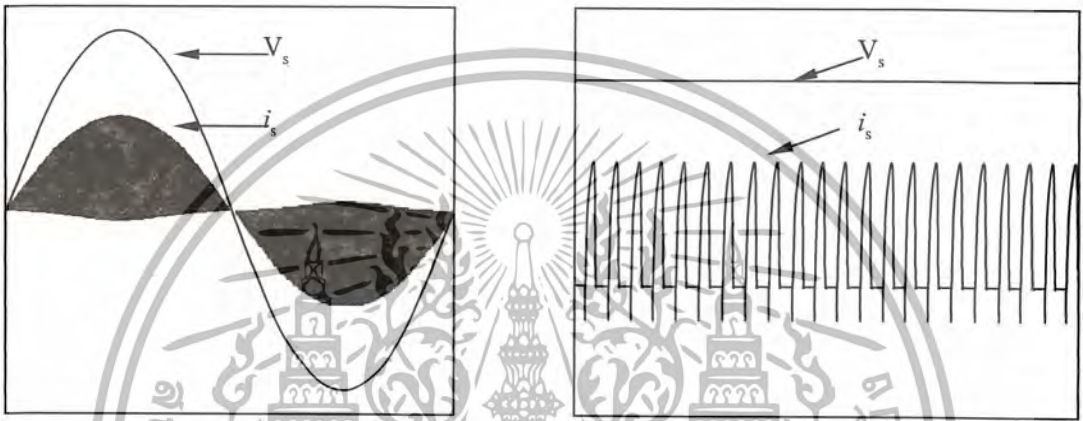
ดังนั้นในการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามารถสรุปได้เป็น 2 กรณีใหญ่ๆ คือ

1. กรณีไม่ได้ตัวเก็บประจุรองรับแรงดันเอาต์พุท จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทนั้นมีคุณภาพดี ไม่มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ อีกทั้งยังมีตัวประกอบกำลังที่ดี แต่จะให้ผลของแรงดันเอาต์พุทคุณภาพไม่ดี มีค่าการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุทสูง เมื่อนำไปจ่ายให้กับวงจรจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรนั้นไม่ดี หรือถ้านำไปเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำให้การหมุนของเครื่องจักรไม่ราบเรียบ
2. กรณีใส่ตัวเก็บประจุรองรับแรงดันเอาต์พุท จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุทมีความผิดเพี้ยนไป และมีตัวประกอบกำลังแย่ โดยแนวโน้มจะด้อยลงเมื่อขนาดของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น แต่จุดให้แรงดันเอาต์พุทที่คุณภาพสูง มีการกระเพื่อมของแรงดันต่ำ

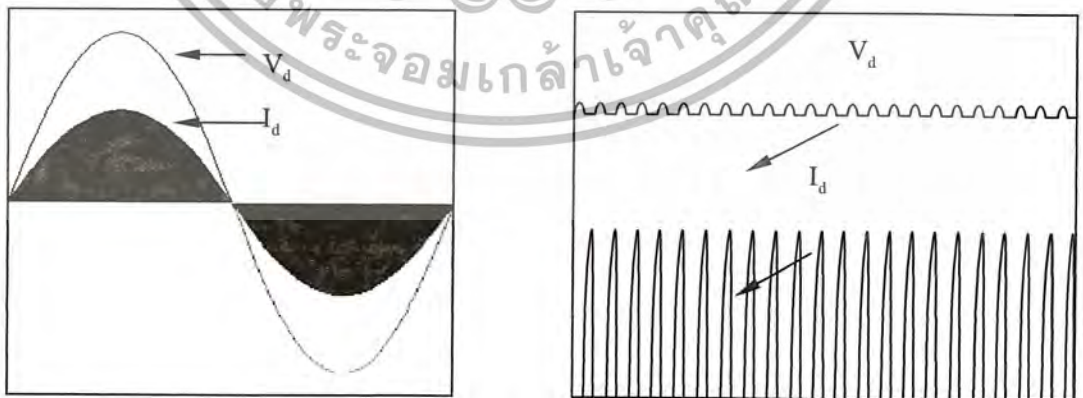
3.5.2 การออกแบบวงจรเรียงกระแส

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่นใส่ตัวเก็บประจุรองรับแรงดันค่าน้อยๆ ที่มีสร้างผลกระทบกับการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นการแสอินพุท เอาไว้สะสมพลังงานคืนกลับและป้องกันการแกว่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อันเนื่องมาจากวงจรอิน-เวอเตอร์มีการทำงานที่ความถี่สูงและมีโหลดเป็นแบบเรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 3.12

ในการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีการเปิดและปิดวงจรบ่อยครั้ง โดยขึ้นอยู่กับความถี่สวิตช์ ซึ่ง จะส่งผลให้กระแสด้านอินพุทของวงจรเรียงกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง แสดงให้เห็นได้ตามรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามรูปที่ 3.12 (a) จะเห็นได้ว่ากระแสอินพุทจะหยุดหรือไหลเข้าวงจรตามจังหวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในลักษณะรูปคลื่นกระแสเช่นนี้จะมีค่าความผิดเพี้ยนสูง ซึ่งเห็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ แต่จะสังเกตได้ว่า ตามรูป 3.10 (b) โครงสร้างของรูปคลื่นประกอบด้วยความถี่สวิตช์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของไลน์ โดยมีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่สวิตช์ และมีเฟสตรงกับแรงดัน ซึ่งถ้ากำจัดความถี่ในส่วนนี้ทิ้งไปก็จะคงเหลือเฉพาะความถี่ของไลน์ จะทำให้สามารถลดค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นลงได้



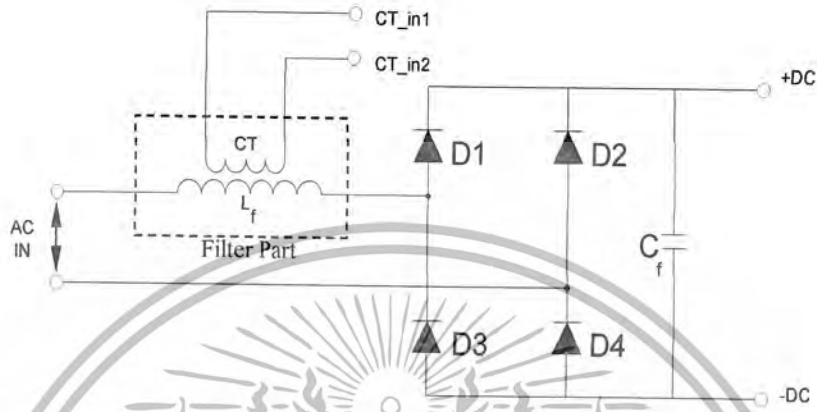
(a) รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุท (b) ภาพขยายรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุท
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสด้านเข้าวงจรเรียงกระแส ขณะมีการทำงานของวงจรอิน-เวอร์เตอร์



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสด้านเข้าวงจรอิน-เวอร์เตอร์ ขณะมีการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดการปัญหาดังกล่าวข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_f ต่ออนุกรมเข้ากับไลน์ อินพุทเพื่อจำกัดความถี่สูงที่ปะปนอยู่กับกระแสออกไป วงจรใช้งานแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรเรียงกระแสที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้

3.5.3 การออกแบบไดโอด

ไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็น ไดโอดกำลังชนิดเต็มคลื่นแบบโมดูลคิงแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 (a) โดยพิกัดกำลังหาได้ตามสมการคือ

$$P_{in} = V_{in} I_m \cos \phi \tag{3.6}$$

- โดยที่ P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าด้านอินพุท (วัตต์ :W)
- V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์ :V)
- I_m คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์ :A)
- $\cos \phi$ คือ ค่าตัวประกอบกำลัง

ตามคุณสมบัติของเตาหุงต้มที่กำหนดไว้เป็น

พิกัดการทำงานของเครื่อง	1200	วัตต์
ด้านอินพุทรับไฟฟ้ากระแสสลับ	220	โวลต์
ตัวประกอบกำลังมีค่า	0.99	

จากสมการที่ 3.6 จะได้กระแสที่จะไหลผ่านไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากวงจรดังกล่าวมีการทำงานแบบสวิตซ์ซึ่งดังนั้นจึงกำหนดให้ไดโอดทำงานที่ 70% ของพิกัดตัวเอง จะได้ว่าไดโอดที่ควรเลือกมาใช้งานจะมีพิกัดกระแสอยู่ที่ 7.2 แอมป์

ดังนั้นจึงเลือกไดโอดขนาด 600 V 10 A ซึ่งหาซื้อตามท้องตลาดได้ง่าย นอกจากนี้ในการใช้งานจริงจะต้องติดตั้งแผ่นระบายความร้อนให้กับไดโอดนี้ด้วย

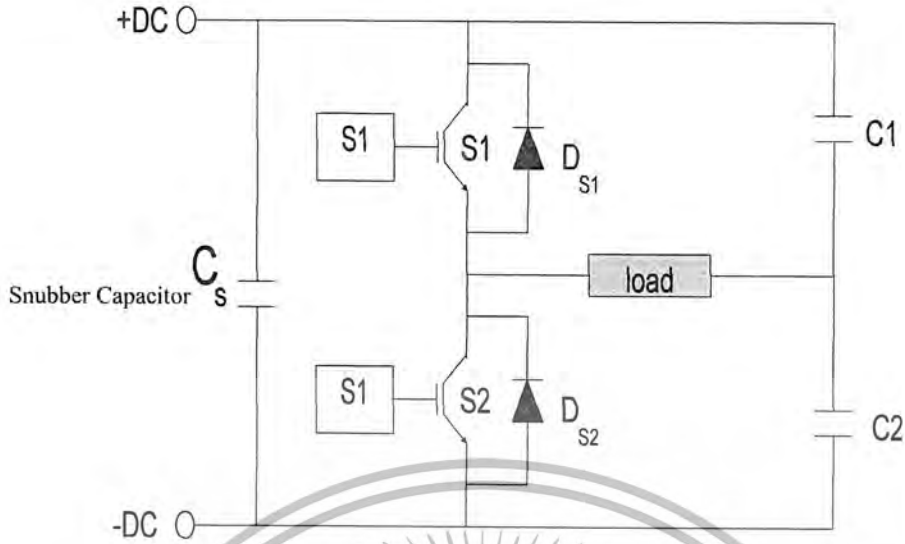
3.5.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L_r)

ทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่สูงที่ปะปนอยู่ในกระแสเอชอีอินพุท เพื่อลดความผิดเพี้ยนและปรับปรุงรูปคลื่นของสัญญาณกระแสอินพุทก่อนเข้าวงจรบริดจ์ไดโอดให้ดีขึ้น นอกจากนี้ตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับกระแสอินพุทสำหรับใช้เป็นระบบป้องกันกระแสเกินอีกด้วย โดยจะส่งสัญญาณไปให้ชุดควบคุมต่อไป ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะต้องให้ค่ากระแสอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

3.6 อินเวอร์เตอร์

3.6.1 หลักการทำงาน

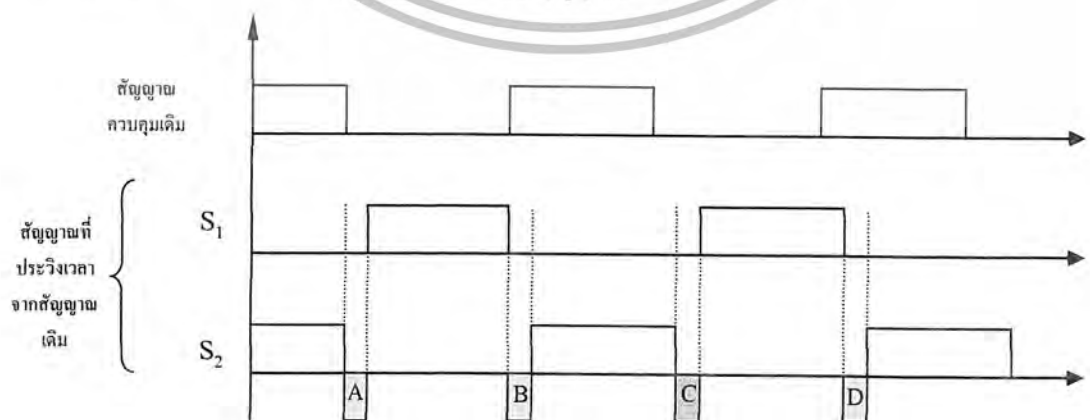
วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้เลือกนำมาใช้งานสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบที่เป็นฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge Inverter) ชนิดจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter) ตามรูปที่ 3.13 เพราะเนื่องจากมีโครงสร้างของวงจรที่ง่าย และมีพิกัดการทำงานในช่วงปานกลาง ($\leq 5 \text{ kW}$) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดพิกัดกำลังไว้ที่ 1.2 kW เป็นที่เพียงพอสำหรับจะนำไปใช้งาน อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ แต่ข้อเสียของอินเวอร์เตอร์นี้ คือ จะมีการลัดวงจรในกิ่งเดียวกัน (Short Branch) ซึ่งในการควบคุมการทำงานของ S_1 และ S_2 จึงต้องมีการหน่วงเวลาในการทำงานของสวิตซ์ทั้งสองตัวไม่ให้ทำงานพร้อมกัน ซึ่งเรียกว่า วงจรเดดไทม์ (Dead Time Circuit) หรือวงจรประวิงเวลา ดังแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 นอกจากนี้ในการส่งสัญญาณควบคุม ไปควบคุมสวิตซ์ S_1 และ S_2 จะต้องผ่านวงจรแยกกราวด์ (Isolate Ground Circuit) และวงจรขับ (Gate Drives Circuit) ด้วย เพื่อแยกสัญญาณระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลังเป็นการป้องกันการรบกวนและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมได้ และยังเพิ่มอัตรากระแสในการควบคุมให้ S_1 และ S_2 ทำงานไม่ให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นที่อาจนำไปสู่ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตซ์ S_1 และ S_2 ได้ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแยกกราวด์และวงจรขับจะได้แสดงให้เห็นในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.13 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดกึ่งบริดจ์

3.6.2 วงจรเดดไทม์

คุณสมบัติของวงจรประวิงเวลาเป็นวงจรแบ่งสัญญาณที่ส่งมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ก่อนจะนำไปควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ในชุดบน (S_1) และ (S_2) ตามรูปที่ 3.13 โดยวงจรจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณประวิงเวลา เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์สวิตซ์ในกึ่งเดียวกันมีการทำงานพร้อมกันอาจเป็นผลทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์สวิตซ์นั้นเสียหายได้ โดยหลักการประวิงเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าสัญญาณซับเกท S_1 และ S_2 ต้องมีค่าเวลาหน่วงกันเล็กน้อย นั่นก็คือส่วนที่ แรเงา A, B, C, และ D ในการกำหนดค่าประวิงเวลานี้จะต้องมีความเหมาะสม โดยจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาไม่ขึ้น (Rise Time) และไต่ลง (Full Time) ของอุปกรณ์สวิตซ์นั้นๆ ตามที่ระบุไว้คู่มือการออกแบบใช้งาน (Datasheet)

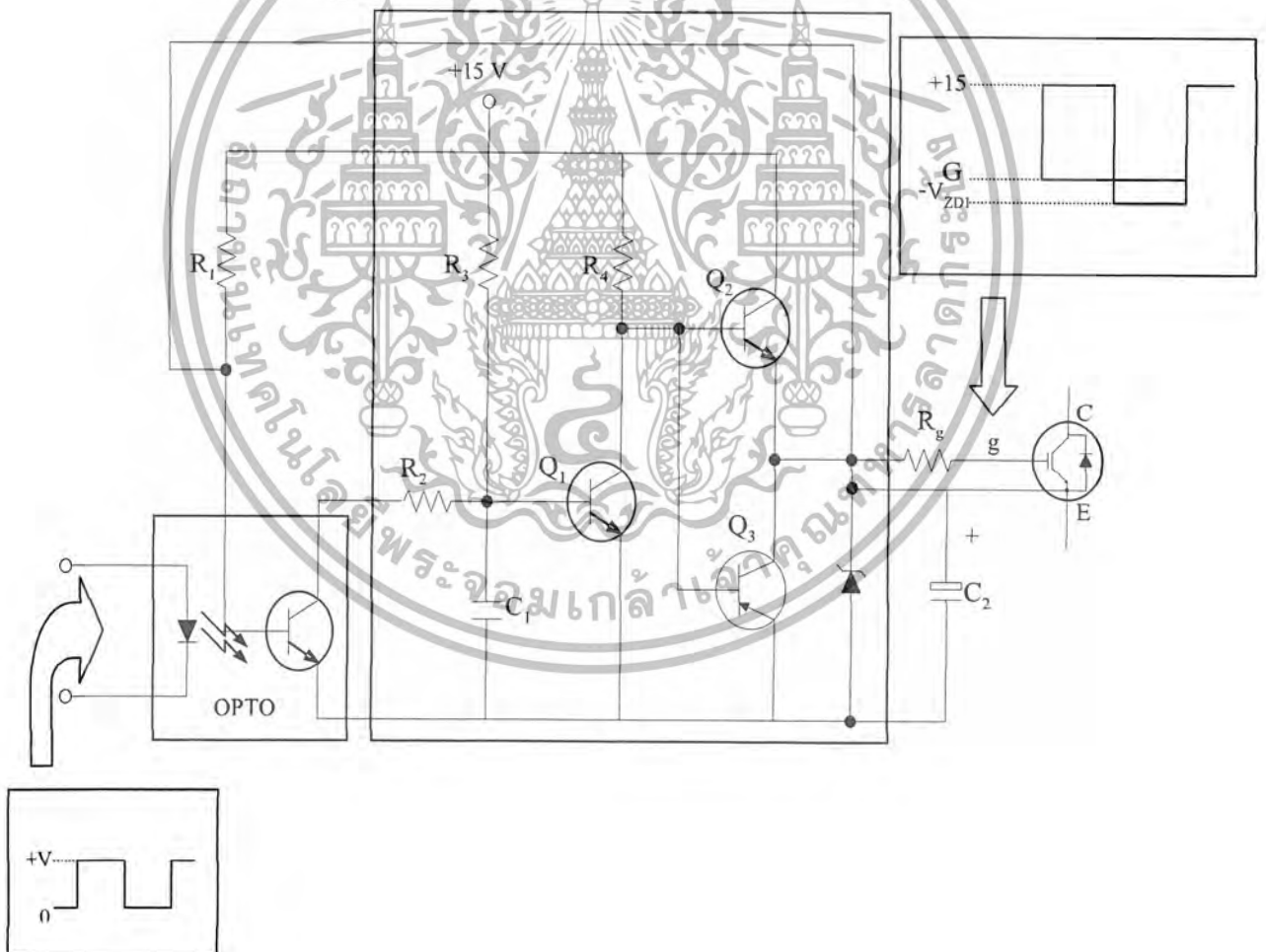


รูปที่ 3.14 สัญญาณซับเกท S_1 และ S_2 ที่มีการประวิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 วงจรขับเคลื่อน (Gate Drives)

ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลังจำเป็นต้องมีวงจรซึ่งทำหน้าที่แยกแยะระหว่างสัญญาณขับเคลื่อนกับสัญญาณควบคุม เพื่อแยกกราวด์ไม่ให้อุปกรณ์สวิตช์ตัวบน (S_1) และตัวล่าง (S_2) เกิดการลัดวงจรอันเนื่องมาจากใช้กราวด์ควบคุมร่วมกัน ตามรูปที่ 3.15 เป็นวงจรขับเคลื่อนสำหรับสวิตช์ 1 ตัว ที่ประกอบด้วยวงจรแยกกราวด์สัญญาณที่มาจากวงจรประวิงเวลาและชุดขับเคลื่อน ซึ่งได้ใช้ออปโต (OPTO) เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่แยกสัญญาณทางไฟฟ้าโดยวงจรที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ S_1 จะมีการแยกไฟเลี้ยงขนาด +15 โวลต์ จากแหล่งจ่ายคนละที่กันกับสวิตช์ S_2 หลังจากผ่านวงจรแยกกราวด์สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาเข้าวงจรขยายขนาดของแรงดันและกระแสให้มีค่าเพียงพอกับความต้องการของอุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ในโครงงานวิจัยนี้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้เป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ 2 ตัว ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขับเคลื่อนด้วยกันทั้งหมด 2 ชุด



รูปที่ 3.15 วงจรแยกกราวด์และวงจรขับเคลื่อนสำหรับควบคุม S_1 และ S_2

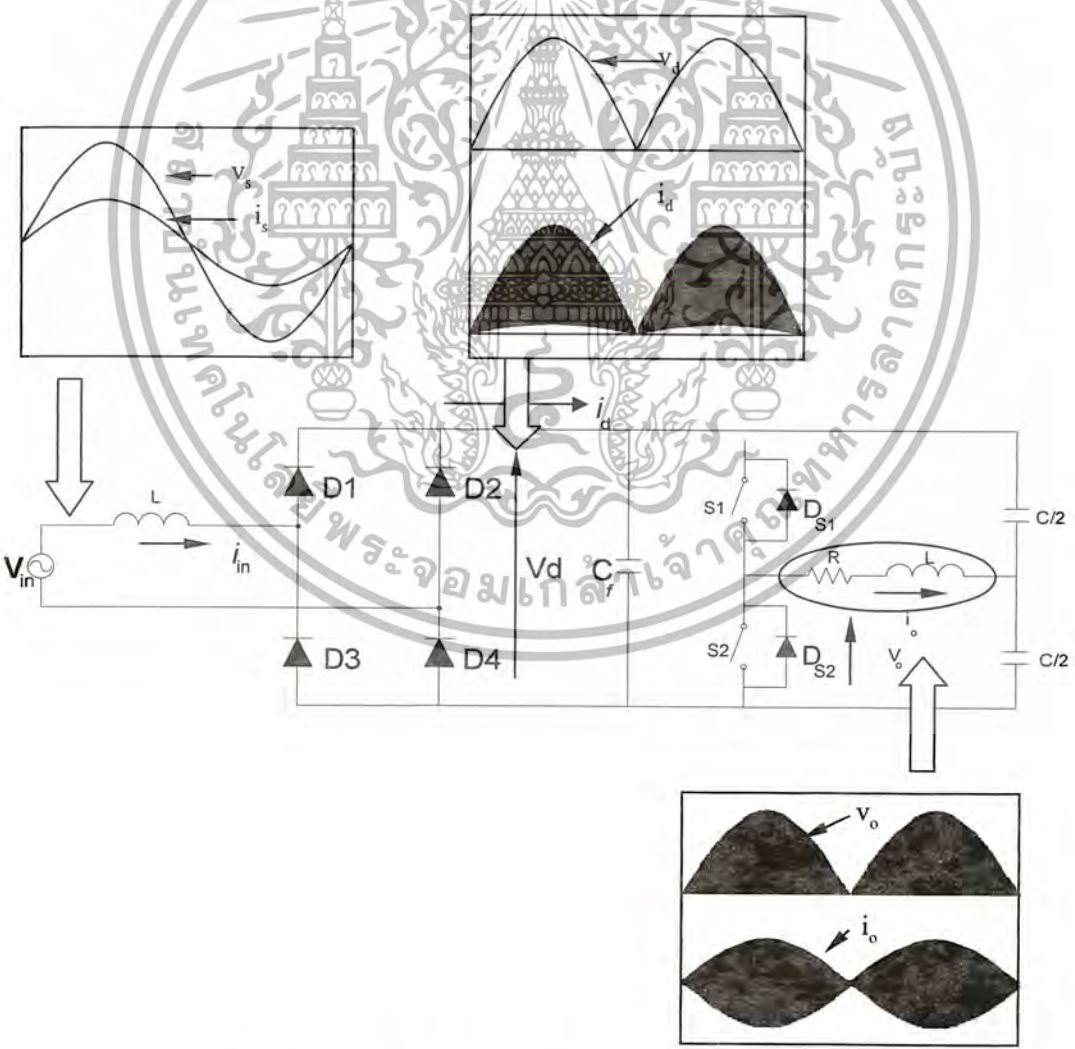
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 วงจรขับเคลื่อน (Gate Drives)

จากรูปที่ 3.16 จะทำการสมมุติให้แรงดันอินพุต 1 เฟส 50 Hz เป็นไซน์บริสุทธิ์จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ดังนั้นแรงดันที่ป้อนให้วงจรอินเวอร์เตอร์จึงเป็นรูปคลื่นไซน์เต็มคลื่นที่บริสุทธิ์หรือแรงดันไฟตรงที่ไม่คงที่ (V_d) ส่วนการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะการแปลงแรงดันไฟตรงที่ไม่คงที่เป็นไฟสลับความถี่สูง โดยมีสวิตช์ S_1, D_{S2} และ S_2, D_{S1} สลับกันทำงาน C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากันเป็น เรโซแนนซ์คาปาซิเตอร์ ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำและภาชนะหุ้มดัมจะแทนด้วยค่าความเหนี่ยวนำสมมูล L_{eq} ต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานสมมูล R_{eq} ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L_f ที่ต่ออยู่ทางด้านแหล่งจ่ายไฟสลับจะทำให้หน้าที่กรองความถี่สูงที่ปนอยู่กับกระแสไลน์ i_s

จากรูปที่ 3.19 ในการวิเคราะห์ห้วงจรจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง คือ

- (1) การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจากทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์จนถึงทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
- (2) การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจากทางด้านอินพุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจนถึงทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์



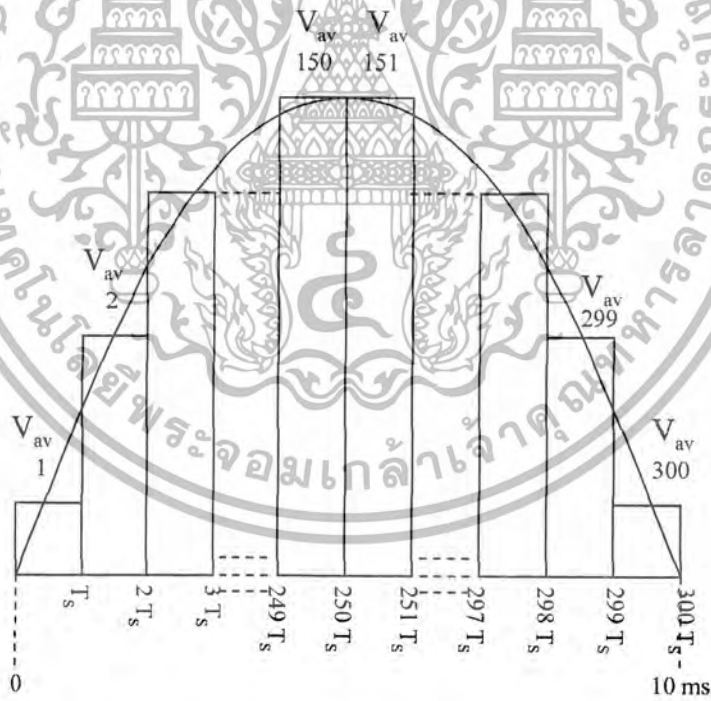
รูปที่ 3.16 วงจรเตาหุ้มดัมเหนี่ยวนำความถี่สูงในการวิเคราะห์หลักการการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจากทางด้านอินพุทของอินเวอเตอร์จนถึงทางด้านเอาต์พุทของอินเวอเตอร์

จากที่กล่าวมาแล้วแรงดันไฟตรงที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอเตอร์เป็นแรงดันไฟตรงที่ไม่คงที่ (V_d) ในแต่ละคาบเวลาของการสวิตช์ด้วยค่าระดับแรงดันที่คงที่ค่าหนึ่งซึ่งได้จากการเฉลี่ยในช่วงเวลาของการสวิตช์ ดังรูปที่ 3.17 และเมื่อพิจารณาช่วงความถี่ 100 Hz หรือ 10 ms ช่วงค่าเฉลี่ยที่ได้จะมี 300 ค่า และในช่วงค่าเฉลี่ยแต่ละช่วงจะแบ่งการทำงานของวงจรอินเวอเตอร์ ออกเป็น 4 โหมดการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.18 และในแต่ละโหมดการทำงานจะได้วงจรสมมูลเหมือนกันจะต่างกันเฉพาะในส่วนของแรงดันอินพุทที่มีเครื่องหมายหรือขั้ว + และ - ที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.18

จากรูปที่ 3.18 วงจรสมมูลสำหรับโหมด I และ II จะเป็นวงจรที่เหมือนกันโดยที่แรงดันอินพุทคือ $+V_{av,n}/2$ ในการวิเคราะห์จึงสามารถใช้เพียงวงจรเดียว ส่วนวงจรสมมูลสำหรับโหมด III และ โหมด IV ก็สามารถทำการพิจารณาเช่นเดียวกับโหมด I และโหมด II จะแตกต่างกันเฉพาะที่แรงดัน คือ $-V_{av,n}/2$ ดังนั้น ในการคำนวณหาสมการกระแสและแรงดันที่โหนดของโหมดที่ I ถึง IV จะมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.17 การหาค่าเฉลี่ยแรงดันไซน์เต็มคลื่นในแต่ละช่วงย่อย

$$i_{o,n} = e^{-\alpha t} \sin(\beta t) \left[\pm \frac{V_{av,n}}{2L\beta} - \frac{\alpha}{\beta} I_{1,n} - \frac{V_{1,n}}{L\beta} \right] + I_{1,n} e^{-\alpha t} \cos(\beta t) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{RL,n} = \operatorname{Re}^{-\alpha t} \sin(\beta t) \left[\pm \frac{V_{av,n}}{2L\beta} - \frac{\alpha}{\beta} I_{1,n} - \frac{V_{1,n}}{L\beta} \right] + (R, I_{1,n} e^{-\alpha t} \cos(\beta t)) +$$

$$L \left[e^{\alpha t} (\beta \cos(\beta t) - \alpha \sin(\beta t)) \right] \pm \frac{V_{av,n}}{2L\beta} - \frac{\alpha}{\beta} I_{1,n} - \frac{V_{1,n}}{L\beta} +$$

$$L \left[-I_{1,n} e^{-\alpha t} (\beta \sin(\beta t) + \alpha \cos(\beta t)) \right] \quad (3.8)$$

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ของสมการ v_{RL} และ i_u

ตัวแปรต่างๆ	ความหมาย
α	$\frac{R}{2L}$
β	$\sqrt{(R/2L)^2 - (1/LC)}$
R	$R_{\text{eq}} + R_{\text{DS(on)}}$
$+ V_{av,n}/2$	แรงดันเฉลี่ยใดๆ ของวงจรสมมูลใน Mode I และ Mode II ในช่วงไซเคิล ความถี่การสวิตช์
$- V_{av,n}/2$	แรงดันเฉลี่ยใดๆ ของวงจรสมมูลใน Mode III และ Mode IV ในช่วงไซเคิล ความถี่การสวิตช์
$V_{1,n}, I_{1,n}$	ค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อม C และกระแสที่ไหลผ่านคาบหนึ่งขวนำสมมูล L

จากสมการที่ (3.7) และ (3.8) สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ในวงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมดการทำงาน ดังนี้

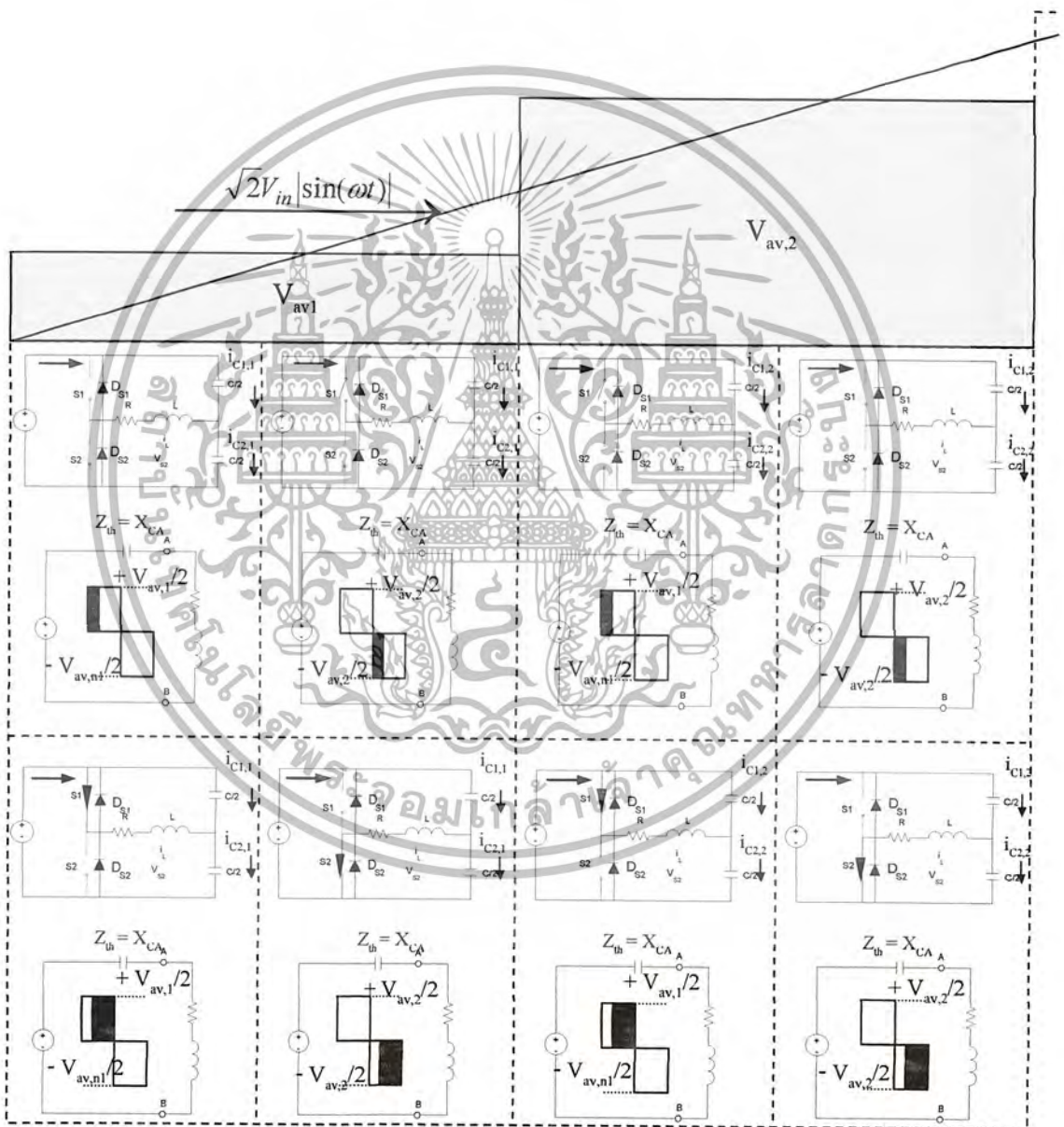
ตารางที่ 3.3 สมการสำหรับ Mode I และ Mode II

สมการแรงดัน	สมการกระแส
$V_{C1,n} = V_{RL,n}$	$i_{C1,n} = C1 \frac{dv_{C1,n}}{dt}$
$V_{C2,n} = V_{av,n} - V_{RL,n}$	$i_{C2,n} = i_{o,n} + i_{C1,n}$
$V_{O,n} = V_{RL,n} + V_{C2,n}$	$i_{d,n} = i_{o,n} + i_{C1,n}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สมการสำหรับ Mode III และ Mode IV

สมการแรงดัน	สมการกระแส
$V_{C1,n} = V_{av,n} + V_{RL,n}$	$i_{C1,n} = i_{o,n} + i_{C2,n}$
$V_{C2,n} = -V_{RL,n}$	$i_{C2,n} = C2 \frac{dv_{C2,n}}{dt}$
$V_{o,n} = 0$	$i_{d,n} = i_{C1,n}$



รูปที่ 3.19 โหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วงค่าเฉลี่ย

3.6.6 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรจากทางด้านอินพุทของแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจนถึงด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ แรงดันที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ v_d และ i_d ที่ได้จากสมการ $i_{d,n}$ ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 สามารถนำไปใช้ในการหารูปคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า (v_{in} , i_{in}) โดยคูณกับ Switching Function ความถี่ 50 Hz ที่มีขนาด 1 หน่วย ก็จะได้แรงดัน v_{in} และกระแส i_{in} ดังกล่าว

3.6.7 กำลังไฟฟ้าทางอินพุต P_{in} และเอาต์พุต P_o ประสิทธิภาพ η และค่าตัวประกอบกำลังทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า PF

ในการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตสามารถทำได้โดยวัดคลื่นกระแสและแรงดันจากวงจรแล้วนำผลที่ได้มากระจายสเปกตรัมด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อให้ได้แรงดันและกระแสของฮาร์มอนิกสัณในลำดับต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้างต่อไปนี้

กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตแหล่งจ่ายไฟฟ้า P_{in}

$$P_{in} = \sum_{n=1}^{\infty} (V_{in,n} I_{in,n} \cos \theta_n) \quad (3.9)$$

เมื่อ V_{in} คือ แรงดันด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้า
 i_{in} คือ กระแสด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้า
 กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ P_o

$$P_o = \sum_{n=1}^{\infty} (V_{o,n} I_{o,n} \cos \phi_n) \quad (3.10)$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
 i_o คือ กระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

Power Factor ทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้า PF

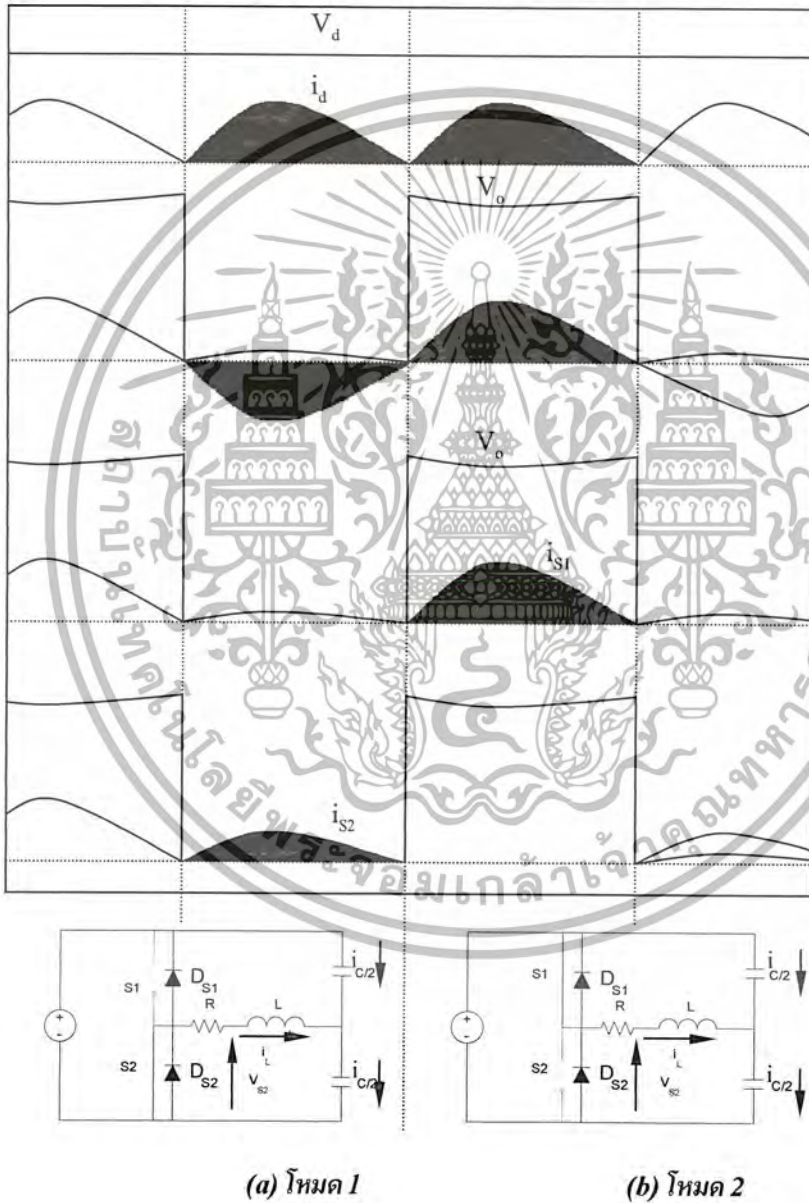
$$PF = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (V_{in,n} I_{in,n} \cos \theta_n)}{\left(\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (V_{in,n})^2} \right) \left(\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_{in,n})^2} \right)} \quad (3.11)$$

ประสิทธิภาพระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ η

$$\eta = P_o / P_{in} \quad (3.12)$$

3.6.8 รูปคลื่นการทำงานตามส่วนต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อกับแรงดันไฟตรงจากวงจรเรียงกระแสที่ไม่ใส่ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน

3.6.8.1 กรณี $f_s = f_r$



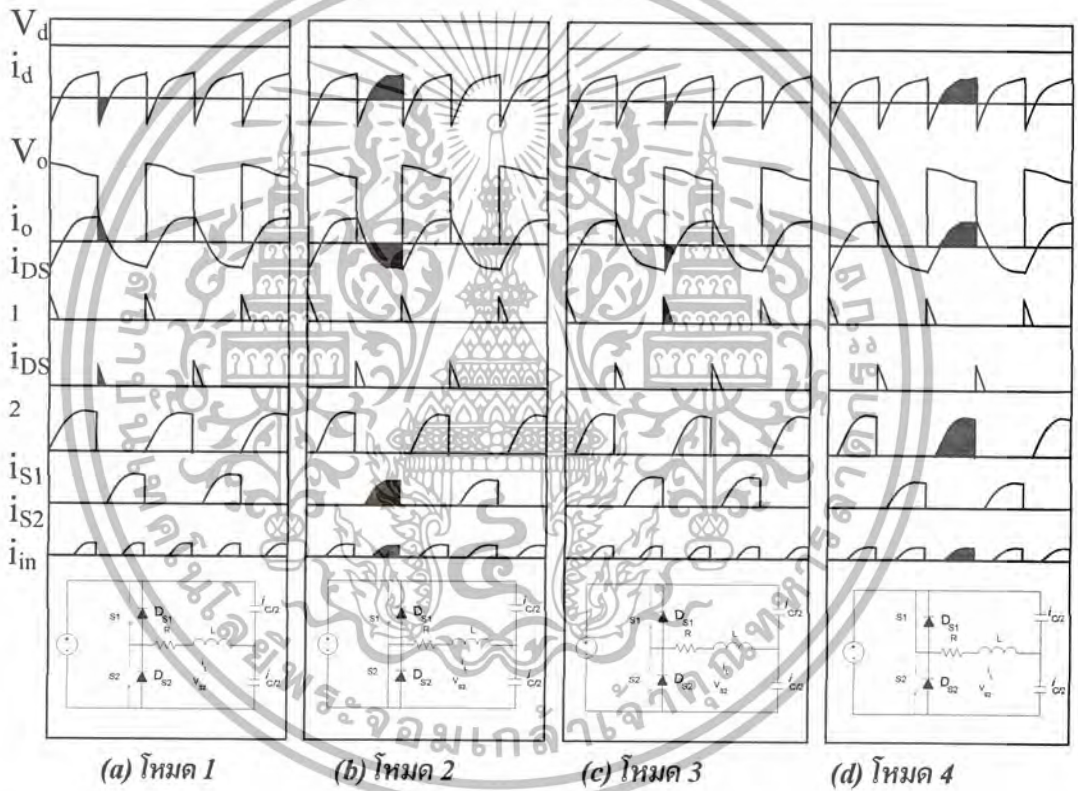
รูปที่ 3.19 รูปคลื่นและการทำงานของวงจรเมื่อ $f_s = f_r$

จากรูปที่ 3.19 เมื่อ $f_s = f_r$ การทำงานของอินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย 2 โหมดคือ

โหมด 1 สวิตช์ S_2 ทำงาน ลักษณะและทิศทางของรูปคลื่นจริงจะเป็นดังรูปที่ 3.19 (a) ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลดเนื่องจากกระแส i_d มีค่าเป็นบวก และไหลออกจากแหล่งจ่าย V_d ได้แรงดันที่โหลด V_o มีค่าเท่ากับ 0 และกระแสโหลด i_o มีค่าเป็นลบ

โหมด 2 สวิตช์ S_1 ทำงานลักษณะและทิศทางของรูปคลื่นจริงจะเป็นดังรูปที่ 3.19 (b) ในโหมดนี้แหล่งจ่ายจะจ่ายพลังงานให้กับโหลดเนื่องจากกระแส i_d มีค่าเป็นบวก และไหลออกจาก แหล่งจ่าย V_d เหมือนกับโหมด 1 แต่จะได้แรงดันที่โหลด เท่ากับ $+V_d$ และกระแส โหลดมีทิศทางเป็นบวก

3.6.8.2 กรณี $f_s > f_r$



รูปที่ 3.20 รูปคลื่นและการทำงานของวงจรเมื่อ $f_s > f_r$

ตามรูปที่ 3.20 เป็นการทำงานเมื่อ $f_s > f_r$ จะประกอบด้วยโหมดการทำงานทั้ง 4 โหมด ดังนี้

โหมด 1 ไดโอด D_{S1} ทำงาน จะเห็นได้ว่ามีกระแส i_{DS2} ไหลผ่านไดโอด D_{S2} ซึ่งเกิดจากโหลดมีการคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่าย V_d เนื่องจากพลังงานดังกล่าวไม่สามารถคืนกลับสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าได้จึงทำให้แรงดัน V_d สูงขึ้น และกระแส i_d เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ไม่มีการแส i_{in} ไหลเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งลักษณะและทิศทางของรูปคลื่นเป็นดังรูปที่ 3.20 (a)

โหมด 2 ลักษณะการทำงานเหมือนกับโหมด 1 ในกรณี $f_s = f_r$ ซึ่งพลังงานที่จ่ายให้กับโหลดในช่วงแรกจะได้มาจากพลังงานที่คืนกลับจากโหมด 1 เพราะฉะนั้นในช่วงนี้จึงไม่มีกระแส i_{in} ไหลเข้า เนื่องจากแรงดัน V_d มีค่าสูงกว่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจึงทำให้ไดโอดของจอร์เรียงกระแสไม่ทำงาน ในช่วงต่อมาเมื่อแรงดัน V_d ลดลงมามีค่าเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า จึงทำให้มีกระแส i_{in} ไหลเข้าวงจรเพื่อจ่ายให้กับโหลดต่อไป ลักษณะและทิศทางของรูปคลื่นเป็นดังรูปที่ 3.20 (b)

โหมด 3 ไดโอด D_{S1} ทำงาน เห็นได้ว่ามีกระแส i_{DS1} ไหลผ่านไดโอด D_{S1} ซึ่งเกิดจากโหลดมีการคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่าย V_d การทำงานจะเหมือนกับโหมด 1 ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ลักษณะและทิศทางของรูปคลื่นเป็นดังรูปที่ 3.20 (c)

โหมด 4 ลักษณะการทำงานจะเหมือนกับโหมด 2 ในกรณี $f_s = f_r$ ซึ่งพลังงานที่จ่ายให้กับโหลดในช่วงแรกจะได้มาจากพลังงานที่คืนกลับจากโหมด 3 ที่ผ่านมา และการทำงานจะเหมือนกับโหมด 2 ซึ่งลักษณะและทิศทางของรูปคลื่นเป็นดังรูปที่ 3.20 (d)

3.6.9 การออกแบบวงจรกำลังอินเวอร์เตอร์

ในส่วนของวงจรกำลังได้เลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นแบบ ไอจีบีทีโมดูล ซึ่งภายในต่อเป็นวงจรฮาล์ฟบริดจ์อยู่แล้ว ในการหาพิคคของไอจีบีที เราสามารถหาค่ากระแสที่ไหลผ่านสูงสุดได้จากสมการที่ 3.13

$$I_p = \frac{2\pi P_o}{V} \tag{3.13}$$

โดย P_o คือ พิกคกำลังเอาต์พุต (วัตต์)
 V คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุด (โวลต์)

เมื่อพิคคของเครื่องได้กำหนดไว้ที่ 1.2 kW อินพุตรับไฟฟ้า 220 V ± 10 % ซึ่งเมื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะได้ค่าสูงสุดคือ

$$\begin{aligned} V_p &= (220 + 10\%) \sqrt{2} \\ &= 342.2 \text{ V} \end{aligned}$$

ตามสมการที่ 3.13 เมื่อแทนค่าจะได้กระแสสูงสุดคือ

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{2\pi \cdot 1200}{(220 - 10\%) \sqrt{2}} \\ &= 26.9 \text{ A} \end{aligned}$$

ในการใช้งานโมดูลไอจีบีทีที่จำเป็นต้องเพื่อพิคัดในการใช้งานไว้ที่ 70 % เพื่อป้องกันการกระชากและการเปลี่ยวแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด จะได้ว่ากระแสสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับไอจีบีทีที่จะมีค่าเท่ากับ 35 A ดังนั้นไอจีบีทีที่จะเลือกมาใช้งานมีพิคัดเท่ากับ 35 A 600 V ซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไป โดยแสดงลักษณะของตัวอย่างตามรูปที่ 3.21 (a) ในการใช้งานจริงจะต้องติดตั้งบนแผ่นระบายความร้อนด้วย เพื่อระบายความร้อนให้กับไอจีบีที ป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิขณะทำงานที่ไอจีบีทีเกิน ดังแสดงภาพตัวอย่างของแผ่นระบายความร้อนในรูปที่ 3.21 (b) นอกจากนี้สำหรับงานที่มีพิคัดกำลังหรือความถี่สูงๆ ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุสนับสนุนเบอร์ (Snubber Capacitor) ไว้ด้วย เพื่อลดสไปรค์แรงดันตกคร่อมไอจีบีที ไม่ให้สูงเกินกว่าที่ไอจีบีทีจะทนได้ ซึ่งตัวเก็บประจุจะดังกล่าวจะต่อคร่อมกับจุดแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (ตามรูปที่ 3.13 คือ C_s) โดยค่าของตัวเก็บประจุจะได้มาจากคำแนะนำของกลุ่มไอใช้งาน ไอจีบีทีเบอร์นั้นๆ

3.7 ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT)

หากจะกล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในด้านเพาเวอร์กำลังหรือเพาเวอร์คอนโทรล ก็เห็นจะมีอยู่ไม่กี่ชนิดซึ่งในแต่ละชนิดก็มีข้อจำกัดและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ตามลักษณะของการทำงานไปใช้ควบคุมงานด้านต่างๆ ซึ่งอาจจะรวมไปถึงความไม่ล้าสมัยเร็วจนเกินไปของอุปกรณ์ที่ถูกเลือกมาใช้งานด้วย

อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลที่พอจะคุ้นเคยและใช้งานกันอย่างกว้างขวางในขณะนี้ ก็เห็นจะไม่พ้นเอสซีอาร์ (SCR), ไตรแอก (TRIAC), ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟต ที่จะเป็นจุดพัฒนาการของอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

ทรานซิสเตอร์กำลังขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีอัตราทนแรงดันและขยายกระแสได้สูง แต่ความเร็วในการสวิตช์ทำงานยังต่ำอยู่ โดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแส จะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่า ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ตรงกันข้ามกับเพาเวอร์มอสเฟต ที่มีความเร็วในการสวิตช์ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็วกว่ามาก แต่ก็มีอัตราการสูญเสียกำลังงานสูงมากเช่นกัน จากเหตุผลที่กล่าวมาของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพาเวอร์มอสเฟตจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้จนสามารถได้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพาเวอร์คอนโทรลชนิดใหม่นี้ โดยมีการตั้งชื่อหรือเรียกชื่ออย่างเป็นทางการว่า ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT) จะมีลักษณะ และวงสมมูลยุดังรูปที่ 3.21 และ 3.22



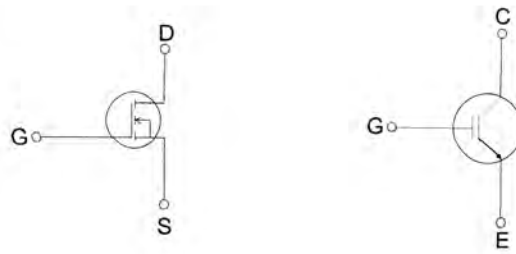
(a) โมดูลไอจีบีที



(b) แผ่นระบายความร้อน

รูปที่ 3.21 ลักษณะโมดูลไอจีบีทีและแผ่นระบายความร้อนที่ใช้งานวิจัย

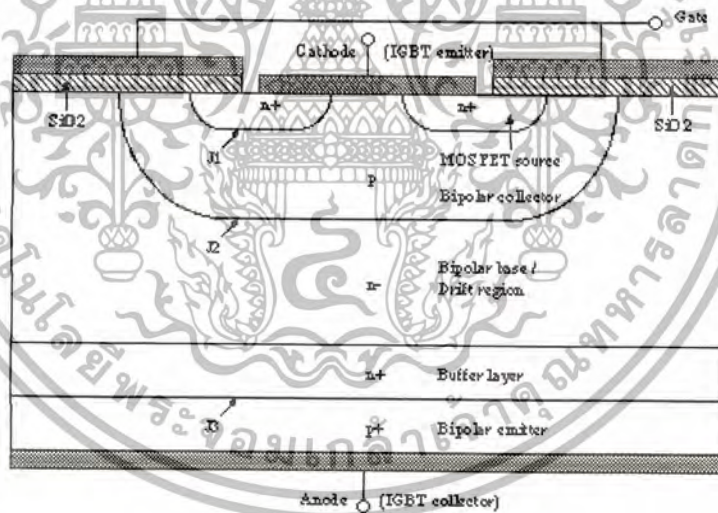
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 สัญลักษณ์และการเรียกชื่อขาของ IGBT

3.7.1 โครงสร้างของไอจีบีที

โครงสร้างของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวางได้ดังรูปที่ 3.23 โครงสร้างโดยรวมส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของมอสเฟตมาก จะแตกต่างกันตรงที่ IGBT จะมีชั้น P⁺ หรือชั้นอินเจกต์ติ้ง (Injecting) ต่อยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งในมอสเฟตนั้นไม่มี จากการทำมาเกิดถูกกันด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO₂) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 10⁹ โอห์ม



รูปที่ 3.23 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT

จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT มีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์มากกว่า การควบคุมกระแสที่ขานี้เหมือนกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT เป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดัน

รูปกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนมีค่าต่ำๆ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์ลดลงใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

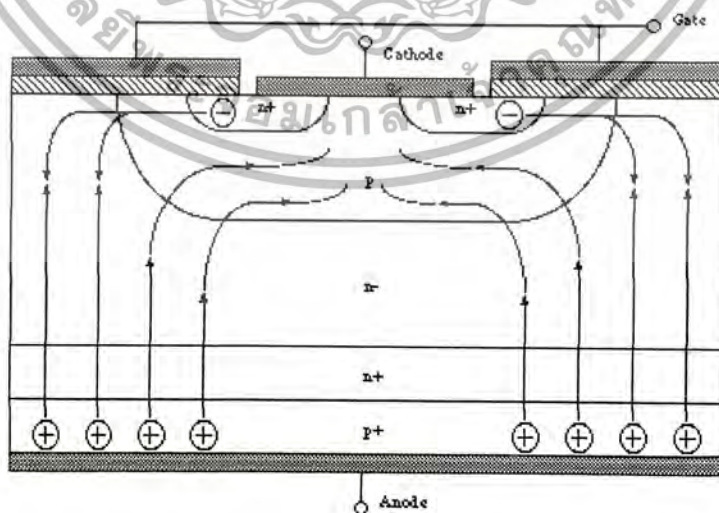
สภาวะการทำงาน (จุด threshold voltage : $V_{GS(th)}$) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สที่ต่ำกว่าแรงดันที่จุด $V_{GS(th)}$ แล้ว IGBT จะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสหรือคัตออฟ ในกรณีของ IGBT ชนิดที่แชนเนลนั้นคุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนเนล แต่โครงสร้างและสัญลักษณ์จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนเนล เช่น ชนิดของสารที่ได้ไปจากแชนเนลก็จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม , สัญลักษณ์ลูกศรก็จะกลับเอาหัวลูกศรกลับไปทางตรงกันข้าม

3.7.2 สภาวะนำกระแส

เมื่อชาเดรนได้รับแรงดันไบแอสตรง คือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์ส และแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวมกันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ (body layer) ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n^- (drift region) เข้ากับบริเวณซอร์ส n^+ (source region) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับการทำงานของมอสเฟต

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณลอยเลื่อน n^- จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจกต์ดิง p^+ (ดูรูปโครงสร้างในรูปที่ 3.23) เพราะรอยต่อ J1 ได้รับแรงดันไบแอสตรง ทำให้ IGBT อยู่ในสภาวะนำกระแส เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n^- เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation)

ผลของการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n^- มีค่าต่ำลง เป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับทรานซิสเตอร์กำลัง ผลของความต้านทานที่ลดลง ทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลง การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮล แสดงไว้ในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 สถานะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน $V_{GS(th)}$ จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี p เป็น n⁻ ได้ ทำให้บริเวณ n⁻ ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ส n⁺ IGBT จึงอยู่ในสถานะหยุดนำกระแส ในสถานะนี้รอยต่อ J2 ที่ได้รับแรงดันไบแอสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ขึ้นที่รอยต่อ J2 ด้วย

บริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามายังบริเวณ n⁻ มากกว่าที่จะขยายไปยังบริเวณชั้นบอดี p มีความหนาแน่นในการโด๊ปสารมากกว่า ถ้าความหนาแน่นของสารที่โด๊ปในบริเวณลอยเลื่อน n⁻ มากเพียงพอ ก็จะทำให้การขยายของบริเวณปลอดพาหะไม่สามารถแตะกับชั้นอินเจกต์ติ้ง p⁺ ได้ ชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ (buffer layer) (ดังในรูปที่ 3.23) ก็ไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดขึ้นหรือไม่จำเป็นต้องโด๊ปสาร

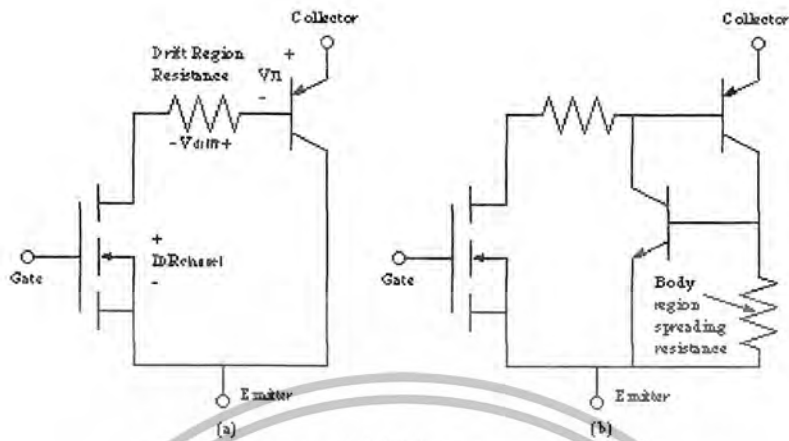
ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบแอสตรง สำหรับ IGBT ที่ไม่มีชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ นี้ จะเรียกว่า IGBT แบบสมมาตร ซึ่งจะมีอัตราทนแรงดันย้อนกลับ (V_{RM} หรือ BV_{SDS}) สูงพอๆ กับค่าอัตราทนแรงดันไหลตรง (BV_{DSS}) เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การลดความหนาของบริเวณ n⁻ ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันไหลตรงไว้สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ เข้าไป เพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจกต์ติ้ง p⁺ ซึ่งจะเรียก IGBT ชนิดนี้ว่า IGBT แบบไม่สมมาตร และจากการลดความหนาของบริเวณลอยเลื่อน n⁻ ลง จะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือ

- ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานน้อยลงด้วย
- ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงได้

แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ ก็มี คือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้น้อยลงเหลือเพียงไม่กี่สิบลโวลต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อ IGBT ได้รับแรงดันไบแอสกลับที่ขาเกต รอยต่อ J1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมากจะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น IGBT ชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

3.7.4 วงจรสมมูลของ IGBT



(a) วงจรสมมูลสำหรับการใช้งานสวิตช์ของ IGBT

(b) วงจรสมมูลที่แสดงส่วนของทรานซิสเตอร์ที่ฝังอยู่ใน IGBT

รูปที่ 3.25 วงจรสมมูลของ IGBT

วงจรสมมูลของ IGBT แสดงไว้ในรูปที่ 3.25 ซึ่งในรูปที่ 3.25 (ก) นั้นจะเห็นว่าในบริเวณขอดี p ชั้นบริเวณ n⁺ และชั้นอินเจกต์ติ้ง p⁺ จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี โดยแทนได้ด้วยขาคอลเล็กเตอร์, เบส และอิมิตเตอร์ ตามลำดับ และบริเวณภายใต้เกิดจะแทนได้ด้วยเฟด ซึ่งจะมีความต้านทานบริเวณ n⁺ เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเข้ากับขาเดรนของมอสเฟต ซึ่งเมื่อเขียนวงจรสมมูลออกมาจะได้วงจรดังรูปที่ 3.25 (ข)

จากรูปที่ 3.25 (ข) จะเห็นว่าเป็นวงจรคว่ำลงต้น โดยมีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี แต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรทั่วไป คือกระแสเดรนส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์ และขาซอร์สสำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 3.25 (ก) จะแสดงให้เห็นว่าภายใน IGBT มีทรานซิสเตอร์ฝังอยู่ด้วยโดยดูได้จากการที่ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพีต่อกันเข้าด้วยกันในลักษณะที่มีการป้อนกลับ ทำให้เห็นได้ชัดถึงเหตุที่ทำให้เกิดการแลตซ์ของ IGBT

โดยถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ผ่านความต้านทานข้างเคียงแล้วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะนำกระแส ส่งผลให้เกิดการแลตซ์ขึ้นใน IGBT สำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรนและซอร์สของ IGBT ขณะนำกระแส ($V_{DS(on)}$) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{DS(on)} = V_{JI} + V_{drift} + I_D R_{channel} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_{J1} เป็นแรงดันไบแอสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น จึงมีค่าค่อนข้างคงที่ จะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็เพียงเล็กน้อย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับกระแส ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-1 โวลต์

V_{drift} เป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อน ซึ่งความต้านทานค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อเทียบกับมอสเฟตแล้วจะมีค่าน้อยกว่า

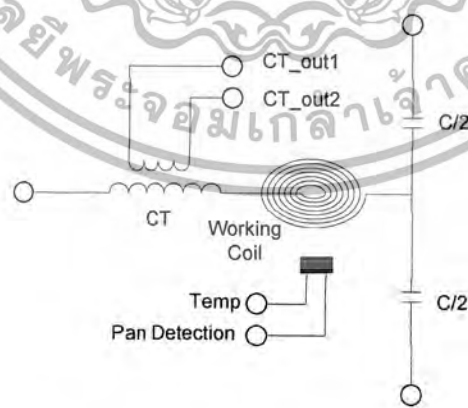
$R_{channel}$ เป็นค่าความต้านทานใน IGBT

$I_D R_{channel}$ เป็นแรงดันตกคร่อมที่ $R_{channel}$

ดังนั้นจึงพอจะสรุปได้ว่า $V_{DS(on)}$ จะมีค่าสูงมากขึ้นตามค่ากระแสทรานซิสเตอร์ที่สูงขึ้น โดยทั่วไป IGBT จะสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิรอยต่อสูงสุดถึง 150 องศาเซลเซียส และผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิจากค่าอุณหภูมิห้องไปถึงค่าสูงสุดนี้ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า $V_{DS(on)}$ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะ IGBT มีค่า $V_{DS(on)}$ เป็นผลรวมระหว่างแรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวก (หมายถึงอุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมก็จะสูงขึ้นตาม) กับแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิลบ

3.8 ชุดวงจรโหนดเรโซแนนซ์

ในส่วนนี้ประกอบด้วยชุดขดลวดซึ่งขดเป็นวงกลมให้พอดีกับแกนหม้อและทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์, ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (C_1 และ C_2) และหม้อแปลงตรวจจับกระแสเอาท์พุท (CT) เพื่อใช้ในวงจรป้องกันกระแสเอาท์พุทเกิน นอกจากนี้ยังติดตั้งชุดตรวจจับอุณหภูมิ และตรวจจับภาชนะหุงต้ม โดยส่งสัญญาณดังกล่าวไปให้ชุดควบคุมต่อไป ตามรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.26 วงจรเรโซแนนซ์และโหนด

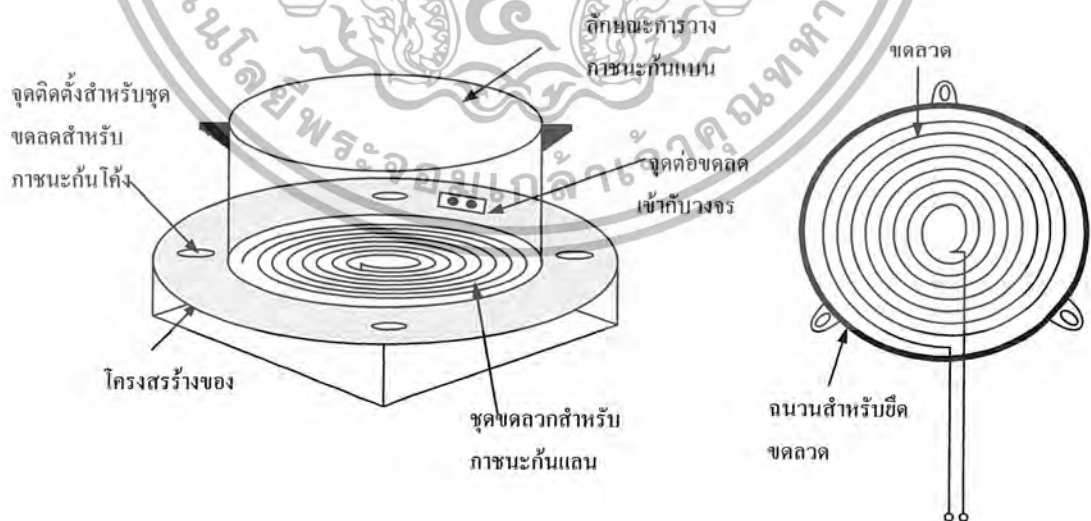
3.81 การออกแบบวงจร

ในการออกแบบขดลวดจะพิจารณาจากผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองควบคู่กันไป โดยตัวแปรที่สำคัญก็คือ ภาชนะหุ้มต้ม ที่ขึ้นอยู่กับ ความหนา และชนิดของวัสดุ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรนั้นเปลี่ยนแปลงไปในการออกแบบขั้นต้นเพื่อเก็บค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.17

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.15)$$

เมื่อ	f_r	คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)
	L_r	คือ ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ (H)
	C_r	คือ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (F)

งานวิจัยนี้จะต้องมีการออกแบบขดลวดให้สามารถใช้ได้กับภาชนะก้นโค้ง และก้นแบน ดังนั้นจึงสามารถออกแบบรูปทรงอย่างคร่าวๆ ได้ดังรูปที่ 3.27 โดยหลักการออกแบบจะแยกชุดขดลวดสำหรับภาชนะก้นโค้งและก้นแบนออกจากกันอย่างอิสระ ขดลวดสำหรับภาชนะก้นแบนจะติดตั้งอยู่กับเตาที่ตั้งส่วนของขดลวดสำหรับภาชนะก้นโค้งจะมีลักษณะเป็นส่วนเสริมและจะถูกติดตั้งเข้าไปภายหลังเมื่อต้องการใช้งาน ดังนั้นในส่วนนี้จึงต้องมีวงจรสำหรับสับเปลี่ยน (Transfer Switch) ขดลวดเพื่อเลือกใช้งานระหว่างภาชนะก้นโค้งและแบน ซึ่งการสับเปลี่ยนจะใช้รีเลย์เป็นตัวต่อวงจร ดังแสดงรูปวงจรได้ตามรูปที่ 3.28 โดยมีการส่งงานมาจากผู้ใช้โดยตรง



(a) การวางขดลวดและรูปทรงขดลวดของภาชนะก้นแบน

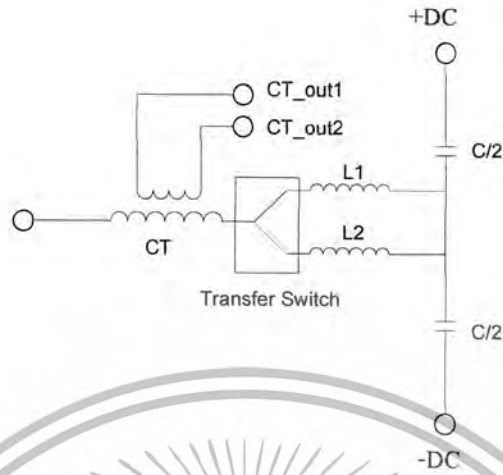
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) การติดตั้งชุดขดลวดสำหรับภาชนะก้นโค้งเข้ากับเตา

รูปที่ 3.27 รูปทรงของขดลวดเหนียวนำของภาชนะก้นโค้ง และแบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



L2 คือ ขดลวดสำหรับภาระกึ่งโค้ง

L2 คือ ขดลวดสำหรับภาระกึ่งแบน

รูปที่ 3.28 วงจรขดลวดเหนี่ยวนำของภาระกึ่งโค้ง และแบน

สำหรับค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ แสดงให้เห็นตามผังงานรูปที่ 3.39 อธิบายได้ว่า ในการออกแบบต้องกำหนดขนาดของภาระให้แน่นอน เพื่อต้องการให้วงจรมีประสิทธิภาพทำงานได้สูงสุด ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ภาระมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 เซนติเมตร โดยพันขดลวดให้มีขนาดเท่ากับก้นภาระนั้นๆ เมื่อได้ขดลวดที่มีรูปทรงตามต้องการ ต่อไปจะนำขดลวดดังกล่าวไปตรวจวัดค่าความเหนี่ยวนำ ตามสมการที่ 3.14 ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับ 30 kHz เพราะเป็นความถี่ที่ไม่สร้างสัญญาณรบกวนทางเสียงได้ และในการปรับเปลี่ยนกำลังงานเอาต์พุท จะปรับความถี่สวิตช์ในย่าน lagging ($f_s > f_r$) เพราะถ้าหากปรับไปในย่าน leading ($f_s < f_r$) จะทำให้ความถี่เข้าใกล้การรบกวนทางเสียงได้ จนถึง 40 kHz ตามกราฟรูปที่ 2.6จะได้อัตราส่วนการลดลงของกำลังงานเป็น 1.3 เท่าของพิกัด ก็จะเพียงพอ ซึ่งถ้าปรับไปมากกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง อันเนื่องมาจากมีการสูญเสียมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถหาค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ได้ ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปทำการทดลองและต้องมีการปรับแต่งให้วงจรทำงานได้ดีที่สุด



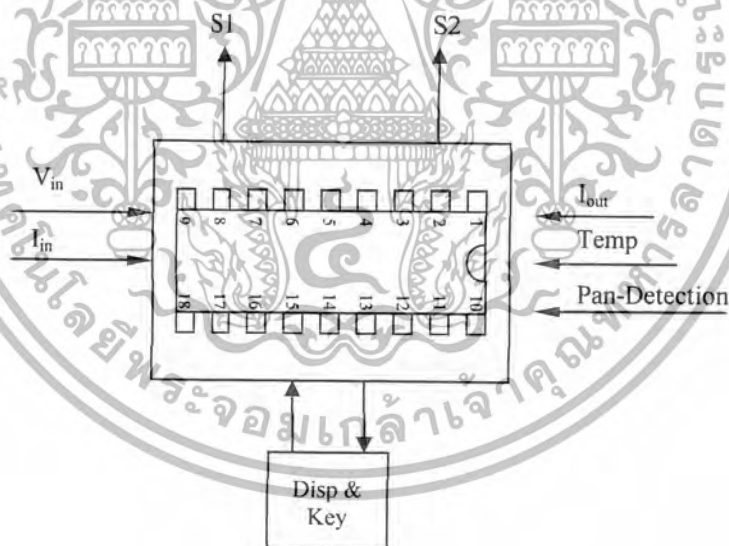
รูปที่ 3.29 ผังงานการหาค่าตัวเหนียวหน้าและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์

นอกจากนี้ จะต้องการออกแบบลวดนึ่งระหว่างขดลวด กับภาชนะ เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนใด ๆ ของภาชนะสัมผัสกับขดลวดเหนียวหน้าโดยตรง ฉนวนนี้จะเป็นฉนวนที่ทนความร้อนได้สูง เช่น เซรามิก แผ่นไมก้า หรืออื่นๆ ซึ่งการเลือกมาใช้งานจะต้องคำนึงถึงน้ำหนัก ความทนทาน และราคาประกอบกัน ดังนั้นความหนาของฉนวนจะต้องอยู่จุดเหมาะสมของการทำงาน ในส่วนนี้จะต้องมีการทดลองและปรับแต่งค่าเพื่อให้เครื่องทำงานได้ดีที่สุด

3.8.2 วงจรควบคุม

สำหรับในส่วนของวงจรควบคุมตามรูป 3.30 ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต เป็นตัวควบคุม ซึ่งจะทำให้มีความยืดหยุ่นสูง, มีเสถียรภาพในการทำงาน และวงจรมีขนาดเล็กกะทัดรัด โดยได้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC 18F458 ของบริษัท Microchip เพราะเนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่ครบถ้วน ได้แก่ วงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter), มีวงจรสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM) และมีวงจรประวิงเวลาในตัว ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์การนำมาใช้งานในงานวิจัยดังกล่าว ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. สร้างสัญญาณ พีดับบลิว เอ็ม เพื่อควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์
2. ตรวจสอบกระแสอินพุตและเอาต์พุตเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอินเวอร์เตอร์ได้
3. ตรวจสอบแรงดันอินพุตสูงหรือต่ำเกิน ($220 \pm 10\%$)
4. ตรวจสอบอุณหภูมิที่อุปกรณ์หุงต้มกิน
5. ตรวจสอบการทำงานและป้องกัน ขณะทำงานโดยไร้อุปกรณ์หุงต้ม
6. รับค่าและแสดงผลต่างๆ เช่น ค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องโดยผู้ใช้งาน, การเลือกชนิดของอุปกรณ์หุงต้ม, คำสั่งการเปิดปิดเครื่อง และแสดงเสียงเตือนต่างๆ ขณะการทำงานผิดพลาด



รูปที่ 3.30 วงจรควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

จะเห็นได้ว่าหน้าที่ของไมโครคอนโทรลเลอร์จะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. สร้างสัญญาณควบคุม
2. ตรวจสอบสัญญาณต่างๆ เพื่อป้องกันการการทำงานผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการควบคุมเตาหุงต้มจะไม่ซับซ้อนมาก ซึ่งการทำงานเป็นแบบลูปเปิด (Open Loop) โดยการทำงานนี้จะอยู่กับการเขียนซอฟต์แวร์ควบคุมทั้งหมด ซึ่งจะทำให้แก้ไขหรือตัดแปลงฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ได้ง่าย

3.8.3 วงจรป้องกันไฟรั่ว

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่ตัดไฟเมื่อมีกระแสไฟฟ้าบางส่วนรั่วหายไปคือไม่ไหลกลับไปตามสายไฟฟ้า แต่มีไฟรั่วลงไปในดิน โดยผ่านร่างกายมนุษย์ หรือผ่านฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายจากไฟดูด (ตัดไฟรั่วที่ไหลผ่านร่างกาย) หรือป้องกันการเกิดอัคคีภัย (ตัดไฟรั่วที่ไหลลงดินที่อุปกรณ์ไฟฟ้า หรือสายไฟฟ้าในกรณีที่เครื่องป้องกันกระแสเกิน เช่น ฟิวส์ หรือเบรกเกอร์ไม่ทำงานหรือทำงานช้า เนื่องจากปริมาณกระแสไฟรั่วมีค่าต่ำ แต่อาจทำให้เกิดอัคคีภัยได้)

ตามโครงสร้างของเตาหุงต้มนั้น ประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และมีเปลือกห่อหุ้มเป็นฉนวน แต่เนื่องจากในการหุงต้มหรือปรุงอาหารจะมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำปะปนอยู่ด้วย อาจทำให้เกิดความชื้นหรือมีการไหลแทรกซึมของน้ำเข้าไปด้านในตัวเครื่องได้ ซึ่งจะสร้างความไม่ปลอดภัยแก่ผู้ใช้งานได้ ฉะนั้นในส่วนนี้จึงต้องติดตั้งระบบป้องกันไฟรั่วเข้าไป เพื่อเสริมสร้างความน่าเชื่อถือและการไว้วางใจสำหรับใช้งาน

3.9 พลังงานความร้อน

พลังงานความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งซึ่งเปลี่ยนรูปร่างมาจากพลังงานรูปอื่นๆ ได้ ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากการเผาไหม้เปลี่ยนรูปร่างมาจากพลังงานเคมี ความร้อนจากเตารีดไฟฟ้าหรือหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเปลี่ยนรูปร่างมาจากพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น จากจากนี้พลังงานความร้อนยังอาจเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานอื่นๆ ได้ เช่น ความร้อนจากไอน้ำ เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปร่างมาจากพลังงานอื่นๆ จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานเดิม จากจากนี้เราทราบแล้วอุณหภูมิของวัตถุจะเพิ่มขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น อยู่กับค่าของพลังงานเดิมที่จะเปลี่ยนรูปร่างเป็นพลังงานความร้อน ความจุความร้อน

ความจุความร้อนของระบบๆ หนึ่งสำหรับกระบวนการทางกระบวนการ ถูกนิยามดังนี้

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T} \quad (3.15)$$

โดย Q เป็นความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ระบบระหว่างกระบวนการนั้น และ ΔT เป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของระบบสำหรับปริมาณสาร n โมลหรือมวล m ของานเอกพันธ์ ความจุความร้อนต่อโมล เป็น $c' = C/n$ และความจุความร้อนจำเพาะ (เหนือเรียกอย่างง่าย ความร้อนจำเพาะ) คือ $c = C/m$ หน่วยของ C , c' และ c เป็น J/K , $J/mol.K$ และ $J/kg.K$ ตามลำดับ

ตามธรรมดาแล้วความจุความร้อน ถูกจำกัดความไว้สำหรับกระบวนการเพียง 2 กระบวนการเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 กระบวนการที่ปริมาตรคงที่

สำหรับกระบวนการเหล่านี้ กฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการ

$$E = Q - W$$

เมื่อ W เป็นงานที่ระบบเป็นผู้กระทำต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างกระบวนการนั้น และ

Q เป็นความร้อนที่ไหลจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ (งานที่กระทำต่อระบบและความร้อนที่ไหลออกจากระบบ ทั้งสองนี้ถือว่ามีค่าเป็นลบ)

จะได้ $Q = \Delta E$ ดังนั้นความจุความร้อนสามารถหาได้จากพลังงานภายในของระบบ

$$C_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta T} = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_v \quad (3.16)$$

3.11 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนถ่ายเทจากที่หนึ่ง ไปยังอีกที่หนึ่งได้ 3 ทางคือ

การนำความร้อน (conduction) เป็นวิธีการเคลื่อนที่ของความร้อน ซึ่งความร้อนจะส่งผ่านจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในเนื้อวัสดุเดียวกันหรือต่างกัน ความร้อนจะไหลผ่านของแข็งโดยวิธีนี้ เช่นถ้าจับปลายข้างหนึ่งของแท่งโลหะไว้ แล้วนำปลายอีกข้างหนึ่งของโลหะนั้นเผาไฟในไม่ช้าจะรู้สึกว่ามีความร้อนถึงมือที่จับโลหะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ โมเลกุลของโลหะตรงจุดที่ถูกไฟเผาได้รับปริมาณความร้อนมากและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผ่านไปให้โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง จากโมเลกุลแรกไปยังโมเลกุลที่สองและต่อๆ ไปจนถึงปลายอีกข้างหนึ่งของโลหะที่มีมือจับอยู่ ซึ่งเรียกว่าเกิดการนำความร้อนในแท่งโลหะนั้น โดยที่โมเลกุลของแท่งโลหะไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย

การนำความร้อนเกิดขึ้นในของแข็งได้ดีกว่าของเหลวและแก๊ส โลหะที่เป็นจิวนำความร้อนได้ดีที่สุดคือเงิน ทองแดง ทอง และทองเหลือง ตามลำดับ จากความรู้ในเรื่องของการนำความร้อนนี้สามารถอธิบายถึงการนำความร้อนของอาหารที่ใช้หม้อสแตนเลส กับเตาหุงต้มเหนียวมาได้เป็นอย่างดี

3.11.1 พื้นที่ผิว

พื้นที่ผิวเป็นส่วนที่จะมีผลต่ออัตราการไหลของความร้อนคือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุที่ร้อนและวัตถุอื่น โดยทั่วไปถ้าพื้นที่ผิวถูกสัมผัสมาก อัตราการไหลของความร้อนจะมีมาก

3.11.2 แคลอรี

แคลอรี (calory) เป็นหน่วยที่ใช้วัดปริมาณความร้อน ดังที่ทราบได้ว่าเทอร์โมมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดระดับอุณหภูมิ ซึ่งจะใช้วัดได้เฉพาะระดับความหนาแน่นของความร้อนเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับความร้อน บางครั้งจำเป็นต้องวัดค่าปริมาณความร้อนด้วย เนื่องจากความร้อนเป็นพลังงานซึ่งไม่มีตัวตนจึงไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่จะวัดได้จากผลของความร้อนที่กระทำต่อวัตถุ เช่น ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนแปลงไป หรือเปลี่ยนสถานะ เปลี่ยนสี เปลี่ยนขนาด เป็นต้น

ปริมาณความร้อน 1 แคลอรี หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำซึ่งมีมวล 1 กรัม จะทำให้น้ำ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส หมายความว่า ถ้าเพิ่มปริมาณความร้อนจำนวนนี้ให้กับน้ำซึ่งมีมวล 1 กรัม จะทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส หรือในทางตรงข้าม ถ้าดึงปริมาณความร้อนออก 1 แคลอรีจากน้ำซึ่งมีมวล 1 กรัม ก็จะทำให้ น้ำมีอุณหภูมิลดลงจากเดิม 1 องศาเซลเซียสเช่นกัน

แคลอรี คือค่าผลรวมของปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในตัววัตถุ จึงกล่าวได้ว่าวัตถุใดที่มีค่าแคลอรี มากวัตถุนั้นย่อมมีค่าผลรวมของปริมาณความร้อนในตัวมาก (ปริมาณความร้อน 1 แคลอรี มีค่าเท่ากับ พลังงาน 4.184 J/kg.K หรือเท่ากับ 1 cal/g.°C)

3.11.3 ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของวัตถุใด หมายถึงปริมาณความร้อนที่พอดีทำให้อัตุซึ่งมี มวล 1 กรัมมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าค่าความร้อนจำเพาะของน้ำจะ มีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี และค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุอื่นจะบอกเป็นตัวเลขที่แสดงให้ทราบว่าวัตถุนั้นมี ความจุความร้อนเป็นกี่เท่าของน้ำ อย่างไรก็ตามถ้าวัตถุเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง ค่า ความร้อนจำเพาะของวัตถุนั้นในสถานะของแข็ง จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งโดยประมาณของวัตถุเดียวกันใน สถานะของเหลว

ปริมาณความจุความร้อนจำเพาะ
$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} \quad (3.17)$$

เมื่อ Q เป็นพลังงานความร้อนที่ให้แก่อสาร (kJ)
m เป็นมวลของสาร (kg)
T เป็นอุณหภูมิ (K)

ตาราง 3.5 ความจุความร้อนจำเพาะของสารทางชนิด

สาร	ความจุความร้อน (kJ/kg K)
น้ำ	4.184
น้ำแข็ง (-5°C)	2.08
ไอน้ำ (150°C 1 บรรยากาศ)	1.98
ปรอท	0.138
อะลูมิเนียม	0.880
เหล็ก	0.451
ทองแดง	0.385
ตะกั่ว	0.126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้พลังงานความร้อน

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (3.18)$$

3.12 พลังงานและกำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าถูกนิยามว่า คืออัตราเวลาของการทำงาน (ต่อวัตถุที่มีประจุโดยสนามไฟฟ้า) หรืออีกนัยหนึ่ง คืออัตราเวลาของการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน

$$P = \frac{dw}{dt} \quad (3.19)$$

เมื่อ w เป็นพลังงาน (J)

$$P = \left(\frac{dq}{dt} \right) v \quad (3.20)$$

$$P = vi \quad (3.21)$$

เป็นที่ทราบกันดีว่ากำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์ (หรือ J/s, cal/min) ดังนั้นเตาหุงต้มเหนี่ยวนำจะให้ พลังงานที่อาหารในภาชนะหุงต้มได้รับ (หรือเป็นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำที่ให้กับอาหาร)

$$P_{pot \rightarrow p} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{mc\Delta T}{\Delta t} \quad (3.22)$$

บทที่ 4

ไมโครคอนโทรลเลอร์

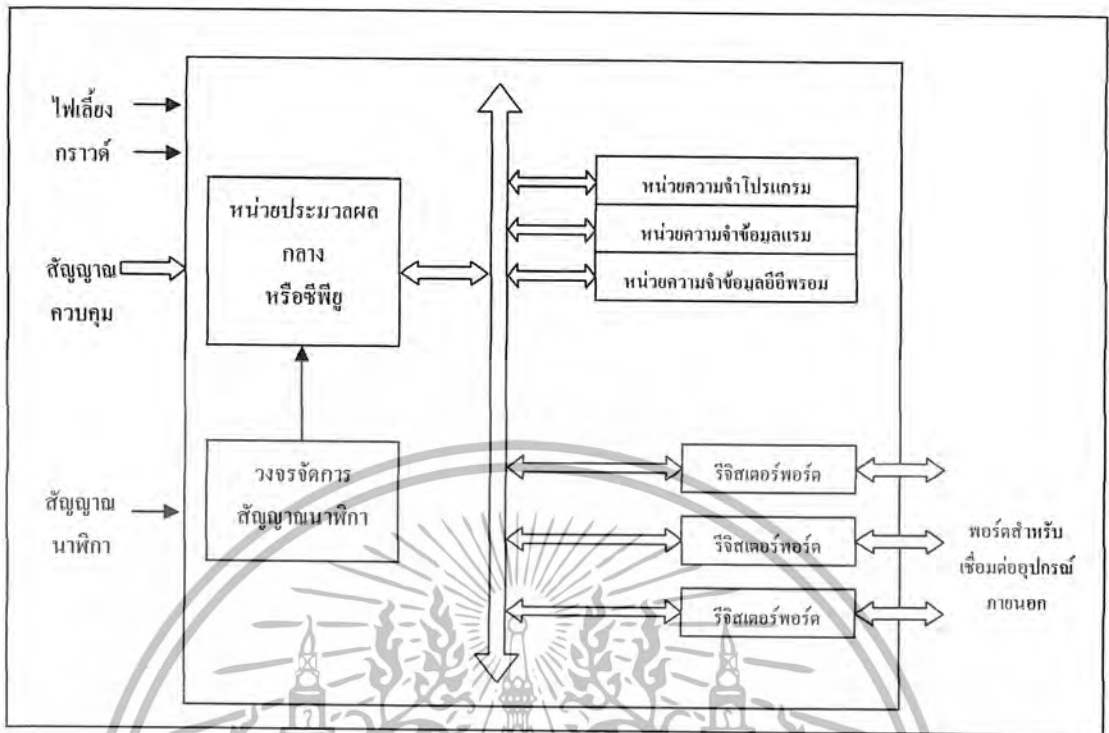
4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) PIC18F458

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เป็นตัวควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ภายในตัวอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กนี้ ได้บรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ที่คนโดยส่วนใหญ่คุ้นเคย กล่าวคือ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู, หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยบรรจุรวมกันอยู่ภายใต้ตัวถังเดียวกัน ดังรูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบหลักที่สำคัญและกลไกการทำงานเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2 PIC

PIC คือ Microcontroller อีกชนิดหนึ่งขอมานจากคำว่า Peripheral Interface Controller ซึ่ง concept ของผู้ผลิต Microcontroller ชนิดนี้ก็คือ พยายามรวมเอาทุกอย่างเอาไว้ในตัวของมันไม่ว่าจะเป็น Program MEMROY, RAM, EEPROM, Serial, i2C, PWM, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ในตัวของ PIC จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งหน่วยความจำ ซึ่งทำให้คล้ายกับเป็น CPU ตัวหนึ่ง

ซีพียูจะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านคำสั่งที่ระบุไว้โดยต้องทำการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำผ่านตามสัญญาณที่เรียกว่า บัสแอดเดรส (address bus) แล้วทำการอ่านข้อมูลคำสั่งออกมาจากหน่วยความจำโปรแกรมในแอดเดรสนั้นๆ จากนั้นทำการประมวลผล โดยมีหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นที่พักของข้อมูลที่อยู่ในระหว่างการประมวลผล หรืออาจมองว่าหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นเสมือนกระดานขาคในการคำนวณก็ได้ ข้อมูลในการประมวลผลจะส่งผ่านตามสัญญาณที่เรียกว่า บัสข้อมูล (data bus) แล้วส่งต่อไปยังอุปกรณ์ภายนอกผ่านทางขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุต

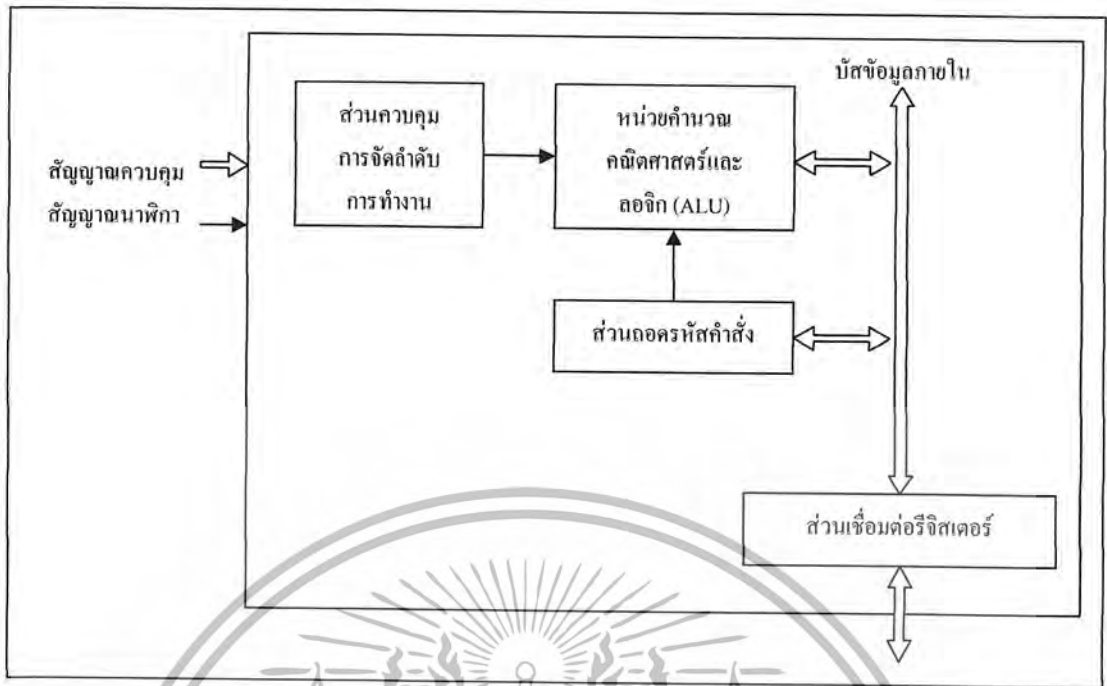


รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.3 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit)

เป็นเสมือนมันสมองของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยซีพียูนี้ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล ที่เข้ามาในระบบ แล้วทำการส่งต่อไปยังส่วนต่างๆ เพื่อควบคุมการทำงานต่อไป รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของซีพียูในไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆไป จะเห็นได้ว่าหัวใจหลักของซีพียูคือหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU : Arithmetic and logic unit) ซึ่งได้รับการกำหนดจังหวะการทำงานจากส่วนควบคุมลำดับการทำงาน โดยจังหวะการทำงานนั้นจะสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา เมื่อซีพียูทำการติดต่อหน่วยความจำ สิ่งปรากฏขึ้นบนบัสข้อมูลภายในซีพียูคือ รหัสคำสั่ง (instruction code) ต้องผ่านการดำเนินงานของส่วนถอดรหัสคำสั่ง (instruction decoder) เสียก่อน จะได้เป็นข้อมูลคำสั่งที่ซีพียูเข้าใจและสามารถดำเนินการต่อไปได้ หลังจากที่หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกประมวลผลแล้วจะส่งข้อมูลมายังส่วนเชื่อมต่อรีจิสเตอร์ภายในซีพียูเพื่อติดต่อกับส่วนอื่นๆ ต่อไป

การทำงานของซีพียูมีด้วยกัน 2 จังหวะคือ เฟตช์ (fetch) และเอ็กซีคิวต์ (executed) โดยการทำงานจะเริ่มจากการเฟตช์ ซึ่งก็คือการเรียกหรือการเข้าถึงคำสั่ง แล้วทำการถอดรหัสเป็นภาษาเครื่องเพื่อเตรียมประมวลผล จากนั้นจะเป็นวังหะของการเอ็กซีคิวต์ ซึ่งก็คือการกระทำตามคำสั่งที่กำหนดให้จนเสร็จสิ้น



รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบหลักของชิพไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4 หน่วยความจำ

ในไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบด้วยหน่วยความจำ 3 แบบคือ หน่วยความจำโปรแกรม (program memory), หน่วยความจำข้อมูลแรม (RAM data memory) และหน่วยความจำข้อมูล อีอีพรอม (EEPROM data memory)

4.4.1 หน่วยความจำโปรแกรม

หน่วยความจำโปรแกรมเป็นที่สำหรับเก็บข้อมูลคำสั่งของโปรแกรมควบคุมที่ผู้พัฒนาเขียนขึ้น หรือเรียกว่าโปรแกรมมอนิเตอร์ (monitor program) ชิปที่จะเข้ามาติดต่อก็อ่านข้อมูลรหัสคำสั่งจากหน่วยความจำในส่วนนี้แล้วนำไปประมวลผล เพื่อควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดต่อไป เรียกได้ว่ามีความสำคัญเท่าๆ กับชิพยูเอสบีซีเลย หน่วยความจำโปรแกรมนี้นักก็มีขนาดใหญ่ และถ้ายังมีขนาดมากเท่าใด ก็จะสามารบรรจุโปรแกรมที่มีความซับซ้อนหรือสามารถเก็บตารางข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลได้มากตาม โดยทั่วไปมีความจุไม่น้อยกว่า 512 ไบต์ แต่จะให้ดีกว่ามีความจุ 1 กิโลไบต์ขึ้นไป จึงจะช่วยให้การเขียนโปรแกรมควบคุมมีอิสระเพิ่มมากขึ้น ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมจะแปรตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี มีการพัฒนาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรมสูงขึ้นเรื่อยๆ เป็น 4, 6, 8, 32 และ 64 กิโลไบต์ และยังไม่สิ้นสุดเท่านี้ เชื่อได้ว่าต้องมีการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรมสูงเป็นหลักร้อยกิโลไบต์หรือหลักเมกะไบต์ในที่สุด

4.4.1.1 EPROM

แบบอีพรอม ยังแบ่งเป็น 2 แบบ โปรแกรมได้หลายครั้งและ แบบโปรแกรมได้ครั้งเดียวถ้าหากเป็นแบบโปรแกรมได้หลายครั้งบนตัวถังของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีหน้าต่างกระจกติดอยู่สามารถมองเห็นชิปภายในได้ เวลาลบต้องลบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จำนวนครั้งในการโปรแกรมใหม่อยู่ระหว่าง 10-100 ครั้ง แต่ถ้าเป็นแบบโปรแกรมได้ครั้งเดียวหรือ OTP (one-time programmable) จำไม่สามารถลบได้ ตัวถังของมันจะปิดมิดชิดเหมือนกับไอซีธรรมดา

4.4.1.2 EEPROM

แบบอีอีพรอม หน่วยความจำแบบนี้จะลบและเขียนใหม่ได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้าในอดีตนับที่นิยมมากเนื่องจากสามารถลบและเขียนใหม่ได้เป็นหลักร้อยรอบขึ้นไป ในทางตระกูลถึง 1 ล้านครั้ง แต่ในปัจจุบันแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว เนื่องจากต้นทุนสูง

4.4.1.3 FLASH

แบบแฟลช หน่วยความจำโปรแกรมชนิดนี้สามารถลบและเขียนได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้า แตกต่างกับแลตอีอีพรอมในเชิงการใช้งานตรงที่กระบวนการลบข้อมูลหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลชจะไม่สามารถเลือกลบเฉพาะเจาะจงบางแอดเดรสบางตำแหน่งได้ เมื่อทำการลบข้อมูลจะต้องลบทั้งหมด หน่วยความจำโปรแกรมแบบนี้ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากราคาไม่สูง และสามารถโปรแกรมได้เป็นร้อยครั้งขึ้นไป แต่โดยปกติมักมีที่หนึ่งพันครั้ง ในทางรุ่นสูงเป็นหมื่นครั้งและเป็นแสนครั้งก็มี ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ในการโปรแกรม

ขนาดข้อมูลของหน่วยความจำโปรแกรมขึ้นอยู่กับผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ ยกตัวอย่างในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51, 16HC05, 68HC08, 68HC11 ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมเป็น 8 บิต ถ้าเป็นตระกูล PIC จะเป็น 12 และ 14 บิต ถ้าเป็นตระกูล AVR, 68HC12 จะเป็นขนาด 16 บิต แต่ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมไม่ได้เป็นตัวระบุความสามารถในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4.2 หน่วยความจำข้อมูลแรม

เป็นหน่วยความจำที่ต้องมีในไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกตัว เพราะใช้เป็นพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลทั้งในระหว่างและหลังจากการประมวลผล ยังมีมากยิ่งช่วยให้การทำงานสะดวกเพราะหน่วยความจำแรมมีอัตราเร็วในการอ่านเขียนสูงมาก จึงไม่จำกัดจำนวนรอบในการอ่านเขียน ในพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลแรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของข้อมูลทั่วไปสำหรับเก็บค่าตัวแปร และส่วนของรีจิสเตอร์

4.4.3 หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม

เป็นหน่วยความจำข้อมูลพิเศษที่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ทางเบอร์ บางรุ่น บางตระกูลไม่มีใช้สำหรับเก็บข้อมูลที่ต้องการรักษาไว้เมื่อไม่มีการจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ การติดต่อเพื่ออ่านเขียนจะมีลักษณะเป็นพิเศษขึ้นอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์ขนาดของหน่วยความจำแบบนี้มักเท่ากับ 8 บิต ส่วนความจุก็จะแตกต่างกันไป มีตั้งแต่ไม่กี่สิบไบต์จนถึงเป็นกิโลไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 รีจิสเตอร์ (register)

เป็นหน่วยความจำพิเศษที่มีบทบาทสูงมากในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถที่จะอ่านและเขียนข้อมูลได้ตลอดเวลา จนกว่าจะหยุดจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ หน้าที่หลักคือ ใช้เก็บข้อมูลในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยข้อมูลที่เก็บนี้มีทั้งข้อมูลแสดงสถานการณ์ทำงาน ข้อมูลสำหรับควบคุมการทำงานโมดูลย่อยต่างๆ ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลที่รับเข้ามาจากพอร์ตอินพุต ข้อมูลที่ต้องการส่งออกไปยังอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตเอาต์พุต โดยข้อมูลแต่ละประเภทก็จะถูกจัดเก็บลงในรีจิสเตอร์ที่แตกต่างกันตามหน้าที่การทำงาน

4.6 รีจิสเตอร์ตัวนับโปรแกรมหรือโปรแกรมเคาน์เตอร์ (PC)

การที่ซีพียูสามารถติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านข้อมูลคำสั่งได้อย่างถูกต้องเป็นผลมาจากรีจิสเตอร์หน้าที่พิเศษตัวหนึ่งคือ รีจิสเตอร์ตัวนับโปรแกรม หรือ PC (Program Counter) โดย PC จะเป็นตัวชี้ตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่ซีพียูจะต้องไปกระทำในลำดับถัดไป โดยปกติแล้วค่าของ PC จะเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับผลการทำงานที่เกิดขึ้นในไมโครคอนโทรลเลอร์บางตระกูลสามารถเข้าถึงรีจิสเตอร์ PC เพื่อทำการอ่านเขียนได้ ในบางตระกูลก็ไม่สามารถทำได้

4.7 สแต็กในไมโครคอนโทรลเลอร์

สแต็ก (stack) เป็นหน่วยความจำส่วนพิเศษที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทุกตัวต้องมีโดยหน้าที่ของมันคือ เก็บข้อมูลที่ยังต้องการอยู่ของรีจิสเตอร์ และเมื่อข้อมูลนั้นถูกนำมาเก็บไว้ในสแต็กแล้วก็สามารถที่จะเปลี่ยนข้อมูลในรีจิสเตอร์ตัวนั้นๆ ได้ทันที หลังจากทำงานเรียบร้อยแล้วจึงกลับมาอ่านข้อมูลเดิมกลับจากสแต็ก การเก็บข้อมูลของสแต็กจะมีลักษณะเป็นระดับหรือเป็นชั้น ข้อมูลที่เก็บเข้ามาจะต้องอ่านออกทีหลังหรือเป็นแบบ FILO (First In Last Out) และจำนวนระดับหรือจำนวนชั้นของสแต็กก็มีจำกัด

4.8 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถทำงานได้เมื่อจ่ายไฟเลี้ยงและต้องวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้แก่มัน จากนั้นซีพียูในไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านข้อมูลคำสั่งแล้วทำงานตามคำสั่งที่บรรจุอยู่ในหน่วยความจำโปรแกรม

นั่นหมายความว่า ต้องมีการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมก่อน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์จะมีรูปแบบของข้อมูลคำสั่งที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องอาศัยการเขียนโปรแกรม (programming) ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสามารถแบ่งได้ 2 ระดับคือ ภาษาสูง (high language) และภาษาแอสเซมบลี (assembly language) โดยปกติไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาแอสเซมบลี เนื่องจากสามารถทำงานได้รวดเร็วผ่านกระบวนการแปลงข้อมูลคำสั่งเป็นข้อมูลเลขฐานสิบหก หรือที่เรียกว่าออปโค้ด (Op-code)

4.9 ความเร็วของ PIC

ความถี่สัญญาณนาฬิกา ปัจจุบันสามารถทำสัญญาณนาฬิกาได้ที่ 40 MHz ซึ่งทำให้คำสั่งของ PIC ใช้เวลาเพียง 0.05 uSec แต่อย่างไรก็ตามได้มีบริษัทอื่นได้ซื้อลิขสิทธิ์ PIC จาก Microchip และได้สร้าง chip ที่มีความเร็วได้มากกว่าเดิมขึ้นไปอีก

4.10 สถาปัตยกรรมของ PIC

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการพัฒนา PIC เบอร์ 12CXXX, 12FXXX, 16C5X, 16CXXX, 16FXXX, 17CXXX, 18CXXX, 18FXXX โดยมีการพัฒนาขีดความสามารถสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับ ซึ่งชนิดของ PIC ในตระกูล PIC แบ่งตามชนิดของ Program MEMORY ตามตาราง

ตารางที่ 4.1 ชนิดของ PIC

	Family	name	Technology
PIC18CX XX	8-bit High- Performance MCU Family	PIC18CXX2	OTP program memory with higher resolution analog functions
		PIC18FXXX	FLASH program memory
PIC17CX XX	8-bit High- Performance MCU Family	PIC17C4X	OTP program memory, digital only
		PIC17CR4X	ROM program memory, digital only
		PIC17C7XX	OTP program memory with mixed-signal functions
PIC16CXXX	8-bit Mid-Range MCU Family	PIC16C55X	OTP program memory, digital only
		PIC16C6X	OTP program memory, digital only
		PIC16CR6X	ROM program memory, digital only
		PIC16C62X	OTP program memory with comparators
		PIC16CR62X	ROM program memory with comparators
		PIC16CE62X	OTP program memory with comparators and EEPROM data memory
		PIC16F62X	EEPROM data memory
		PIC16C64X	FLASH program memory with comparators and EEPROM data memory
		PIC16C66X	EEPROM data memory
		PIC16C7X	OTP program memory with comparators
			OTP program memory with comparators
			OTP program memory with analog functions (i.e. A/D)
		PIC16CR7X	ROM program memory with analog functions
PIC16C7XX	OTP program memory with higher resolution analog functions		
PIC16F8X	FLASH program memory and EEPROM data memory		
PIC16CR8X	ROM program memory and EEPROM data memory		
PIC16F87X	FLASH program memory with higher resolution analog functions		
PIC16C9XX	OTP program memory, LCD driver		

ตารางที่ 4.1 ชนิดของ PIC (ต่อ)

Family	name	Technology	
PIC16C5X	8-bit Base-Line MCU Family	PIC16C5X	OTP program memory, digital only
		PIC16CR5X	ROM program memory, digital only
		PIC16C505	OTP program memory, digital only, internal 4 MHz oscillator
		PIC16HV540	OTP program memory with high voltage operation
PIC12CXXX	8-bit, 8-pin MCU Family	PIC12C5XX	OTP program memory, digital only
		PIC12CE5XX	OTP program memory, digital only with EEPROM data memory
		PIC12CR5XX	ROM program memory, digital only
		PIC12C67X	OTP program memory with analog functions
		PIC12CE67X	OTP program memory with analog functions and EEPROM data memory

ตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์

- PIC12FXXX 8-pin 12-bit/14-bit program word
- PIC16C5X 12-bit program word
- PIC16FXXX 14-bit program word
- PIC17FXXX 16-bit program word
- PIC18FXXX enhanced 16-bit program word

ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แต่ละตระกูล

คุณสมบัติของ ไมโครคอนโทรลเลอร์	PIC12FXXX	PIC16F62X	PIC17FXXX	PIC18FXX8
Memory Type Standard	Flash	Flash	OTP	Enhanced Flash
Program Memory	2048×4	2048×4	2048×4	16384×16
Data memory	SRAM	128	256-352	-
	EEROM	256	256	-
	EPROM	-	-	2048×16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

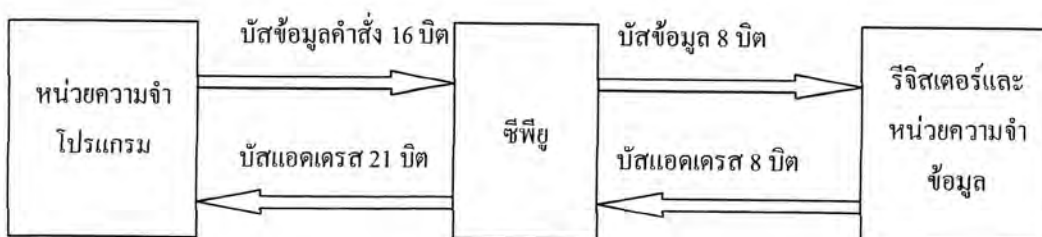
ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างทางเทคนิคของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แต่ละตระกูล (ต่อ)

คุณสมบัติของ ไมโครคอนโทรลเลอร์	PIC12FXXX	PIC16F62X	PIC17FXXX	PIC18FXX8
I/O	6	35	66	34
ADC	4/10 bit	0	0	8/10 bit
Comparator	1	2	0	2
Timer	2-8 bit 1-16 bit 1-WDT	1-8 bit 1-16 bit 1-WDT	2-8 bit 2-16 bit 1-WDT	1-8 bit 3-16 bit 1-WDT
Max speed (MHz)	20	20-40	33	40
PWM module	10 bit PWM, fmax 20 kHz.	10 bit PWM, fmax 20 kHz.	10 bit PWM	10 bit PWM, fmax @8 bit =150 kHz. @10 bit =39 kHz.
Number of Pin	8	28, 40	48, 60, 74, 80	40

4.11 สถาปัตยกรรมและโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของ PIC

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard architecture) กล่าวคือ มีการวัดแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกัน มีบัสสำหรับติดต่อแยกกัน ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าซีพียูภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมด้วยบัสของแอดเดรส 13 บิต และบัสของข้อมูลหน่วยความจำโปรแกรม 14 บิต ในขณะที่บัสติดต่อหน่วยความจำข้อมูลและรีจิสเตอร์ภายในเป็นแบบ 8 บิต

นอกจากการจัดสถาปัตยกรรมแบบนี้แล้ว การกระทำคำสั่งทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ยังใช้กระบวนการที่เรียกว่าไปป์ไลน์ (pipeline) ทำให้สามารถเฟตช์คำสั่งถัดไป ในขณะที่กำลังเอ็กซีคิวต์คำสั่งในปัจจุบัน ส่งผลให้ความเร็วในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพิ่มมากขึ้น นั่นจึงเป็นที่มาของความสามารถในการกระทำคำสั่ง 1 คำสั่งภายในสัญญาณนาฬิกา 1 ลูก (กระบวนการเฟตช์ (fetch) เป็นกระบวนการเรียกคำสั่งออกจากหน่วยความจำโปรแกรมแล้วทำการแปลคำสั่งนั้นให้เป็นรหัสเลขฐานสิบหกเพื่อให้ซีพียูเข้าไป ส่วนกระบวนการเอ็กซีคิวต์ (execute) เป็นการกระทำคำสั่งให้เกิดผลลัพธ์ตามที่คำสั่งนั้นๆ กำหนด)

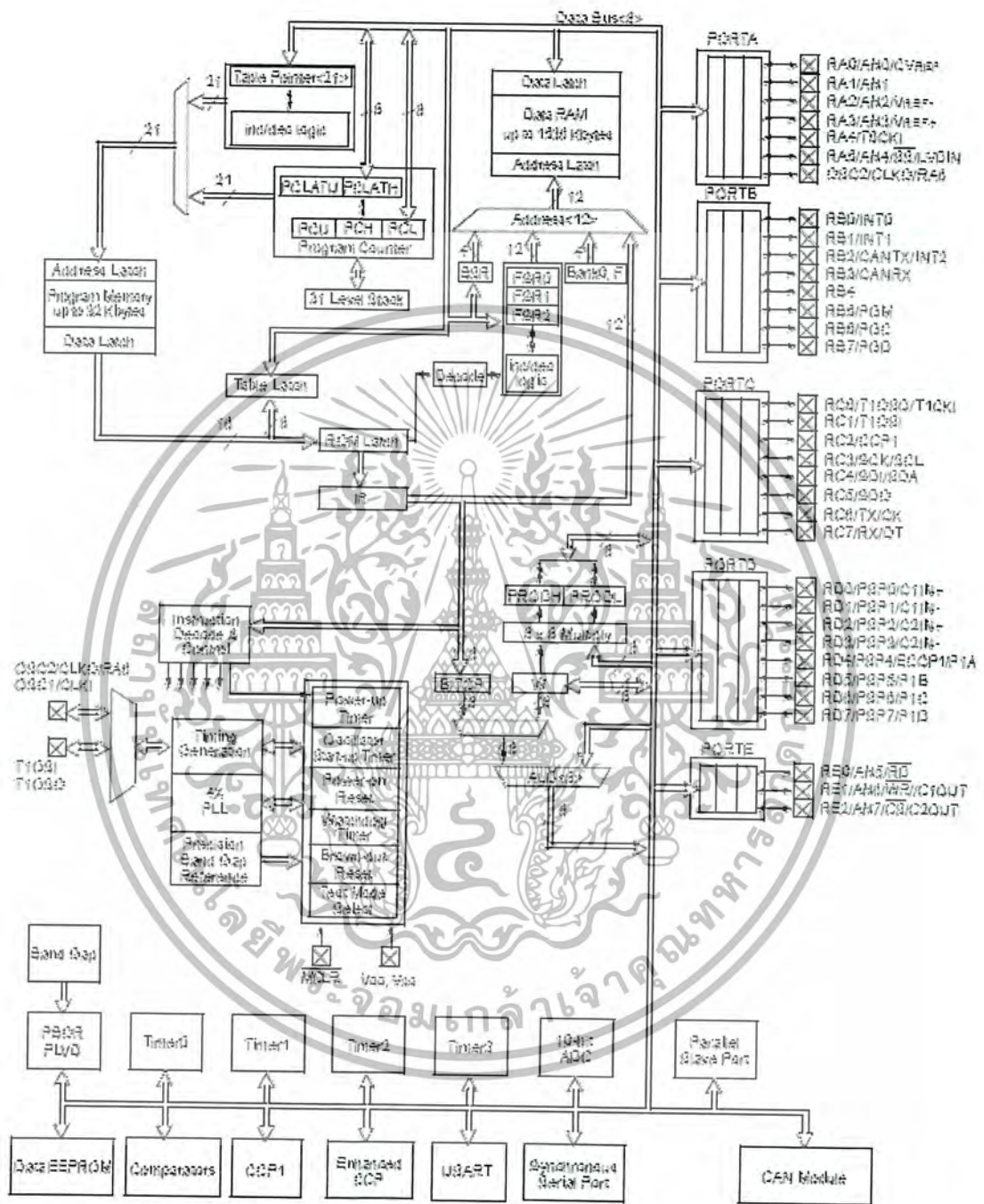


รูปที่ 4.3 โค้ดแอมการการทำงานพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

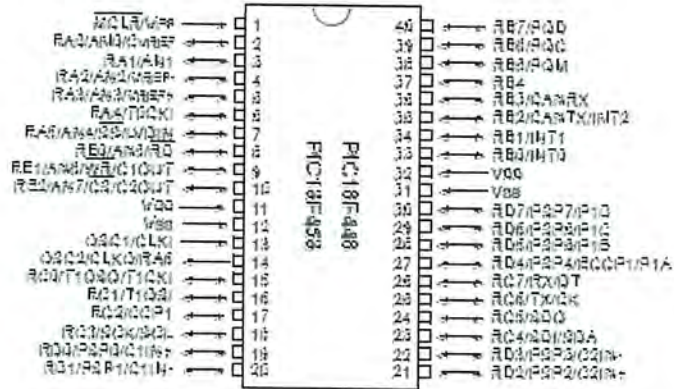
ส่วนประกอบหลักของ PIC 18F458 ที่โดดเด่นได้แก่ วงจรบราวเอาต์รีเซต (brown-out reset) สำหรับสร้างสัญญาณรีเซตซีพียูเมื่อไฟเลี้ยงลดต่ำกว่าที่กำหนด, วงจรโปรแกรมข้อมูลด้วยแรงดันต่ำ (low-voltage programming), ไทเมอร์ที่มีมากถึง 4 ตัว, โมดูลสร้างแรงดันอ้างอิง (reference voltage module), โมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก 2 ชุด (analog comparator), วงจรสื่อสารอนุกรม (USART : Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter), โมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Module), และโมดูลตรวจจับสัญญาณ-เปรียบเทียบข้อมูล-วงจรสร้างสัญญาณมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์หรือ PWM (CCP : Capture Compare Pulse-width modulation module) สามารถสรุปรายละเอียดของส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.5





รูปที่ 4.5 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ชิปตระกูล PIC18FXXX 40 ขา

คุณสมบัติทางเทคนิคของ PIC18F458

- ซึ่พียูเป็นแบบ RISC (reduce Instruction-Set Computer) มีคำสั่งใช้งานเพียง 77 คำสั่ง
- ขนาดหน่วยความจำโปรแกรม 16 กิโลไบต์
- หน่วยความจำแรมข้อมูล 1536 ไบต์
- หน่วยความจำอีอีพรอม 256 ไบต์
- ความถี่สัญญาณนาฬิกา ตั้งแต่ไฟตรง 40 MHz (สูงสุด)
- ตอบสนองแหล่งกำเนิดอินเทอร์รัปต์ได้ 10 แหล่ง
- มีการจัดลำดับความสำคัญของอินเทอร์รัปต์
- มีอินเทอร์รัปต์ภายนอก 3 ชุด
- เลือกสัญญาณนาฬิกาได้ 8 โหมดหลัก
 1. โหมด EC ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก
 2. โหมด ECIO ใช้สัญญาณนาฬิกาภายนอก โดยมีหนึ่งขาเป็นได้ทั้งสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต
 3. โหมด RC ใช้ตัวต้านทานภายนอก
 4. โหมด RCIO (ใช้ความต้านทานภายนอกโดยใช้สัญญาณภายใน โดยมีหนึ่งขาเป็น I/O
 5. โหมด LP ใช้คริสตอลพลังงานต่ำ
 6. โหมด XT ใช้คริสตอลความถี่รีโซแนนซ์
 7. โหมด HS ใช้คริสตอลความถี่สูง สูงสุดไม่เกิน 10 MHz.
 8. โหมด HS4 ใช้คริสตอลความถี่สูงในโหมด HS เพิ่มสัญญาณนาฬิกา $4 \times F_{osc}$
- สามารถโปรแกรมในวงจรได้
- ไฟฟ้าเลี้ยง +4.2 ถึง +5.5V
- มีวงจรโปรแกรมข้อมูลด้วยแรงดันต่ำ (low-voltage programming)
- กระแสซิงก์และซอร์สของพอร์ต 25mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีไทมเมอร์ 4 ตัว ประกอบด้วย 8 bit 1 ตัวและ 16 bit 3 ตัว
- มีโมดูล CCP (Capture/Compare/PWM) มีโหมดจับสัญญาณ 16 bit, เปรียบเทียบข้อมูล 16 bit, โหมดสร้างสัญญาณ PWM ตั้งแต่ 1-10 bit มีความถี่สูงสุดของสัญญาณ PWM 8 bit ที่ความถี่ 156 kHz. และ 10 bit ที่ความถี่ 39 kHz.
- โมดูล Enhanced CCP สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตของ PWM ได้ 1,2 หรือ 4 เอาต์พุต
- มีโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 10 bit 8 ตัว
- มีโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิง
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม USART
- มีวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟเลี้ยงหรือบราวเอาต์ดีเทกชัน (brown-out detection) เพื่อสร้างสัญญาณรีเซ็ตซีพียูหรือเรียกว่า บราวเอาต์รีเซ็ต (Brown-out reset: BOR)

4.12 Configuration word : รีจิสเตอร์กำหนดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ทุกเบอร์จะมีพารามิเตอร์อยู่ตัวหนึ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างมากที่ต้องทราบและทำความเข้าใจพารามิเตอร์ตัวนี้คือ Configuration word ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์ที่บรรจุข้อมูลสำหรับกำหนดการทำงานทั้งหมดของไมโครคอนโทรลเลอร์ ไม่ว่าจะเป็นการเลือกป้องกันข้อมูล, การเลือกให้สามารถโปรแกรมหน่วยความจำด้วยแรงดันต่ำ, เลือกการรีเซ็ตอัตโนมัติเมื่อไฟเลี้ยงลดต่ำลงค่าที่กำหนด, ควบคุมการทำงานของวอตช์ด็อกไทมเมอร์ หรือกระทั่งการเลือกชนิดของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

โหมดการเลือกใช้สัญญาณนาฬิกา 6 โหมดหลัก 8 โหมดย่อย

U-D	U-0	R/P-1	U-0	U-0	R/P-1	R/P-1	R/P-1
—	—	OSCSEN	—	—	FOSC2	FOSC1	FOSC0
bit 7							bit 0

bit 7-6 ไม่มีการใช้งาน

bit 5 OSCSEN : บิตเลือกการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

1 = เอ็นเนเบิลความสามารถนี้

0 = ดิส์เอเบิลความสามารถนี้

bit 4-3 ไม่ได้ใช้งาน

bit 2-0 FOSC2:FOSC0: บิตเลือกโหมดของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกาหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์

000 โหมด LP (คริสตอลพลังงานต่ำ)

001 โหมด XT (คริสตอลหรือเรโซเนเตอร์)

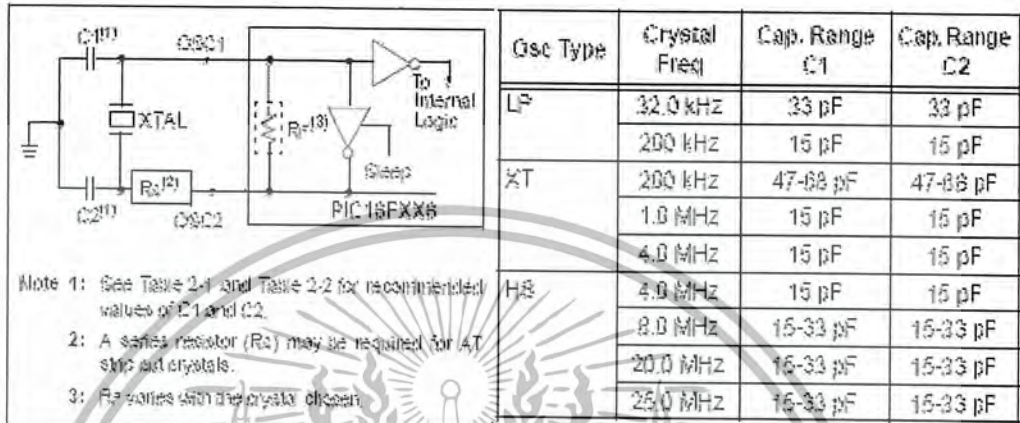
010 โหมด HS (คริสตอลหรือเรโซเนเตอร์ความเร็วสูง)

011 โหมด RC (ใช้ความต้านทานภายนอกโดยใช้สัญญาณภายใน)

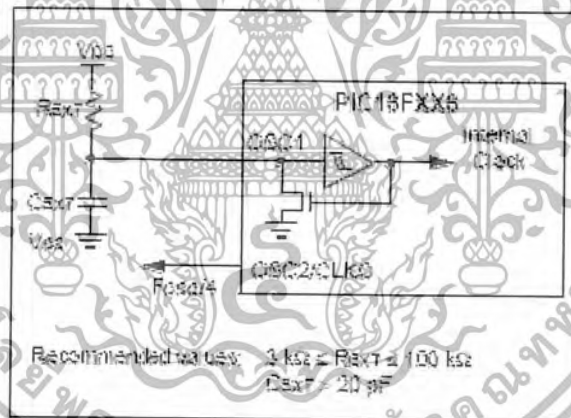
100 โหมด EC (สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

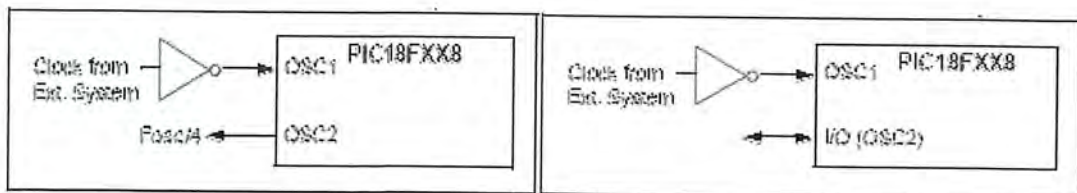
- 101 โหมด ECIO (สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก มีหนึ่งขาเป็น I/O)
- 110 โหมด HS4 (เพิ่มสัญญาณนาฬิกา $4 \times F_{osc}$)
- 111 โหมด RCIO (ใช้ความต้านทานภายนอกโดยใช้สัญญาณภายใน โดยมีหนึ่งขาเป็น I/O)



รูปที่ 4.7 กรณีการใช้คริสตัลเป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 4.8 กรณีการต่อ RC จากภายนอกเพื่อกำเนิดความถี่ในโหมดสัญญาณนาฬิกาแบบ RC และ RCIO



ก)

ข)

รูปที่ 4.9 กรณีการต่อเพื่อใช้โหมดสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) แบบ EC

ข) แบบ ECIO

4.13 โมดูลไทมเมอร์เคาน์เตอร์ของ PIC

ความสามารถที่โดดเด่นของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 อีกประการหนึ่งคือ มีไทมเมอร์เคาน์เตอร์ (timer/counter) มากถึง 4 ตัว คือ ไทมเมอร์ 0 (Timer0), ไทมเมอร์ 1 (Timer1) ไทมเมอร์ 2 (Timer2) และไทมเมอร์ 3 (Timer3) โดยไทมเมอร์แต่ละตัวมีความสามารถพื้นฐานที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีความสามารถพิเศษเพิ่มเติมที่แตกต่างกันออกไป อันเป็นการเพิ่มทางเลือกและทางออกในการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ให้แก่ผู้ใช้งาน

4.13.1 Timer0

Timer0 สามารถทำงานเป็นไทมเมอร์ และเคาน์เตอร์ (ตัวตั้งเวลาและตัวนับ) ขนาด 8 bit หรือ 16 bit มีปริสเกลเลอร์ขนาด 8 bit รวมอยู่ด้วย โดยไทมเมอร์ 0 นี้จะเป็นไทมเมอร์พื้นฐานที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ทุกเบอร์ต้องมี

T0CON: รีจิสเตอร์ควบคุม TIMER0

RAW-1	RAW-1	RAW-1	RAW-1	RAW-1	RAW-1	RAW-1	RAW-1
TMR0ON	T08BIT	T0CS	T0SE	PSA	T0PS2	T0PS1	T0PS0
bit 7							bit 0

TMR0ON : บิตสัญญาณ on-off ไทมเมอร์

T08BIT: บิตเลือกขอบขาของสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอก

T0CS: บิตเลือกแหล่งจ่ายสัญญาณนาฬิกาของไทมเมอร์ 0

T0SE: บิตเลือกการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณ เพื่อให้ไทมเมอร์ 0 เพิ่มค่าขึ้น การกำหนดข้อมูลในบิตนี้เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการเลือกแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้แก่ไทมเมอร์ 0 ที่บิต T0CS หากเลือกรับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกจะต้องมาเลือกการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่บิตนี้

PSA: บิตทางเลือกการทำงานของปริสเกลเลอร์

PS2-PS0: บิตเลือกอัตราส่วนของปริสเกลเลอร์ใช้กำหนดอัตราส่วนในการทำงานของปริสเกลเลอร์เมื่อทำงานร่วมกับทั้งวอตช์ด็อกไทมเมอร์และไทมเมอร์ 0 ซึ่งจะมีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

4.13.2 Timer1

Timer1 เหมือนกับไทมเมอร์ 0 แต่จะมีขนาดใหญ่กว่าคือ เป็นไทมเมอร์เคาน์เตอร์ขนาด 16 bit พร้อมปริสเกลเลอร์ และที่พิเศษคือ แม้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานอยู่ในโหมดสลีป ไทมเมอร์ 1 ยังคงทำงานเพิ่มค่าอยู่ต่อไป สามารถเลือกโหมดการทำงานเป็นไทมเมอร์หรือตัวตั้งเวลา 16 bit , ตัวนับหรือเคาน์เตอร์ 16 bit ทั้งแบบซิงโครนัสและอะซิงโครนัส รวมถึงสามารถกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์เมื่อเกิดการโอเวอร์โฟลได้ด้วย

TICON: รีจิสเตอร์ควบคุม TIMER1

RAW-0	U-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0
RD16	—	TICKPS1	TICKPS0	TIOSCEN	TISYNC	TMR1CS	TMR1ON
bit 7							bit 0

TICKPS1-TICKPS0: บิตเลือกอัตราการทำงานของปริสเกลในไทมเมอร์ 1

TIOSCEN: บิตควบคุมวงจรรอสซิคเลเตอร์ไทมเมอร์ 1

TISYNC: บิตควบคุมจังหวะของสัญญาณกระตุ้นจากภายนอกให้สัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกาภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์หรือการซิงโครไนซ์ โดยบิตนี้ต้องทำงานสัมพันธ์กับบิต TMR1CS (บิต 1)

TMR1CS: บิตเลือกแหล่งกำเนิดสัญญาณกระตุ้นของไทมเมอร์ 1

TMR1ON: บิตควบคุมทำงานของไทมเมอร์ 1

4.13.3 Timer2

ไทมเมอร์ 2 เป็นไทมเมอร์ขนาด 8 bit ที่มีความสามารถพิเศษเพิ่มขึ้น โดยมีทั้งไทมเมอร์, ปริสเกลเลอร์, โปสต์สเกลเลอร์ (post scaler) และรีจิสเตอร์คาบเวลา (period register) อยู่ในตัวครบ พร้อมกันนั้นไทมเมอร์ 2 ยังใช้เป็นตัวกำหนดคาบเวลาของโมดูล CCP (Capture/Compare/Pulse width modulation module) เมื่อกำหนดให้ทำงานในโหมด PWM ด้วย

T2CON: รีจิสเตอร์ควบคุม TIMER2

U-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0	RAW-0
—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0
bit 7							bit 0

TOUTPS3-TOUTPS0: บิตเลือกอัตราสัญญาณเอาต์พุตของโปสต์สเกลเลอร์ในไทมเมอร์ 2

TMR2ON: บิตควบคุมการทำงานของไทมเมอร์ 2

T2CKPS1-T2CKPS0: บิตเลือกอัตราการทำงานของปริสเกลเลอร์ไทมเมอร์ 2

4.13.4 Timer3

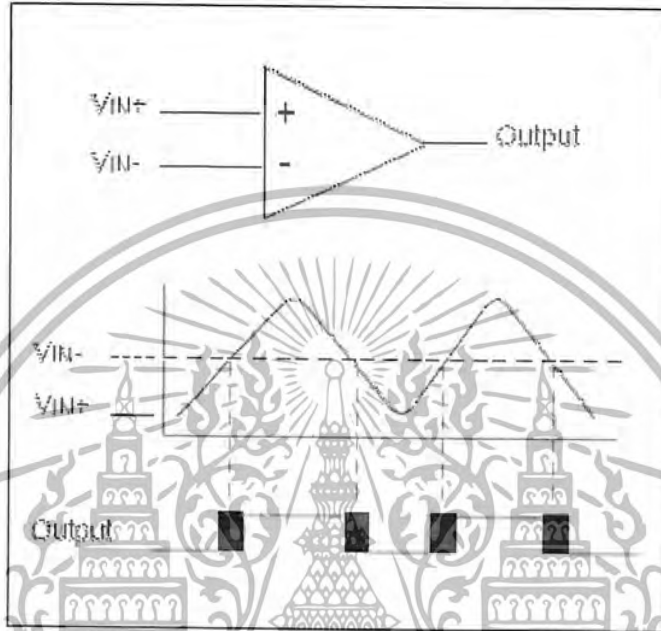
ไทมเมอร์ 3 มีการทำงานเหมือนกับไทมเมอร์ 1 โดยทำงานร่วมกันในโหมดของ capture และ comparator

4.13.5 Prescaler

ปริสเกลเลอร์ เป็นตัวนับขนาด 8 bit สามารถทำงานใน 2 ลักษณะคือ เป็นปริสเกลเลอร์หรือตัวหาร-ตัวลดทอนสำหรับโมดูลไทมเมอร์ 0 และเป็นโพลัสสเกลเลอร์ (prescaler) หรือตัวเพิ่มค่าเวลาสำหรับบวตซ์ดีค็อกไทมเมอร์

4.14.1 หลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

ใน PIC18F458 มีวงจรเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกอยู่ 2 ชุดสามารถกำหนดให้ทำงานในลักษณะต่างๆ ได้ 6 แบบซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป สำหรับการทำงานเบื้องต้นของวงจรเปรียบเทียบแสดงด้วยไดอะแกรมในรูปที่ 7 โดยรูปที่ 7 (ก) เป็นสัญลักษณ์ของวงจรเปรียบเทียบ มีอินพุต 2 อินพุต คือ $+V_{in}$ และ $-V_{in}$ ผลการเปรียบเทียบจะส่งออกทางเอาต์พุต



รูปที่ 4.11 ไดอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของวงจรเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก

(ก) สัญลักษณ์ของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

(ข) ไดอะแกรมเวลาแสดงผลการเปรียบเทียบ

อินพุตของวงจรเปรียบเทียบใน PIC18F458 สามารถรับแรงดันอะนาล็อกโดยตรงได้ตั้งแต่ V_{SS} (คือกราวด์) ถึง V_{DD} (คือไฟเลี้ยง) เมื่อแรงดันที่อินพุต $+V_{in}$ มากกว่า $-V_{in}$ เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบจะเป็นลอจิกสูง ในทางตรงข้ามหากแรงดันที่อินพุต $+V_{in}$ น้อยกว่า $-V_{in}$ เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบจะเป็นลอจิกต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข)

จากรูปที่ 7 (ข) จะเห็นว่าที่ผลทางเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบจะมีสถานะที่ไม่แน่นอนในช่วงการเปลี่ยนระดับลอจิกจากสูงไปต่ำ และจากต่ำไปสูง ทั้งนี้เนื่องจากจุดตัดสินใจว่า แรงดันที่อินพุต $+V_{in}$ มากหรือน้อยกว่า $-V_{in}$ มีช่วงที่แคบมาก และด้วยผลการทำงานที่ไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อาจทำให้จุดตัดสินใจนั้นคลาดเคลื่อน จึงเกิดเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนขึ้น ดังนั้นในการนำผลทางเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบไปใช้งานจึงต้องระมัดระวังในจุดนี้ด้วย

สำหรับเวลาในการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกใน PIC18F458 อยู่ระหว่าง 150 นาโนวินาทีถึง 10 ไมโครวินาที ขึ้นอยู่กับการเลือกแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง หากใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก วงจรเปรียบเทียบจะใช้เวลา 150-600 นาโนวินาที แต่ถ้าหากใช้แรงดันอ้างอิงจากภายในใช้ใช้เวลาสูงสุด 10 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14.2 CNCON รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก

ในโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกของ PIC18F458 มีรีจิสเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งใช้ในการกำหนดและควบคุมการทำงานอยู่เพียง 1 ตัวคือ CMCON มีแอดเดรสอยู่ที่ตำแหน่ง 0x001F ในแบงก์ 0 รายละเอียดในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์ CMCON มีดังนี้

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
CVREN	CVROE	CVRR	CVRSS	CVR3	CVR2	CVR1	CVR0
bit 7				bit 0			

CVREN: บิตแสดงผลการเปรียบเทียบของวงจรเปรียบเทียบแรงดันชุดที่ 2 โดยการแสดงผลนั้นจะสัมพันธ์กับการกำหนดสถานะที่บิต CVRR

CVROE: บิตแสดงผลการเปรียบเทียบของวงจรเปรียบเทียบแรงดันชุดที่ 1 โดยการแสดงผลนั้นจะสัมพันธ์กับการกำหนดสถานะที่บิต CVRSS

CVRR: บิตกลับสถานะเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบชุดที่ 2 ใช้สำหรับกำหนดการแสดงผลเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันชุดที่ 2 ว่าจะให้แสดงผลกลับตรงข้ามหรือไม่

CVRSS: บิตกลับสถานะเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบชุดที่ 1 ใช้สำหรับกำหนดการแสดงผลเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันชุดที่ 1 ว่าจะให้แสดงผลกลับตรงข้ามหรือไม่

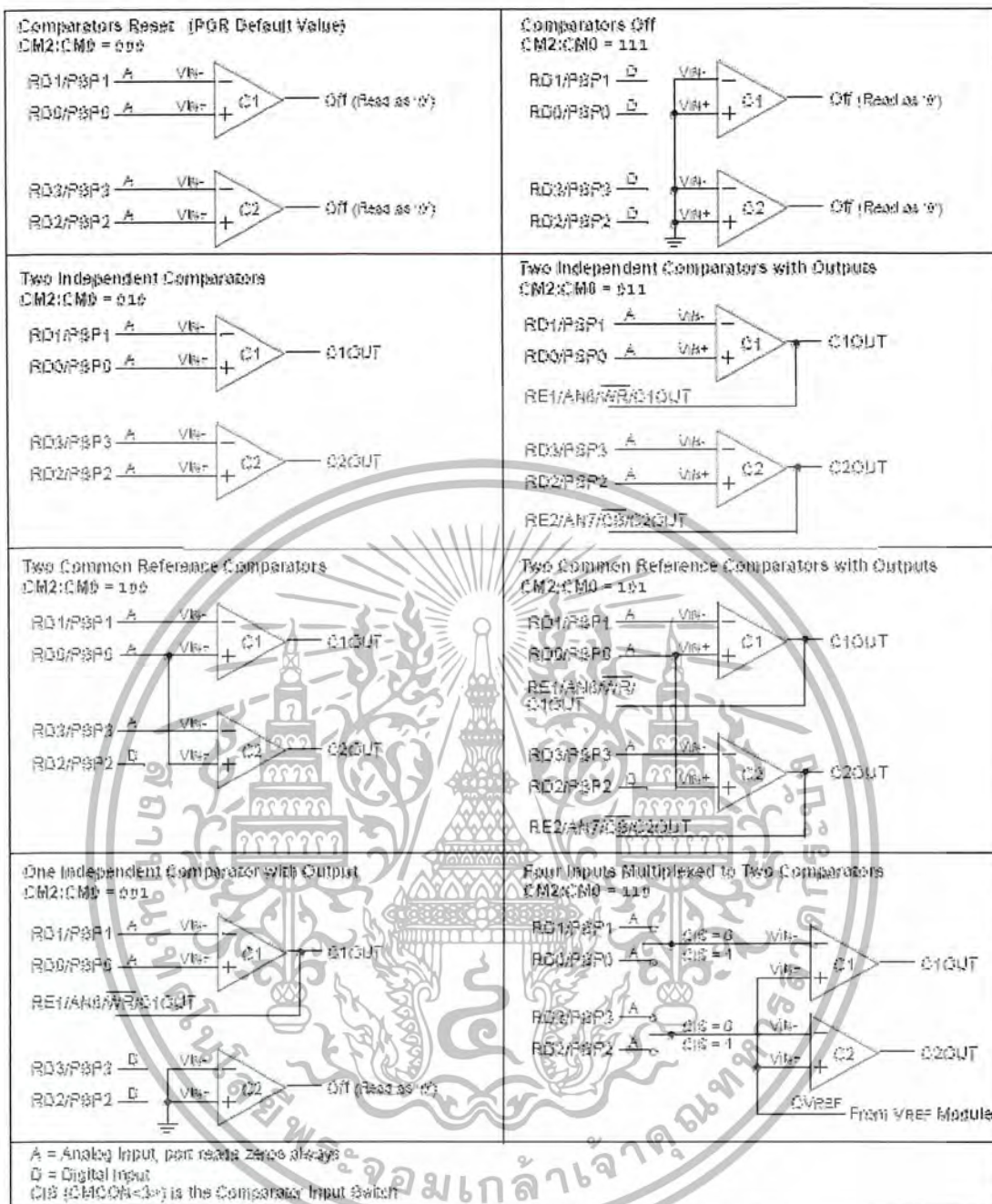
CIS: บิตเลือกขาพอร์ตอินพุตให้แก่โมดูลเปรียบเทียบแรงดัน โดยบิตนี้จะทำงานสัมพันธ์กับบิต CV2-CV0 ซึ่งเป็นบิตเลือกโหมดการทำงานของโมดูลเปรียบเทียบแรงดัน

CV2-CV0: บิตเลือกโหมดการทำงานของโมดูลเปรียบเทียบแรงดัน

4.14.3 โหมดการทำงานของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก

มีทั้งสิ้น 8 โหมดขึ้นอยู่กับกำหนัดที่บิต CV2-CV0 (บิต 2-0) ในรีจิสเตอร์ CMCON โดยในรูปที่ 8 ได้แสดงให้เห็นการทำงานอย่างสรุปของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกในโหมดต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

- 000 จะอยู่ในสถานะรีเซต ไม่มีการทำงาน
- 001 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบ 3 อินพุต 2 เอาต์พุต
- 010 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบ 4 อินพุต 2 เอาต์พุต
- 011 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบ 2 ชุด ที่มีแรงดันอ้างอิงร่วมกัน
- 100 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบ 2 ชุด ที่ทำงานแยกอิสระจากกัน
- 101 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบอินระ 1 ชุด โดยใช้วงจรเปรียบเทียบชุดที่ 2
- 110 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน 2 ชุด ที่มีแรงดันอ้างอิงร่วมกันและส่งค่าออกทางขาพอร์ต



รูปที่ 4.12 แสดงไดอะแกรมของการทำงานในโหมดต่างๆ ของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาลอกในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458

4.14.4 แรงดันอ้างอิงของโมดูลเปรียบเทียบแรงดัน

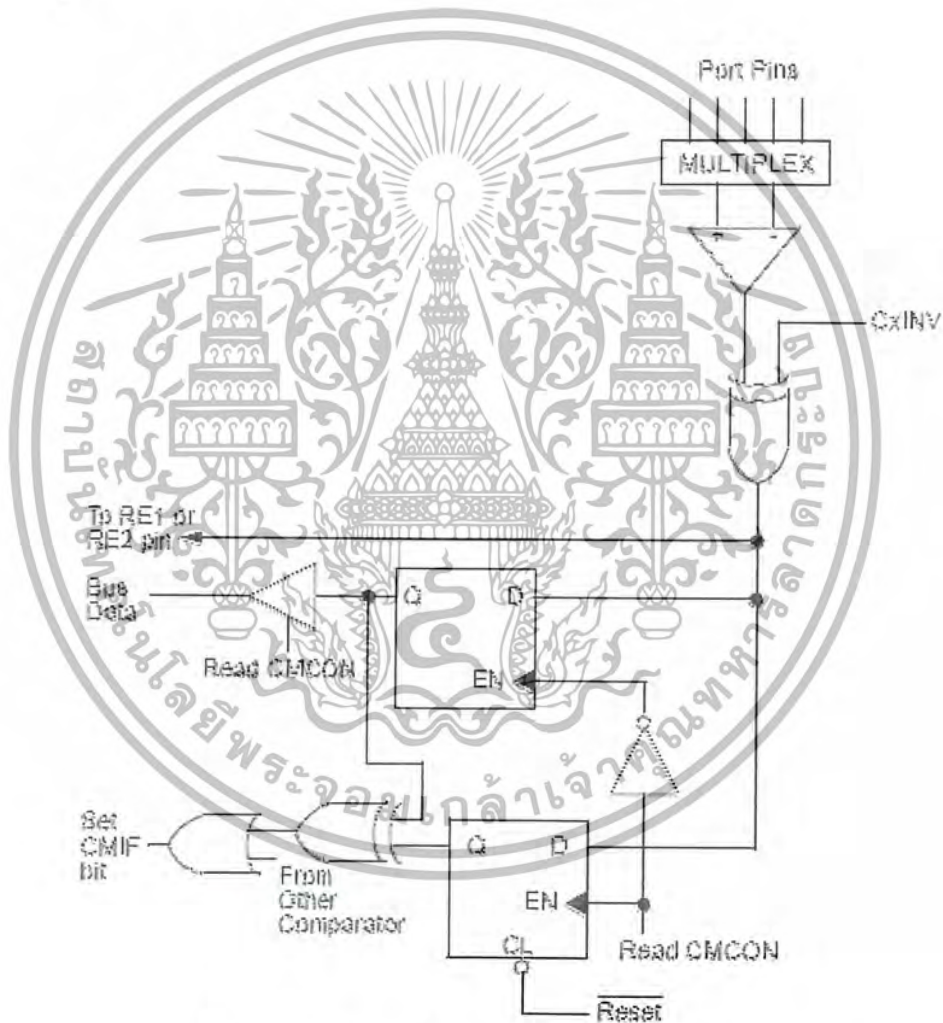
โมดูลเปรียบเทียบแรงดันของ PIC18F458 สามารถเลือกแรงดันอ้างอิงได้ 2 แหล่งคือ จากโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงภายใน และจากแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก ในกรณีเลือกใช้จากภายในจะต้องทำการเอ็นเอเบิลโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงให้ทำงาน และต้องกำหนดโหมดการทำงานของวงจรเปรียบเทียบให้ถูกต้องด้วยซึ่งมีเพียงโหมดเดียวที่สามารถใช้กับแรงดันอ้างอิงภายในได้ นั่นคือโหมดที่กำหนดให้บิต CV2-CV0 เป็น 010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก สามารถป้อนเข้าที่ขาอินพุตได้ตามที่ต้องการ โดยมีข้อจำกัดเพียงว่า ระดับแรงดันอ้างอิงต้องอยู่ในย่าน V_{SS} ถึง V_{DD} เท่านั้น (ซึ่งก็คือระดับกราวด์ถึงไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์นั่นเอง)

4.14.5 ส่วนเอาต์พุตของโมดูลเปรียบเทียบแรงดัน

ผลการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันใน PIC18F458 แสดงออก 2 ทางคือ ผ่านทางรีจิสเตอร์ CMCON ที่บิต CVREN และ CVROE อีกทางหนึ่งคือส่งค่าออกทางขาพอร์ต RE1, RE2 นอกจากนี้ที่ขาพอร์ต RE3 และ RE4 มีหน้าที่อื่นทับซ้อนอยู่ด้วย แต่จะไม่มีการทำงานพร้อมกันในแต่ละหน้าที่ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 4.12 วงจรส่วนเอาต์พุตของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อก

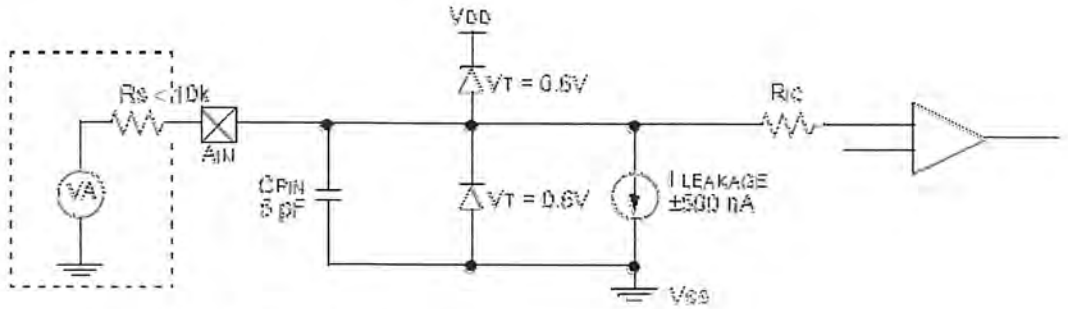
4.14.6 ส่วนอินพุตอะนาล็อกของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

ในรูปที่ 4.13 แสดงวงจรของขาพอร์ตอินพุตอะนาล็อกของวงจรเปรียบเทียบแรงดันในโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาล็อกของ PIC18F458 ที่อินพุตจะมีไดโอดต่อไบแอสกลับระหว่างกราวด์กับ

ไฟเลี้ยงเพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับจากไฟเลี้ยงของไมโครคอนโทรลเลอร์ แหล่งจ่ายแรงดันอะนา

ลอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอคที่นำมาป้อนควรมีอิมพีแดนซ์สูงสุดไม่เกิน 10 kΩ ส่วนอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเข้าที่อินพุตอะนาลอกนี้ไม่ว่าจะเป็นตัวเก็บประจุหรือซีเนอร์ไดโอดควรเป็นแบบที่มีกระแสรั่วไหลต่ำมาก ๆ



C_{PIN} คือ ค่าความจุอินพุต

V_T คือ แรงดันเทรชโฮลต์

$I_{LEAKAGE}$ คือ กระแสรั่วไหลที่จาวพอร์ต

R_{IC} คือ ค่าความต้านทานที่จุดเชื่อมต่อ

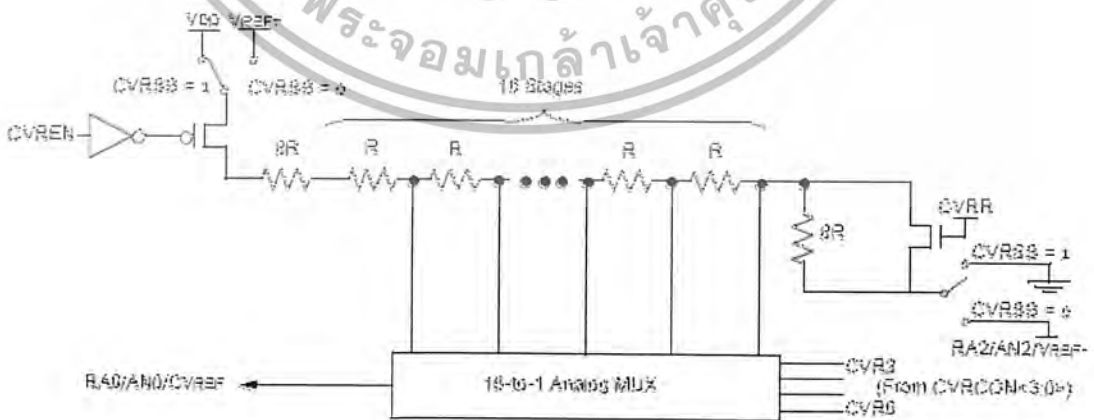
R_s คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

V_A คือ แรงกั้นอะนาลอก

รูปที่ 4.13 วงจรอ่านอินพุตของโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอะนาลอก

4.15 โมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงภายใน PIC18F458

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 มีโมดูลที่ทำงานเกี่ยวกับสัญญาณอะนาลอกอีกหนึ่งส่วนคือ โมดูลสร้างแรงดันอ้างอิง (voltage reference module) โดยภายในโมดูลนี้ประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ค่าที่ต่อร่วมกันในลักษณะคล้ายขั้นบันได (ladder) 16 จุดต่อโดยต่อเข้ากับวงจระนาลอกมัลติเพล็กซ์แบบเข้า 16 ออก 1 ดังแสดงในรูปที่ 11 ค่าแรงดันเอาต์พุตและการทำงานทั้งหมดของโมดูลนี้ขึ้นอยู่กับประจิสเตอร์ VRCON ซึ่งมีแอดเดรสอยู่ที่ 0x9F



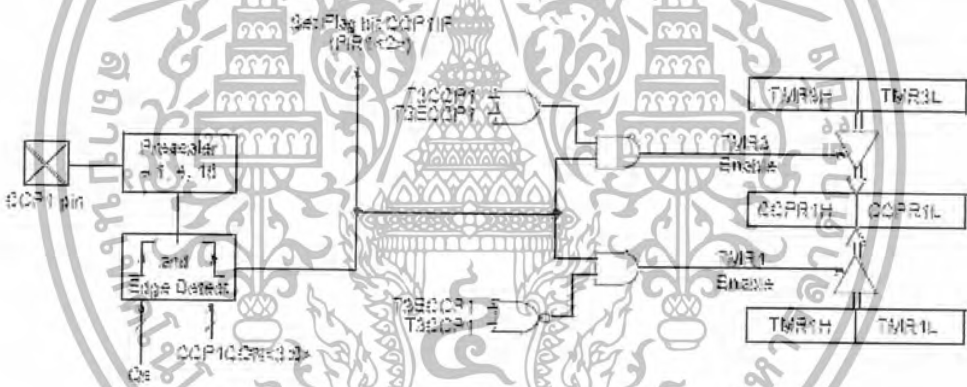
รูปที่ 4.14 ใ้ดอะนาลอกการทำงานของโมดูลสร้างแรงดันอ้างอิงภายใน PIC18F458

4.16 การทำงานในโหมดเปรียบเทียบข้อมูล

มีไดอะแกรมการทำงานแสดงในรูปที่ 4.15 ในโหมดนี้โมดูล CCP1 จะเปรียบเทียบข้อมูลในรีจิสเตอร์ CCPR1 กับ TMR1 เมื่อทำกันก็จะแจ้งผลให้ทราบผ่านทางขา RB3/CCP1 และทางบิต CCP1IF โดยการแจ้งผลทางขา RB3/CCP1 มี 3 ลักษณะคือ ส่งค่า “1”, “0” และไม่มีการเปลี่ยนแปลงลอจิกที่ขา RB3/CCP1 แต่จะเกิดการอินเตอร์รัปชั่นแทน ในกรณีที่มีการเอ็นเอเบิลไว้ สำหรับลักษณะของการแจ้งผลการเปรียบเทียบสามารถกำหนดได้ที่บิต CCP1M3-CCP1M0 ในรีจิสเตอร์ CCP1CON

นอกจากนี้ในโหมดเปรียบเทียบข้อมูลนี้ยังสามารถกำหนดให้โมดูล CCP1 สร้างสัญญาณกระตุ้นเหตุการณ์พิเศษเมื่อข้อมูลใน TMR1 เท่ากับ CCPR1 โดยสัญญาณนี้จะส่งไปรีเซตไทเมอร์ 1 เพื่อเคลียร์ค่าในรีจิสเตอร์ TMR1 จึงสามารถใช้ความสามารถนี้สร้างรีจิสเตอร์คาบเวลาขนาด 16 บิต ได้

สำหรับการทำงานในโหมดนี้ต้องกำหนดให้ขา RB3/CCP1 เป็นเอาต์พุต โดยกำหนดได้ที่บิต 3 ของรีจิสเตอร์ TRISB ส่วนโหมดการทำงานของไทเมอร์ 1 ต้องกำหนดให้ให้ทำงานในโหมดตัวนับแบบซิงโครนัสหรือโหมดไทเมอร์เช่นเดียวกับการทำงานในโหมดตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 4.15 ไดอะแกรมการทำงานของโมดูล CCP ในโหมดเปรียบเทียบข้อมูล

4.16.1 การทำงานในโหมด PWM

ในโหมดนี้โมดูล CCP1 จะกำเนิดสัญญาณมอดูเลชันทางความกว้างพัลส์หรือ PWM ความละเอียด 10 บิต โดยมีไดอะแกรมการทำงานแสดงในรูปที่ 4.16 สัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นนี้จะส่งออกทางขา RB3/CCP1 หลักการสร้างสัญญาณ PWM ของโมดูล CCP1 มีดังนี้

1. กำหนดค่าให้แกรีจิสเตอร์ PR2 เพื่อกำหนดคาบเวลาของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ
2. กำหนดค่าดิวิตีไซเคิลโดยเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ CCPR1L ร่วมกับบิต 5 และ 4 ในรีจิสเตอร์ CCP1CON
3. กำหนดให้ขาพอร์ต RB3/CCP1 เป็นเอาต์พุต เพื่อเป็นทางออกของสัญญาณ PWM โดยการเคลียร์บิต 3 ของรีจิสเตอร์ TRISB

4. กำหนดค่าปริสเกลเลอร์ของ TMR2 และเอ็นเอเบิลการทำงานของไทมเมอร์ 2
กำหนดให้โมดูล CCP1 ทำงานในโหมด PWM

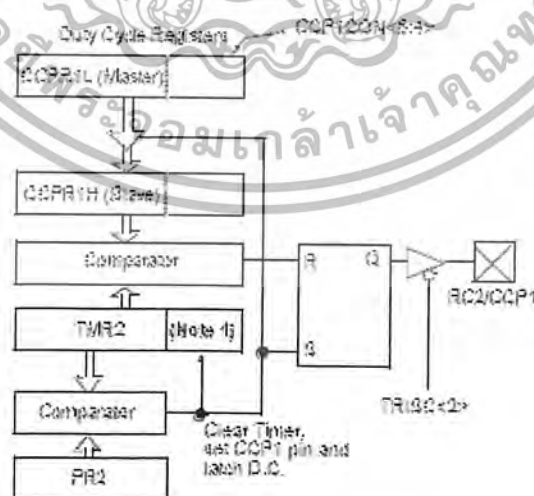
5. ทำการ

ทันทีที่โมดูล CCP1 เริ่มทำงานค่าของ TMR2 จะเพิ่มขึ้นเท่ากับ PR2 ที่ขาพอร์ต RC2/CCP1 จะเกิดลอจิก "1" และคงสถานะอยู่เช่นนั้น หลังจากนั้นค่าของ TMR2 จะเคลียร์ ค่าดีวีดีไซเกิลที่กำหนดไว้ในรีจิสเตอร์ CCPR1L และ 2 บิตใน CCP1CON จะถูกถ่ายทอดไปยัง CCPR1H และ 2 บิตในหน่วยความจำพิเศษเพื่อเปรียบเทียบค่าใน TMR2 และบิตปริสเกลเลอร์ 2 บิต ซึ่งเริ่มต้นเพิ่มค่าใหม่จนกระทั่งเมื่อข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มเท่ากัน จะส่งสัญญาณไป ทำให้ขาพอร์ต RC2/CCP1 กลับมาเป็นลอจิก "0" และคงสถานะอยู่เช่นนั้นจนกระทั่งค่าของ TMR2 เท่ากับ PR2 อีกครั้ง ก็จะเกิดสัญญาณลอจิก "1" เป็นการเริ่มต้นรอบใหม่ของสัญญาณ และจะทำงานวนเช่นนี้จนกระทั่งมีการดีสเอเบิล

ค่าดีวีดีไซเกิลของสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา แต่ค่าของคาบเวลาหรือความถี่จะไม่เปลี่ยนแปลง จนกว่าจะหยุดการทำงาน แล้วกำหนดค่าของคาบเวลาลงในรีจิสเตอร์ PR2 ใหม่ ดังนั้นสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นจึงอาจมีทั้งช่วงดีวีดีไซเกิลสูงหรือต่ำสลับไปมาได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน

ประโยชน์ของสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นนี้คือ นำไปใช้งานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟตรง ควบคุมความสว่างของหลอดไฟหรือใช้ในวงจรรีเฟรชไฟบนเอง ใช้ในการปรับแรงดัน โดยต้องมีการต่อวงจรรองความถี่ผ่านที่เอาท์พุทของขาพอร์ต RC3/CCP1 เป็นต้น

การกำหนดคาบเวลาของสัญญาณ PWM ทำได้โดยการเขียนข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ PR2 (รีจิสเตอร์คาบเวลาของไทมเมอร์ 2) แล้วนำค่าของ PR2 มาคำนวณหาค่าคาบเวลาของสัญญาณ PWM ได้จากสูตร



รูปที่ 4.16 ไตอะแกรมการทำงานของโมดูล CCP เพื่อสร้างสัญญาณ PWM

4.16.2 คาบเวลาของสัญญาณ

คาบเวลาของสัญญาณ PWM = (ค่าในรีจิสเตอร์ PR2+1)×4×T_{OSC}×ค่าปริสเกลเลอร์ของ TMR2

โดยที่ T_{OSC} คือคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาหลัก มีหน่วยเป็นวินาที และค่าในรีจิสเตอร์ ทั้งหมดคำนวณในรูปของเลขฐานสิบ

ส่วนความถี่ของสัญญาณ PWM สามารถคำนวณได้จาก 1/คาบเวลาของสัญญาณ PWM เมื่อค่าของ TMR2 เท่ากับ PR2 จะเกิดเหตุการณ์ขึ้น 3 เหตุการณ์ในไซเคิลการทำงานถัดไป ดังนี้

1. เกิดการเคลียร์ค่าของ TMR2
2. เกิดลอคจิก 1 ขึ้นที่ขา RC2/CCP1 ยกเว้นในกรณีที่กำหนดค่าคิวดี้ไซเคิลของสัญญาณ PWM เท่ากับ 0% ที่ขา RC2/CCP1 นี้จะไม่เกิดการเซตเป็นลอคจิก 1
3. ค่าคิวดี้ไซเคิลของสัญญาณ PWM จะถูกแอสซ์เก็บไว้โดยถ่ายทอกข้อมูลจาก CCP1L ไปยัง CCP1H

การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณ PWM จะไม่ใช้โพสต์สเกลเลอร์ภายในไทมเมอร์ 2

การกำหนดค่าคิวดี้ไซเคิลของสัญญาณ PWM ทำได้โดยการเขียนข้อมูลไปยังรีจิสเตอร์ CCP1L ร่วมกับบิต 5 และ 4 ของรีจิสเตอร์ CCP1CON ทำให้สามารถกำหนดความละเอียดของสัญญาณ PWM ได้สูงถึง 10 บิต โดย 8 บิตบนจะใช้ข้อมูลในรีจิสเตอร์ CCP1L ส่วน 2 บิตล่างใช้ข้อมูลในบิต 5 และ 4 ของรีจิสเตอร์ CCP1CON สามารถคำนวณหาค่าคิวดี้ไซเคิลได้จากสูตร

คิวดี้ไซเคิลของสัญญาณ PWM = ค่าในรีจิสเตอร์ CCP1L (8 บิต) ร่วมกับข้อมูลบิต 5 และ 4 ของรีจิสเตอร์ CCP1CON (2 บิต) × T_{OSC}

โดยที่ ค่า T_{OSC} คือคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาหลัก มีหน่วยเป็นวินาที และค่าในรีจิสเตอร์ทั้งหมดคำนวณในรูปของเลขฐานสิบ

สำหรับการกำหนดค่าของรีจิสเตอร์ CCP1L และบิต 5 และ 4 ของรีจิสเตอร์ CCP1CON ซึ่งเป็นค่าคิวดี้ไซเคิลของสัญญาณ PWM สามารถกระทำได้ตลอดเวลา แต่ค่าคิวดี้ไซเคิลนี้จะไม่ถูกแอสซ์หรือถ่ายทอกไปยังรีจิสเตอร์ CCP1H จนหว่าค่าของรีจิสเตอร์ PR2 จะเท่ากับ TMR2 ซึ่งเมื่อเท่ากันแต่สามารถอ่านค่าได้เพียงอย่างเดียว

ความละเอียดของสัญญาณ PWM จะขึ้นอยู่กับบิตปริสเกลเลอร์ของไทมเมอร์ 2 ในขณะที่ความละเอียดสูงสุดของสัญญาณ PWM จะสัมพันธ์กับความถี่ที่กำหนด, ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาและค่าของปริสเกลเลอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความละเอียด} = \frac{\log\left(\frac{f_{\text{osc}}}{f_{\text{PWM}} \times N}\right)}{\log 2} \quad (4.1)$$

โดยที่ f_{OSC} คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหลัก (Hz)
 f_{PWM} คือ ความถี่ของสัญญาณ PWM (Hz)
 N คือ ค่าของปริสเกลเลอร์ในไทมเมอร์ 2

สัญญาณ PWM จะมีความละเอียดสูงสุดเมื่อปริสเกลเลอร์เท่ากับ 1 ทำให้สูตรการคำนวณเป็น

$$\text{ความละเอียด} = \frac{\log\left(\frac{f_{\text{osc}}}{f_{\text{PWM}}}\right)}{\log 2} \quad (4.2)$$

4.16.3 การสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้โมดูล CCP1

ขั้นตอนในการใช้งานโมดูล CCP1 เพื่อสร้างสัญญาณ PWM มีดังนี้

1. ตั้งให้ขา CCP1 (RC2) เป็นเอาต์พุต
2. กำหนดคาบเวลาให้กับรีจิสเตอร์ PR2
3. กำหนดค่าดีวีไซด์ไจกัลให้กับรีจิสเตอร์ CCPR1L และ บิต CCP1X, CCP1Y ในรีจิสเตอร์ CCP1CON
4. กำหนดค่า 4 บิตล่างในรีจิสเตอร์ CCP1CON เพื่อเลือกให้โมดูล CCP ทำงานในโหมดสร้างสัญญาณ PWM
5. เคลียร์ค่าไทมเมอร์ 2 และกำหนดค่าปริสเกลเลอร์ในรีจิสเตอร์ T2CON
6. ตั้งให้ไทมเมอร์ 2 ทำงาน

การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

มีสูตรการคำนวณที่สำคัญ 2 สูตรคือ สูตรหาค่าของ PR2 โดยการกำหนดคาบเวลาของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ และสูตรหาค่าของ CCPR1H และ CCPR1L โดยกำหนดค่าดีวีไซด์ไจกัลที่ต้องการมีรายละเอียดดังนี้

$$PR2 = \frac{T_{\text{PWM}}}{4 \times T_{\text{OSC}} \times N} - 1 \quad (4.3)$$

โดยที่ RP2 คือ ค่าของรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดคาบเวลาต้องเป็นจำนวนเต็ม และมีค่าน้อยกว่า 256

T_{PWM} คือ คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาหลัก มีค่าเท่ากับ $1/f_{\text{PWM}}$ (f_{PWM} คือความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ)

$$\text{ความละเอียด} = \frac{\log\left(\frac{f_{\text{osc}}}{f_{\text{PWM}} \times N}\right)}{\log 2} \quad (4.1)$$

โดยที่ f_{OSC} คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหลัก (Hz)

f_{PWM} คือ ความถี่ของสัญญาณ PWM (Hz)

N คือ ค่าของปริสเกลเลอร์ในไทมเมอร์ 2

สัญญาณ PWM จะมีความละเอียดสูงสุดเมื่อปริสเกลเลอร์เท่ากับ 1 ทำให้สูตรการคำนวณเป็น

$$\text{ความละเอียด} = \frac{\log\left(\frac{f_{\text{osc}}}{f_{\text{PWM}}}\right)}{\log 2} \quad (4.2)$$

4.16.3 การสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้โมดูล CCP1

ขั้นตอนในการใช้งานโมดูล CCP1 เพื่อสร้างสัญญาณ PWM มีดังนี้

1. ตั้งให้ขา CCP1 (RC2) เป็นเอาต์พุต
2. กำหนดคาบเวลาให้กับรีจิสเตอร์ PR2
3. กำหนดค่าดีวีตี่ไซเกิ้ลให้กับรีจิสเตอร์ CCPR1L และ บิต CCP1X, CCP1Y ในรีจิสเตอร์ CCP1CON
4. กำหนดค่า 4 บิตลงในรีจิสเตอร์ CCP1CON เพื่อเลือกให้โมดูล CCP ทำงานในโหมดสร้างสัญญาณ PWM
5. เคลียร์ค่าไทมเมอร์ 2 และกำหนดค่าปริสเกลเลอร์ในรีจิสเตอร์ T2CON
6. ตั้งให้ไทมเมอร์ 2 ทำงาน

การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

มีสูตรการคำนวณที่สำคัญ 2 สูตรคือ สูตรหาค่าของ PR2 โดยการกำหนดคาบเวลาของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ และสูตรหาค่าของ CCPR1H และ CCPR1L โดยกำหนดค่าดีวีตี่ไซเกิ้ลที่ต้องการมีรายละเอียดดังนี้

$$PR2 = \frac{T_{\text{PWM}}}{4 \times T_{\text{OSC}} \times N} - 1 \quad (4.3)$$

โดยที่ $PR2$ คือ ค่าของรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดคาบเวลาต้องเป็นจำนวนเต็ม และมีค่าน้อยกว่า 256

T_{PWM} คือ คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาหลัก มีค่าเท่ากับ $1/f_{\text{PWM}}$ (f_{PWM} คือความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ)

T_{OSC} คือ คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาหลัก มีค่าเท่ากับ $1/f_{OSC}$ (f_{OSC} คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหลัก)

N คือ ค่าของปริสเกลเลอร์

ส่วนการหาค่าของรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดค่าความถี่เกิดของสัญญาณ PWM คำนวณได้จาก

$$(CCPR1L : CCPR1X : CCPR1Y) = \frac{d_{PWM}}{T_{OSC} \times N} \quad (4.4)$$

โดยที่ (CCPR1L:CCPR1X:CCPR1Y) คือ ค่าของรีจิสเตอร์ขนาด 10 บิตที่ใช้กำหนดค่าความถี่เกิด โดย 8 bit บนเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ CCPR1L และสองบิตล่างเก็บในบิต CCPR1X และ CCPR1Y ในรีจิสเตอร์ CCP1CON

d_{PWM} คือ ค่าความถี่เกิดของสัญญาณ PWM ซึ่งคำนวณได้จาก

$$d_{PWM} = \frac{d(\%) \times T_{PWM}}{100} \quad (4.5)$$

ส่วนค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณ PWM สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{PWM} = \frac{d(\%) \times V_{CC}}{100} \quad (4.6)$$

4.16.4 การทำงานในโหมดตรวจจับสัญญาณ

ค่าของไทมเมอร์ 1 ในรีจิสเตอร์ TMR1 จะเพิ่มค่าขึ้นตามจังหวะสัญญาณนาฬิกาของไทมเมอร์ 1 สัญญาณที่ต้องการตรวจจับจะป้อนเข้าที่จอร์อินพุต CCP1 โดยผ่านปริสเกลเลอร์และส่วนตรวจจับของขาสัญญาณภายในโมดูล CCP1 เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด จะเกิดสัญญาณ “จับสัญญาณ” หรือเรียกว่า “สัญญาณแคปเจอร์เอินเนเบิล” ส่งมาเพื่อสั่งให้เกิดการถ่ายทอข้อมูลจาก TMR1 ไปยังรีจิสเตอร์ CCP1 ก็จะได้ค่าสัญญาณตามที่ต้องการ พร้อมกันนั้นจะเกิดการเซตบิต CCP1IF ถ้าหากมีการเอินเนเบิลอินเทอร์รัปต์ในลักษณะนี้ไว้ ก็จะมีการอินเทอร์รัปต์ขึ้นสำหรับบิต CCP1IF ต้องทำการเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์เท่านั้น

คาบเวลาของสัญญาณอินพุตที่ทำการตรวจจับสามารถคำนวณได้จากค่าของความละเอียดของสัญญาณที่โมดูล CCP สามารถตรวจจับได้ ตามความสัมพันธ์

$$RES_{CAP} = \frac{4}{f_{OSC} \times N} \quad \text{วินาที} \quad (4.7)$$

โดยที่ f_{OSC} คือความถี่สัญญาณนาฬิกาหลัก มีหน่วยเป็น Hz

N คือค่าปริสเกลเลอร์ เท่ากับ 1, 4 และ 16

อย่างไรก็ตามหากต้องการทราบคาบเวลาของสัญญาณต่ำสุดที่โมดูล CCP1 สามารถตรวจจับได้จะต้องรวมค่าเวลาขอบขาขึ้นของสัญญาณ (risetime), ค่าเวลาขอบขาลงของสัญญาณ (fall time) และค่าหน่วงเวลาของโมดูล CCP1 ดังนั้นคาบเวลาต่ำสุดของสัญญาณที่โมดูล CCP1 สามารถตรวจจับได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$T_{CCP} = \frac{3T_{CY} + 40}{N} \text{ นาโนวินาที} \quad (4.8)$$

โดยที่ TCY

คือ คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาภายในซึ่งเท่ากับ $4/f_{osc}$ หรือ $1/4$ เท่าของค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหลักหรือความถี่ของคริสตอล มีหน่วยเป็น นาโนวินาที

N

คือค่าของปริสเกลลออร์ มีด้วยกัน 3 ค่าคือ 1, 4 และ 16

4.17 การอินเทอร์รัปต์เบื้องต้น

กระบวนการอินเทอร์รัปต์ของ PIC18F458 มี 2 แบบ คือ การอินเทอร์รัปต์ในขณะที่ทำงานปกติ และเมื่ออยู่ในสลิปโหมด

4.17.1 การอินเทอร์รัปต์ในขณะที่ทำงานปกติ

เมื่อเกิดการอินเทอร์รัปต์ขึ้นในขณะที่กระทำคำสั่งใดๆก็ตาม ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะกระทำคำสั่งนั้นเสร็จก่อน แล้วจำค่า PC ที่ได้จากการทำงานของคำสั่งนั้นดังกล่าวไปเก็บที่สแต็ก แล้วจึงกระโดดไปทำงานที่แอดเดรสอินเทอร์รัปต์แอดเดรส $0x04$ ต่อไป และเมื่อออกจากโปรแกรมบริการอินเทอร์รัปต์แล้ว สแต็กจะคืนค่าให้กับ PC และจะไปทำงานที่แอดเดรสดังกล่าวต่อไป

4.17.2 การอินเทอร์รัปต์เมื่ออยู่ในโหมดสลิปหรือโหมดประหยัดพลังงาน

เมื่อเกิดการอินเทอร์รัปต์ขึ้น ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะออกจากโหมดสลิป แล้วจะกระทำคำสั่งที่อยู่ถัดจากคำสั่ง SLEEP ก่อนจากนั้นจึงกระโดดไปยังอินเทอร์รัปต์แอดเดรสต่อไป ดังนั้นเพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัปต์ คำสั่งที่อยู่ถัดจากคำสั่ง SLEEP ควรเป็นคำสั่ง NOP ส่วนกระบวนการอื่นๆ ก็จะเหมือนกับการอินเทอร์รัปต์ในโหมดปกติ

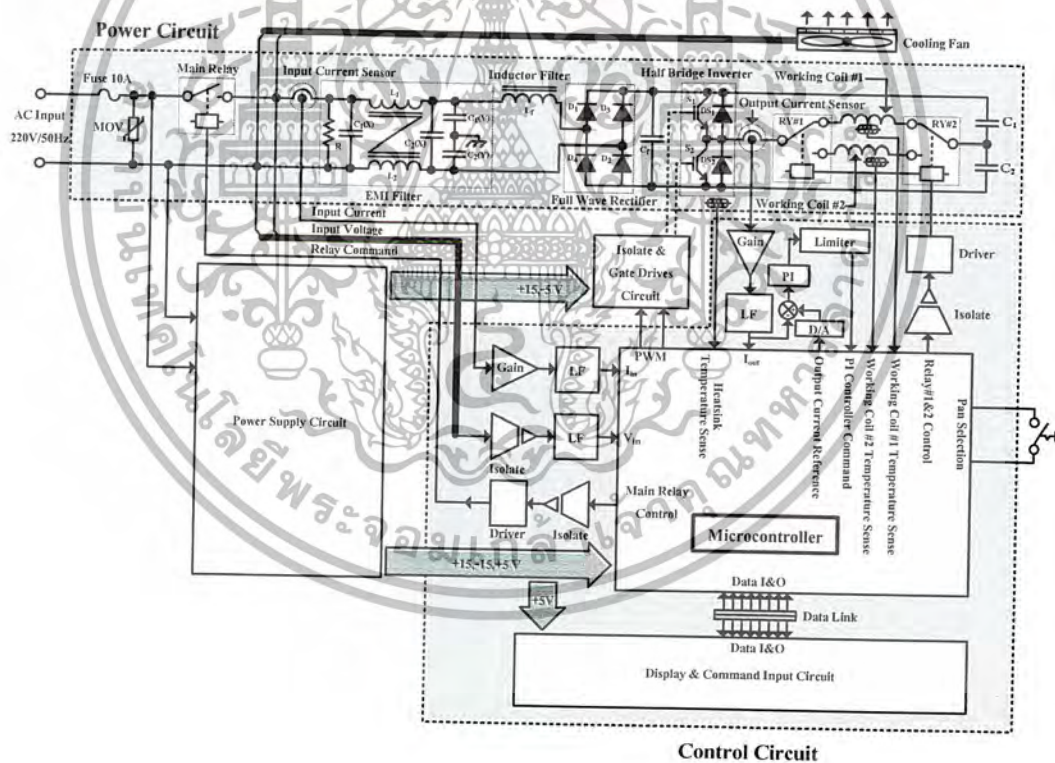
บทที่ 5

การสร้างวงจรเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบวงจร และการเลือกอุปกรณ์ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างวงจร เครื่องต้นแบบเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ ทั้งวงจรกำลังและวงจรควบคุม โดยที่ให้มีการทำงานเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วตามรายงานฉบับที่ 1

รายละเอียดของวงจรเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.1 โดยสามารถแยกพิจารณาการออกแบบ และสร้างวงจรในส่วนต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของหุงต้มเหนี่ยวนำ

5.2 การออกแบบและสร้างวงจรกำลัง

5.2.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

ตามรายงานการออกแบบฉบับที่ 1 ได้เลือกชนิดของวงจรเรียงกระแส และคำนวณหาพิคกิ้งกระแสไว้คือ ไดโอดกำลังชนิดเต็มคลื่นแบบโมดูลขนาด 600 V 10 A จึงได้เลือกใช้ไดโอดกำลังเบอร์ KBC 10-06 (หรือเบอร์อื่นๆที่มีขนาดหรือพิคกิ้งเท่ากัน และมีขายตามท้องตลาด) ซึ่งจะมีลักษณะ และตำแหน่งของขาที่ต่อใช้งานต่างๆ ดังรูปที่ 5.2

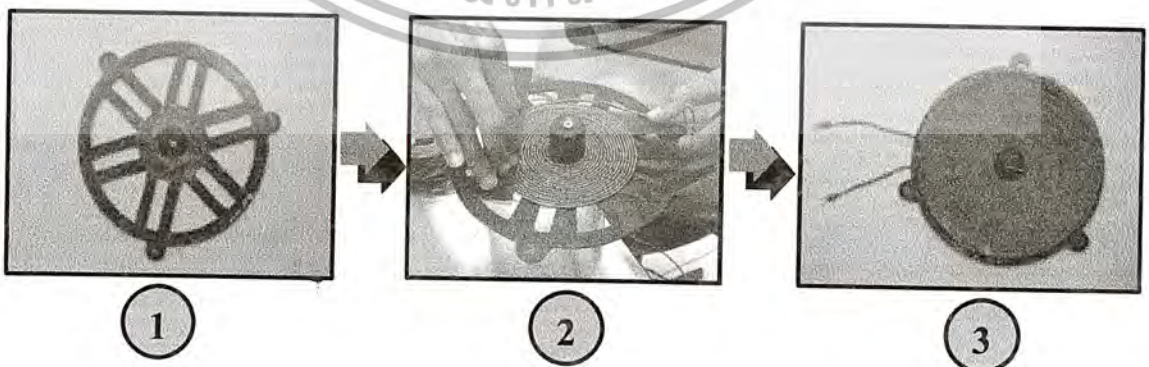
5.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ชนิดของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแบบ ไอจีบีทีโมดูลชนิดวงจรฮาล์ฟบริดจ์ มีพิคกิ้ง 35 A 600 V จึงได้เลือกใช้เบอร์ SK45GB063 ของบริษัท SEMIKRON โดยมีพิคกิ้งที่ 45A@25°C (30A@80°C) 600 V เพราะเนื่องจากมีขนาดเล็กกะทัดรัด มีคุณสมบัติการทำงานตามต้องการ และหาซื้อได้ง่าย

5.2.3 ชุดวงจรไหลลดโซ่เนนซ์

5.2.3.1 การสร้างชุดขดลวดสำหรับหม้อกันเบน

โครงการวิจัยนี้ได้ออกแบบภาชนะหุ้มขดลวดกันเบนมีขนาดใหญ่สุดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 เซนติเมตร ดังนั้นความกว้างของชุดขดลวดจึงต้องมีความพอดีกับกันภาชนะ ส่วนขดลวดได้ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 26 AWG ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 200 องศาเซลเซียส จำนวน 10 เส้น พันตีเกลียว เพื่อลดเซพผลสกินเอฟเฟค (Skin Effect) ที่เกิดขึ้นกับการไหลของกระแสในลวดทองแดงขณะทำงานที่ความถี่สูง และมีพื้นที่เพียงพอกับปริมาณกระแสที่ไหลขณะเดาหุ้มขดลวดทำงานที่พิคกิ้งสูงสุด (~ 30 A_{Peak}) ดังแสดงขั้นตอนการออกแบบขดลวดสำหรับหม้อกันเบนรูปที่ 2.4



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการออกแบบขดลวดสำหรับหม้อกันเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 5.4 การสร้างขดลวดสำหรับเครื่องต้นแบบจะมีทั้งหมด 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบฟอร์มสำหรับขดลวดซึ่งทำมาจากเบ็กกาไลต์ เนื่องจากสามารถทนอุณหภูมิได้สูง (มากกว่า 200 องศาเซลเซียส) และติดไฟได้ยาก โดยออกแบบให้มีรูปร่าง ลักษณะตามรูป และนำมาฉลุลวหรือเลื่อยให้เป็นรูปร่างดังกล่าว จากรูปร่างเห็นได้ว่า จะมีส่วนที่ยื่นออกมา 3 ด้านซึ่งจะใช้สำหรับยึดติดตั้ง และส่วนที่เป็นช่องว่างจะเป็นช่องระบายอากาศสำหรับขดลวด

ขั้นตอนที่ 2 นำขดลวดที่ตีเกลียวไว้เรียบร้อยแล้ว มาพันลงบนฟอร์มที่เตรียมไว้ โดยลักษณะการพันจะพันจากด้านในออกสู่ด้านนอก และพันให้ชิดติดกัน ซึ่งขดลวดจะยึดติดแน่นกับฟอร์มด้วยกาวชนิดแห้งและแข็งไว พ้นขดลวดจนเต็มฟอร์มสามารถนับจำนวนชั้นได้ทั้งหมด 43 ชั้น

ขั้นตอนที่ 3 ทาวานิชขดลวดที่พันบนฟอร์มเรียบร้อยแล้ว และนำไปอบให้วานิชแห้งสนิท ซึ่งจะได้ลักษณะรูปร่างของขดลวดสำหรับภาชนะกั้นแบนตามรูป

ขดลวดที่ได้เมื่อนำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำจะได้เท่ากับ $250 \mu\text{H}$ ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปใช้สำหรับคำนวณหาตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ต่อไป

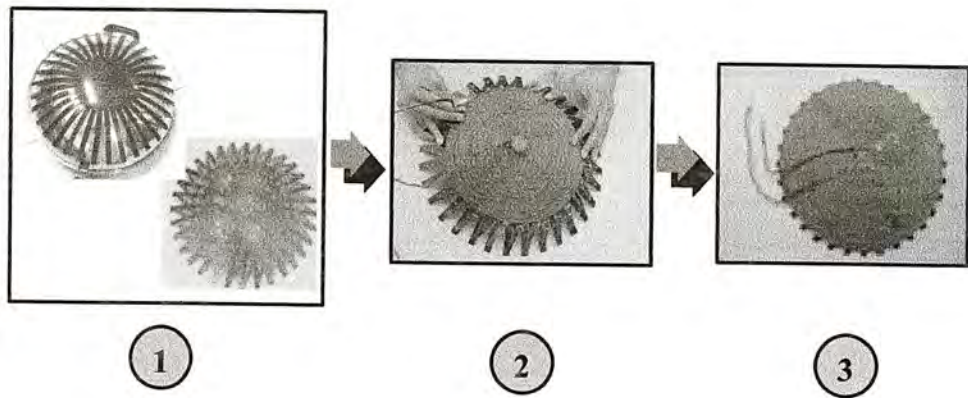
5.2.3.2 การสร้างชุดขดลวดสำหรับหม้อก้นโค้ง

ภาชนะก้นโค้งได้ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 เซนติเมตร ซึ่งลักษณะขดลวดของภาชนะชนิดนี้จะต้องครอบคลุมส่วนก้นของภาชนะทั้งหมด จะเห็นได้ว่าพื้นที่ของภาชนะก้นโค้งจะมากกว่าก้นแบน เมื่อใช้จำนวนลวดตีเกลียวที่มีจำนวนเท่ากับภาชนะก้นแบนจะทำให้จำนวนชั้นของขดลวดมากกว่า ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องด้วยวงจรถูกกำลังและความคุมของเตาแบบภาชนะก้นโค้งนี้เป็นเครื่องเดียวกันกับชนิดก้นแบน ซึ่งจะทำให้มีผลดังต่อไปนี้

1. เมื่อคงที่ค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ จะต้องเปลี่ยนความถี่เรโซแนนซ์ให้มากกว่าหรือน้อยกว่าภาชนะก้นแบน (30 kHz) ถ้าเปลี่ยนไปในย่านน้อยกว่าจะทำให้เกิดการรบกวนทางเสียงได้ หรือถ้าเปลี่ยนไปในย่านมากกว่าจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง เนื่องมาจากมีการสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์มากขึ้น

2. เมื่อคงที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะต้องสับเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้วงจรมีความยุ่งยาก และซับซ้อนมากขึ้น

ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น จะต้องทำให้ค่าความถี่และตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์มีค่าคงที่ โดยวิธีการทำให้ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดของภาชนะก้นโค้งคงที่ด้วย นั่นก็คือ เพิ่มขนาดจำนวนเส้นลวดตีเกลียวให้มากขึ้น จากการทดลองจะได้จำนวนเส้นที่นำมาตีเกลียวทั้ง 45 เส้น ซึ่งเมื่อพันจนเต็มฟอร์มจะได้จำนวนชั้นทั้งหมด 43 ชั้น และได้ค่าความเหนี่ยวนำ $250 \mu\text{H}$ ดังแสดงขั้นตอนตามรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ขั้นตอนการออกแบบขดลวดสำหรับหม้อก้นโค้ง

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าขั้นตอนที่ 1 ในการออกแบบฟอร์มได้ใช้เบ็กกาไลต์ขนาดบาง (2 มิลลิเมตร) นำมาตัดให้เป็นซี่เล็กๆ เพื่อให้สามารถติดตั้งได้ง่าย และไม่หัก การขึ้นรูปจะใช้ภาชนะจริงเป็นแบบ แล้วตัดโค้งตามก้นของภาชนะจนเต็ม จากนั้นขั้นตอนที่ 2 และ 3 ก็จะดำเนินงานเหมือนกับภาชนะชนิดก้นแบน

ตารางที่ 5.1 ชนิดของขดลวดเหนียวนำและองค์ประกอบชุดเรโซแนนซ์

ชนิดภาชนะ	องค์ประกอบ	ค่าที่ได้
ก้นแบน	เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดสูงสุด	24 เซนติเมตร
	เบอร์ลวดทองแดง	26 AWG (200 °C)
	จำนวนเส้นลวดตีเกลียว	8 เส้น
	จำนวนชั้น	43 ชั้น
	ค่าความเหนียวนำ	250 μ H
	ค่าความต้านทาน	0.1 Ω
ก้นโค้ง	เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดสูงสุด	36 เซนติเมตร
	เบอร์ลวดทองแดง	26 AWG (200 °C)
	จำนวนเส้นลวดตีเกลียว	45 เส้น
	จำนวนชั้น	43 ชั้น
	ค่าความเหนียวนำ	250 μ H
	ค่าความต้านทาน	0.2 Ω
ก้นแบนและก้นโค้ง	ค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ คุณสมบัติตัวเก็บประจุที่ใช้	112.58 nF
	<ul style="list-style-type: none"> ● ชนิด ● ค่าพิกัด ● จำนวน 	<p>โพลีโพรไพลีน ฟิล์ม (WIMA MKP10)</p> <p>4700 pF, 2000 V_{DC}</p> <p>24 ตัวต่อขนาบ</p>

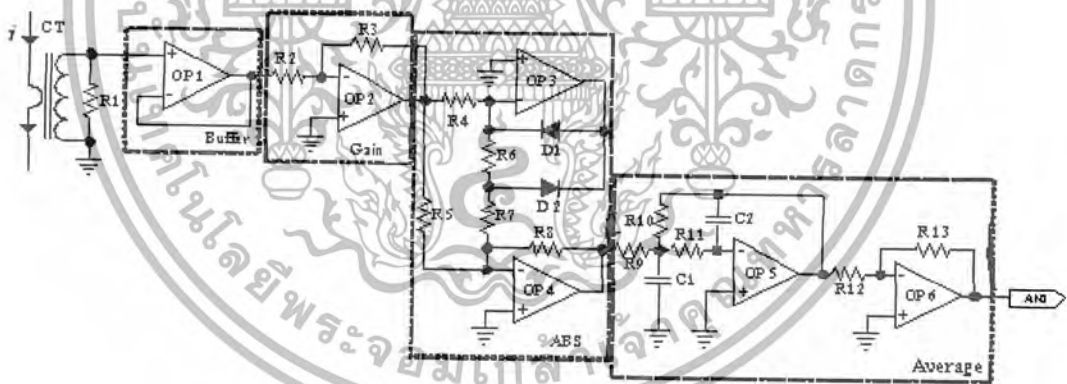
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุม

การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมนั้นจะขึ้นอยู่กับเป้าหมายของการทำงานของเครื่องให้เป็นไปตามต้องการ เช่น การสร้างสัญญาณควบคุม, มีระบบป้องกันต่างๆ หรือมีฟังก์ชันการทำงานอื่นตามความเหมาะสม ตามรูปที่ 5.1 ในงานวิจัยนี้วงจรควบคุมมีหน้าที่หลักคือ สร้างสัญญาณควบคุมวงจรถักล้างและตรวจสอบการทำงานของเครื่อง จะเห็นได้ว่าจะประกอบด้วย ส่วนของวงจรช่วย ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณกระแส, แรงดัน หรืออุณหภูมิ แล้วปรับแต่งสัญญาณให้มีค่าเหมาะสม และส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลต่อไป นอกจากนี้ยังมีส่วนของวงจรที่รับค่าต่างๆจากผู้ใช้งาน, แสดงผล และวงจรขับไอจีบีที เป็นต้น โดยสามารถแยกพิจารณาการออกแบบและสร้างได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

5.3.1 การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับกระแสอินพุต

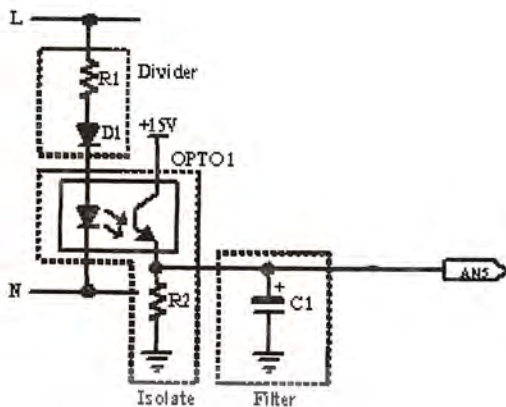
วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสอินพุต เพื่อนำกระแสแรงดันที่ได้ส่งต่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลต่อไป โดยสัญญาณกระแสนี้จะป้อนกลับไปที่สำหรับการสร้างระบบป้องกันกระแสอินพุตมากเกินไป (สูงกว่า $6.5 A_{rms}$) ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมและวงจรใช้งาน



รูปที่ 5.6 บล็อกไดอะแกรมและวงจรใช้งานจริงของวงจรตรวจจับกระแสอินพุต

5.3.2 การออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับแรงดันอินพุต

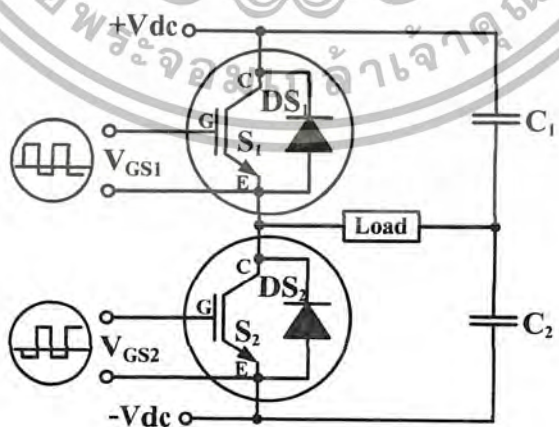
วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันอินพุตที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อนำแรงดันจริงที่ได้ส่งต่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลสำหรับการสร้างระบบป้องกันแรงดันอินพุตสูงหรือต่ำเกิน (สูงกว่า $220+10\% V_{rms}$ และต่ำกว่า $220-10\% V_{rms}$) ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมและวงจรใช้งานจริงตามรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมและวงจรใช้งานจริงของวงจรตรวจจับแรงดันอินพุต

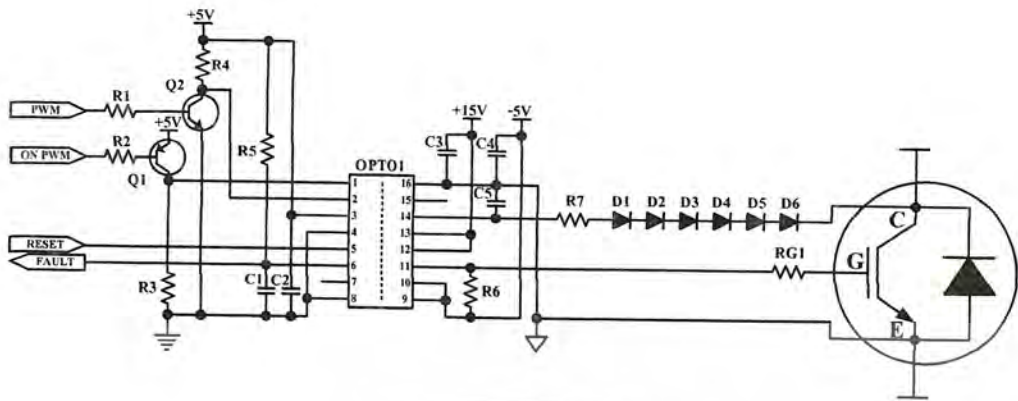
5.3.3 การออกแบบและสร้างวงจรขับไอจีบีที

ทำหน้าที่แยกคราวด์ระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง นอกจากนี้แยกคราวด์ระหว่างอุปกรณ์สวิตช์ตัวบนและตัวล่างของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ออกจากกัน เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวอุปกรณ์สวิตช์ทั้ง 2 และขยายขนาดแรงดันและกระแสให้มีค่าเพียงพอกับความต้องการของไอจีบีทีที่สามารถทำงานโดยไม่ข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ดังแสดงลักษณะพื้นฐานของการขับไอจีบีทีแต่ละตัวตามรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ลักษณะการขับไอจีบีทีแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 วงจรขับไอซีบีทีแต่ละตัว

วงจรขับไอซีบีทีที่แสดงได้ตามรูปที่ 5.9 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังนี้

วงจรแยกสัญญาณและขับไอซีบีที เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแบบชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งข้อเสียอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบนี้ คือขณะทำงานอาจจะเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรระหว่างไอซีบีทีตัวบนและตัวล่างของกิ่งนั้นๆ ทำให้ไอซีบีทีที่มีความเสียหายได้ ผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่วนใหญ่มักจะมีสาเหตุมาจากวงจรขับไอซีบีทีที่ไม่มีเสถียรภาพ ไม่มีระบบวงจรป้องกัน หรือวงจรยุ่งยากเกินไป มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ HPCL316 ของบริษัท Agilent Technologies ซึ่งภายในไอซีตัวนี้จะรวมวงจรแยกสัญญาณและขับไอซีบีทีเข้าด้วยกัน จึงทำให้ไม่ต้องมีวงจรภายนอกเข้ามาเพิ่มเติม นอกจากนี้คุณสมบัติการทำงานอื่นๆ ประกอบด้วย

1. สามารถขับไอซีบีทีได้พิกัดสูงสุดที่ 150 A, 1200 V
2. อินพุตสามารถรองรับการทำงานกับอุปกรณ์ที่เป็น CMOS หรือ TTL ได้
3. มีความเร็วในการทำงานสูงสุด 500 ns
4. มีวงจรป้องกันภายใน และส่งสัญญาณสภาวะผิดปกติออกมาภายนอก
5. วงจรป้องกันไฟเลี้ยงตก
6. วงจรตรวจจับการลัดวงจรของไอซีบีที
7. ผู้ใช้สามารถกำหนดได้ว่า เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติกับไอซีบีที ให้มีการหยุดหรือไม่หยุดทำงานแบบอัตโนมัติได้ (Auto-Shutdown) และให้เริ่มหรือไม่เริ่มการทำงานใหม่แบบอัตโนมัติได้ (Auto-Reset)

ตามรูป 5.9 ทางด้านซ้ายมือของวงจรจะเห็นว่า สัญญาณ PWM และ ON PWM เป็นสัญญาณที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสัญญาณ PWM จะเข้ามาขับทรานซิสเตอร์ Q1 เพื่อกลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนเข้าขา 2 ของไอซี ส่วนสัญญาณ ON PWM จะมาขับ Q2 และเข้าขา 1 ของไอซี ซึ่งเป็นสัญญาณป้องกันในกรณีไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มต้นทำงาน เพราะฉะนั้นไอซี HCPL316 จะมีสัญญาณผ่านไปขับ ไอจีบีทีได้นั้นที่ขา 1 และ 2 จะต้องมีสัญญาณควบคุมตามรูปที่ 5.10



หมายเหตุ V_{IH+} คือ สัญญาณควบคุมเข้าขา 1
 V_{IH-} คือ สัญญาณ PWM เข้าขา 2

รูปที่ 5.10 สัญญาณควบคุมด้านอินพุตของไอซี HCPL316

เมื่อไอจีบีทีทำงานผิดปกติ ไอซี HCPL316 ก็หยุดการทำงานของตัวเองลง และส่งสัญญาณ FAULT ออกมา แล้วส่งต่อไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลต่อไป ส่วนสัญญาณ RESET เป็นสัญญาณที่ส่งออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้ไอซี HCPL316 เริ่มทำงานใหม่อีกครั้ง หลังจากที่เกิดสภาวะหยุดทำงานของตัวเองลงไป

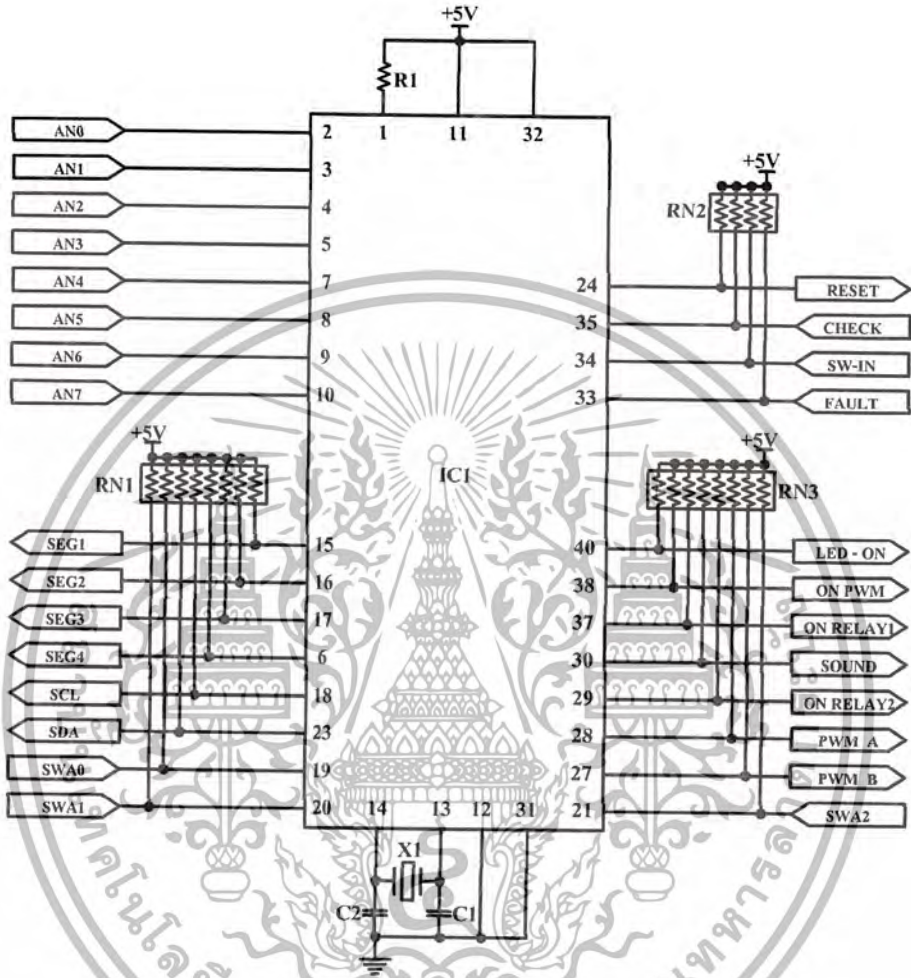
ส่วนทางด้านขวามือของวงจรเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ส่งไปขับ ไอจีบีที ลักษณะวงจรจะเป็นตามคำแนะนำของผู้ผลิต โดยประกอบด้วย

วงจรไฟเลี้ยง ไอซีนี้ต้องการไฟเลี้ยงวงจรระดับ +15V, -5V ซึ่งสัญญาณที่จะนำไปขับ ไอจีบีทีก็จะมีระดับเดียวกันกับไฟเลี้ยง โดยสูงสุดเท่ากับ +15V และต่ำสุดเป็น -15V ในส่วนของวงจรไฟเลี้ยงจริงจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

วงจรตรวจับกระแสลัดวงจร จะใช้การตรวจับกระแสแบบทางอ้อม โดยอาศัยหลักการทำงานของไอจีบีที กล่าวคือ ขณะที่ไอจีบีทีทำงานจะมีกระแสไหลผ่าน ทำให้มีแรงดันตกคร่อม (V_{CE}) เมื่อกระแสไหลเพิ่มขึ้น แรงดันก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จนเป็นแรงดันสูงสุด V_{CESAT} ที่ไอจีบีทีสามารถทนได้ แรงดันดังกล่าวจะถูกตรวจับมาเข้าไอซี โดยใช้ไดโอด (D1-D6) ต่อกับขา C ของไอจีบีทีผ่านความต้านทาน (R7) มาเข้าขา 14 ของไอซี (V_{DESAT}) สัญญาณแรงดันที่ตรวจับมาได้นี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันขนาด 7 V ซึ่งเป็นระดับแรงดันอ้างอิงภายใน (ตามข้อมูลไอซี)

5.3.4 การออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์

5.3.4.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.11 วงจรควบคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

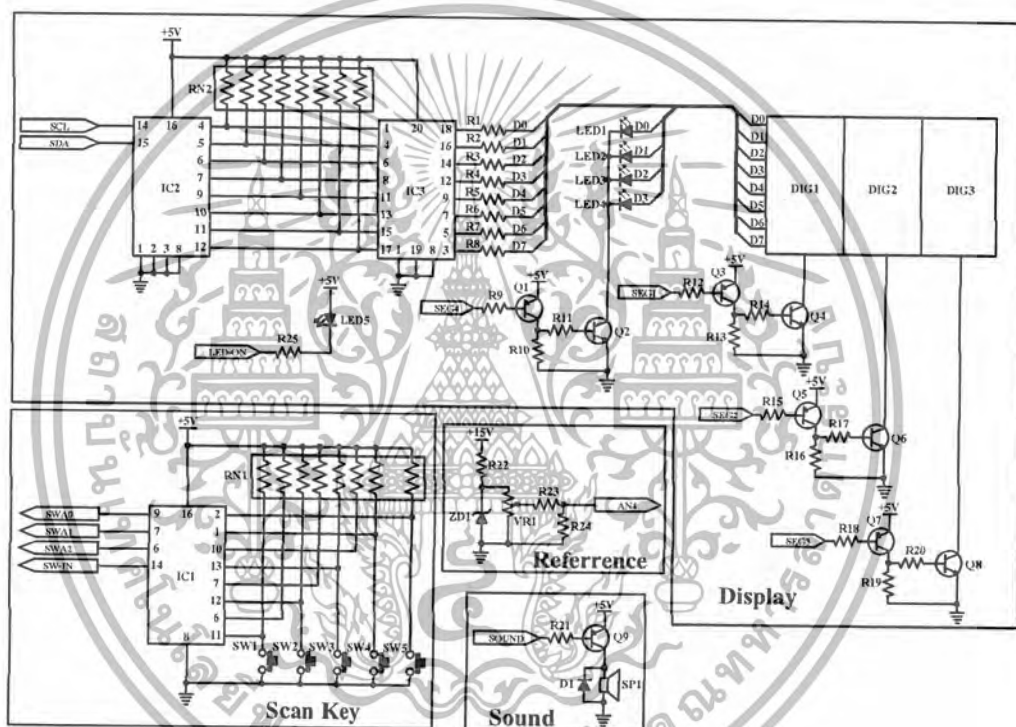
ตามรูปที่ 5.11 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์มีส่วนประกอบดังนี้

วงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ประกอบด้วย คริสตัล (X1) และตัวเก็บประจุ (C1,C2) ขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้สามารถป้อนสัญญาณนาฬิกาได้สูงสุด 40 MHz นอกจากนี้ยังใช้ความถี่ที่ค่าต่ำลงมา 4 เท่า (10 MHz สูงสุด) ป้อนได้ แล้วเขียนโปรแกรมให้ใช้วงจร PLL (Phase Lock Loop) ภายในตัวซึ่งมีตัวคูณเท่ากับ 4 เท่าคูณกับความถี่ป้อนเข้ามา ก็จะได้ 40 MHz เท่าเดิม วิธีนี้ทำให้สัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามีความถี่ต่ำลงแต่สัญญาณนาฬิกาภายในมีค่าเท่าเดิม ทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาต่ำลง ในที่นี้ได้เลือกใช้ความถี่ขนาด 7.3728 MHz และใช้ตัวคูณ 4 ภายใน จะได้ความถี่เป็น 29.4912 MHz ซึ่งเป็นค่า

เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากผลการทดสอบโปรแกรมขึ้นต้นสำหรับการสร้างสัญญาณต่างๆ ส่วนค่า C1 และ C2 เป็นไปตามคำแนะนำในคู่มือการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

วงจรสร้างสภาวะให้พอร์ต เนื่องจากพอร์ตต่างๆเป็นส่วนที่ส่งสัญญาณออกภายนอกและรับค่าเข้ามาประมวลผลซึ่งจะมีสถานะเป็นดิจิตอล ดังนั้นสถานะต่างๆจึงต้องการความแน่นอน เพื่อไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมวลผล ในที่นี้ให้สถานะแน่นอนเป็นลอจิก “H(1)” จึงเห็นได้ว่าจะใช้ความต้านทานขนาด 10 kΩ ที่ภายในมีวงจรต่อเป็นแบบโครงข่ายไว้ (RN1-RN3) ต่อระหว่างทุกพอร์ตที่มีการทำงานแบบดิจิตอลกับไฟเลี้ยงไว้

5.3.4.2 วงจรรับค่าและแสดงผล



รูปที่ 5.12 วงจรรับค่าและแสดงผล

การออกแบบวงจรแสดงผลและรับค่าจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการทำงานของเตาหุงต้มที่กำหนดขึ้นมา ซึ่งฟังก์ชันทำงานของเตาหุงต้มที่ได้ออกแบบนี้ประกอบด้วย

1. สามารถตั้งเวลาในการหุงต้มได้ตั้งแต่ 1-99 นาที
2. สามารถเลือกลักษณะการหุงต้มได้ 4 แบบ คือ
 - แบบปรับความร้อนได้อย่างเชิงเส้น ตั้งแต่ 300-1200วัตต์
 - แบบเดือดมาก (1200วัตต์)
 - แบบเดือด (600วัตต์)
 - แบบอุ่น (300วัตต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

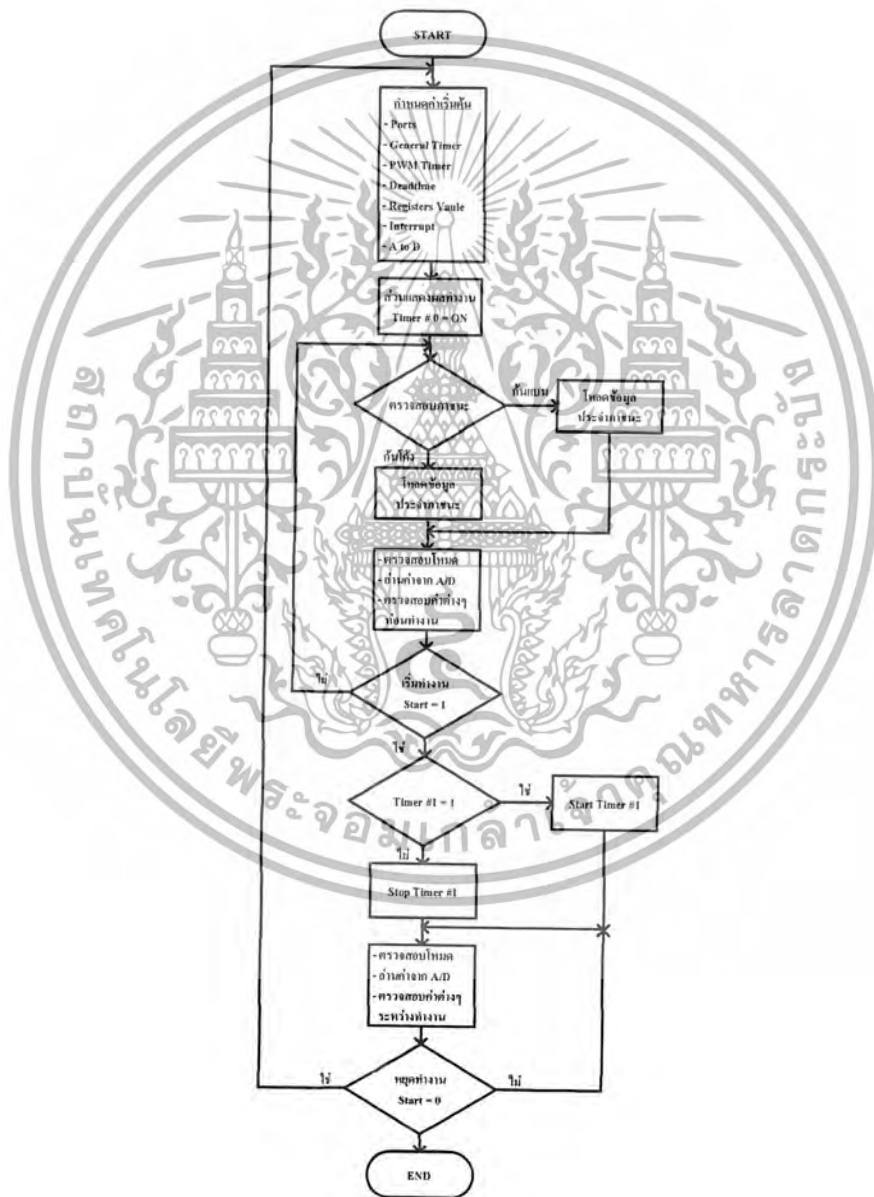
3. ส่งเสียงเตือนขณะที่มีการทำงานผิดปกติขึ้น

5.3.5 การออกแบบและสร้างซอฟต์แวร์

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบโปรแกรมสำหรับสั่งงานให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานตามเงื่อนไขต่างๆ ในการเขียนโปรแกรมจะใช้ภาษาแอสเซมบลี (Assembly) โดยเขียนผ่านโปรแกรม MPLAB ด้วยคอมไพเลอร์ จากนั้นจะทำการแปลง (Compile) โปรแกรมที่ได้เพื่อนำไปป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ซึ่งลักษณะของโปรแกรมได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

5.3.5.1 โปรแกรมหลัก (Main Program)

ดังแสดงได้ตามขบวนการรูปที่ 5.13 ดังนี้



รูปที่ 5.13 ขบวนการของโปรแกรมหลัก

ดังรูปขบวนการของโปรแกรมหลัก จะประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำหนดค่าเริ่มต้น เช่น การทำงานของพอร์ต, การทำงานของไทมเมอร์แต่ละตัว, สัญญาณ PWM และค่าการประวิงเวลา, กำหนดลักษณะการขัดจังหวะ โปรแกรม (Interrupt) และค่าเริ่มต้นทำงานของรีจิสเตอร์ต่างๆ เป็นต้น

2. สั่งให้ส่วนแสดงผลการทำงาน ซึ่งจะแสดงค่าเริ่มต้นในขณะที่เปิดเครื่อง

3. ตรวจสอบประเภทของสถานะที่ต้องการหุงต้ม และอ่านข้อมูลประจำภาชนะนั้นขึ้นมาเก็บไว้ก่อน เพื่อใช้สำหรับคำนวณต่อไป

4. ตรวจสอบลักษณะการหุงต้มขณะเริ่มต้นทำงาน

5. ตรวจสอบการเริ่มต้นทำงานของเครื่องใช้หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะกลับไปเริ่มต้นขั้นตอนที่ 1 ใหม่

6. เมื่อเครื่องเริ่มต้นทำงาน จะตรวจสอบก่อนว่ามีการตั้งเวลาเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามีจะให้ไทมเมอร์เริ่มนับเวลาถอยหลัง

7. ตรวจสอบลักษณะการหุงต้มในขณะที่ทำงาน, อ่านค่าจาก A/D และนำค่าที่ได้ไปประมวลผลในส่วนของโปรแกรมป้องกัน และการสร้างสัญญาณ PWM ต่อไป

8. ตรวจสอบว่าต้องการหยุดการทำงานของเครื่องใช้หรือไม่ ถ้าใช่จะกลับไปเริ่มต้นขั้นตอนที่ 1 ถ้าไม่ใช่จะกลับไปทำขั้นตอนที่ 7 ใหม่เรื่อยๆ

ส่วนของคำสั่งโปรแกรมหลักมีดังนี้

MAIN

```
include main.asm
include initprog.asm
include i2c.asm
include delay.asm
include mode.asm
include progetc.asm
include a_to_d.asm
include fault.asm
include eeprom.asm
include inirlow.asm
include intrhi.asm
END
```

LOW_INTR
HIGH_INTR

File name : main.asm

CALL SET_ALL_PORT

```
CALL SET_ALLINTR
CALL SET_I2C_MODE
CALL INITIAL_7_LED
CALL SET_TIMER0
CALL RESET_TIMER0
CALL SET_TIMER1
CALL RESET_TIMER1
CALL SET_PWM
CALL RESET_PWM
CALL STOP_ALL_INTR
CALL SET_RS232
CALL CHECK_EEP_TO_WR
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MAIN_MAIN
CALL    INITIAL_DATA
MAIN_RUN
CLRF    STKPTR
CALL    RESET_PWM
CALL    RESET_TIMER0
CALL    RESET_TIMER1
CALL    INITIAL_D2A
CALL    INITIAL_DATA_RUN
CALL    RESET_INTRFLAG

BSF     INTCON,GIE
BSF     INTCON,PEIE
BSF     T1CON,TMR1ON
BSF     T2CON,TMR2ON
CHECK_BEFOR_RUN
CALL    CHECK_SW_ETC
CALL    CHECK_PAN_START
CALL    CHECK_MODE_RUN
BTSS    BIT_FLAG1,START_UP
BRA     CHECK_BEFOR_RUN
BSF     PORTC,RESET_FAULT
BCF     PORTB,LED_ON
BCF     PORTB,ON_OPTO
BCF     PORTB,ON_RELAY1
MOVLW  H'FF'
CPFSEQ  TIME_ONREG
BRA     COOKING_RUN1
MOVFF   TIME_REG,TIME_USE
MOVLW  TMR0L_TIMER
MOVWF   TMR0L
MOVLW  TMR0H_TIMER
MOVWF   TMR0H
BCF     INTCON,TMR0IF
BSF     T0CON,TMR0ON
MOVLW  H'40'
MOVWF   CHAR1
BSF     BIT_FLAG1,TIMER_ON
COOKING_RUN1
CALL    CHECK_SW_ETC
CALL    CHECK_MODE_RUN
CALL    SCAN_PAN_RUN
GOTO    CHECK_PAN_RUN
COOKING_RUN2
CALL    CHECK_ATOD_ETC
GOTO    COOKING_RUN1
CHECK_INV_FAULT_AGAIN
BSF     T1CON,TMR1ON
BSF     T2CON,TMR2ON
BSF     T0CON,TMR0ON
BSF     INTCON,GIE
BSF     INTCON,PEIE
BRA     $

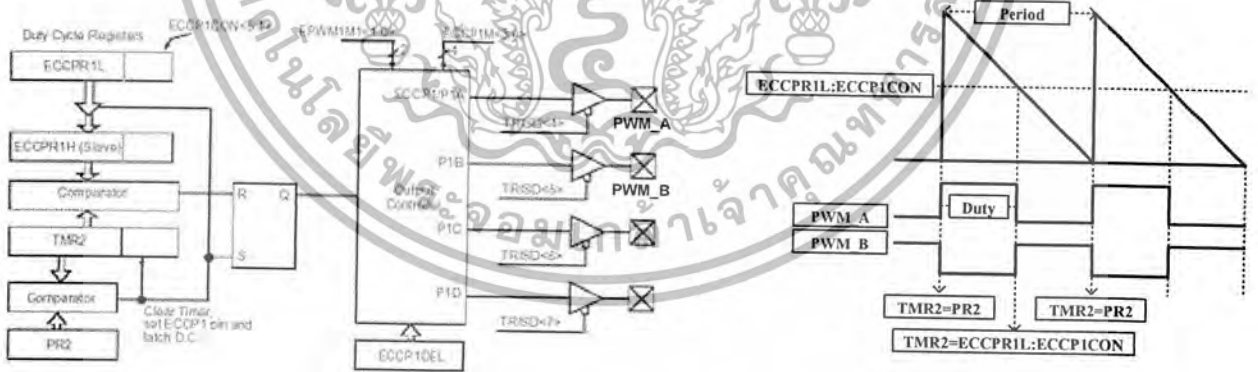
```

5.3.5.2 โปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 5.14 ขบวนการของโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM

ในงานวิจัยนี้ต้องการสัญญาณ PWM ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ (30 kHz – 40 kHz) เพื่อใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงกำลังเอาต์พุต ขณะที่ความกว้างของสัญญาณ (Duty Cycle) คงที่เท่ากับ 50% โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดนี้จะมีวงจรสร้างสัญญาณ PWM ตามความต้องการอยู่แล้ว ในการสร้างสัญญาณดังกล่าวจะใช้ไทมเมอร์ 2 (TMR2) ขนาด 8 บิต เป็นตัวนับคาบเวลา ซึ่งจะนำค่าของคาบเวลาที่ต้องการไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต (PR2) ส่วนค่าความกว้างของสัญญาณจะเป็นค่าขนาด 10 บิตโดยจะแบ่งเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต 2 ตัว คือ ECCPRIL<7:0> 8 บิตด้านสูง และ ECCPICON<5:4> 2 บิตด้านต่ำ



รูปที่ 5.15 หลักการสร้างสัญญาณ PWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์

ตามรูปที่ 5.15 (b) ในสภาวะเริ่มต้นค่าของ TMR2 จะเท่ากับ 0 เมื่อให้ TMR2 เริ่มทำงาน ฆาสัญญาณ PWM จะเปลี่ยนสถานะทันที และ TMR2 ก็จะนับค่าขึ้นไปเรื่อยๆ (เริ่มจาก 0) จนค่าใน TMR2 เท่ากับค่าใน ECCPR1L:ECCP1CON จะทำให้ฆาสัญญาณ PWM เปลี่ยนสถานะอีกครั้ง ซึ่งจะได้ค่าเวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดทำงานนี้เป็นค่าความกว้างของสัญญาณตามที่ต้องการ ขณะเดียวกัน TMR2 จะนับค่าต่อไปจนค่าของ TMR2 เท่ากับค่าใน PR2 ฆาสัญญาณ PWM ก็จะเปลี่ยนสถานะอีกครั้งซึ่งจะได้เป็นค่าคาบเวลาของสัญญาณ การทำงานจะเป็นลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะสั่งให้ TMR2 หยุดทำงาน ดังนั้นในการสร้างสัญญาณ PWM เราจะต้องคำนวณหาค่าคาบเวลาและค่าความกว้างของสัญญาณ และนำค่าที่ได้ไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ PR2 และ ECCPR1L:ECCP1CON ตามลำดับโดยค่าคาบเวลา และค่าความกว้างของสัญญาณที่จะนำไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ สามารถหาได้ดังนี้

$$PR2 = \frac{(T_s) \cdot (F_{osc})}{4(TMR2 \text{ prescale value})} - 1 \quad (5.1)$$

(2.26)

โดยที่

 T_s

คือคาบเวลาของสัญญาณ PWM (sec)

 F_{osc}

คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา (Hz)

TMR2 prescale value

คือค่าตัวหารของสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้าไทมเมอร์ 2

โดยมีค่าเท่ากับ 1, 4 หรือ 16 (ตามข้อมูลใช้งาน)

$$ECCPR1L : ECCP1CON = \frac{(\%D) \cdot (T_s) \cdot (F_{osc})}{100(TMR2 \text{ prescale value})} \quad (5.2)$$

โดยที่

 $\%D$

คือ

เปอร์เซ็นต์ความกว้างของสัญญาณ

ขณะที่ค่าใน TMR2 เท่ากับ PR2 นั้น จะเกิดสภาวะโอเวอร์โฟลว์ (Overflow) เป็นสภาวะที่ค่าใน TMR2 มีค่าเท่ากับ 0 ใหม่อีกครั้ง หรือรีเซ็ตตัวเอง และส่งสัญญาณมาขัดจังหวะ โปรแกรมหลัก ซึ่งเมื่อเกิดสภาวะนี้โปรแกรมจะกระโดดไปทำโปรแกรมย่อยของการสร้างสัญญาณ PWM ทันที โดยในส่วนของโปรแกรมนี้ตามขบวนการรูปที่ 5.14 จะเป็นการโหลดค่าของ PR2 และ ECCPR1L:ECCP1CON ใหม่ ที่ได้มาจากการคำนวณในโปรแกรมหลัก เพราะฉะนั้น โปรแกรมนี้การขัดจังหวะ โปรแกรมหลักจะมี TMR2 เป็นอุปกรณ์การร้องขอ โดยจะเข้ามาแทรกการทำงานของโปรแกรมหลักทุกๆคาบเวลาของสัญญาณ PWM

สัญญาณ PWM ที่ได้นี้จะส่งต่อไปยังวงจรประวิงเวลาก่อนที่ออกมายังฆา PWM_A และ PWM_B วงจรดังกล่าวจะหน่วงสัญญาณออกไปตามค่าที่กำหนดในรีจิสเตอร์ ECCPIDEL ซึ่งเป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต ใช้สำหรับเก็บค่าเวลาหน่วงที่ต้องการ โดยสามารถหาได้จาก

$$ECCP1DEL = \frac{T_d}{4T_{osc}} \quad (5.3)$$

โดยที่ T_d คือ ค่าเวลาในการหน่วง (sec)
คำสั่งโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM มีดังนี้

```

SET_PWM
    MOVLW    B'00000000'
    MOVWF    T2CON
    MOVLW    DEAD_TIME
    MOVWF    ECCP1DEL
    CLRF     ECCPAS
    RETURN

RESET_PWM
    MOVLW    FS_MIN_PO
    MOVWF    PR2
    MOVLW    B'10001100'
    MOVWF    ECCP1CON
    MOVWF    DUTYL_BUFF
    MOVLW    B'01011100'
    MOVWF    ECCPR1L
    MOVWF    DUTYH_BUFF
    RETURN

SET_TIMER0
    MOVLW    B'00000110'
    MOVWF    T0CON
    RETURN

RESET_TIMER0
    BCF     T0CON,TMR0ON
    BCF     INTCON,TMR0IF
    RETURN

SET_TIMER1
    MOVLW    B'10010000'
    MOVWF    T1CON
    RETURN

RESET_TIMER1
    BCF     T1CON,TMR1ON
    MOVLW    TMR1H_V
    MOVWF    TMR1H
    MOVLW    TMR1L_V
    MOVWF    TMR1L
    BCF     PIR1,TMR1IF
    RETURN
  
```

5.4 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร

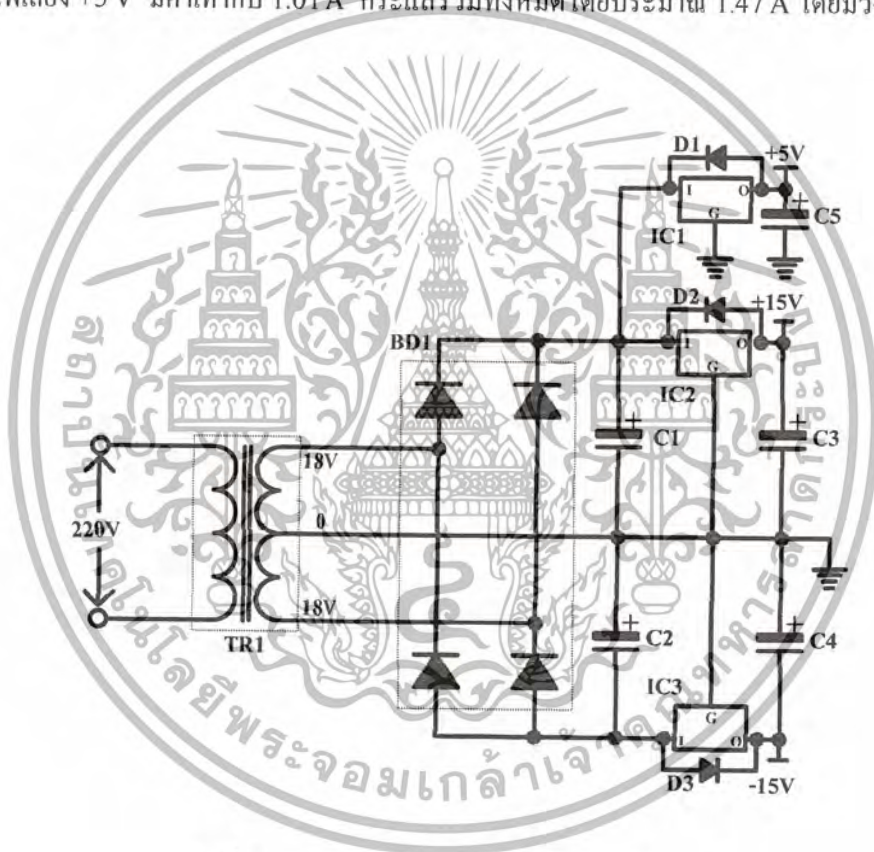
5.4.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์ และอื่นๆ

แหล่งจ่ายในส่วนนี้จะแหล่งจ่ายสำหรับวงจรดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรตรวจจับกระแสอินพุต	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	$\pm 15\text{ V}$ 150 mA
2. วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	$\pm 15\text{ V}$ 150 mA
3. วงจรตรวจจับแรงดันอินพุต	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	+15 V 10 mA
4. วงจรตรวจจับอุณหภูมิ	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	+5 V 10 mA
5. วงจรควบคุมแบบ พี ไอ	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	$\pm 15\text{ V}$ 150 mA
6. วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	+5 V 200 mA
7. วงจรแสดงผลและรับค่า	ระดับไฟเลี้ยงที่ใช้	+5 V 800 mA

ดังนั้นไฟเลี้ยงวงจรนี้จะประกอบด้วยระดับไฟทั้งหมด 3 ระดับ คือ +15, -15 และ +5 V ซึ่งกระแสที่ต้องจ่ายสำหรับระดับแรงดันไฟเลี้ยง $\pm 15\text{ V}$ มีค่าเท่ากับ 0.46A และกระแสสำหรับแหล่งจ่ายระดับไฟเลี้ยง +5 V มีค่าเท่ากับ 1.01A กระแสรวมทั้งหมดโดยประมาณ 1.47 A โดยมีวงจรตามรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์

ตามรูปวงจรการออกแบบได้ใช้หม้อแปลงขนาดพิกัด 18-0-18 V, 2A (TR1) ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (BD1) และกรองด้วยเก็บประจุ (C1 - C5) เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าตามที่ต้องการและคงที่ขณะจ่ายโหลด ดังนั้นวงจรจึงแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ

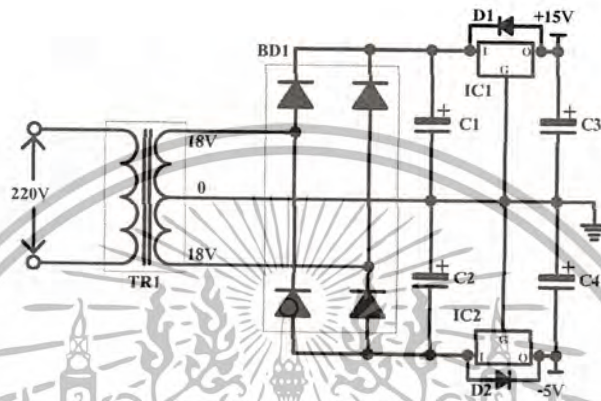
1. แหล่งจ่ายไฟ +15 V จะใช้ไอซีรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulation) เบอร์ 7815 (IC2) เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ 15 V จ่ายกระแสสูงสุดได้ +1 A
2. แหล่งจ่ายไฟ -15 V จะใช้ไอซีเบอร์ 7915 (IC3) เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ -15 V จ่ายกระแสสูงสุดได้ -1 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แหล่งจ่ายไฟ +5V จะใช้ไอซีเบอร์ UA7805 (IC1) เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ +5 V โดยจ่ายกระแสสูงสุดได้ +1.5 A

5.4.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรขับ

วงจรขับไอจีบีทีที่ออกแบบไว้ต้องการไฟเลี้ยงวงจร +15 V, -5 V ตามข้อมูลของไอจีบีทีจะใช้กระแสในการขับให้ทำงานสูงสุดโดยประมาณ 100 mA ดังนั้นวงจรไฟเลี้ยงจึงมีวงจรตามรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 วงจรแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรขับ

ตามวงจรการออกแบบได้ใช้หม้อแปลงขนาด 18-0-18 V, 150 mA (TR1) ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (BD1) และกรองด้วยเก็บประจุ (C1-C4) เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าตามที่ต้องการและคงที่ขณะจ่ายโหลด ดังนั้นวงจรจึงแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. แหล่งจ่ายไฟ +15 V จะใช้ไอซีเบอร์ 7815 (IC1) เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ +15 V จ่ายกระแสสูงสุดได้ +1A
2. แหล่งจ่ายไฟ -5 V จะใช้ไอซีเบอร์ 7905 (IC2) เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ -5 V จ่ายกระแสสูงสุดได้ -1 A

วงจรไฟเลี้ยงสำหรับวงจรขับไอจีบีทีจะมีทั้งหมด 2 ชุด เพราะกราวด์ของวงจรขับไอจีบีทีทั้ง 2 ตัวต้องแยกอิสระต่อกัน

บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบ

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะได้กล่าววิธีการทดสอบและผลการทดสอบการทำงานของเตาหุงต้มเหนียวนำที่ได้ ออกแบบและสร้างเป็นเครื่องต้นแบบจริง ซึ่งการทดสอบจะเป็นการตรวจสอบค่าต่างๆในการทำงานของ เครื่อง เช่น การตรวจสอบค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้า, ประสิทธิภาพรวม, ค่าเวลาในการหุงต้ม และค่า ความผิดเพี้ยนของกระแสอินพุต เป็นต้น ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเตาประเภทอื่น และกับค่ามาตรฐานตามที่ได้ระบุไว้

6.2 การทดสอบเพื่อปรับค่าการทำงานของวงจรให้เหมาะสม

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อปรับแต่งค่าตัวอุปกรณ์ในวงจร เพื่อให้เครื่องทำงานได้อย่าง เหมาะสมและดีที่สุด

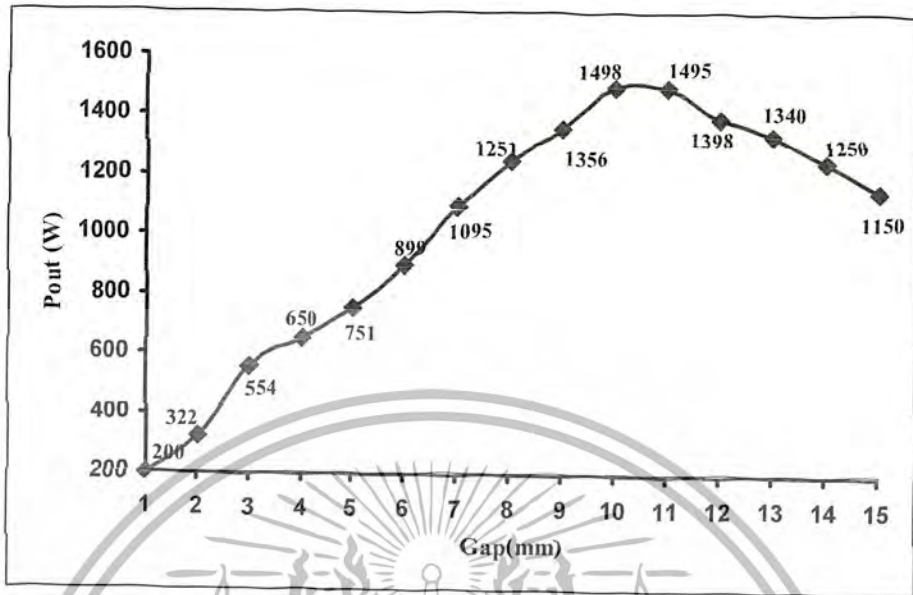
6.2.1 การทดสอบหาระยะ Gap ระหว่างขดลวดกับแกน

โปรแกรมควบคุมวงจรที่ใช้สำหรับการทดสอบนี้เป็นชนิด Open Loop ซึ่งเป็นการปรับ ความถี่ด้วยมือ โดยใช้ ดิจิตอลสโตนออสโคป (Digital Storage Scope) รุ่น DL-1520 ของ Yokogawa ตรวจสอบกระแสและแรงดันอินพุตและเอาต์พุต จะบันทึกผลเป็นรหัส ASCII แล้วนำมา วิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังงาน เอาต์พุต, P_{out} โดยมีสมการดังต่อไปนี้

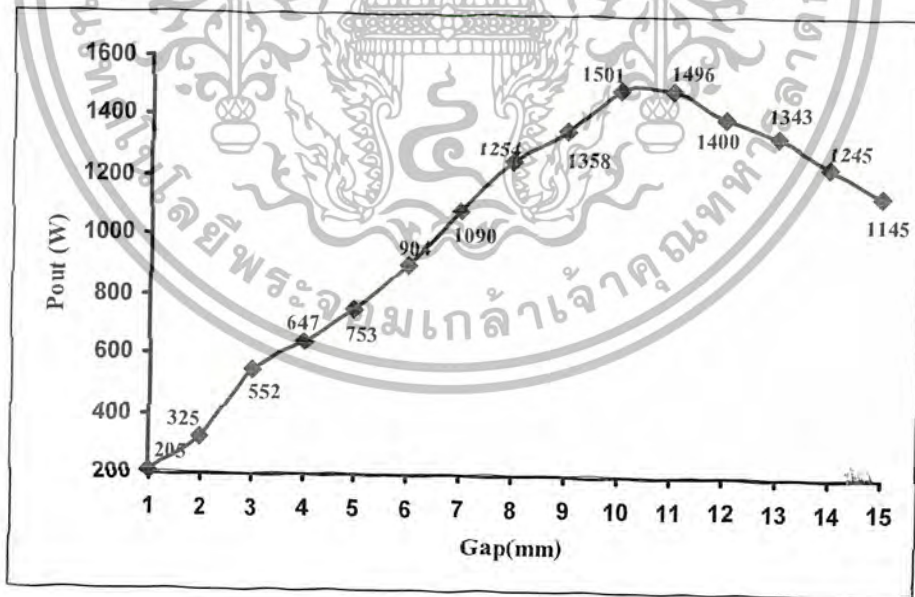
$$P_{out} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_{out}(tk) \cdot I_{out}(tk) \quad (5.1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดภายใน 1 คาบ

ในการทดสอบจะปรับระยะ Gap ตั้งแต่ 1-15 mm. ปรับค่าความถี่ที่จูดเรโซแนนซ์ คือ 30kHz และแกนหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็น Stainless Steel 8-18, 8-10 สำหรับแกนแบน (ϕ -24 cm.) และ Stainless Steel 18-10 สำหรับแกนโค้ง (ϕ -36 cm.) จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมตามสมการที่ (6.1) จะได้ผลดังรูปที่ 6.2, 6.3, 6.4

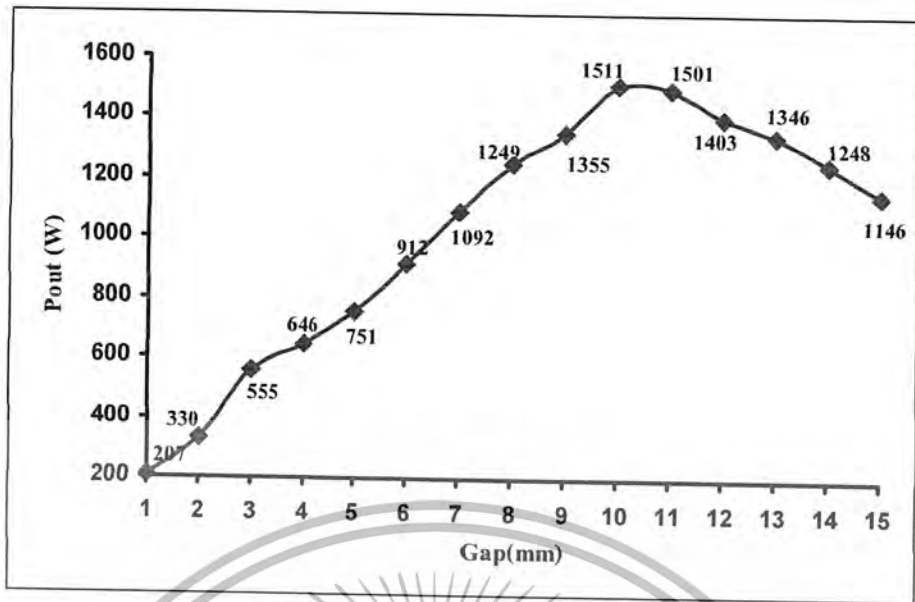


รูปที่ 6.1 ค่ากำลังงานเอาต์พุตเมื่อระยะ Gap เปลี่ยนแปลง ของภาชนะชนิดก้นแบนวัสดุแบบ *Stainless Steel* 8-18



รูปที่ 6.2 ค่ากำลังงานเอาต์พุตเมื่อระยะ Gap เปลี่ยนแปลง ของภาชนะชนิดก้นแบนวัสดุแบบ *Stainless Steel 18-10*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ค่ากำลังงานเอาต์พุตเมื่อระยะ Gap เปลี่ยนแปลง ของภาชนะชนิดก้นโค้งวัสดุแบบ *Stainless Steel 18-10*

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าเมื่อระยะ Gap เพิ่มขึ้นจาก 1 mm. จนถึงประมาณ 10 mm. จะทำให้กำลังงานเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานของภาชนะหุ้มต้มมีค่าลดลง (ตามความลึกของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกี่ยวข้องกับภาชนะ) จึงทำให้ความหนาแน่นของกระแสเกิดที่ผิวของก้นภาชนะมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะ Gap มากขึ้น (>10 mm.) เส้นแรงแม่เหล็กที่ไปเกี่ยวข้องกับก้นภาชนะลดลงจะทำให้ความต้านทานสมมูลของวงจรมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสเกิดที่ผิวของก้นภาชนะลดลงจึงทำให้กำลังงานเอาต์พุตที่ได้ลดลงด้วย ผลของชนิดของภาชนะและวัสดุที่ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกัน เนื่องจากค่าความต้านทานของภาชนะ ไม่เท่ากันแต่ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน เพราะฉะนั้นเตาหุ้มต้มเครื่องต้นแบบนี้ทั้งภาชนะก้นแบนและ โค้ง จึงปรับค่าระยะ Gap ระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับก้นภาชนะไว้ประมาณ 10 mm. ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับ กำลังงานเอาต์พุตที่ได้ และการระบายความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำ

6.2.2 การทดสอบหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ปรับปรุงกระแสด้านอินพุต

เป็นการทดสอบหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ปรับปรุงกระแสด้านอินพุตให้เหมาะสมกับการทำงานของวงจร

โปรแกรมควบคุมวงจรที่ใช้สำหรับการทดสอบนี้จะเป็นชนิด Open Loop ซึ่งเป็นการปรับความถี่ด้วยมือ โดยใช้ ดิจิตอลสโตรเรจสโคป (Digital Storage Scope) รุ่น DL-1520 ของ Yokogawa ตรวจจับกระแสและแรงดันอินพุต จะบันทึกผลเป็นรหัส ASCII แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่า THD; และค่าสเปคตรัมของกระแส โดยมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{h=1}^{40} \left(\frac{I_{in,h}}{I_{in,1}} \right)^2} \quad (6.2)$$

ในการทดสอบจะปรับระยะ Gap เท่ากับ 10 mm. ปรับค่าความถี่ 30 kHz, 35 kHz และ 40 kHz และภาชนะหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็น Stainless Steel 18-8, 18-10 ทั้งก้นแบน (ϕ -24 cm.) และก้นโค้ง (ϕ -36 cm.) จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมตามสมการที่ (6.2) และนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานที่อ้างอิงไว้

6.2.2.1 ก่อนใส่ตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกสักระยะอินพุตเมื่อ เป็นภาชนะก้นแบนวัสดุ Stainless Steel 18-8

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
1	8.10	4.70	2.21
2	0.37	0.53	0.17
3	0.16	1.37	0.51
4	0.63	0.09	0.05
5	1.39	0.75	0.29
6	0.18	0.18	0.13
7	0.84	0.52	0.18
8	0.33	0.11	0.06
9	0.42	0.30	0.22
10	0.12	0.05	0.06
11	0.47	0.35	0.11
12	0.11	0.02	0.12

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40 kHz
13	0.49	0.15	0.05
14	0.04	0.07	0.15
15	0.10	0.23	0.19
16	0.06	0.07	0.07
17	0.16	0.10	0.10
18	0.07	0.07	0.02
19	0.17	0.20	0.09
20	0.11	0.05	0.09
21	0.10	0.11	0.13
22	0.01	0.11	0.09
23	0.06	0.15	0.08
24	0.10	0.02	0.06
25	0.09	0.33	0.18
26	0.05	0.06	0.09
27	0.13	0.11	0.14
28	0.04	0.03	0.03
29	0.01	0.05	0.10
30	0.07	0.07	0.03
31	0.08	0.13	0.14
32	0.09	0.05	0.04
33	0.04	0.04	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40 kHz
34	0.20	0.10	0.03
35	0.07	0.14	0.09
36	0.37	0.02	0.06
37	0.10	0.09	0.05
38	0.15	0.08	0.04
39	0.08	0.07	0.06
40	0.14	0.03	0.03
% THD _r	25.90	40.13	39.50

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าอาร์มอิกส์กระแสสลับทุกเครื่องมือ เป็นลักษณะกันแบบวัสดุ Stainless Steel 18-10

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40 kHz
1	8.07	4.68	2.37
2	0.41	0.18	0.13
3	1.30	1.59	0.44
4	0.12	0.12	0.06
5	1.13	0.77	0.43
6	0.18	0.20	0.13
7	0.12	0.20	0.11
8	0.18	0.17	0.12
9	0.35	0.16	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสรีจ (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
10	0.09	0.13	0.07
11	0.21	0.20	0.13
12	0.18	0.07	0.11
13	0.47	0.22	0.06
14	0.12	0.07	0.11
15	0.24	0.25	0.18
16	0.08	0.07	0.07
17	0.06	0.15	0.15
18	0.06	0.06	0.07
19	0.17	0.14	0.16
20	0.06	0.06	0.03
21	0.11	0.18	0.13
22	0.06	0.02	0.09
23	0.13	0.07	0.09
24	0.15	0.06	0.08
25	0.15	0.12	0.18
26	0.03	0.04	0.10
27	0.02	0.11	0.21
28	0.09	0.07	0.09
29	0.11	0.08	0.17
30	0.06	0.03	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
31	0.03	0.10	0.07
32	0.07	0.05	0.08
33	0.09	0.04	0.14
34	0.12	0.02	0.02
35	0.07	0.09	0.13
36	0.04	0.09	0.06
37	0.03	0.08	0.14
38	0.11	0.02	0.04
39	0.04	0.07	0.05
40	0.07	0.09	0.02
% THD _i	24.50	40.97	39.90

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกกระแสสอินพุตเมื่อ เป็นภาระกะกันโค้งวัสดุ Stainless Steel 18-10

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
1	7.60	4.54	2.37
2	1.20	0.38	0.17
3	1.05	0.89	0.56
4	0.40	0.40	0.08
5	0.97	0.75	0.33
6	0.25	0.10	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

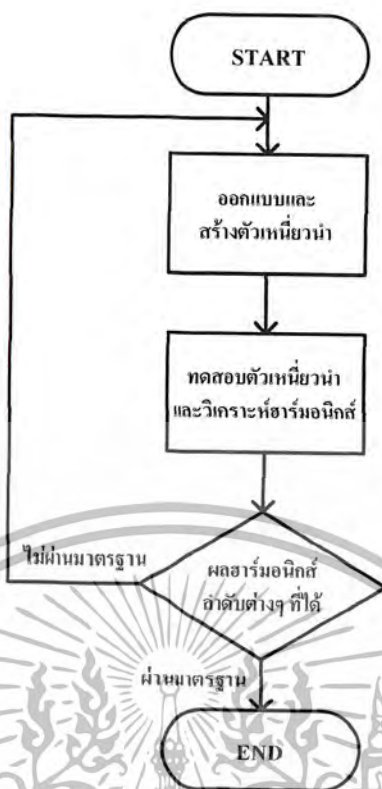
ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
7	0.27	0.60	0.18
8	0.18	0.28	0.10
9	0.31	0.26	0.21
10	0.11	0.06	0.06
11	0.23	0.31	0.06
12	0.15	0.13	0.13
13	0.18	0.13	0.00
14	0.09	0.17	0.16
15	0.15	0.18	0.15
16	0.10	0.18	0.03
17	0.17	0.09	0.14
18	0.03	0.04	0.10
19	0.06	0.09	0.14
20	0.13	0.06	0.10
21	0.13	0.10	0.18
22	0.09	0.10	0.11
23	0.06	0.15	0.08
24	0.11	0.09	0.11
25	0.16	0.09	0.16
26	0.02	0.04	0.10
27	0.07	0.05	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
28	0.06	0.02	0.11
29	0.11	0.07	0.12
30	0.01	0.15	0.09
31	0.02	0.15	0.17
32	0.07	0.17	0.09
33	0.08	0.06	0.10
34	0.04	0.09	0.02
35	0.01	0.35	0.11
36	0.09	0.06	0.03
37	0.06	0.55	0.04
38	0.01	0.15	0.10
39	0.01	0.32	0.11
40	0.08	0.18	0.09
% THD	27.22	39.15	40.68

ค่าที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 6.1 ถึง 6.3 เป็นค่าฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตลำดับต่างๆ ขณะที่เปลี่ยนค่าความถี่, ภาระ และวัสดุ ก่อนใส่ตัวเหนี่ยวนำ เมื่อพิจารณาที่ช่องค่าผลต่างซึ่งมีตามสมการ 5.3 จะเห็นได้ว่าค่าผลต่างที่เป็นค่าลบนั้นแสดงว่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสจริงสูงกว่าค่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำที่สามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ส่วนที่เกินทิ้งไป โดยขั้นตอนออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำจะมีตามขบวนการดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ขบวนการออกแบบและสร้างตัวเหนี่ยวนำ

6.2.2.2 หลังใส่ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ได้หลังจากที่ได้ทดสอบตามขบวนการดังรูปที่ 6.6 จะได้ค่าโดยประมาณ 0.8 mH ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับภาระทั้ง 2 แบบ และวัสดุต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาระกันบนวัสดุ *Stainless Steel 18-8*

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
1	8.10	4.70	2.22
2	0.04	0.04	0.02
3	0.01	0.11	0.05
4	0.06	0.01	0.00

ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสรีจ (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
5	0.13	0.06	0.03
6	0.02	0.01	0.01
7	0.08	0.04	0.02
8	0.03	0.01	0.01
9	0.04	0.02	0.02
10	0.01	0.00	0.01
11	0.04	0.03	0.01
12	0.01	0.00	0.01
13	0.05	0.01	0.00
14	0.00	0.01	0.01
15	0.01	0.02	0.02
16	0.01	0.01	0.01
17	0.02	0.01	0.01
18	0.01	0.01	0.00
19	0.02	0.02	0.01
20	0.01	0.00	0.01
21	0.01	0.01	0.01
22	0.00	0.01	0.01
23	0.01	0.01	0.01
24	0.01	0.00	0.01
25	0.01	0.01	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
26	0.01	0.01	0.01
27	0.01	0.01	0.01
28	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.01
30	0.01	0.01	0.00
31	0.01	0.01	0.01
32	0.01	0.00	0.00
33	0.00	0.00	0.01
34	0.02	0.01	0.00
35	0.01	0.01	0.01
36	0.03	0.00	0.01
37	0.01	0.01	0.00
38	0.01	0.01	0.00
39	0.01	0.01	0.01
40	0.01	0.00	0.00
% THD _i	2.46	3.21	3.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกกระแสอินพุตเมื่อ เป็นภาระกันแบบวัสดุ Stainless Steel 18-10

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
1	8.07	4.68	2.37
2	0.04	0.01	0.01
3	0.11	0.12	0.04
4	0.01	0.01	0.01
5	0.10	0.06	0.04
6	0.02	0.02	0.01
7	0.01	0.02	0.01
8	0.02	0.01	0.01
9	0.03	0.01	0.02
10	0.01	0.01	0.01
11	0.02	0.02	0.01
12	0.02	0.01	0.01
13	0.04	0.02	0.01
14	0.01	0.01	0.01
15	0.02	0.02	0.02
16	0.01	0.01	0.01
17	0.01	0.01	0.01
18	0.01	0.00	0.01
19	0.02	0.01	0.02
20	0.01	0.00	0.00
21	0.01	0.01	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสวิง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
22	0.01	0.00	0.01
23	0.01	0.01	0.01
24	0.01	0.00	0.01
25	0.01	0.01	0.02
26	0.00	0.00	0.01
27	0.00	0.01	0.02
28	0.01	0.01	0.01
29	0.01	0.01	0.02
30	0.01	0.00	0.00
31	0.00	0.01	0.01
32	0.01	0.00	0.01
33	0.01	0.00	0.01
34	0.01	0.00	0.00
35	0.01	0.01	0.01
36	0.00	0.01	0.01
37	0.00	0.01	0.01
38	0.01	0.00	0.00
39	0.00	0.01	0.00
40	0.01	0.01	0.00
% THD_i	2.12	3.15	3.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกกระแสอินพุตเมื่อ เป็นสถานะกันโค้งวัสดุ *Stainless Steel 18-10*

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
1	7.59	4.54	2.37
2	0.11	0.03	0.02
3	0.09	0.07	0.05
4	0.04	0.03	0.01
5	0.09	0.06	0.03
6	0.02	0.01	0.01
7	0.02	0.05	0.02
8	0.02	0.02	0.01
9	0.03	0.02	0.02
10	0.01	0.00	0.01
11	0.02	0.02	0.01
12	0.01	0.01	0.01
13	0.02	0.01	0.00
14	0.01	0.01	0.01
15	0.01	0.01	0.01
16	0.01	0.01	0.00
17	0.02	0.01	0.01
18	0.00	0.00	0.01
19	0.01	0.01	0.01
20	0.01	0.00	0.01
21	0.01	0.01	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

ลำดับ	ค่ากระแสจริง (A)		
	30 kHz	35 kHz	40kHz
22	0.01	0.01	0.01
23	0.01	0.01	0.01
24	0.01	0.01	0.01
25	0.01	0.01	0.01
26	0.00	0.00	0.01
27	0.01	0.00	0.00
28	0.01	0.00	0.01
29	0.01	0.01	0.01
30	0.00	0.01	0.01
31	0.00	0.01	0.02
32	0.01	0.01	0.01
33	0.01	0.00	0.01
34	0.00	0.01	0.00
35	0.00	0.03	0.01
36	0.01	0.00	0.00
37	0.01	0.04	0.00
38	0.00	0.01	0.01
39	0.00	0.03	0.01
40	0.01	0.01	0.01
% THD_i	2.42	3.06	3.82

จากผลการทดสอบที่ได้ตามตารางที่ 6.4 ถึง 6.6 จะเห็นได้ค่าผลต่างจะไม่มีค่าลบ แสดงว่า กระแสฮาร์มอนิกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำค่านี้อาจใช้งานได้ ขณะที่เมื่อไปเปรียบเทียบค่าตัวเหนี่ยวนำที่ค่าน้อยกว่านี้ค่ากระแสฮาร์มอนิกจะยังไม่เข้าเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่ได้แสดงผลการทดสอบให้เห็น) แต่ถ้าค่ามากกว่านี้กระแสฮาร์มอนิกจะได้ในเกณฑ์มาตรฐานเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

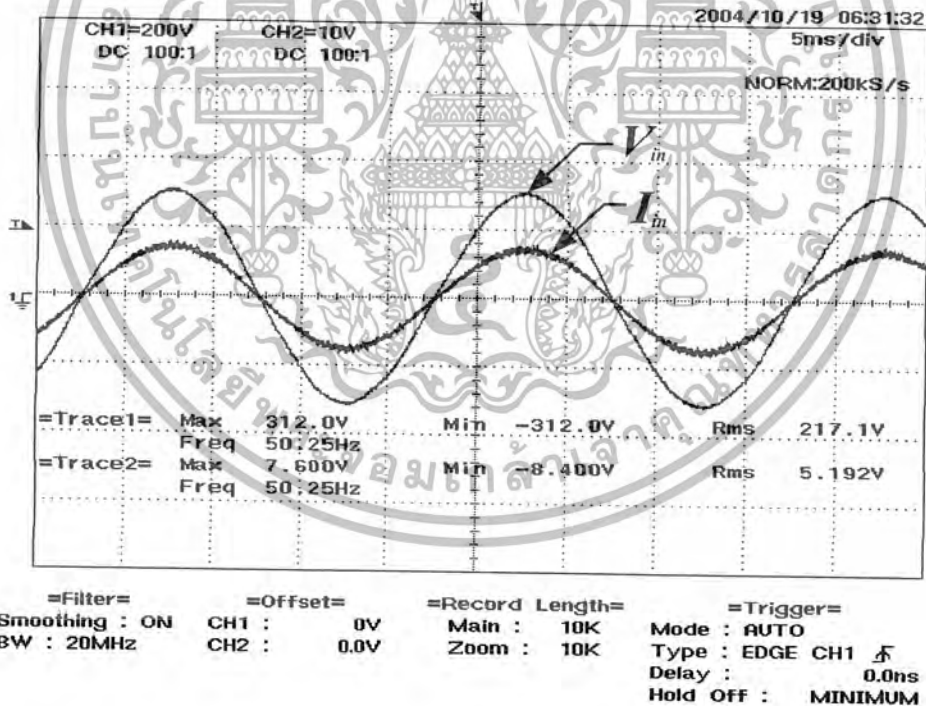
แต่ขนาดของตัวเหนี่ยวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้ต้องเสียพื้นที่ในการติดตั้ง และมีแรงดันตกคร่อมสูงกว่าทำให้แรงดันอินพุตป้อนเข้าวงจรลดต่ำลง เพราะฉะนั้นค่าตัวเหนี่ยวนำ (8 mH) ที่ทดสอบให้เห็นนี้จึงเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

6.3 การทดสอบเพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่อง

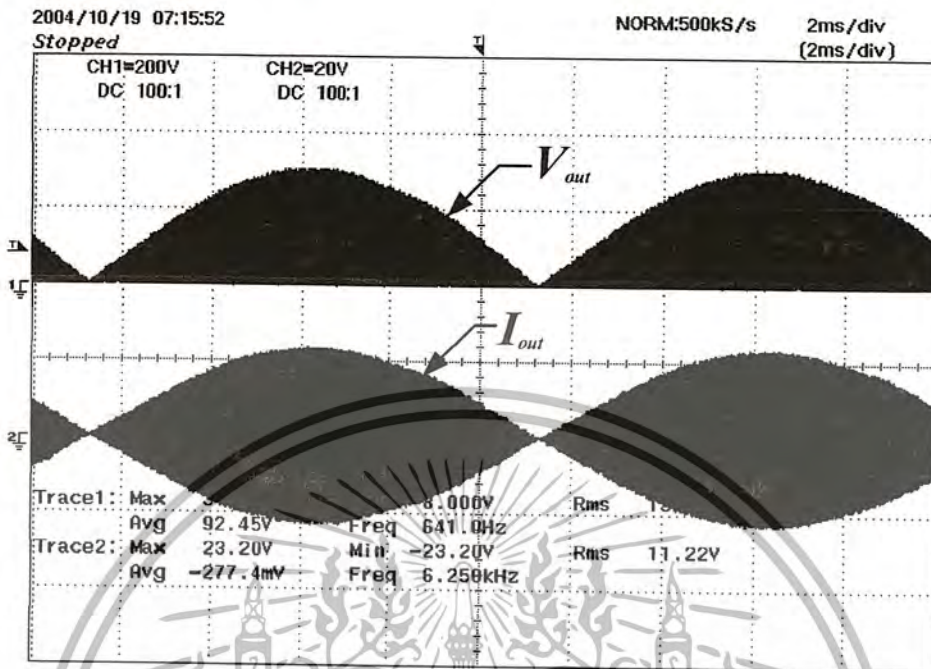
เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อการทำงานของเครื่องเป็นตามที่ได้ออกแบบไว้

6.3.1 การตรวจสอบรูปคลื่นตามส่วนต่างๆของวงจร

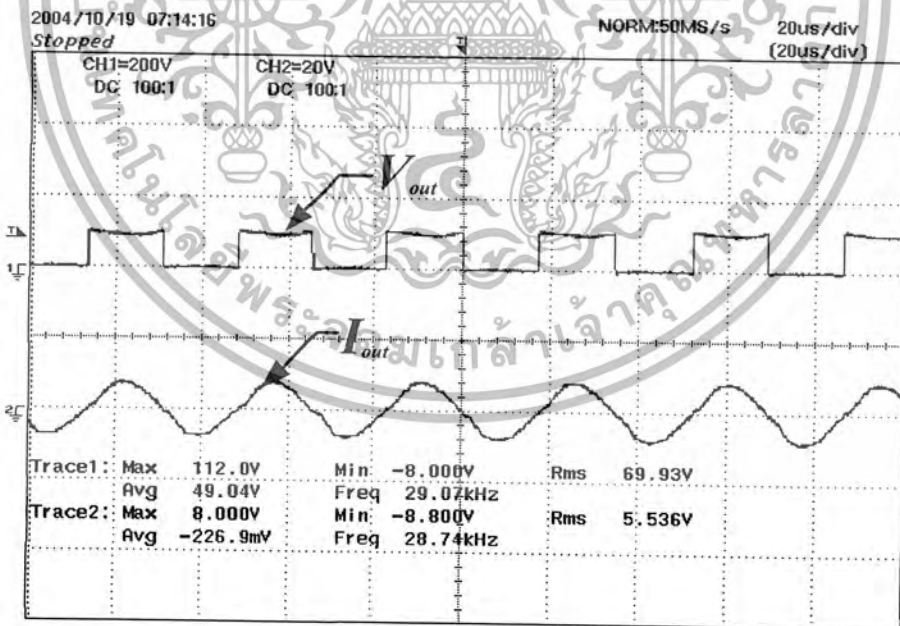
การทดสอบนี้จะใช้วงจรที่มีการทำงานชนิดสมบูรณ์แบบ ตามเครื่องต้นแบบที่ได้นำเสนอไว้ โดยจะตรวจสอบแรงดันและกระแสอินพุตและเอาต์พุต ขณะที่ปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าไป ทั้งภาชนะกันเบนและโค้งชนิด Stainless Steel 18-10



รูปที่ 6.5 กระแสและแรงดันอินพุตของภาชนะกันเบน



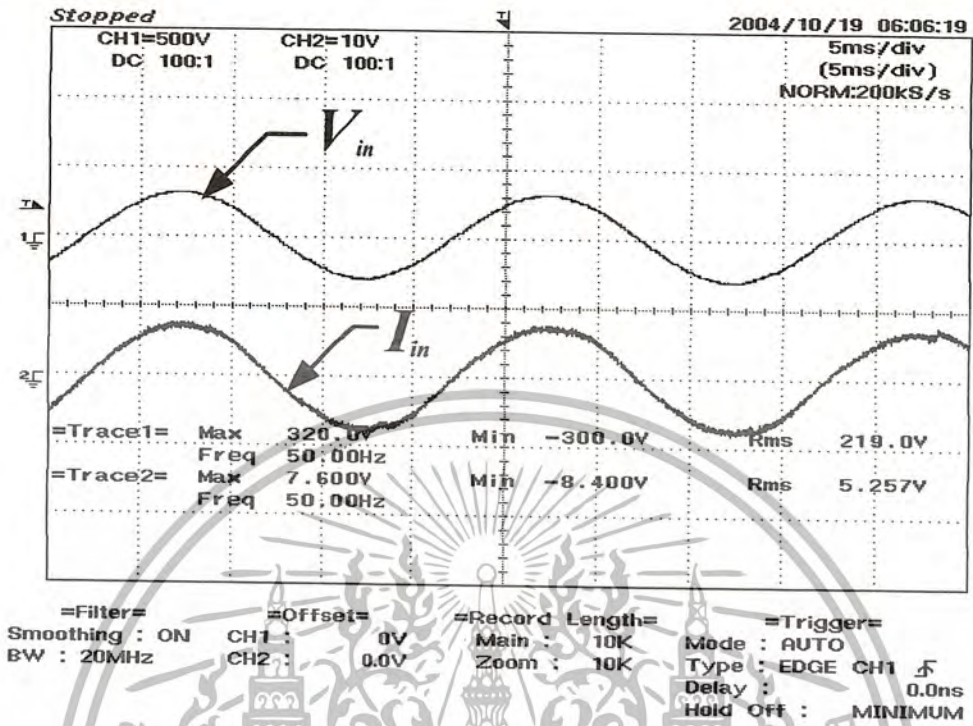
(ก) กระแสและแรงดันเอาต์พุต



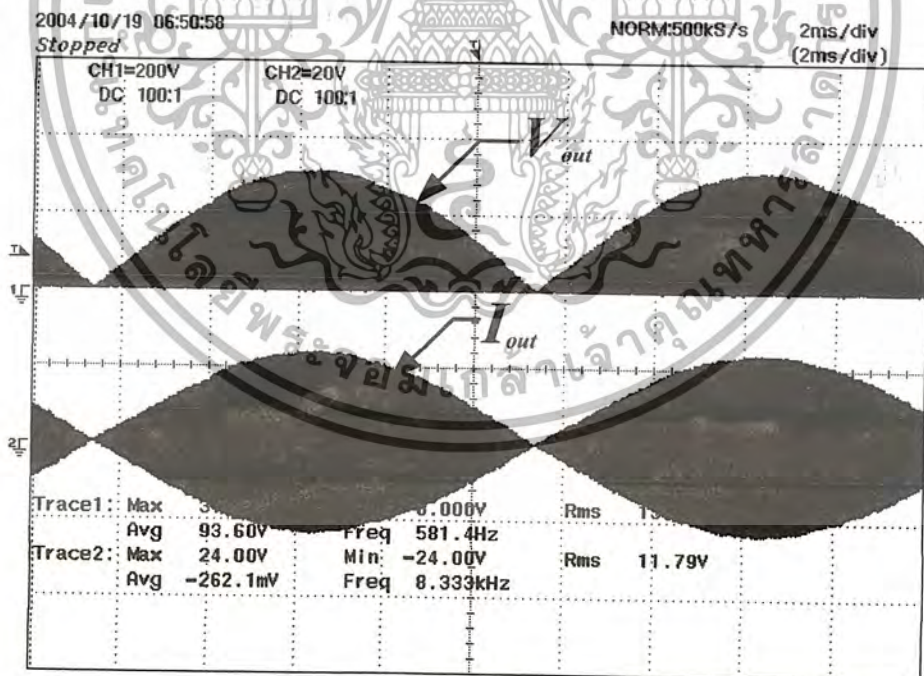
(ข) ภาพขยายบางส่วนของกระแสและแรงดันเอาต์พุต

รูปที่ 6.6 กระแสและแรงดันเอาต์พุตของภาชนะกั้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

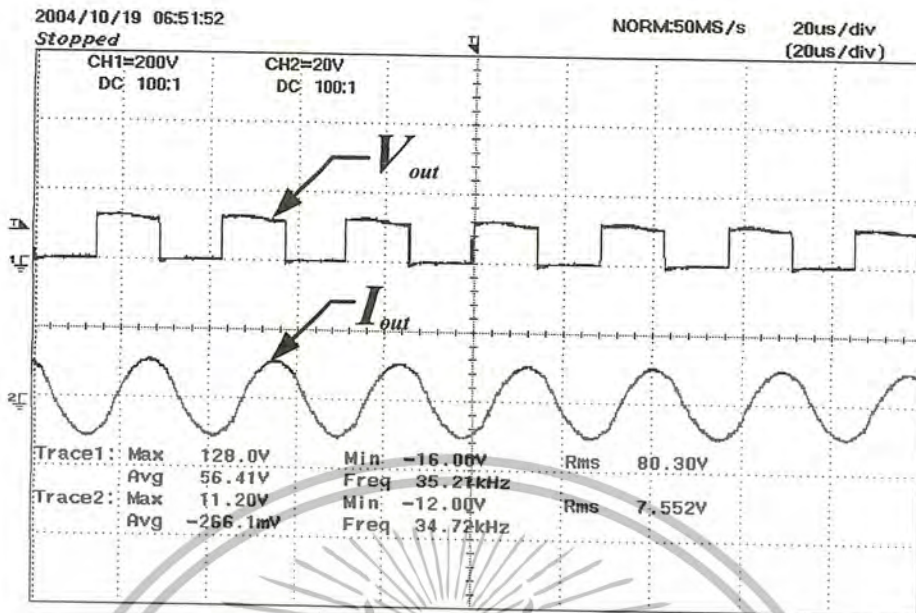


รูปที่ 6.7 กระแสและแรงดันอินพุตของภาชนะกึ่ง



(ก) กระแสและแรงดันเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ภาพขยายบางส่วนของกระแสและแรงดันเอาต์พุต รูปที่ 6.8 กระแสและแรงดันเอาต์พุตของภาชนะกั้นโค้ง

6.3.2 การตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่อง

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าทางไฟฟ้า เช่น ค่าประสิทธิภาพของวงจร, ประสิทธิภาพรวม, ค่าตัวประกอบกำลัง, ค่า THD_v, และค่าเวลาในการทำความร้อน เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดและขนาดของภาชนะ ในการทดสอบจะเติมน้ำดิบด้วยปริมาณ 1 ลิตร มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 °C

การทดสอบนี้ได้ใช้ ดิจิตอลสโตร์เรจิสโคป (Digital Storage Scope) รุ่น DL-1520 ของ Yokogawa ตรวจสอบกระแสและแรงดันอินพุตและเอาต์พุต จะบันทึกผลเป็นรหัส ASCII แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$P_{in} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_{in}(tk) \cdot I_{in}(tk) \tag{6.3}$$

$$\% \eta_{elec} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{6.4}$$

โดยที่ $\% \eta_{elec}$ คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{V_{in,h}}{V_{in,1}} \right)^2} \tag{6.5}$$

$$P_{out, total} = 4180 \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (6.6)$$

โดยที่	$P_{out, total}$	คือ	กำลังงานเอาต์พุตที่เปลี่ยนมาจากพลังงานความร้อนของน้ำ (W)
	T_1	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (°C)
	T_2	คือ	อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำ (°C)
	t_1	คือ	เวลาที่เริ่มต้นทำงาน (sec)
	t_2	คือ	เวลาที่สิ้นสุดทำงาน (sec)
	4184	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg.K) ซึ่งเป็นค่าพลังงานความร้อน 1 แคลอรี ของน้ำขนาดน้ำหนัก 1 กรัม ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนไป 1 องศาเซลเซียส

$$\% \eta_{total} = \frac{P_{out, total}}{P_{in}} \times 100 \quad (6.7)$$

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

6.3.2.1 ภาชนะกั้นแบบ

สำหรับชนิดของภาชนะกั้นแบบที่จะนำมาทดสอบ มีทั้งหมด 5 ชนิด ดังนี้

1. ชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.
2. ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.
3. ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.
4. ชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm.
5. ชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24 cm.

ดังแสดงได้ตามรูปที่ 5.9



(ก) ชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.



(ข) ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.



(ก) ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.



(ง) ชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm.



(ข) ชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24cm.

รูปที่ 6.9 ชนิดของภาชนะที่จะใช้ทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงาน

6.3.2.2.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ตารางที่ 6.7 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกันแบบชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.

P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD_v (%)	THD_i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
342	1.52	220	0.99	1.05	3.89	318.74	93.2
525	2.32	220	0.99	1.03	3.55	494.03	94.1
723	3.18	220	0.99	0.98	3.10	685.40	94.8
925	4.09	220	0.99	1.00	2.85	880.60	95.2
1230	5.55	220	0.99	0.98	2.10	1179.57	95.9

ตารางที่ 6.8 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบบชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด 24 cm.

P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
342	1.63	220	0.99	1.05	3.98	318.40	93.1
525	2.26	220	0.99	0.90	3.42	498.75	95
723	3.17	220	0.99	1.04	3.12	691.19	95.6
925	4.1	220	0.99	0.98	2.71	887.08	95.9
1230	5.55	220	0.99	1.00	2.05	1183.26	96.2

ตารางที่ 6.9 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบบชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด 20 cm.

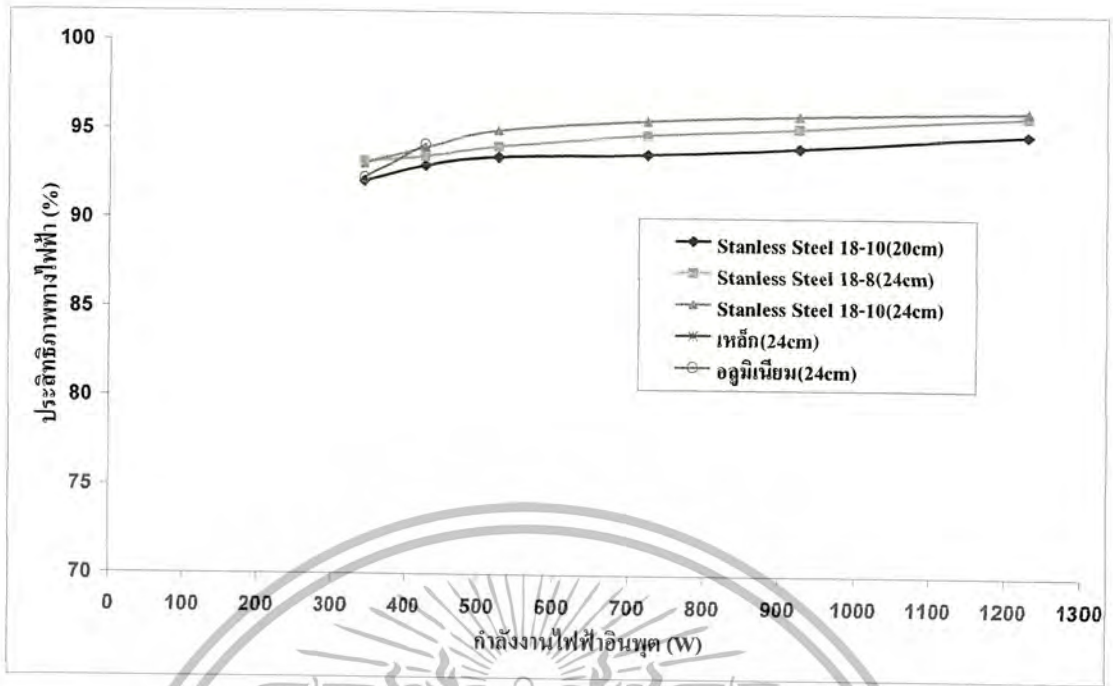
P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% (elec)
342	1.55	220	0.99	1.01	3.93	314.98	92.1
525	2.29	220	0.99	1.02	3.48	490.88	93.5
723	3.2	220	0.99	0.95	3.05	677.45	93.7
925	4.12	220	0.99	1.00	2.65	870.43	94.1
1230	5.55	220	0.99	0.96	1.99	1167.27	94.9

ตารางที่ 6.10 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบบชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm.

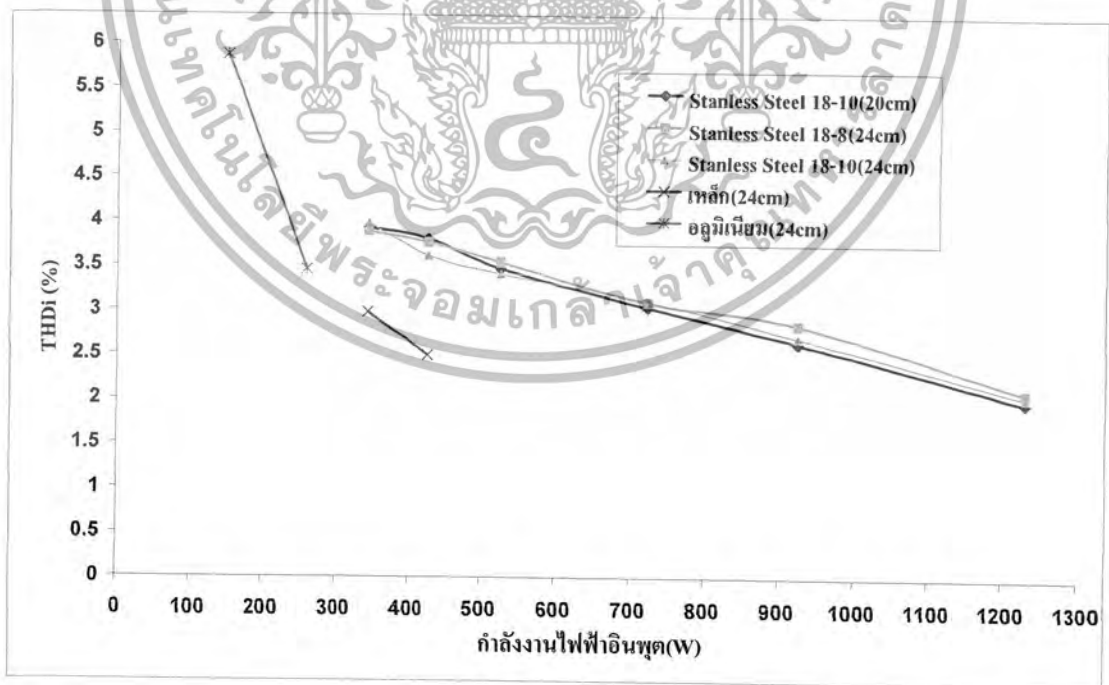
P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
342	1.54	220	0.99	1.02	2.98	315.67	92.3
427	1.95	220	0.99	1.05	2.50	402.23	94.2

ตารางที่ 6.11 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นแบบชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24 cm.

P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
149	0.72	220	0.96	1.10	5.87	135.89	91.2
259	1.18	220	0.98	1.00	3.46	243.98	94.2



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้ากับกำลังงานอินพุตเมื่อภาชนะเป็น Stainless Steel แบบต่างๆ



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง THD, กับกำลังงานอินพุตเมื่อภาชนะเป็น Stainless Steel แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามตารางผลการทดสอบที่ 6.10 และ 6.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อภาชนะ Stainless Steel 18-8 หรือ 18-10 สามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าได้ในช่วงต่ำสุดอยู่ที่ 342 วัตต์ และสูงสุดที่ 1230 วัตต์ แต่เมื่อเป็นภาชนะชนิดเหล็กสามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าได้ในช่วงต่ำสุดที่ 342 วัตต์ และสูงสุดได้ที่ 427 วัตต์ ส่วนชนิดอลูมิเนียมสามารถควบคุมได้ในช่วงต่ำสุดที่ 149 วัตต์ และสูงสุดที่ 259 วัตต์ เท่านั้น

6.3.2.1.2 การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพรวมและเวลาในการทำความร้อน

การทดลองนี้จะหาค่าประสิทธิภาพรวมของระบบ ซึ่งหาค่าได้ตามสมการที่ (5.6) และ(5.7) และตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการหุงต้ม เมื่อให้เตาหุงต้มทำงานที่ 1200 วัตต์ โดยเปลี่ยนแปลงชนิดและขนาดของภาชนะต่างๆ

ตารางที่ 6.12 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกันแบบชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.

Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out, total}$ (W)	$\% \eta_{total}$
30	0:00	1200	889.36	74.12
40	0:35			
50	1:10			
60	2:26			
70	3:05			
80	3:25			
90	3:50			
100	5:29			

ตารางที่ 6.13 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบบชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด 24 cm.

Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$
30	0:00	1200	836	69.67
40	0:34			
50	1:21			
60	2:08			
70	2:58			
80	3:52			
90	4:47			
100	5:50			

ตารางที่ 6.14 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบบชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด 20 cm.

Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$
30	0:00	1200	943.87	78.66
40	0:20			
50	1:00			
60	1:36			
70	2:21			
80	3:01			
90	3:45			
100	5:10			

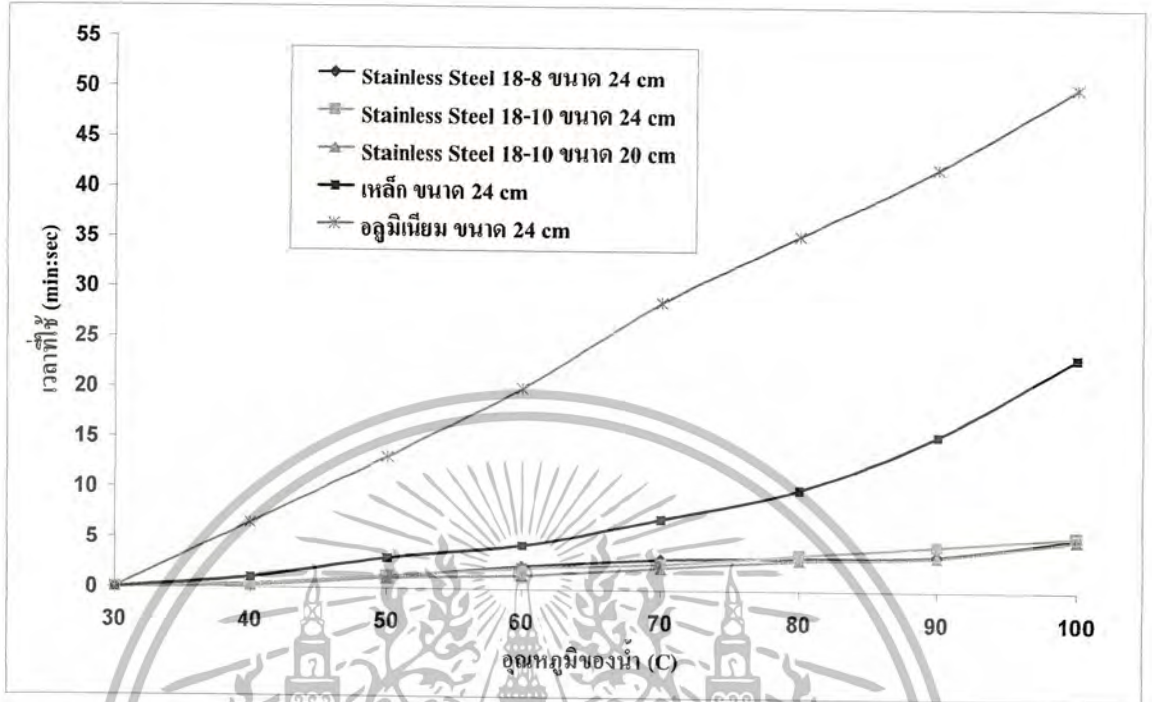
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.15 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm.

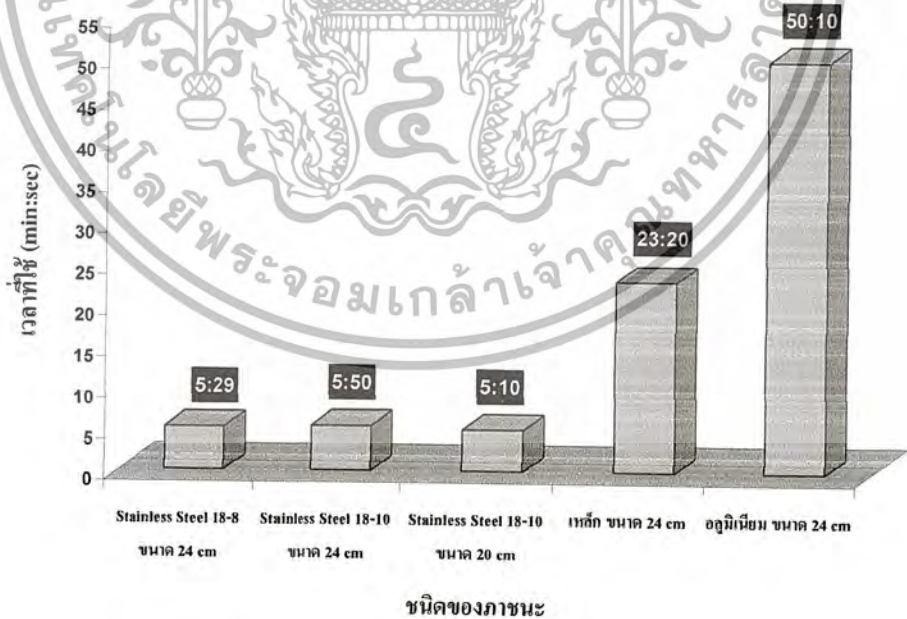
Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$
30	0:00	427	179.14	41.95
40	1:02			
50	3:01			
60	4:35			
70	7:06			
80	10:05			
90	15:45			
100	23:20			

ตารางที่ 6.16 ค่าประสิทธิภาพรวมของภาชนะกั้นแบนชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24 cm.

Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$
30	0:00	259	97.21	37.53
40	6:50			
50	13:10			
60	20:01			
70	28:58			
80	35:30			
90	42:05			
100	50:10			

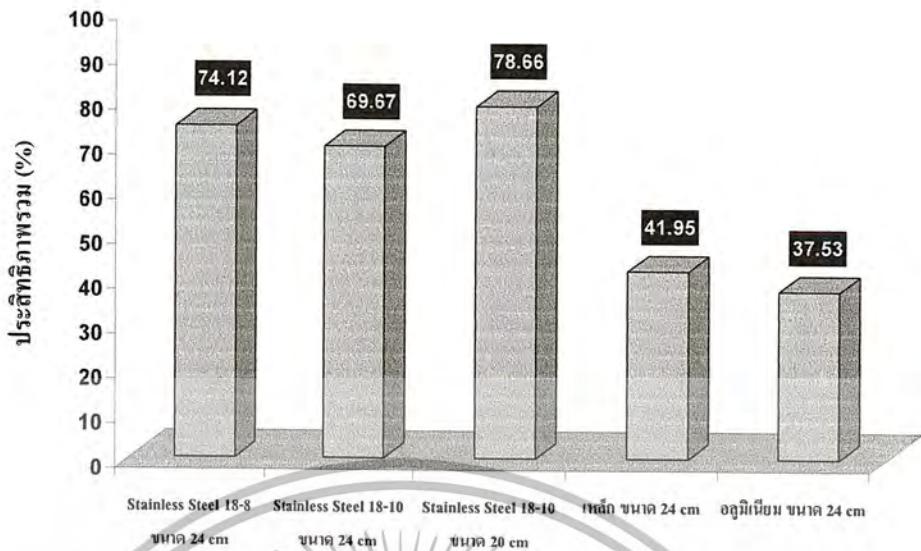


รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงประสิทธิภาพร่วมกับภาชนะชนิดต่างๆ

6.3.2.2 ภาชนะก้นโค้ง

สำหรับชนิดของภาชนะก้นโค้งที่จะนำมาทดสอบ มีทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้

1. ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.
2. ชนิดอลูมิเนียม ขนาด 36 cm.
3. ชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.

ดังแสดงได้ตามรูปที่ 6.15



(ก) ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.



(ข) ชนิดอลูมิเนียม ขนาด 36 cm.



(ค) ชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.

รูปที่ 6.15 ชนิดของภาชนะที่จะใช้ทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงาน

6.3.2.2.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ตารางที่ 6.17 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกึ่งโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.

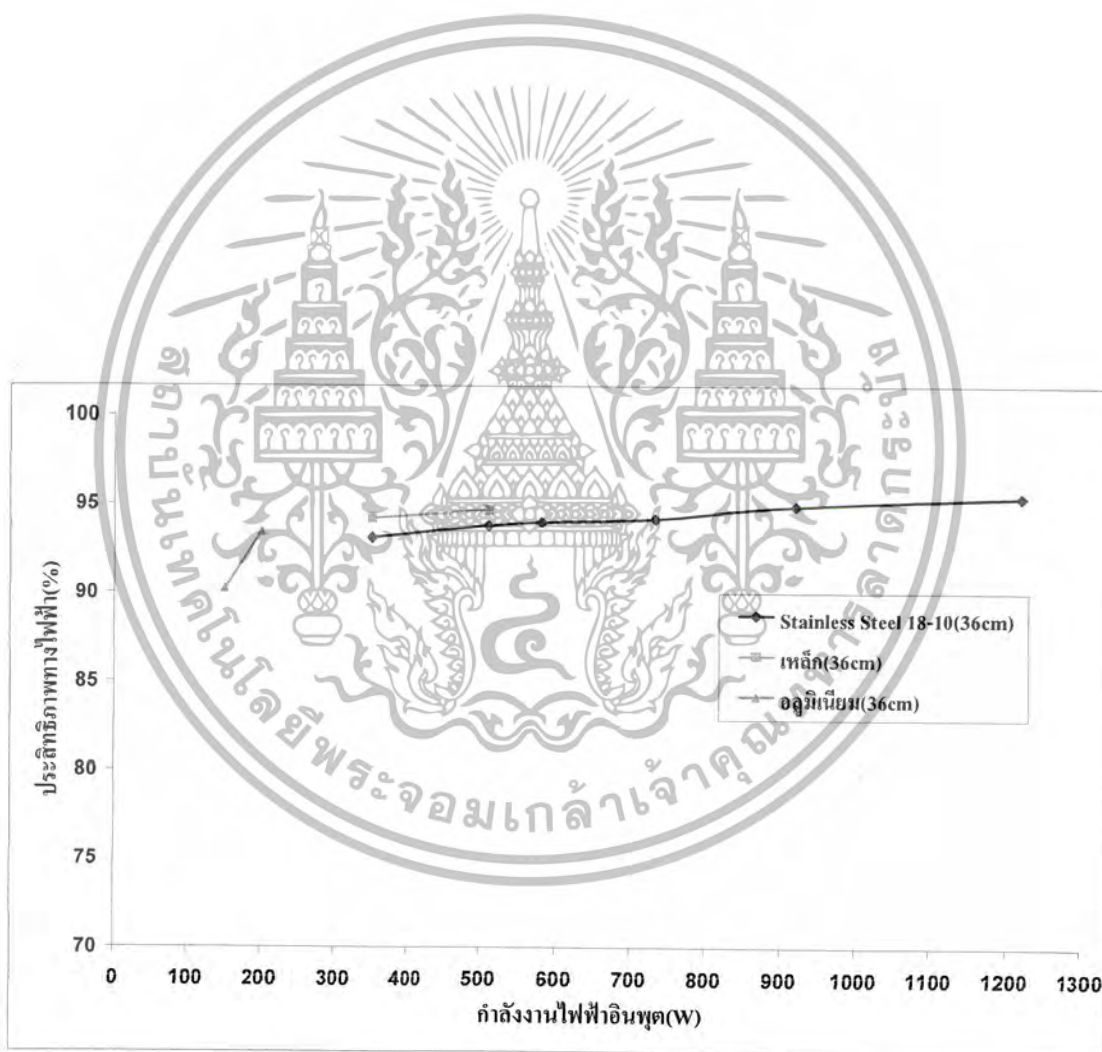
P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
350	1.62	220	0.99	1.11	3.65	325.85	93.1
510	2.23	220	0.99	1.03	3.11	478.38	93.8
732	3.17	220	0.99	1.02	2.68	689.544	94.2
920	4.1	220	0.99	1	2.45	873.08	94.9
1220	5.26	220	0.99	1.05	2.2	1163.88	95.4

ตารางที่ 6.18 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกึ่งโค้งชนิดอลูมิเนียม ขนาด 36 cm.

P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
150	0.72	220	0.95	1.01	4.05	135.3	90.2
200	0.93	220	0.97	1.05	2.55	186.8	93.4

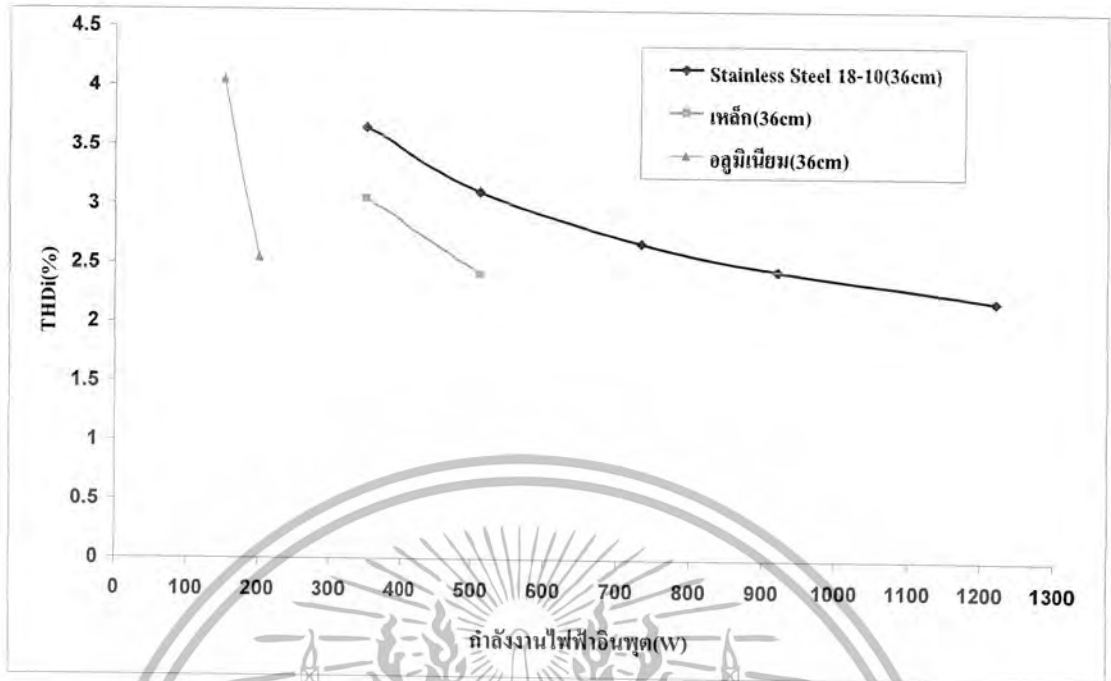
ตารางที่ 6.19 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้ของภาชนะกั้นโค้งชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.

P_{in} (W)	I_{in} (A)	V_{in} (V)	PF	THD _v (%)	THD _i (%)	P_{out} (W)	% η_{elec}
510	2.34	220	0.99	1.11	3.05	480.42	94.2
580	2.63	220	0.99	1.03	2.42	549.26	94.7



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้ากับกำลังงานอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง THDi กับกำลังงานอินพุต

ตามตารางผลการทดสอบที่ 6.17 และ 6.19 จะเห็นได้ว่า เมื่อภาชนะเป็น Stainless Steel 18-8 สามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าได้ในช่วงต่ำสุดอยู่ที่ 350 วัตต์ และสูงสุดที่ 1220 วัตต์ แต่เมื่อเป็นภาชนะชนิดเหล็กสามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าได้ในช่วงต่ำสุดที่ 510 วัตต์ และสูงสุดได้ที่ 580 วัตต์ ส่วนชนิดอลูมิเนียมสามารถควบคุมได้ในช่วงต่ำสุดที่ 150 วัตต์ และสูงสุดที่ 200 วัตต์ เท่านั้น

6.3.2.2 การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพโดยรวมและเวลาในการทำความร้อน ตารางที่ 6.20 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของภาชนะกึ่งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.

Temperature (°C)	Time (min:sec)	Pin (W)	Pout, total (W)	%(total)
30	0:00	1200	943.87	78.66
40	0:50			
50	1:00			
60	1:50			
70	2:10			
80	3:00			
90	3:50			
100	5:10			

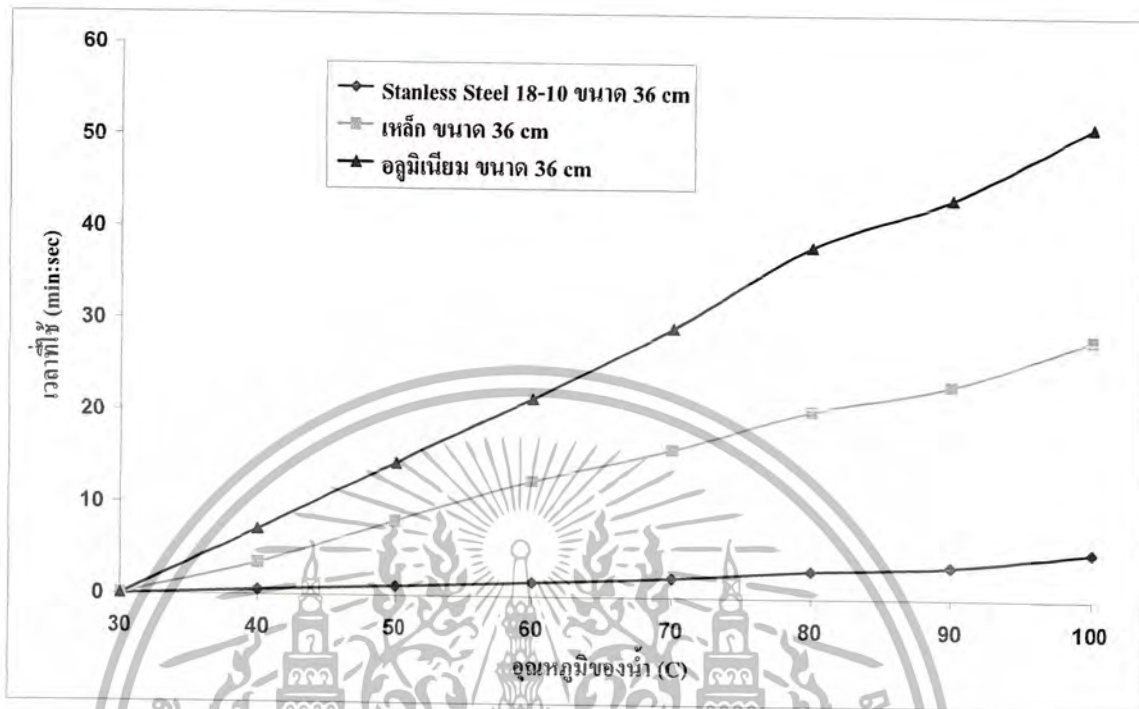
ตารางที่ 6.21 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของภาชนะกักไอ้จิ้งชนิดอูมิเนียม ขนาด 36 cm.

Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	%(total)
30	00:00	200	94.69	47.35
40	07:10			
50	14:35			
60	21:50			
70	29:22			
80	38:15			
90	43:40			
100	51:30			

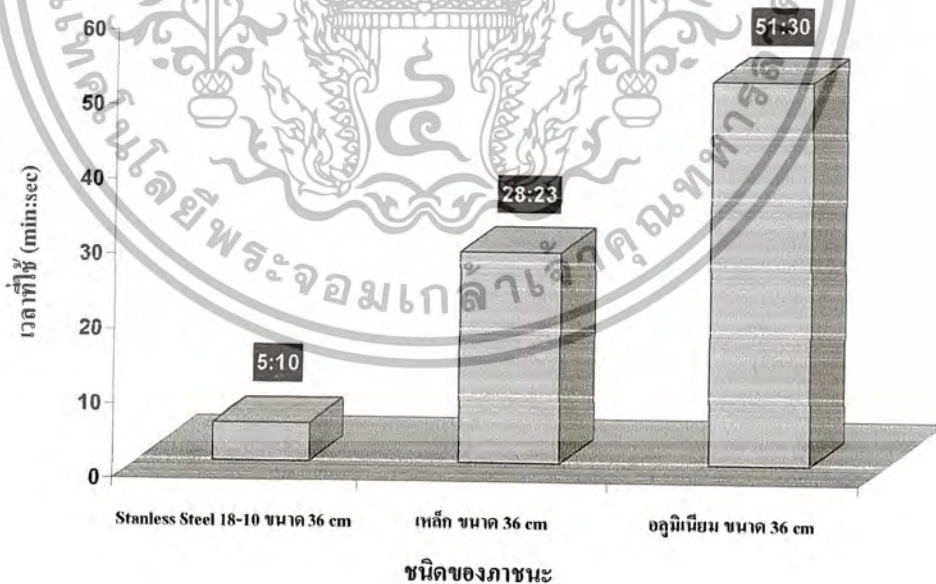
ตารางที่ 6.22 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของภาชนะกักไอ้จิ้งชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.

Temperature ((C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	%(total)
30	00:00	580	171.81	29.62
40	03:44			
50	08:05			
60	12:50			
70	16:01			
80	20:32			
90	23:11			
100	28:23			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

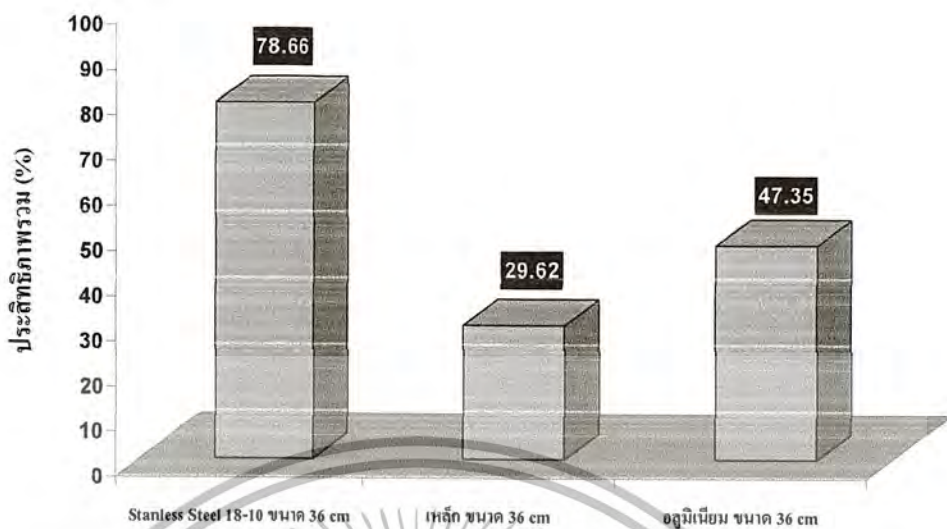


รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชนิดของภาชนะ
รูปที่ 6.20 กราฟแสดงประสิทธิภาพรวม

จากการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า เมื่อภาชนะเป็นชนิด Stainless Steel แบบ 18-8 หรือ 18-10 ที่มีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้หรือเล็กลง เต่าหุงต้มสามารถทำงานได้ โดยมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 90 - 95 % , ประสิทธิภาพรวม 70-80 % , ค่าตัวประกอบกำลัง 0.99 , ค่า THD; 2-4 % และเวลาที่ใช้ทำความร้อน 5-7 นาที แต่ถ้าเปลี่ยนชนิดภาชนะมาเป็น อลูมิเนียมและเหล็ก จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่นำมาทำภาชนะนั้นไม่เป็นวัสดุชนิดสารแม่เหล็ก จึงทำให้การเหนี่ยวนำเกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ก้นภาชนะลดน้อยลง หรือร้อนช้า ดังนั้นเต่าหุงต้มแบบนี้ภาชนะที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นชนิด Stainless Steel แบบต่างๆ

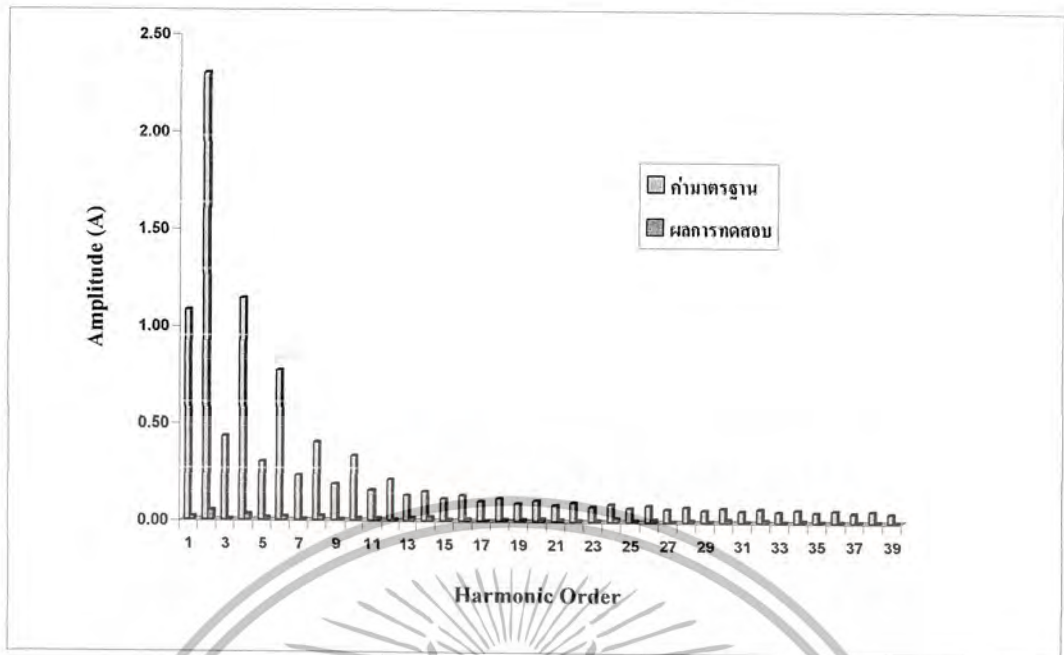
6.4 การเปรียบเทียบค่าที่ทดสอบได้กับค่ามาตรฐาน

เป็นการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตระหว่างค่ามาตรฐานกับค่ากระแสที่ทดสอบได้ เมื่อเปลี่ยนค่ากำลังงาน ชนิดและขนาดของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะไป

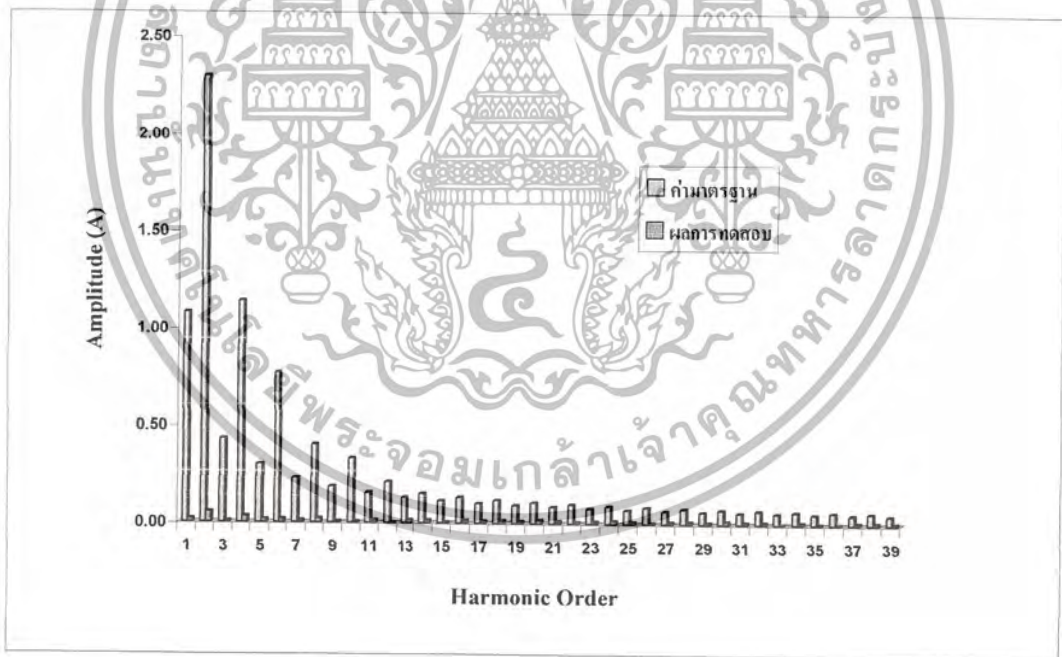
6.4.1 ภาชนะก้นแบน

จะทำการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุต เมื่อเปลี่ยนชนิดและขนาดของภาชนะไปด้วยกันทั้งหมด 3 ชนิด

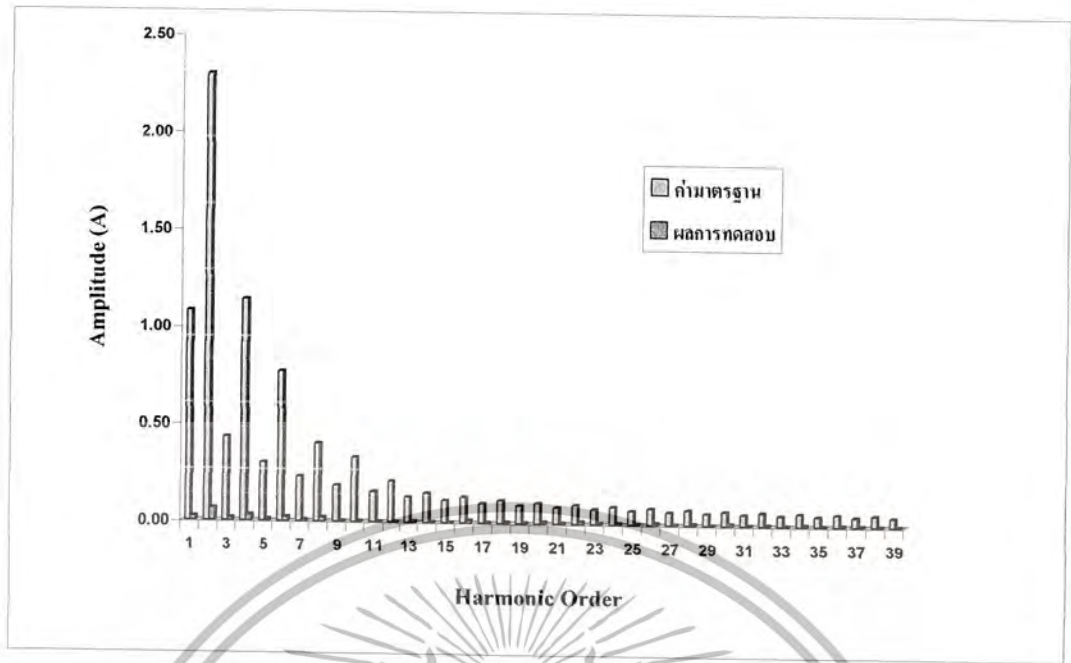
6.4.1.1 ขณะทำงานที่ 300 วัตต์



รูปที่ 6.21 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบน ชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.

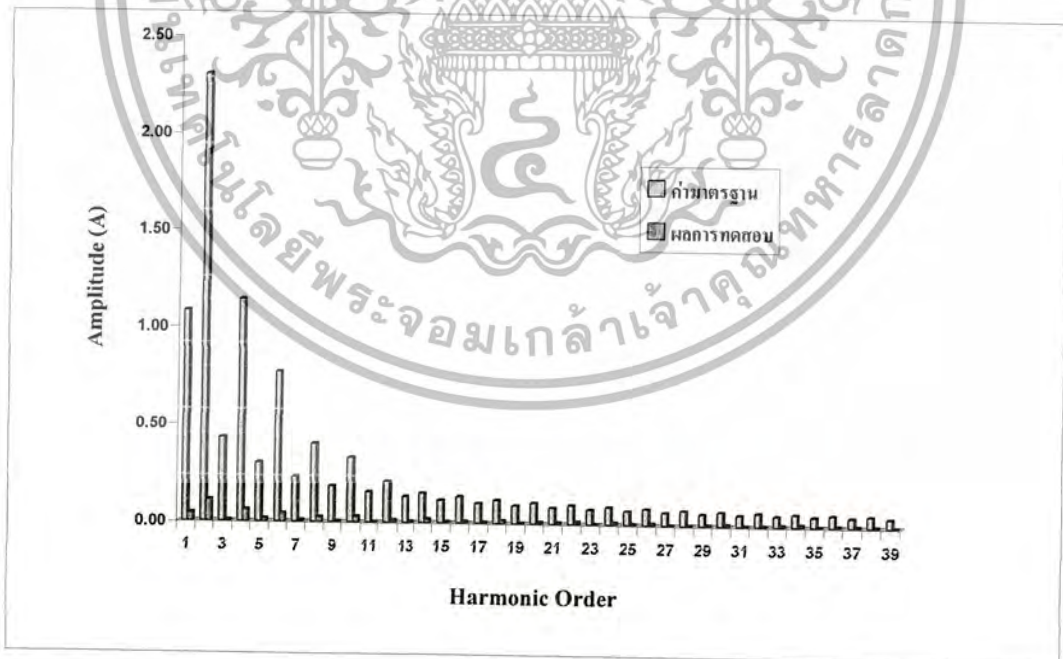


รูปที่ 6.22 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบน ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.



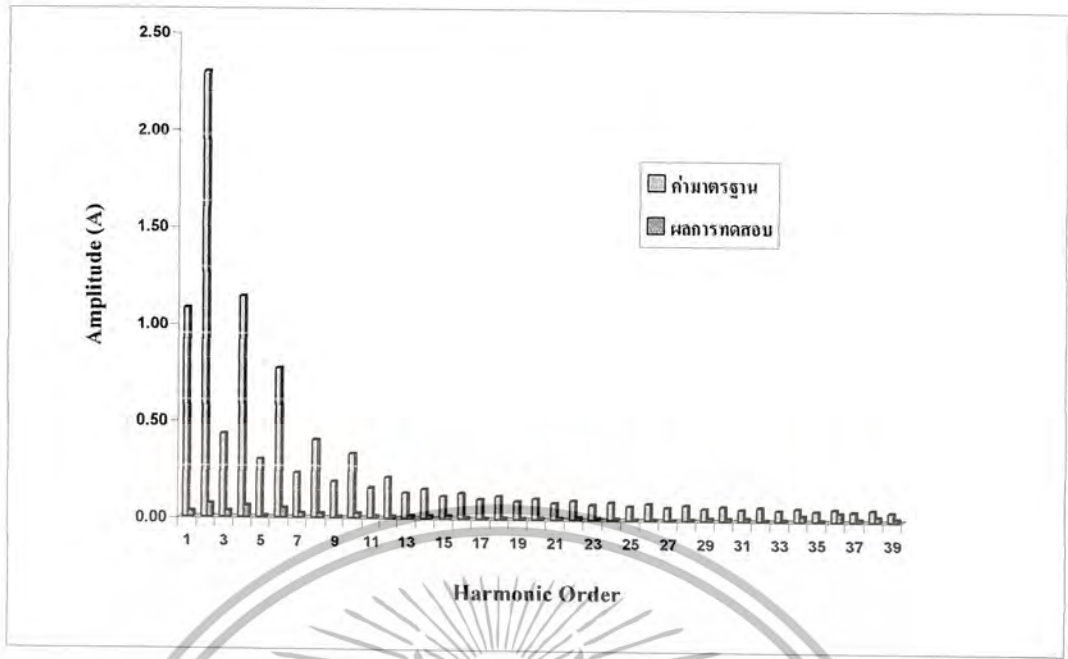
รูปที่ 6.25 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกของกระแสวิกฤตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.

6.4.1.2 ขณะทำงานที่ 600 วัตต์

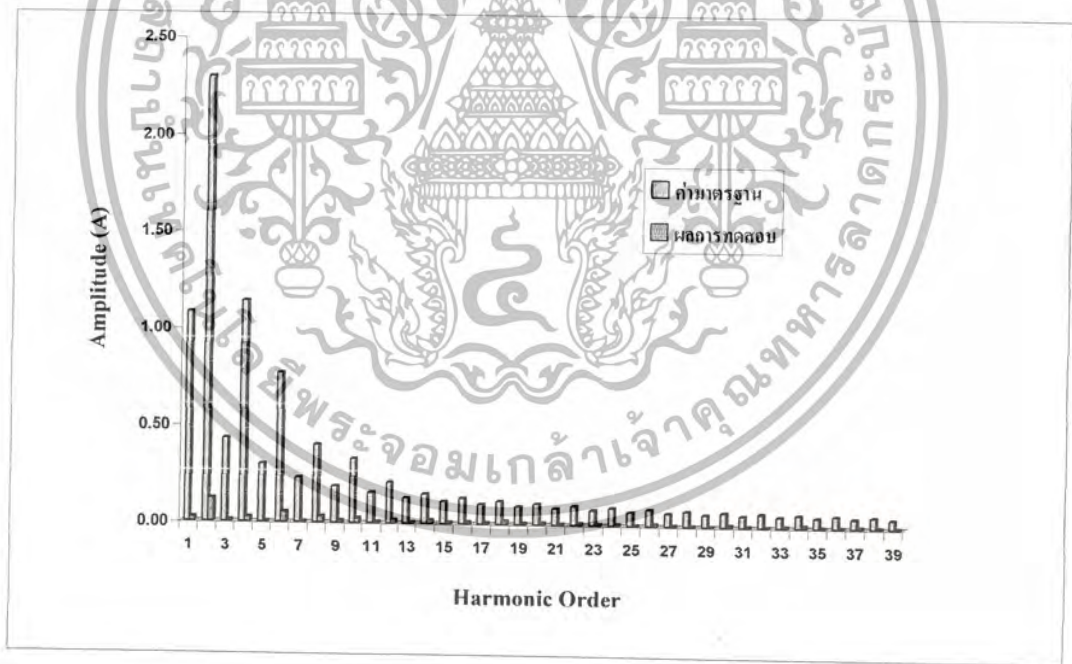


รูปที่ 6.26 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกของกระแสวิกฤตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะกั้นแบนชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



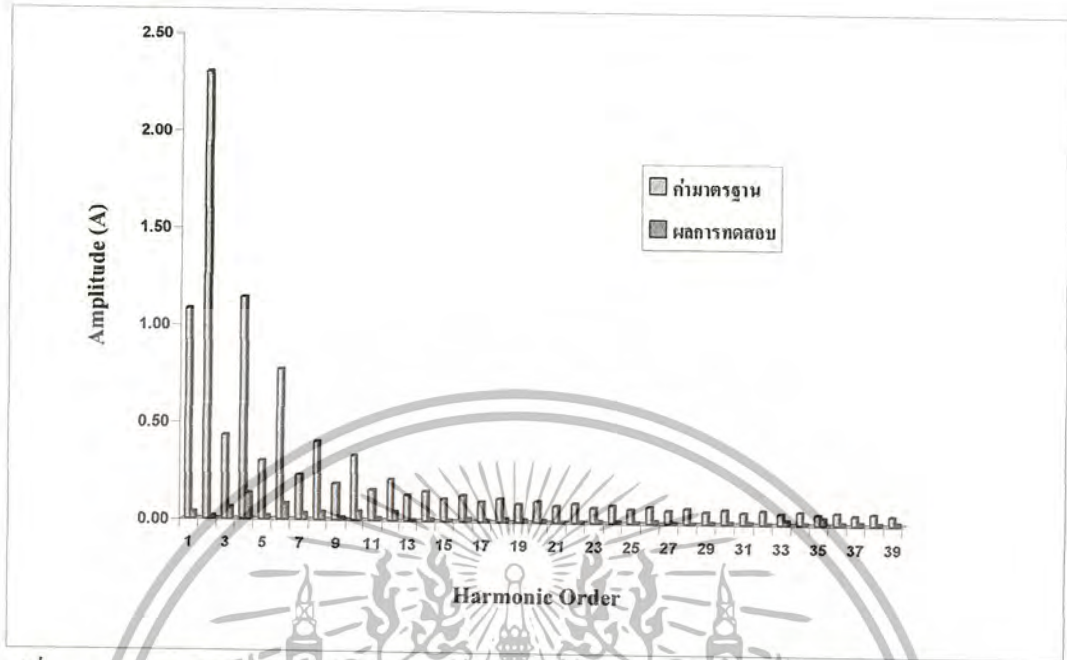
รูปที่ 6.25 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกของกระแสวิกฤตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบน ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.



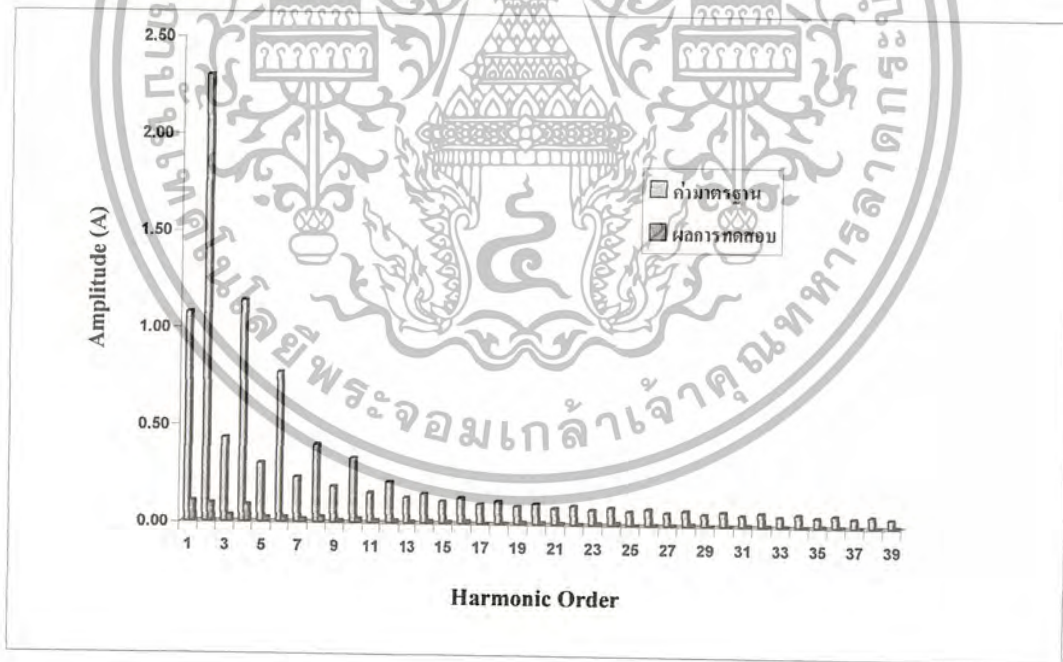
รูปที่ 6.26 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกของกระแสวิกฤตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบน ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.1.3 ขณะทำงานที่ 1200 วัตต์

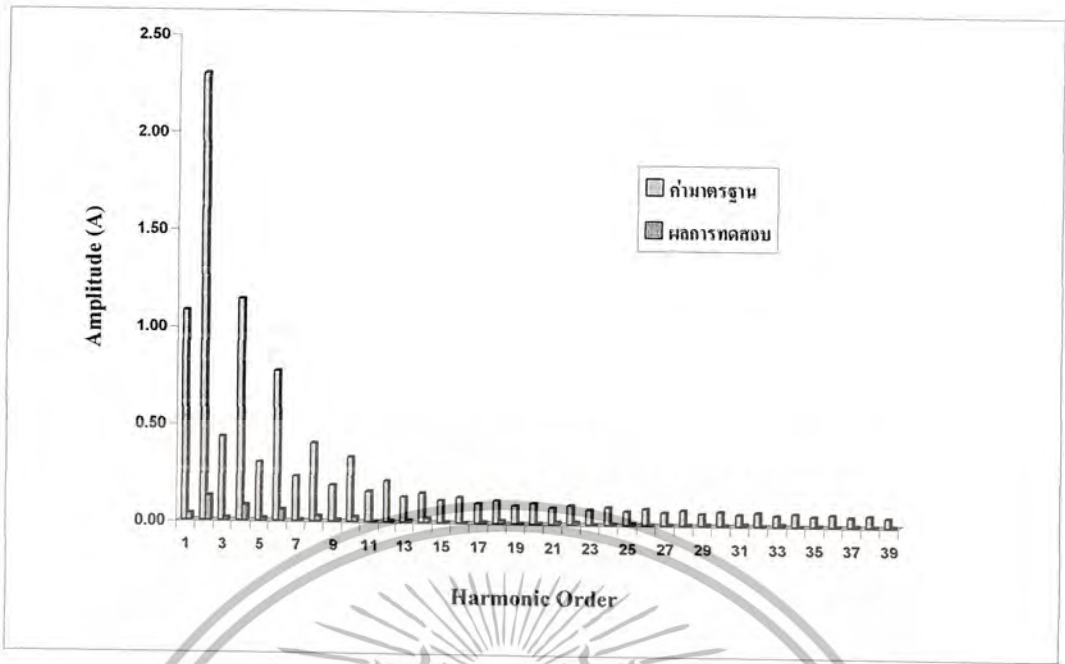


รูปที่ 6.27 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสน้ำมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบน ชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 24 cm.



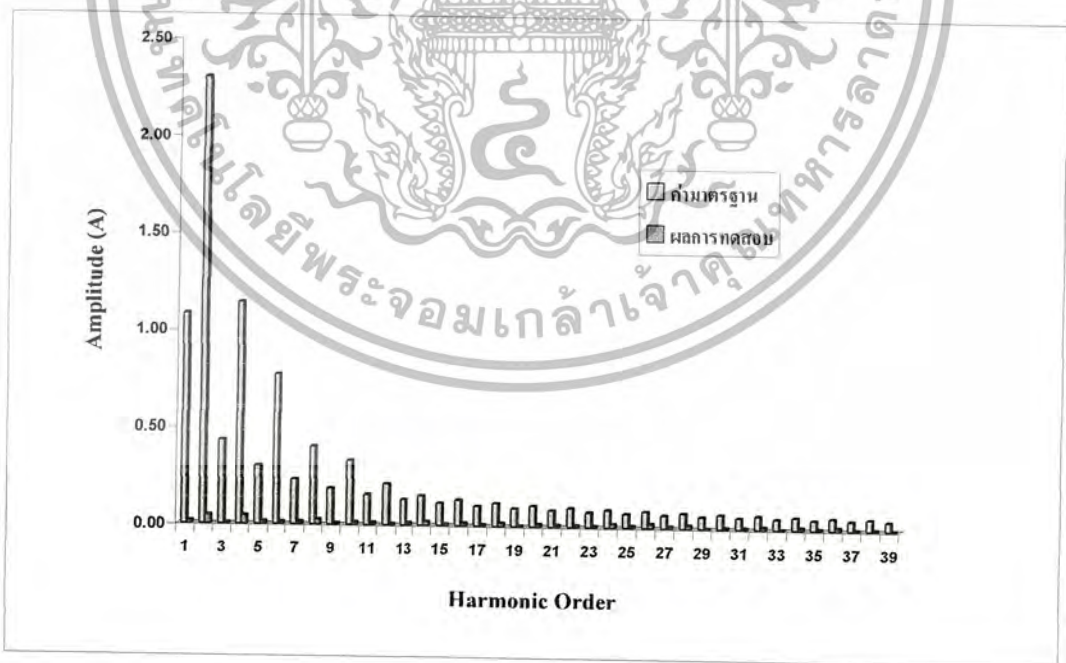
รูปที่ 6.28 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสน้ำมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบน ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



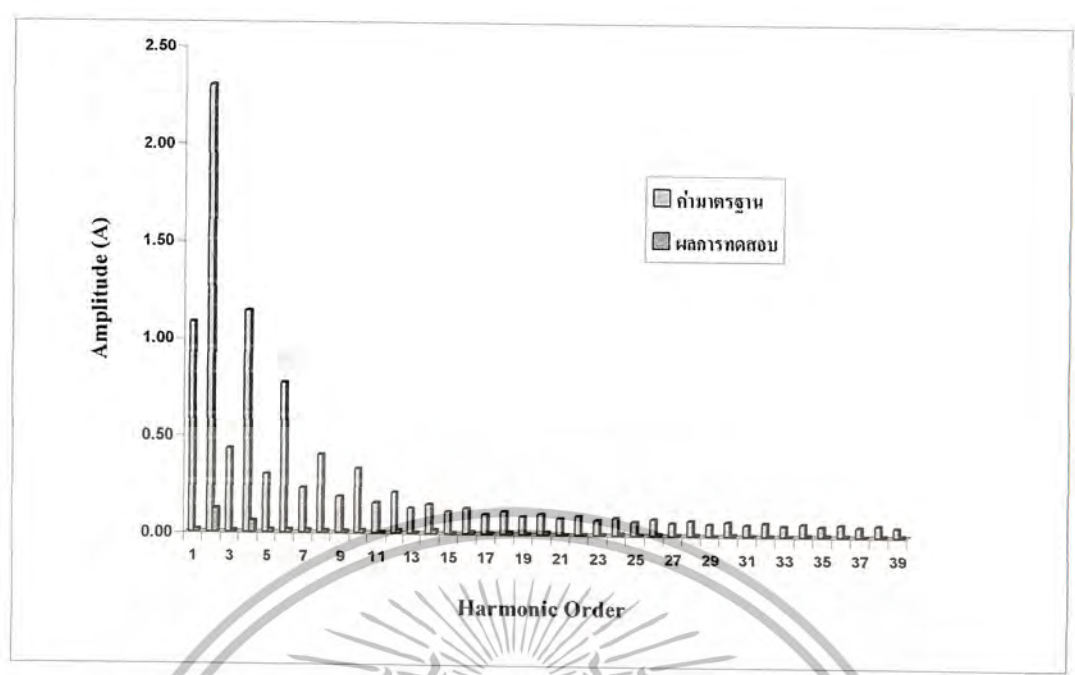
รูปที่ 6.29 ผลการเปรียบเทียบค่าอาร์มอนิกส์ของกระแสดิ้นทุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นแบนชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.

6.4.2 ภาชนะก้นโค้ง

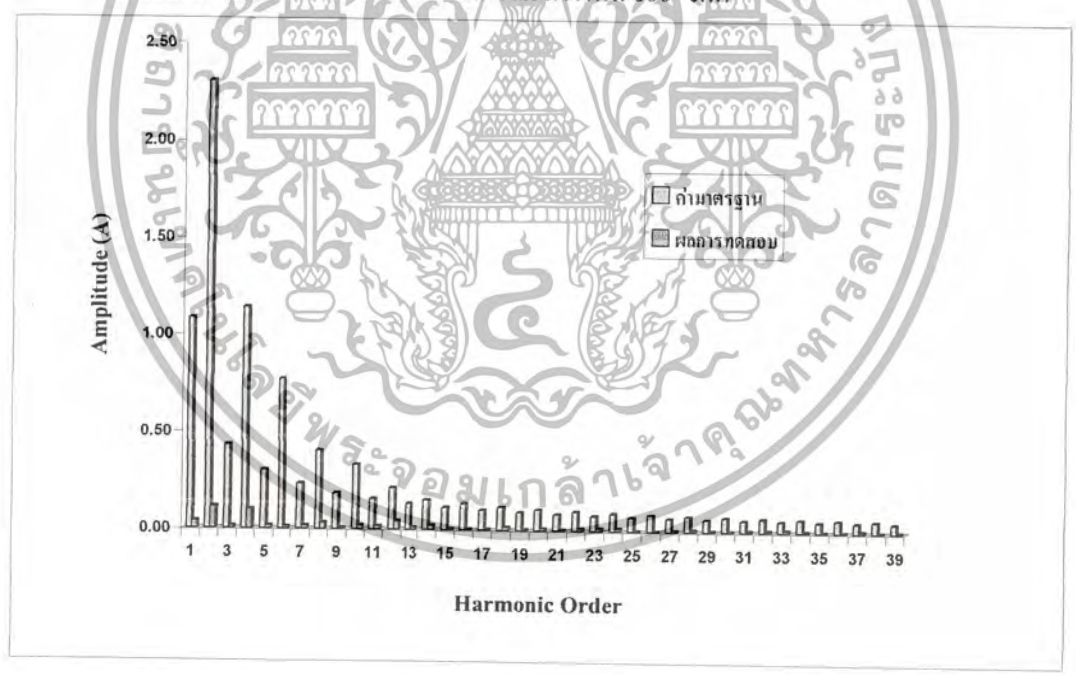


รูปที่ 6.30 ผลการเปรียบเทียบค่าอาร์มอนิกส์ของกระแสดิ้นทุตมาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm. ขณะทำงานที่ 300 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.31 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้ามาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm. ขณะทำงานที่ 600 วัตต์



รูปที่ 6.32 ผลการเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้ามาตรฐานกับการทดสอบของภาชนะก้นโค้งชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm. ขณะทำงานที่ 1200 วัตต์

ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ในทุกๆย่านการทำงานทั้งภาชนะที่เป็นวัสดุชนิด Stainless Steel 18-8 และ 18-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การเปรียบเทียบค่าของเตาเหนียวนำกับเตาประเภทอื่น

6.5.1 ภาชนะก้นแบน

อุปกรณ์ที่จะนำมาเปรียบเทียบจะเป็นเตาไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นผลิตภัณฑ์ของ KANDO รุ่น KOE-1500
2. กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1500 W
3. ปรับกำลังไฟฟ้า ได้ 6 ระดับ คือ 135 W, 220 W, 300W, 850 W , 1150 W และ 1500 W

ดังแสดงเตาไฟฟ้าดังกล่าวได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 6.33 เตาไฟฟ้าที่จะนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ

เงื่อนไขที่จะทดสอบ คือ เวลาในการทำความร้อน และประสิทธิภาพโดยรวม โดยรักษาระดับกำลังอินพุตเท่ากัน เนื่องจากเตาไฟฟ้านี้ไม่สามารถปรับระดับกำลังไฟฟ้าได้ให้เท่ากับ 1200 W ได้ ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด คือ 1150 W ดังนั้นจึงต้องปรับระดับกำลังไฟฟ้าของเตาหุงต้มเหนียวนำลงมาให้เท่ากัน และใช้น้ำในการต้มมีปริมาณเท่ากับ 1 ลิตร โดยอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 30 °C ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 6.22 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด *Stainless Steel 18-8* ขนาด 24 cm.

เตาหุงต้มเหนียวน้ำ							
Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$			
30	0:00	1050	710.19	67.64			
40	0:34						
50	1:25						
60	2:09						
70	2:58						
80	3:52						
90	4:42						
100	6:52						
เตาไฟฟ้า							
30	0:00				1050	555.28	52.88
40	1:30						
50	2:30						
60	3:40						
70	4:37						
80	5:49						
90	7:07						
100	9:02						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.23 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด 24 cm.

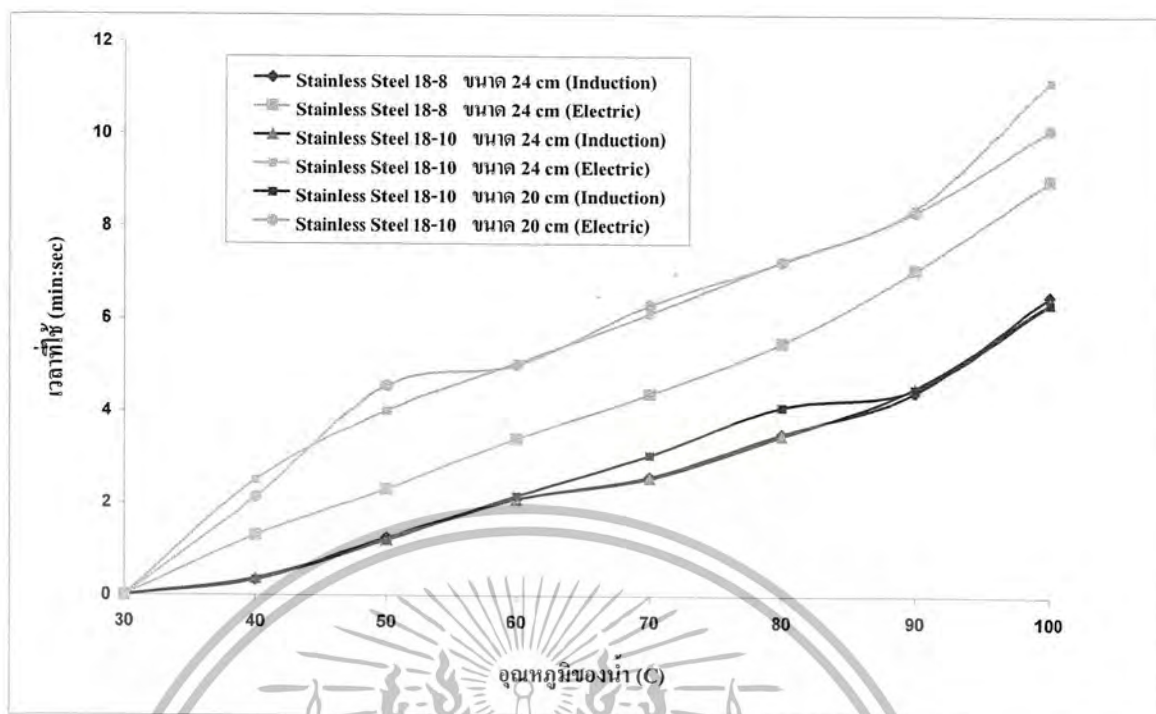
เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ							
Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$			
30	0:00	1050	737.03	70.20			
40	0:37						
50	1:20						
60	2:09						
70	2:55						
80	3:47						
90	4:52						
100	6:37						
เตาไฟฟ้า							
30	0:00				1050	432.84	41.22
40	2:50						
50	4:00						
60	5:04						
70	6:12						
80	7:26						
90	8:40						
100	11:16						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

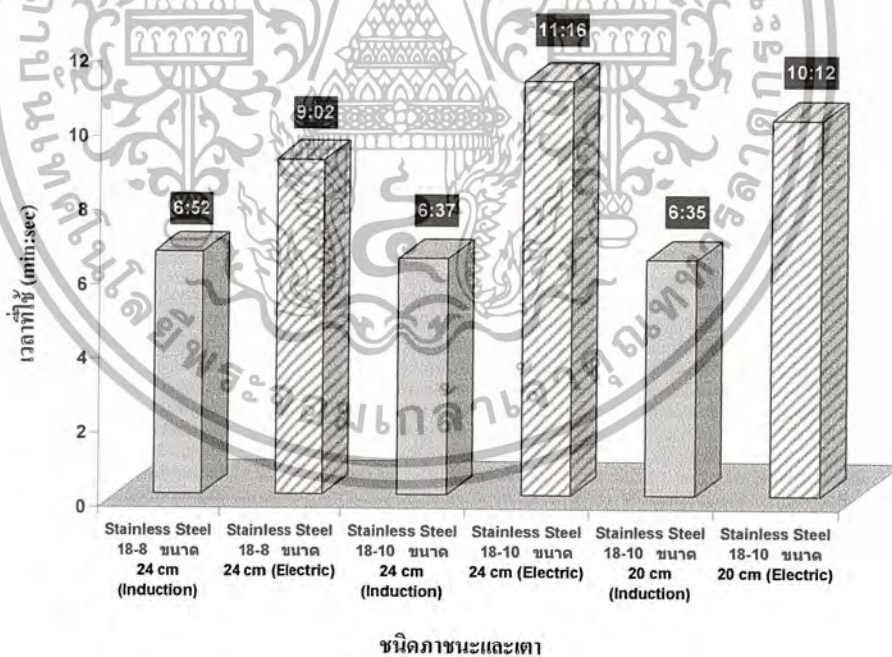
ตารางที่ 6.24 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด 20 cm.

เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ							
Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$			
30	0:00	1050	740.76	70.75			
40	0:34						
50	1:20						
60	2:16						
70	3:05						
80	4:10						
90	4:49						
100	6:35						
เตาไฟฟ้า							
30	0:00				1050	471.27	44.88
40	2:13						
50	4:55						
60	5:01						
70	6:30						
80	7:25						
90	8:33						
100	10:12						

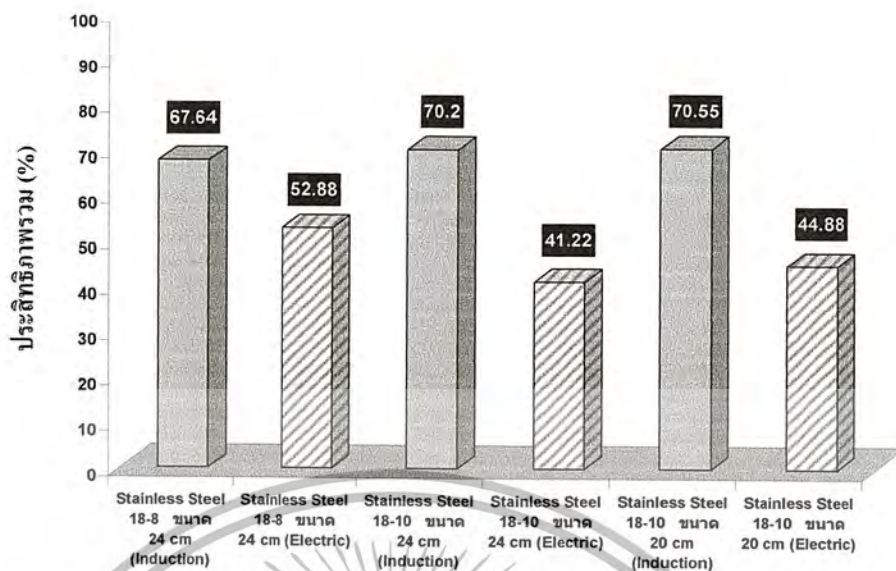
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นของเตาทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 6.35 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100 °C



ชนิดภาชนะและเตา
รูปที่ 6.36 กราฟแสดงประสิทธิภาพโดยรวม

6.5.2 ภาชนะก้นโค้ง

อุปกรณ์ที่จะนำมาเปรียบเทียบจะเป็นกระทะไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท International Group
2. 1000 W 220 V /50Hz
3. ปรับระดับความร้อนแบบต่อเนื่อง

ดังแสดงกระทะไฟฟ้าดังกล่าวได้ดังรูปที่ 5.14

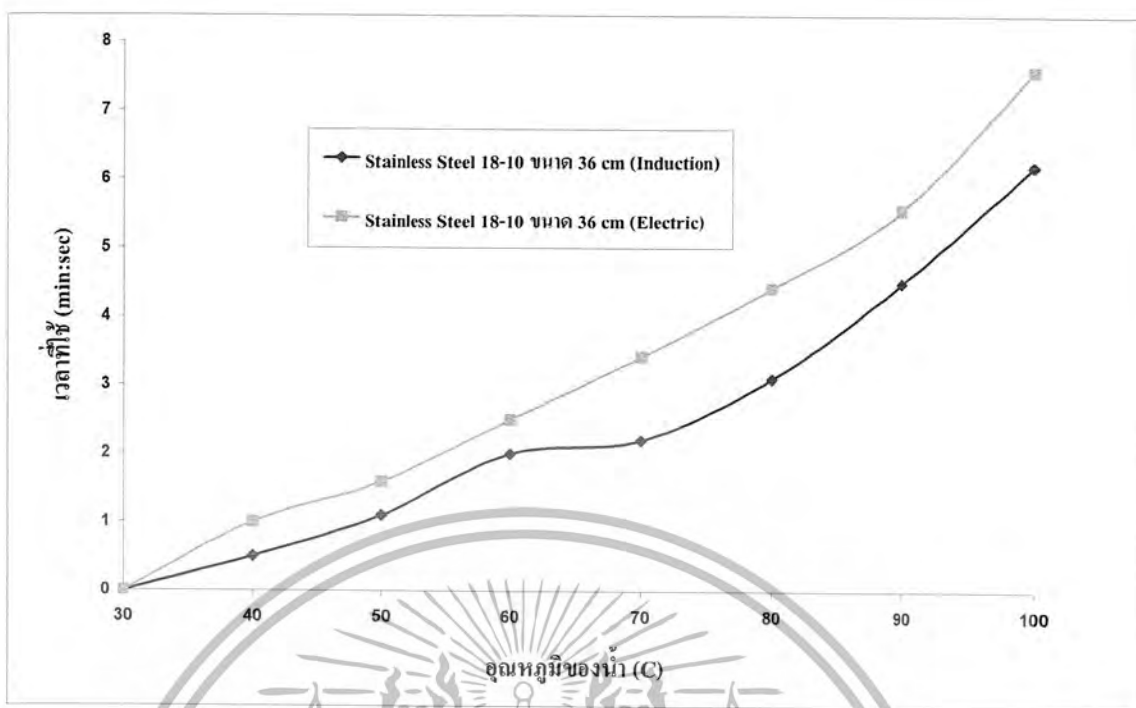


รูปที่ 6.37 เต้าไฟฟ้าที่จะนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ

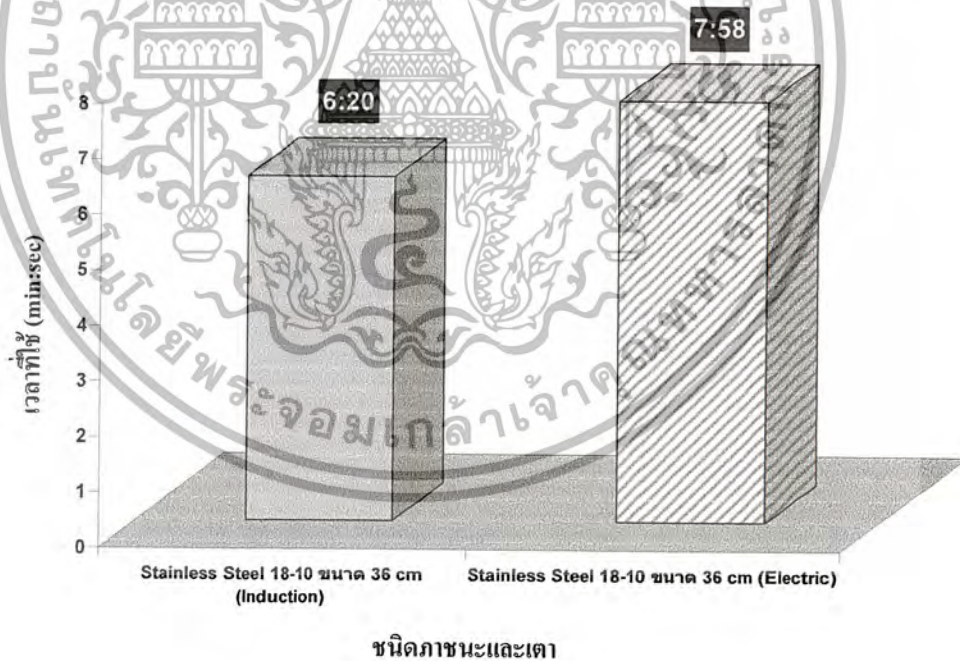
ตารางที่ 6.25 ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาทั้ง 2 ชนิดเมื่อภาชนะเป็นชนิด *Stainless Steel 18-10* ขนาด *36 cm*.

เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ				
Temperature (°C)	Time (min:sec)	P_{in} (W)	$P_{out,total}$ (W)	$\% \eta_{total}$
30	0:00			
40	0:50			
50	1:10			
60	2:00	960	770	80.21
70	2:20			
80	3:10			
90	4:50			
100	6:20			
เตาไฟฟ้า				
30	0:00			
40	1:00			
50	1:59			
60	2:50	960	612.13	63.76
70	3:42			
80	4:42			
90	5:56			
100	7:58			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

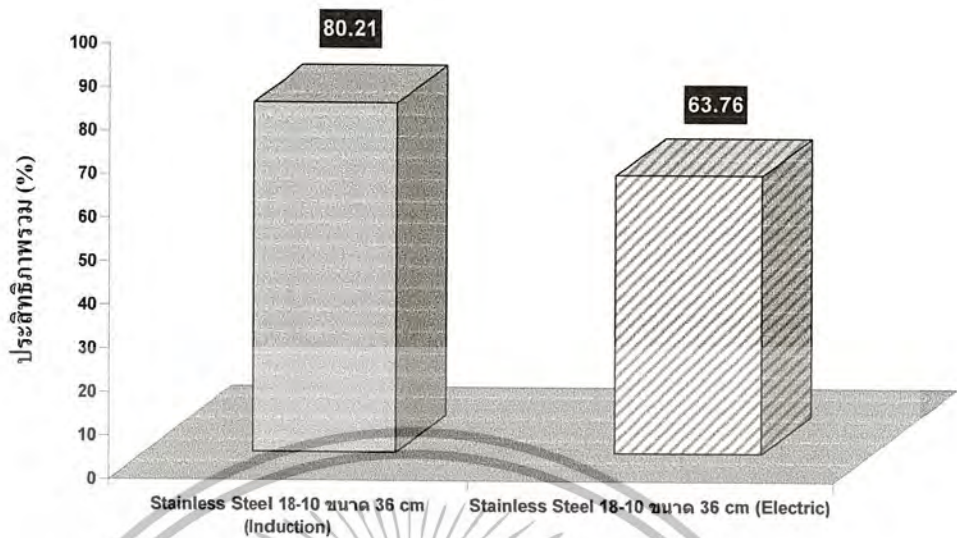


รูปที่ 6.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นของเตาทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 6.39 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชนิดภาชนะและเตา

รูปที่ 6.40 กราฟแสดงประสิทธิภาพโดยรวม

ผลการทดสอบที่ได้จะเห็นได้ว่า เตาหุงต้มเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูง และให้ความร้อนได้เร็วกว่าเตาหุงต้มไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากเตาหุงต้มไฟฟ้าจะให้ความร้อนแบบทางอ้อม ซึ่งจะมีการสูญเสียมากทำให้ส่งถ่ายความร้อนได้ช้ากว่าเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ

บทที่ 7

วิจารณ์และสรุปผลเตาหุงต้มเหนียวน้ำ

ในโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเตาหุงต้มเหนียวน้ำโดยมีแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเตาเหนียวน้ำจากการไฟฟ้า 220 V ความร้อนด้วยวิธีการเหนียวน้ำความถี่สูง โดยทำงานที่ความถี่ 30-40 kHz. และมีความถี่สวิตซ์ที่ความถี่โซแนนซ์เท่ากับ 30 kHz. ขนาดพิกัด 1.2 กิโลวัตต์ โดยที่เตาหุงต้มเหนียวน้ำนั้นจะถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้กับภาชนะก้นโค้งและก้นแบน โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนควบคุมการทำงานทั้งหมด การให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำนี้ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง โดยอาศัยการสั่นไหวในภาชนะหุงต้ม ทำให้อาหารร้อนหรือเดือดในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะมีหลักการพิจารณาเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า

หลักการให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำ จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากภาชนะหุงต้มสู่อาหารภายในภาชนะ ซึ่งการให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำนี้จะต้องอาศัยปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า และทางความร้อนร่วมกัน ซึ่งมีสาเหตุสำคัญ 3 ประการด้วยกัน คือ การเหนียวน้ำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction), ปรากฏการณ์ที่ผิวของภาชนะ (Skin dept effect), และการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) การให้ความร้อนของเตาไฟฟ้าเหนียวน้ำ โดยอาศัยการเหนียวน้ำของขดลวดเหนียวน้ำด้วยกระแสและแรงดันที่ความถี่สูงจ่ายให้กับขดลวดเหนียวน้ำ เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวนในหม้อหรือกระทะ ทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณก้นหม้อหรือกระทะ ในโครงการนี้จะใช้วงจร Half-Bridge series resonant converter โดยอาศัยการควบคุมความถี่ (Frequency Control Based Power Control) ให้กับขดลวดเหนียวน้ำ

การควบคุมด้วยความถี่สูงนั้น จะสามารถลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้ และต้องการกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งจะใช้ ไอบีเจที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT) เป็นสวิตช์และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนียวน้ำ ซึ่งการกำหนดสัญญาณของชุดควบคุมที่ใช้หลักการ PWM มาขับ IGBT โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและตัวควบคุม การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F458 เนื่องจากมีตัวกำเนิดสัญญาณ PWM, DETECTOR, Comparator และอื่นๆ ภายใน

ชุดอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมที่เหมาะสมกับเตาหุงต้มเหนียวน้ำจะเป็นอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ เนื่องจากสามารถรับแรงดันจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าได้โดยตรง โดยใช้ขดลวดเหนียวน้ำของเตาหุงต้มเพียงชั้นเดียว ระยะ Gap (ระยะห่างระหว่างภาชนะกับขดลวดเหนียวน้ำ) เท่ากับ 10 mm ในการเลือกใช้ขดลวดเหนียวน้ำแบบแบนและโค้งจะใช้รีเลย์เป็นตัวเลือกภาชนะว่าเป็นก้นแบนหรือโค้ง

สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้า จะเลือกใช้วิธีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย วงจรไม่ซับซ้อน ต่างจากวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุม Phase-Shift ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฮาล์ฟบริดจ์ได้เนื่องจากวงจรนี้มีสวิตช์เพียง 2 ตัว และมีเพียงกิ่งเดียว ต่างจากวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

จากการทดลองเตาหุงต้มเหนียวนำด้วยการปรับระยะ Gap ระหว่างภาชนะกับขดลวดเหนียวนำ พบว่าการปรับระยะ Gap เท่ากับ 11 mm จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ถ้า Gap มากขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟาลดลง และถ้า gap น้อยกว่า 11 mm จะทำความร้อนส่งผ่านมายังขดลวดและการเปลี่ยนภาชนะหุงต้ม

ภาชนะก้นแบน

สำหรับชนิดของภาชนะก้นแบนที่จะนำมาทดสอบ มีทั้งหมด 5 ชนิด ดังนี้

1. ชนิด Stainless Steel 18-8 ขนาด 11 cm.
2. ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 24 cm.
3. ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 20 cm.
4. ชนิดเหล็ก ขนาด 24 cm.
5. ชนิดอลูมิเนียม ขนาด 24 cm.

ภาชนะก้นโค้ง

สำหรับชนิดของภาชนะก้นโค้งที่จะนำมาทดสอบ มีทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้

1. ชนิด Stainless Steel 18-10 ขนาด 36 cm.
2. ชนิดอลูมิเนียม ขนาด 36 cm.
3. ชนิดเหล็ก ขนาด 36 cm.

การเปลี่ยนภาชนะก้นแบนที่เป็นสแตนเลสจะได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าถึง 95.9 % และประสิทธิภาพในการหุงต้ม 78 % ภาชนะก้นโค้งมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 95 % และประสิทธิภาพในการหุงต้มถึง 78 % โดยภาชนะทั้งสองแบบจะมีประสิทธิภาพมากกว่าภาชนะชนิดอื่น และจะต้มน้ำเดือดภายใน 5 นาที

จากการทดลองการปรับความถี่ ที่ความถี่รีโซแนนซ์ 30 kHz. จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อเพิ่มความถี่ กระแสจะล้าหลังแรงดัน และกำลังไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งจะใช้ในการปรับอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าเหนียวนำ แต่ถ้าความถี่ที่ 40 kHz. จะทำให้สัญญาณของกระแสไหลไม่เป็นคลื่นไซน์ และกระแสไหลจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

7.1 จุดเด่นของโครงการ

1. เตาหุงต้มเหนียวนำนี้จะให้ความร้อนกับภาชนะหุงต้มโดยตรงต่างจากเตาหรือกระทะไฟฟ้าตามท้องตลาดที่ให้ความร้อนทางอ้อม และมีประสิทธิภาพในการหุงต้มดีกว่า การดูแลรักษาง่าย
2. เตาหุงต้มเหนียวนำจะใช้ได้ดีกับภาชนะที่เป็นสาร Ferro magnetic เนื่องจากมีสภาพความต้านทาน(resistivity) ρ และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability) μ_r สูง ทำให้ขดลวดเหนียวนำพร้อมภาชนะหุงต้มสามารถรับแรงดันที่มีการป้อนตรงจากแหล่งกำเนิดการไฟฟ้า 220 V ผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อใช้งานเสร็จแล้วจะเตาไม่ร้อน จะร้อนเพียงเพียงบริเวณที่วางภาชนะ จึงปลอดภัยต่อผู้ใช้
4. มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ต่ำมาก
5. ให้ความร้อนกับอาหารได้อย่างรวดเร็ว
6. สามารถใช้กับภาชนะทั้งกัน โกงและแบบได้
7. ประหยัดพลังงาน

7.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอในการปรับปรุง

8. ภาชนะที่ใช้กับเตาหุงต้มเหนียวน่าจะดีที่สุดคือ สแตนเลส ถ้าเป็นภาชนะชนิดอื่น เช่น อลูมิเนียม เหล็ก จะมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) และความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะน้อยเมื่อเทียบกับสแตนเลส
9. การให้ความร้อนของภาชนะกัน โกงไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับภาชนะกันแบบ เนื่องจากแผ่นเมคคะไลต์ที่ใช้ทำฉนวนรองภาชนะกัน โกงมีระยะ Gap ไม่เท่ากัน และถ้าภาชนะกัน โกงที่ไม่มีอาหารมาใช้กับเตา จะทำให้แผ่นฉนวนนี้ไหม้ได้ วิธีการแก้ไขโดยเปลี่ยนไปใช้ฉนวนที่เป็นเซรามิก หรือดินเผาซึ่งจะทำให้ระยะ Gap เท่ากันโดยรอบของภาชนะและทนต่อความร้อนได้ดี แต่มีราคาแพงและมีน้ำหนักมาก
10. ขดลวดเหนียวนำภาชนะกัน โกงที่เท่ากับขดลวดเหนียวนำภาชนะกันแบบลวดเบอร์ 28 ตีเกลียว จำนวน 8 เส้น 43 รอบจะให้ความร้อนไม่ทั่วถึง จึงมีการเปลี่ยนขดลวดเหนียวนำกัน โกงที่มีจำนวนลวดทองแดงมากขึ้นถึง 46 เส้นจำนวนรอบของขดลวดเท่าเดิม และได้ค่าความนำไฟฟ้าเท่าเดิม คือ 250 μH จะให้ความร้อนได้อย่างทั่วถึงแต่จะมีน้ำหนักมาก
11. การ Drive IGBTs ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458 อาจทำให้สัญญาณไม่คมพอ จึงต้องใช้ อุปกรณ์อย่างอื่นช่วยในการขับ Gate IGBT อีกทีหนึ่ง ทำให้การทำงานที่ความถี่สูงทำงานได้ดีขึ้น แต่ต้องแยกแหล่งจ่ายแรงดันวงจรขับในแต่ละชุด IGBT Gate Driver ออกจากกันเป็นอิสระ เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างกัน ซึ่งอาจทำให้จังหวะในการขับ Gate IGBT ผิดพลาดได้

7.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

12. สามารถจัดทำเตาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูง ที่ประหยัดพลังงาน และมีประสิทธิภาพสูง เหมาะที่จะนำไปใช้ในครัวเรือนเพราะมีความปลอดภัยสูง
13. เตาหุงต้มเหนียวนำนี้ประหยัดพลังงานมากกว่าเตาไฟฟ้าประเภทอื่น และเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้ใช้
14. สามารถทำให้เข้าใจทฤษฎีและระบบการทำงานต่างๆ ของเตา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ เช่น เตอบนเหนียวนำ เครื่องทำน้ำอุ่นเหนียวนำ เครื่องเคลือบผิวเหล็กเหนียวนำ และอื่นๆ เป็นต้น
15. สามารถนำมาพัฒนาเพื่อผลิตขายภายในประเทศเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีรบุทท หนูเหลือ, “เครื่องหลอมแบบเหนียวนำ”, วิทยุยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [2] นิธิ พิพัฒนรัตน์วงศ์, “เตาความร้อนเหนียวนำ”, วิทยุยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [3] สุเมธ ศิริสันติสัมฤทธิ์, “เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำ”, วิทยุยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
- [4] นฤชา ทวีพันธ์, “เตาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูงชนิดปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่พร้อมปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านอินพุท”, วิทยุยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [5] สิทธิโชค สันรัตน์, “การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่”, วิทยุยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [6] สมศักดิ์ รุ่งเรือง, “ชุดอินเวอร์เตอร์ (DC -AC) 1 เฟสแบบไบโพลาร์”, วิทยุยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28/40-Pin High-Performance, Enhanced Flash Microcontrollers with CAN

High-Performance RISC CPU:

- Linear program memory addressing up to 2 Mbytes
- Linear data memory addressing to 4 Kbytes
- Up to 10 MIPS operation
- DC – 40 MHz clock input
- 4 MHz-10 MHz oscillator/clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier

Peripheral Features:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupt pins
- Timer0 module: 8-bit/16-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1 module: 16-bit timer/counter
- Timer2 module: 8-bit timer/counter with 8-bit period register (time base for PWM)
- Timer3 module: 16-bit timer/counter
- Secondary oscillator clock option – Timer1/Timer3
- Capture/Compare/PWM (CCP) modules; CCP pins can be configured as:
 - Capture input: 16-bit, max resolution 6.25 ns
 - Compare: 16-bit, max resolution 100 ns (TCY)
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
Max. PWM freq. @: 8-bit resolution = 156 kHz
10-bit resolution = 39 kHz
- Enhanced CCP module which has all the features of the standard CCP module, but also has the following features for advanced motor control:
 - 1, 2 or 4 PWM outputs
 - Selectable PWM polarity
 - Programmable PWM dead time
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) with two modes of operation:
 - 3-wire SPI™ (Supports all 4 SPI modes)
 - I²C™ Master and Slave mode
- Addressable USART module:
 - Supports interrupt-on-address bit

Advanced Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with:
 - Conversion available during Sleep
 - Up to 8 channels available
- Analog Comparator module:
 - Programmable input and output multiplexing
- Comparator Voltage Reference module
- Programmable Low-Voltage Detection (LVD) module:
 - Supports interrupt-on-Low-Voltage Detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR)

CAN bus Module Features:

- Complies with ISO CAN Conformance Test
- Message bit rates up to 1 Mbps
- Conforms to CAN 2.0B Active Spec with:
 - 29-bit Identifier Fields
 - 8-byte message length
 - 3 Transmit Message Buffers with prioritization
 - 2 Receive Message Buffers
 - 6 full, 29-bit Acceptance Filters
 - Prioritization of Acceptance Filters
 - Multiple Receive Buffers for High Priority Messages to prevent loss due to overflow
 - Advanced Error Management Features

Special Microcontroller Features:

- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator
- Programmable code protection
- Power-saving Sleep mode
- Selectable oscillator options, including:
 - 4x Phase Lock Loop (PLL) of primary oscillator
 - Secondary Oscillator (32 kHz) clock input
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins

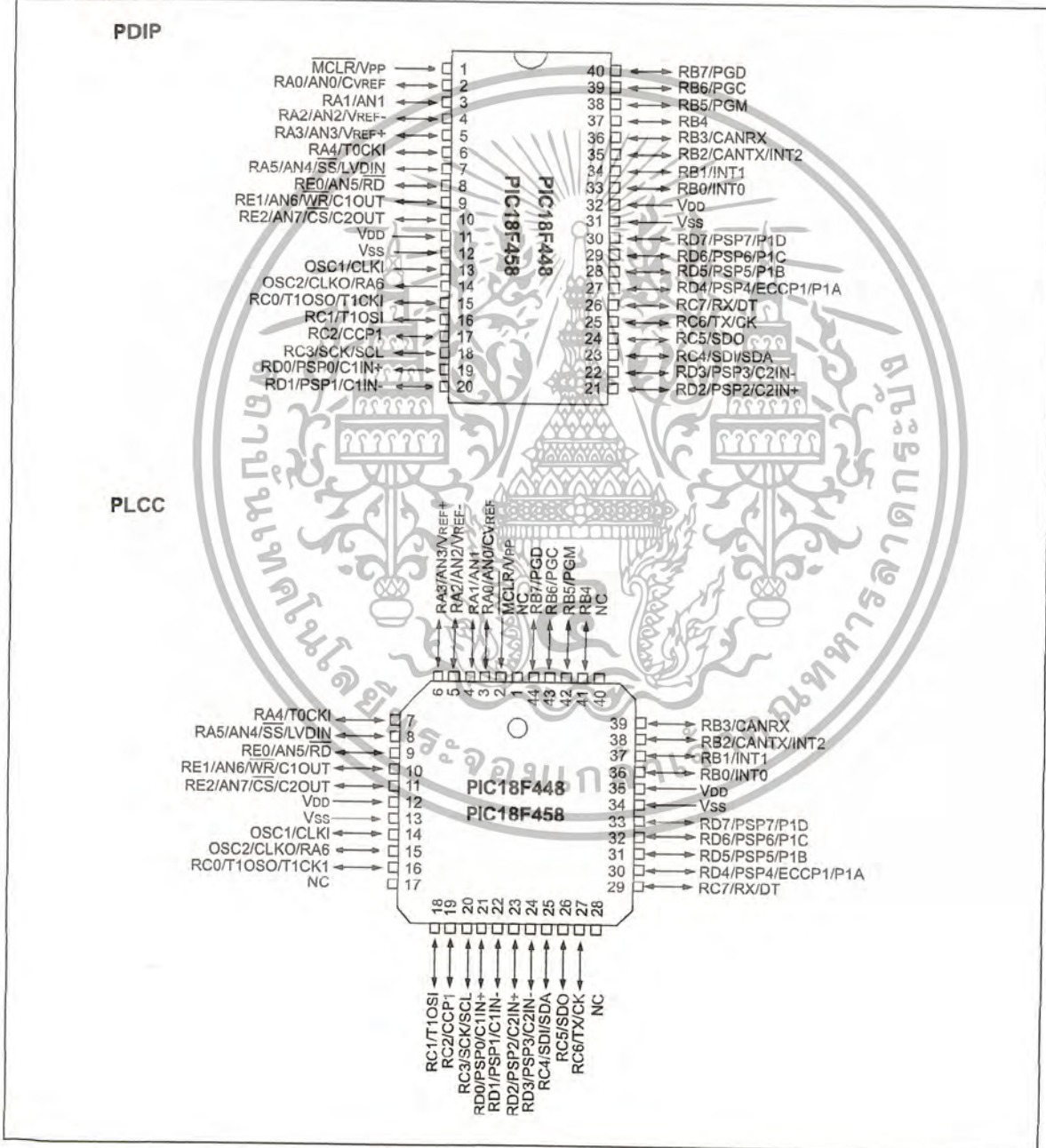
Flash Technology:

- Low-power, high-speed Enhanced Flash technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges

PIC18FXX8

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	Comparators	CCP/ ECCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI™	Master I ² C™		
PIC18F248	16K	8192	768	256	22	5	—	1/0	Y	Y	Y	1/3
PIC18F258	32K	16384	1536	256	22	5	—	1/0	Y	Y	Y	1/3
PIC18F448	16K	8192	768	256	33	8	2	1/1	Y	Y	Y	1/3
PIC18F458	32K	16384	1536	256	33	8	2	1/1	Y	Y	Y	1/3

Pin Diagrams

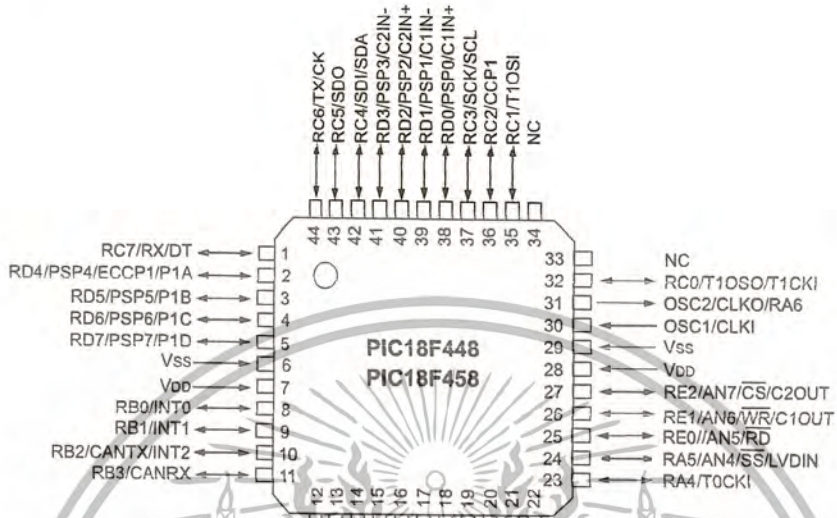


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

Pin Diagrams (Continued)

TQFP



SPDIP, SOIC



PIC18FXX8

1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device specific information for the following devices:

- PIC18F248
- PIC18F258
- PIC18F448
- PIC18F458

These devices are available in 28-pin, 40-pin and 44-pin packages. They are differentiated from each other in four ways:

1. PIC18FX58 devices have twice the Flash program memory and data RAM of PIC18FX48 devices (32 Kbytes and 1536 bytes vs. 16 Kbytes and 768 bytes, respectively).

2. PIC18F2X8 devices implement 5 A/D channels, as opposed to 8 for PIC18F4X8 devices.
3. PIC18F2X8 devices implement 3 I/O ports, while PIC18F4X8 devices implement 5.
4. Only PIC18F4X8 devices implement the Enhanced CCP module, analog comparators and the Parallel Slave Port.

All other features for devices in the PIC18FXX8 family, including the serial communications modules, are identical. These are summarized in Table 1-1.

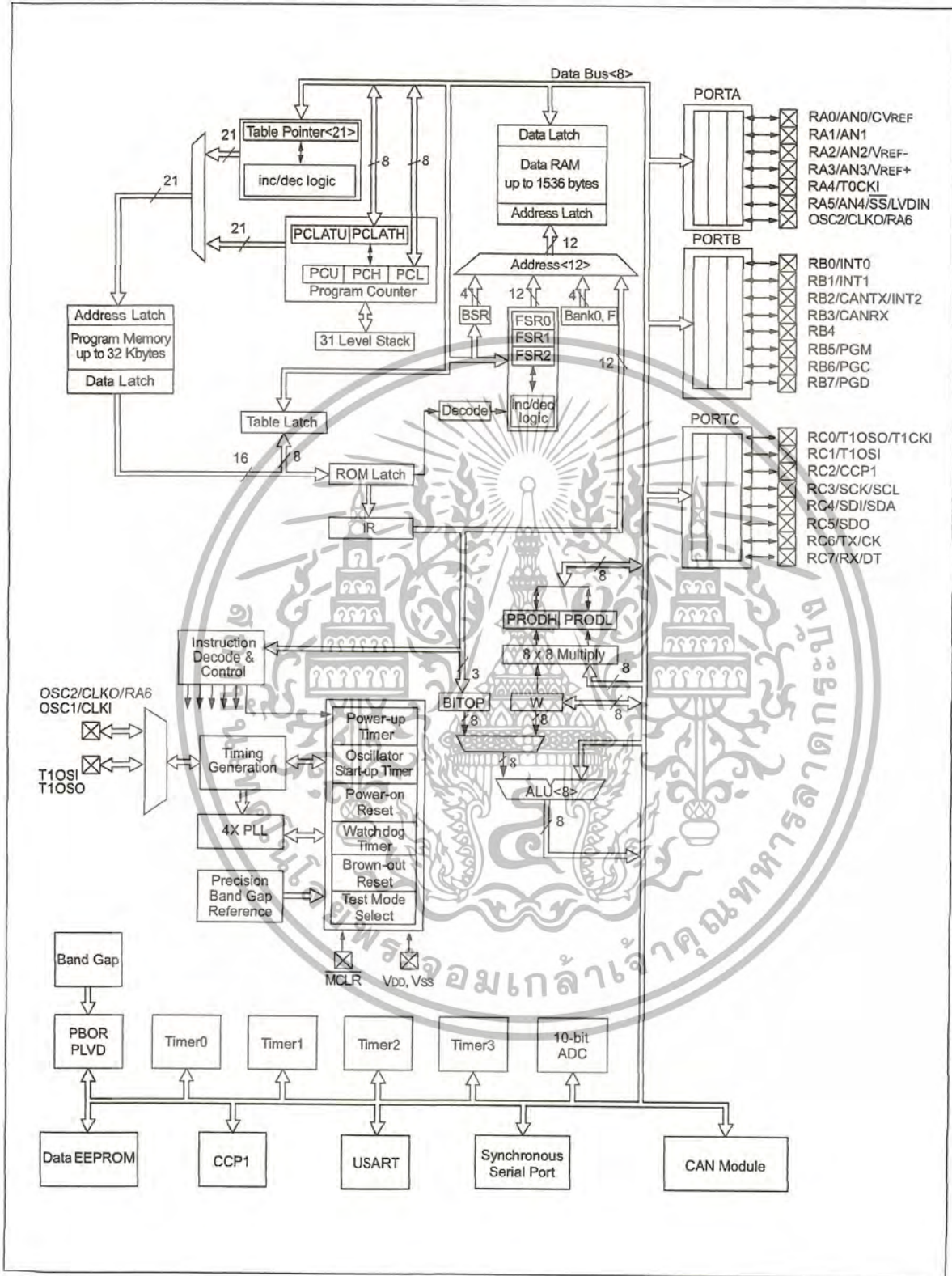
Block diagrams of the PIC18F2X8 and PIC18F4X8 devices are provided in Figure 1-1 and Figure 1-2, respectively. The pinouts for these device families are listed in Table 1-2.

TABLE 1-1: PIC18FXX8 DEVICE FEATURES

Features		PIC18F248	PIC18F258	PIC18F448	PIC18F458
Operating Frequency		DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz
Internal Program Memory	Bytes	16K	32K	16K	32K
	# of Single-Word Instructions	8192	16384	8192	16384
Data Memory (Bytes)		768	1536	768	1536
Data EEPROM Memory (Bytes)		256	256	256	256
Interrupt Sources		17	17	21	21
I/O Ports		Ports A, B, C	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers		4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules		1	1	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules		—	—	1	1
Serial Communications		MSSP, CAN, Addressable USART	MSSP, CAN, Addressable USART	MSSP, CAN, Addressable USART	MSSP, CAN, Addressable USART
Parallel Communications (PSP)		No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Converter		5 input channels	5 input channels	8 input channels	8 input channels
Analog Comparators		No	No	2	2
Analog Comparators VREF Output		N/A	N/A	Yes	Yes
Resets (and Delays)		POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)
Programmable Low-Voltage Detect		Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset		Yes	Yes	Yes	Yes
CAN Module		Yes	Yes	Yes	Yes
In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)		Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set		75 Instructions	75 Instructions	75 Instructions	75 Instructions
Packages		28-pin SPDIP 28-pin SOIC	28-pin SPDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP

PIC18FXX8

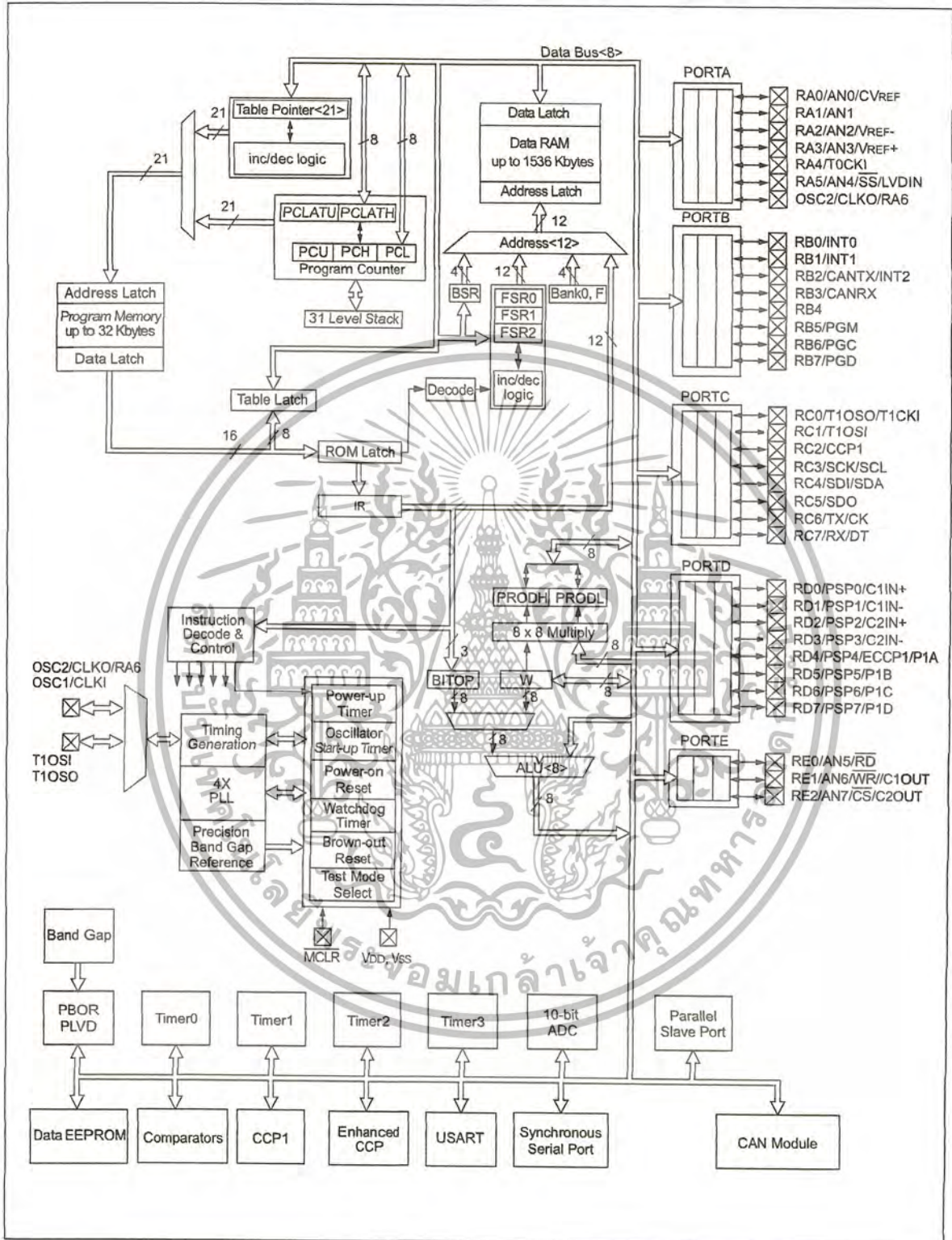
FIGURE 1-1: PIC18F248/258 BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

FIGURE 1-2: PIC18F448/458 BLOCK DIAGRAM



PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
MCLR/VPP MCLR VPP	1	1	18	2	I P	ST —	Master Clear (input) or programming voltage (output). Master Clear (Reset) input. This pin is an active low Reset to the device. Programming voltage input.
NC	—	—	12, 13, 33, 34	1, 17, 28, 40	—	—	These pins should be left unconnected.
OSC1/CLKI OSC1 CLKI	9	13	30	14	I I	CMOS/ST CMOS	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode; otherwise, CMOS. External clock source input. Always associated with pin function OSC1 (see OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins).
OSC2/CLKO/RA6 OSC2 CLKO RA6	10	14	31	15	O O I/O	— — TTL	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate. General purpose I/O pin.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels Analog = Analog input
 I = Input O = Output
 P = Power OD = Open-Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RA0/AN0/CVREF RA0 AN0 CVREF	2	2	19	3	I/O I O	TTL Analog Analog	PORTA is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 0. Comparator voltage reference output.
RA1/AN1 RA1 AN1	3	3	20	4	I/O I	TTL Analog	Digital I/O. Analog input 1.
RA2/AN2/VREF- RA2 AN2 VREF-	4	4	21	5	I/O I I	TTL Analog Analog	Digital I/O. Analog input 2. A/D reference voltage (Low) input.
RA3/AN3/VREF+ RA3 AN3 VREF+	5	5	22	6	I/O I I	TTL Analog Analog	Digital I/O. Analog input 3. A/D reference voltage (High) input.
RA4/T0CKI RA4 T0CKI	6	6	23	7	I/O I	TTL/OD ST	Digital I/O – open-drain when configured as output. Timer0 external clock input.
RA5/AN4/SS/LVDIN RA5 AN4 SS LVDIN	7	7	24	8	I/O I I I	TTL Analog ST Analog	Digital I/O. Analog input 4. SPI™ slave select input. Low-Voltage Detect input.
RA6							See the OSC2/CLKO/RA6 pin.

Legend: TTL = TTL compatible input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
 I = Input
 P = Power
 CMOS = CMOS compatible input or output
 Analog = Analog input
 O = Output
 OD = Open-Drain (no P diode to VDD)

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258		PIC18F448/458				
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RB0/INT0 RB0 INT0	21	33	8	36	I/O I	TTL ST	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O. External interrupt 0.
RB1/INT1 RB1 INT1	22	34	9	37	I/O I	TTL ST	Digital I/O. External interrupt 1.
RB2/CANTX/INT2 RB2 CANTX INT2	23	35	10	38	I/O O I	TTL TTL ST	Digital I/O. Transmit signal for CAN bus. External interrupt 2.
RB3/CANRX RB3 CANRX	24	36	11	39	I/O I	TTL TTL	Digital I/O. Receive signal for CAN bus.
RB4	25	37	14	41	I/O	TTL	Digital I/O. Interrupt-on-change pin.
RB5/PGM RB5 PGM	26	38	15	42	I/O I	TTL ST	Digital I/O. Interrupt-on-change pin. Low-voltage ICSP™ programming enable.
RB6/PGC RB6 PGC	27	39	16	43	I/O I	TTL ST	Digital I/O. In-Circuit Debugger pin. Interrupt-on-change pin. ICSP programming clock.
RB7/PGD RB7 PGD	28	40	17	44	I/O I/O	TTL ST	Digital I/O. In-Circuit Debugger pin. Interrupt-on-change pin. ICSP programming data.

Legend: TTL = TTL compatible input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
 I = Input
 P = Power
 CMOS = CMOS compatible input or output
 Analog = Analog input
 O = Output
 OD = Open-Drain (no P diode to VDD)

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	11	15	32	16	I/O O I	ST — ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1/Timer3 external clock input.
RC1/T1OSI RC1 T1OSI	12	16	35	18	I/O I	ST CMOS	Digital I/O. Timer1 oscillator input.
RC2/CCP1 RC2 CCP1	13	17	36	19	I/O I/O	ST ST	Digital I/O. Capture 1 input/Compare 1 output/PWM1 output.
RC3/SCK/SCL RC3 SCK SCL	14	18	37	20	I/O I/O I/O	ST ST ST	Digital I/O. Synchronous serial clock input/output for SPI™ mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C™ mode.
RC4/SDI/SDA RC4 SDI SDA	15	23	42	25	I/O I I/O	ST ST ST	Digital I/O. SPI data in. I ² C data I/O.
RC5/SDO RC5 SDO	16	24	43	26	I/O O	ST —	Digital I/O. SPI data out.
RC6/TX/CK RC6 TX CK	17	25	44	27	I/O O I/O	ST — ST	Digital I/O. USART asynchronous transmit. USART synchronous clock (see RX/DT).
RC7/RX/DT RC7 RX DT	18	26	1	29	I/O I I/O	ST ST ST	Digital I/O. USART asynchronous receive. USART synchronous data (see TX/CK).

Legend: TTL = TTL compatible input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
 I = Input
 P = Power
 CMOS = CMOS compatible input or output
 Analog = Analog input
 O = Output
 OD = Open-Drain (no P diode to VDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258		PIC18F448/458				
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RD0/PSP0/C1IN+ RD0 PSP0 C1IN+	—	19	38	21	I/O I/O I	ST TTL Analog	PORTD is a bidirectional I/O port. These pins have TTL input buffers when external memory is enabled. Digital I/O. Parallel Slave Port data. Comparator 1 input.
RD1/PSP1/C1IN- RD1 PSP1 C1IN-	—	20	39	22	I/O I/O I	ST TTL Analog	Digital I/O. Parallel Slave Port data. Comparator 1 input.
RD2/PSP2/C2IN+ RD2 PSP2 C2IN+	—	21	40	23	I/O I/O I	ST TTL Analog	Digital I/O. Parallel Slave Port data. Comparator 2 input.
RD3/PSP3/C2IN- RD3 PSP3 C2IN-	—	22	41	24	I/O I/O I	ST TTL Analog	Digital I/O. Parallel Slave Port data. Comparator 2 input.
RD4/PSP4/ECCP1/ P1A RD4 PSP4 ECCP1 P1A	—	27	2	30	I/O I/O I/O O	ST TTL ST —	Digital I/O. Parallel Slave Port data. ECCP1 capture/compare. ECCP1 PWM output A.
RD5/PSP5/P1B RD5 PSP5 P1B	—	28	3	31	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Parallel Slave Port data. ECCP1 PWM output B.
RD6/PSP6/P1C RD6 PSP6 P1C	—	29	4	32	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Parallel Slave Port data. ECCP1 PWM output C.
RD7/PSP7/P1D RD7 PSP7 P1D	—	30	5	33	I/O I/O O	ST TTL —	Digital I/O. Parallel Slave Port data. ECCP1 PWM output D.

Legend: TTL = TTL compatible input

ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels

I = Input

P = Power

CMOS = CMOS compatible input or output

Analog = Analog input

O = Output

OD = Open-Drain (no P diode to VDD)

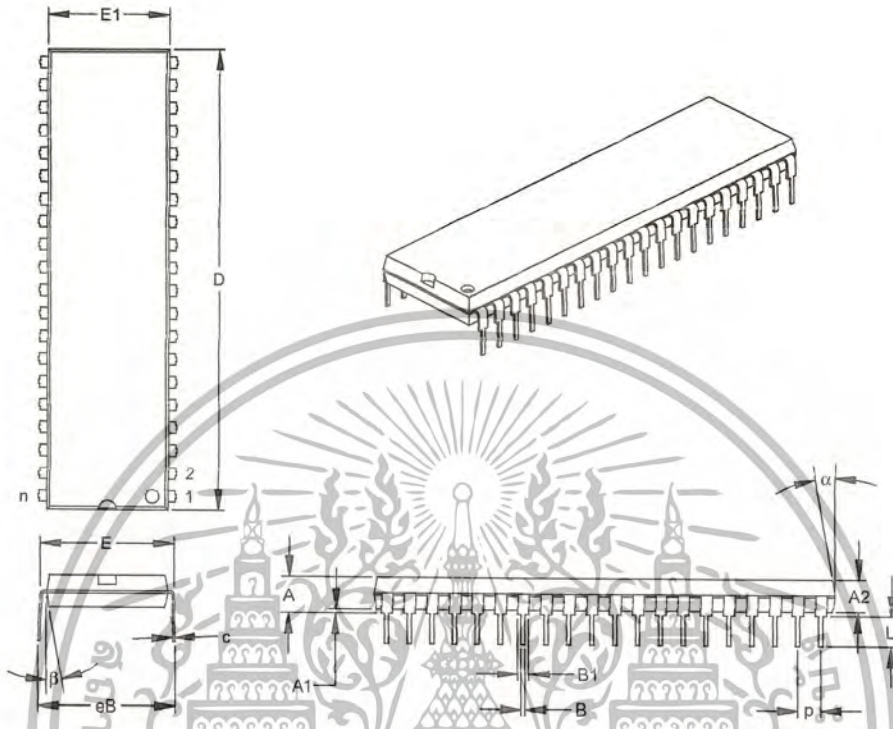
PIC18FXX8

TABLE 1-2: PIC18FXX8 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number				Pin Type	Buffer Type	Description
	PIC18F248/258	PIC18F448/458					
	SPDIP, SOIC	PDIP	TQFP	PLCC			
RE0/AN5/ \overline{RD} RE0 AN5 \overline{RD}	—	8	25	9	I/O I I	ST Analog TTL	<p>PORTE is a bidirectional I/O port.</p> <p>Digital I/O. Analog input 5. Read control for Parallel Slave Port (see \overline{WR} and \overline{CS} pins).</p>
RE1/AN6/ \overline{WR} /C1OUT RE1 AN6 \overline{WR} C1OUT	—	9	26	10	I/O I I O	ST Analog TTL Analog	<p>Digital I/O. Analog input 6. Write control for Parallel Slave Port (see \overline{CS} and \overline{RD} pins). Comparator 1 output.</p>
RE2/AN7/ \overline{CS} /C2OUT RE2 AN7 \overline{CS} C2OUT	—	10	27	11	I/O I I O	ST Analog TTL Analog	<p>Digital I/O. Analog input 7. Chip select control for Parallel Slave Port (see \overline{RD} and \overline{WR} pins). Comparator 2 output.</p>
Vss	19, 8	12, 31	6, 29	13, 34	—	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	20	11, 32	7, 28	12, 35	—	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: TTL = TTL compatible input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels
 I = Input
 P = Power
 CMOS = CMOS compatible input or output
 Analog = Analog input
 O = Output
 OD = Open-Drain (no P diode to VDD)

40-Lead Plastic Dual In-line (P) – 600 mil Body (PDIP)



Dimension Limits	Units	INCHES*			MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Number of Pins	n		40			40	
Pitch	p		.100			2.54	
Top to Seating Plane	A	.160	.175	.190	4.06	4.45	4.83
Molded Package Thickness	A2	.140	.150	.160	3.56	3.81	4.06
Base to Seating Plane	A1	.015			0.38		
Shoulder to Shoulder Width	E	.595	.600	.625	15.11	15.24	15.88
Molded Package Width	E1	.530	.545	.560	13.46	13.84	14.22
Overall Length	D	2.045	2.058	2.065	51.94	52.26	52.45
Tip to Seating Plane	L	.120	.130	.135	3.05	3.30	3.43
Lead Thickness	c	.008	.012	.015	0.20	0.29	0.38
Upper Lead Width	B1	.030	.050	.070	0.76	1.27	1.78
Lower Lead Width	B	.014	.018	.022	0.36	0.46	0.56
Overall Row Spacing	eB	.620	.650	.680	15.75	16.51	17.27
Mold Draft Angle Top	α	5	10	15	5	10	15
Mold Draft Angle Bottom	β	5	10	15	5	10	15

* Controlling Parameter
 § Significant Characteristic

Notes:

Dimensions D and E1 do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed .010" (0.254mm) per side.

JEDEC Equivalent: MO-011

Drawing No. C04-016

SK 45 GB 063



SEMITOP® 2

IGBT Module

SK 45 GB 063
SK 45 GAL 063
SK 45 GAR 063

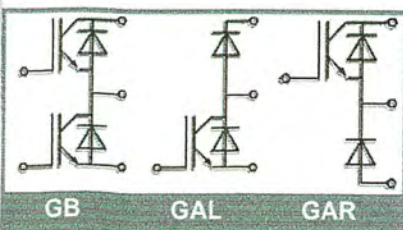
Preliminary Data

Features

- Compact design
- One screw mounting
- Heat transfer and isolation through direct copper bonded aluminium oxide ceramic (DCB)
- N channel, homogeneous Silicon structure (NPT-Non punchthrough IGBT)
- High short circuit capability
- Low tail current with low temperature dependence
- UL recognized, file no. E 63532

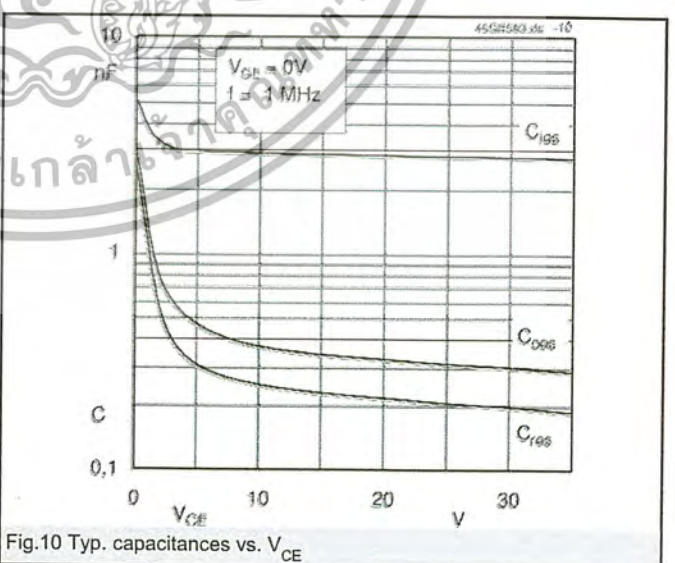
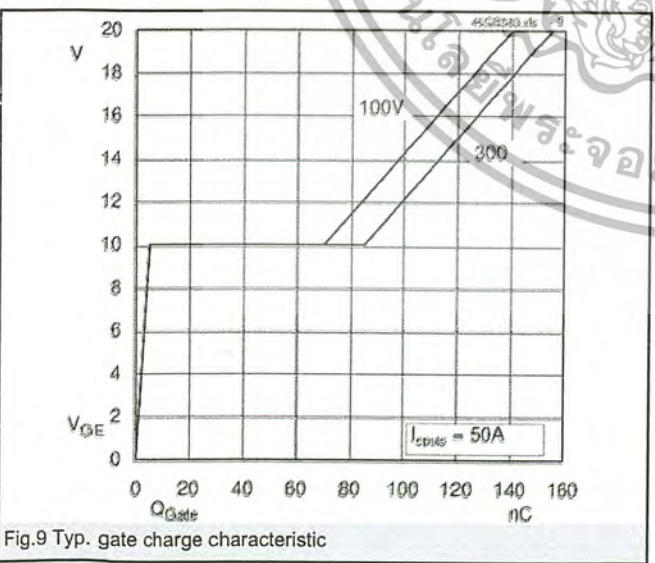
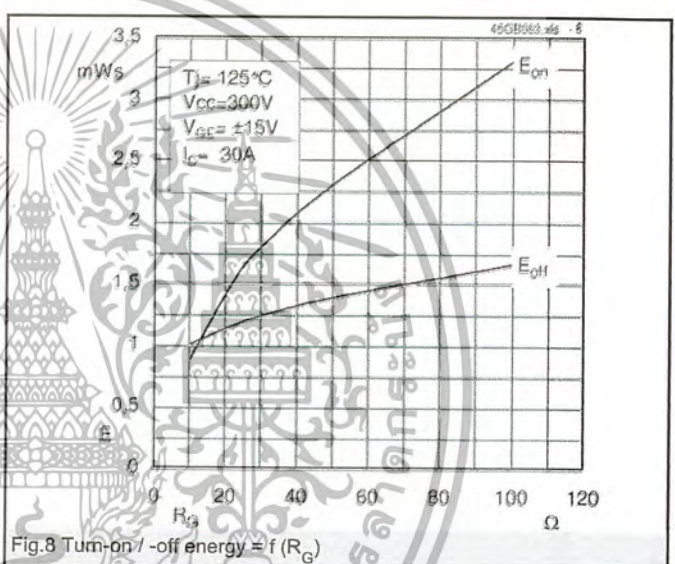
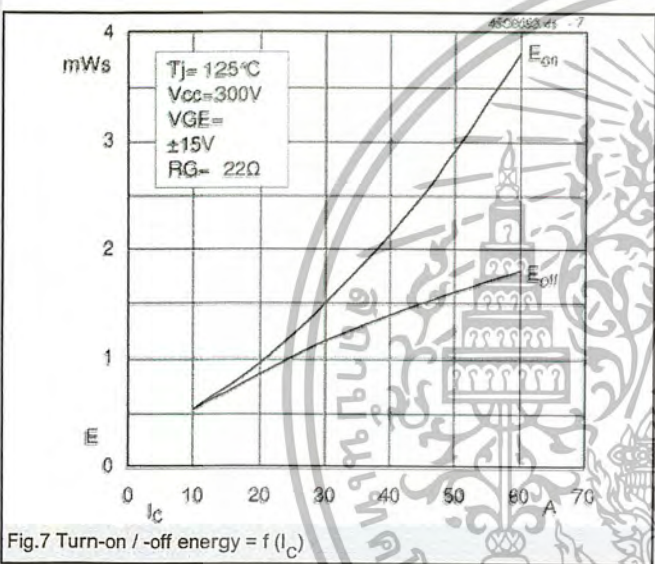
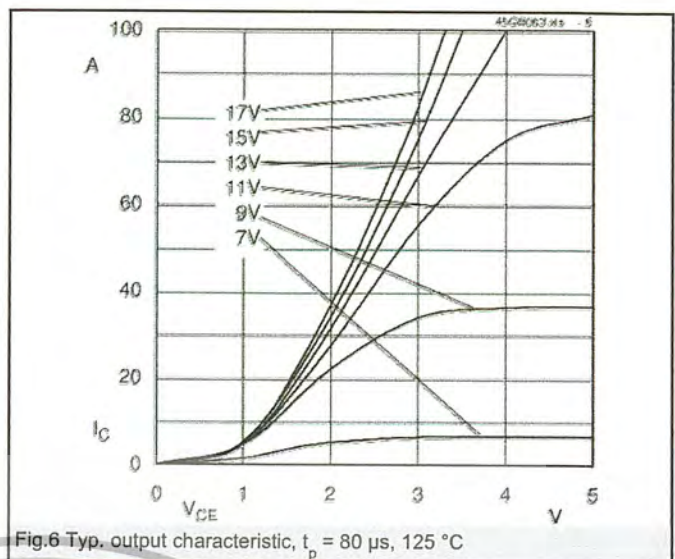
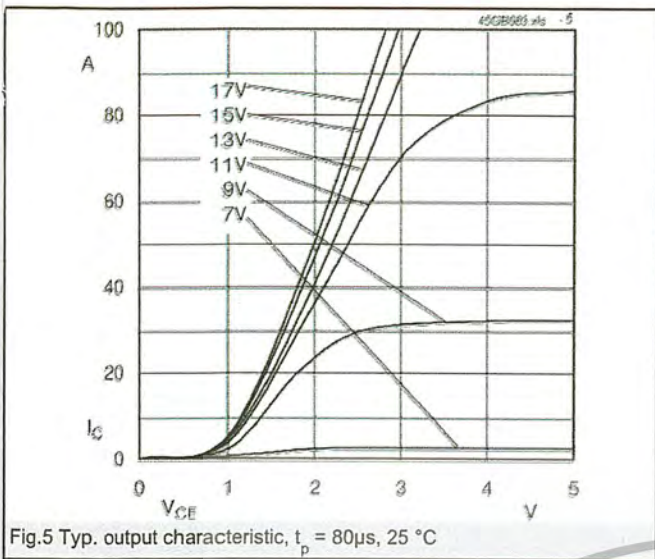
Typical Applications

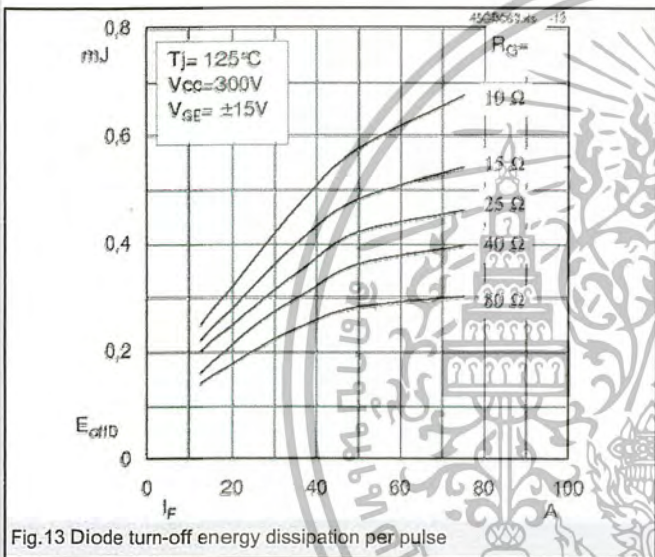
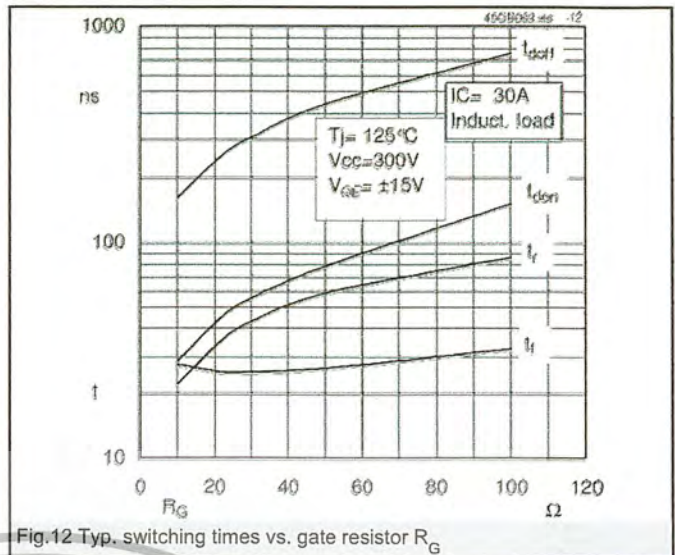
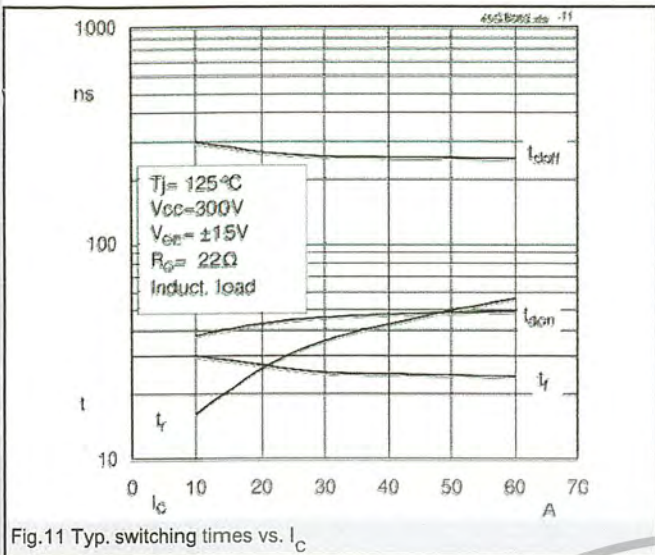
- Switching (not for linear use)
- Inverter
- Switched mode power supplies
- UPS



Absolute Maximum Ratings		$T_s = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified	
Symbol	Conditions	Values	Units
IGBT			
V_{CES}		600	V
V_{GES}		± 20	V
I_C	$T_s = 25\text{ (80) }^\circ\text{C}$;	45 (30)	A
I_{CM}	$t_p < 1\text{ ms}$; $T_s = 25\text{ (80) }^\circ\text{C}$;	90 (60)	A
T_j		- 40 ... + 150	$^\circ\text{C}$
Inverse / Freewheeling CAL diode			
$I_F = -I_C$	$T_s = 25\text{ (80) }^\circ\text{C}$;	57 (38)	A
$I_{FM} = -I_{CM}$	$t_p < 1\text{ ms}$; $T_s = 25\text{ (80) }^\circ\text{C}$;	114 (76)	A
T_j		- 40 ... + 150	$^\circ\text{C}$
T_{stg}		- 40 ... + 125	$^\circ\text{C}$
T_{sol}	Terminals, 10 s	260	$^\circ\text{C}$
V_{isol}	AC 50 Hz, r.m.s. 1 min. / 1 s	2500 / 3000	V

Characteristics		$T_s = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified			
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
IGBT					
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 30\text{ A}$; $T_j = 25\text{ (125) }^\circ\text{C}$		1,8 (2)	2,1 (2,3)	V
$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = V_{GE}$; $I_C = 0,001\text{ A}$	4,5	5,5	6,5	V
C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{ V}$; $V_{GE} = 0\text{ V}$; 1 MHz		2,8		nF
$R_{th(j-s)}$	per IGBT			1	K/W
	per module				K/W
under following conditions:					
$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 300\text{ V}$; $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$		45		ns
t_r	$I_C = 30\text{ A}$; $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$		35		ns
$t_{d(off)}$	$R_{Gon} = R_{Goff} = 22\text{ }\Omega$		250		ns
t_f			25		ns
$E_{on} + E_{off}$	Inductive load		2,65		mJ
Inverse / Freewheeling CAL diode					
$V_F = V_{EC}$	$I_F = 30\text{ A}$; $T_j = 25\text{ (125) }^\circ\text{C}$		1,3 (1,2)	1,5 (1,45)	V
$V_{(rO)}$	$T_j = (125)\text{ }^\circ\text{C}$		(0,85)	(0,9)	V
r_f	$T_j = (125)\text{ }^\circ\text{C}$		(9)	(16)	m Ω
$R_{th(j-s)}$				1,2	K/W
under following conditions:					
I_{RRM}	$I_F = 30\text{ A}$; $V_R = 300\text{ V}$		22		A
Q_{rr}	$di_f/dt = -500\text{ A}/\mu\text{s}$		2,2		μC
E_{off}	$V_{GE} = 0\text{ V}$; $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$		0,2		mJ
Mechanical data					
M1	mounting torque			2	Nm
w			19		g
Case	SEMITOP® 2		T 4		

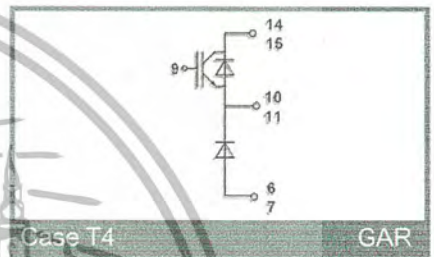
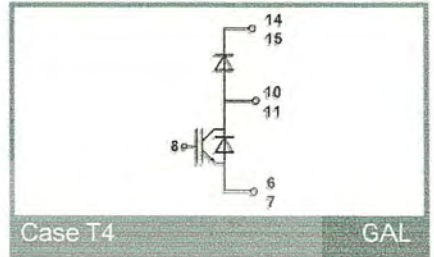
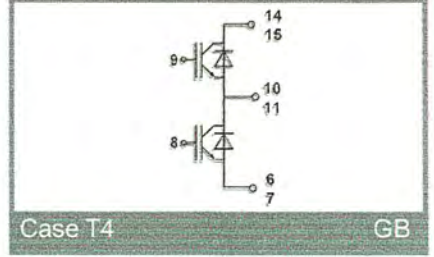
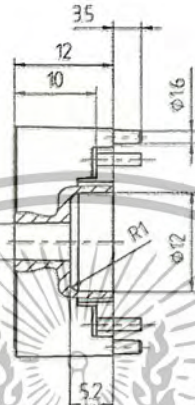
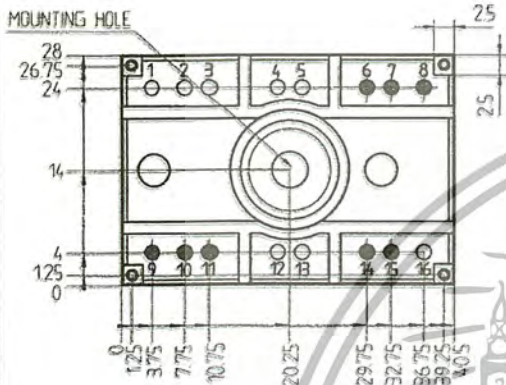
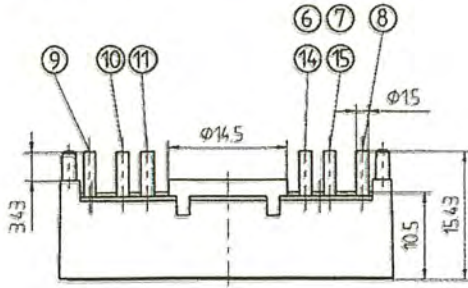




SK 45 GB 063

UL Recognized
File no. E 63532

Dimensions in mm



SUGGESTED HOLEDIAMETER FOR THE SOLDER PINS AND THE MOUNTING PINS IN THE PCB: 2 mm

Case T4

This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX.

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.