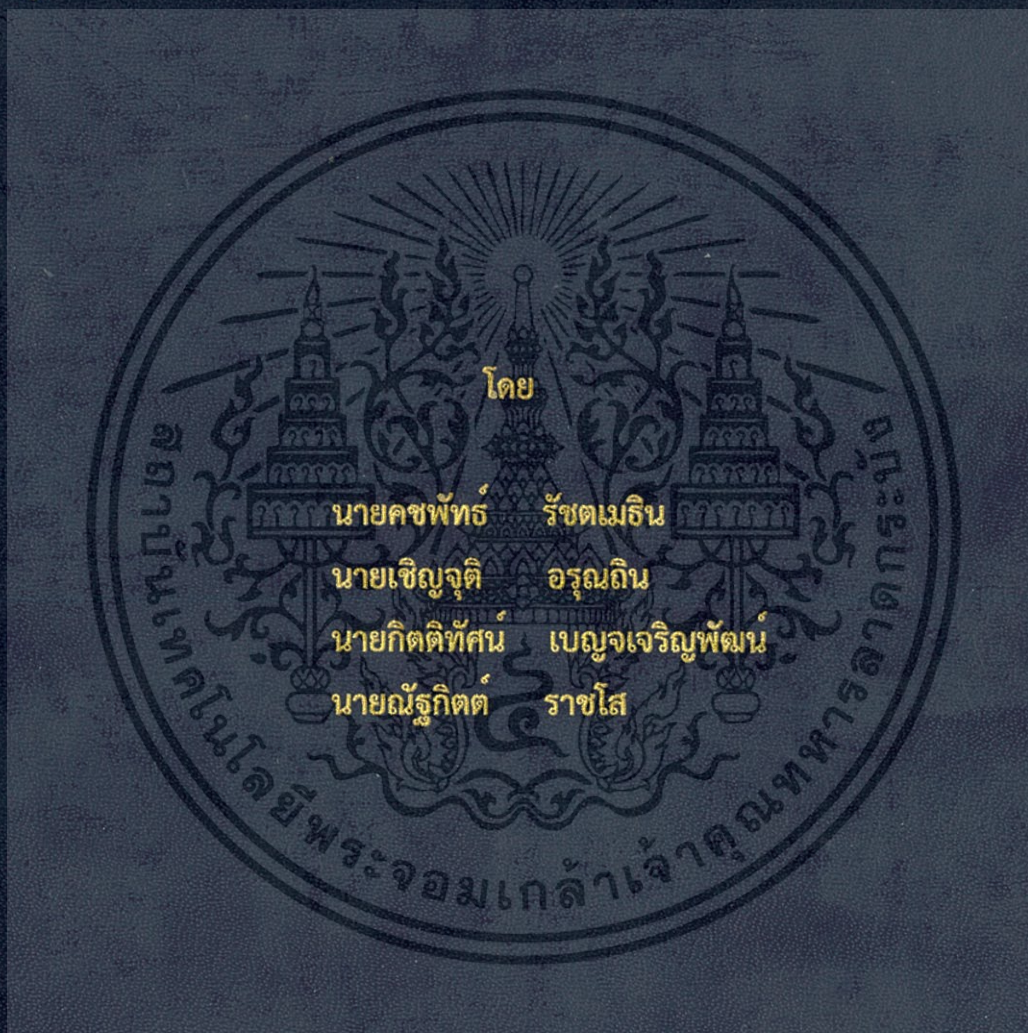


การออกแบบและสร้างเครื่องโอโซนแบบพูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้พีดีบีเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสสำหรับการยืดอายุผลไม้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF PS-PWM HIGH-FREQUENCY HIGHVOLTAGE  
FULL-BRIDGE GENERATOR FOR PROLONGING FRUITS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและสร้างเครื่องโอโซนแบบฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้พีดีบีเอิลยูเอ็มแบบเล็อนเฟสสำหรับการยืดอายุผลไม้  
DESIGN AND CONSTRUCTION OF PS-PWM HIGH-FREQUENCY HIGHVOLTAGE  
FULL-BRIDGE GENERATOR FOR PROLONGING FRUITS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF PS-PWM HIGH-FREQUENCY HIGH VOLTAGE  
FULL-BRIDGE GENERATOR FOR PROLONGING FRUITS



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและสร้างเครื่องโอโซนแบบฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้พีดีบีเอิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสสำหรับการยืดอายุผลไม้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF PS-PWM HIGH-FREQUENCY HIGH VOLTAGE  
FULL-BRIDGE GENERATOR FOR PROLONGING FRUITS



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องโอโซนแบบฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้พีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสสำหรับการยืดอายุผลไม้

ผู้จัดทำ

1. นาย คชพัทธ์ รัชตเมธิน
2. นาย เชิญจติ อรุณถิ่น
3. นาย กิตติทัศน์ เปญจเจริญพัฒน์
4. นาย ญัฐกิตต์ ราชโส



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างเครื่องโอโซนแบบฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้พีดีบีเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสสำหรับการยืดอายุผลไม้

นาย คชพัทธ์ รัชตเมธิน

นาย เชิญจติ อรุณถิ่น

นาย กิตติทัศน์ เบญจเจริญพัฒน์

นาย ญัฐกิตต์ ราชโส

รศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

โครงการงานชิ้นนี้ได้นำเสนอเครื่องผลิตโอโซนโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูงสำหรับนำมาใช้ในการยืดอายุผลไม้ต่างๆ โดยได้มีการใช้สัญญาณแบบดับเบิ้ลเอ็มแบบเลื่อนเฟสในการควบคุมวงจรและสามารถปรับกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยความเข้มข้นของโอโซนนั้นจะถูกควบคุมด้วยการปรับค่าความถี่ของเครื่องอินเวอร์เตอร์ เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่าโอโซนสามารถใช้ยืดอายุผลไม้ได้จึงได้มีการนำมะม่วงมาทดลอง โดยการทดลองนี้ ใช้ความเข้มข้นของโอโซนที่ 242 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ปล่อยให้กับมะม่วงโดยจะการทดลองนี้จะได้ว่าที่การปล่อยโอโซน 10 นาที จะทำให้สามารถยืดอายุของมะม่วงได้นานที่สุดมากกว่าในกรณีเวลาอื่นๆ และประสิทธิภาพสูงสุดของอินเวอร์เตอร์นี้อยู่ที่ 94 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN AND CONSTRUCTION OF PS-PWM HIGH-FREQUENCY HIGH-VOLTAGE FULL-BRIDGE GENERATOR FOR PROLONGING FRUITS

Mr.Khachapat Rachatamethin

Mr.Chernjuti Aroonthin

Mr.Kittithat Benchacharoenpat

Mr.Nuttakit Rachaso

Assoc. Prof.Dr. Anuwat Jangwanitlert Advisor

## ABSTRACT

This project presents an ozone generator by using the high-frequency full-bridge inverter for applying in prolonging fruits process. The Phase-Shifted Pulse Width modulation (PS-PWM) is used in the proposed circuit for adjusting the output power of inverter. In addition, The concentration of ozone will be controlled by adjusting the operating frequency of inverter. In order to prove the mentioned prolonging mangoes. From test, the 242 mg/hr of ozone concentration at 24.3 kHz of switching frequency that spend time about 10 minute can prolong the mangoes life satisfying more than the other time including mangoes that didn't pass ozone process and the maximum efficiency of inverter is 94%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนอย่างดีจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการ ขึ้นนี้อย่างต่อเนื่องเสมอมา และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขในส่วนต่างๆ จนทำให้ปริญญาโทฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ทัตญญา มีศรีสุข ที่ช่วยให้คำแนะนำต่างๆมาโดยตลอดจนกระทั่งโครงการขึ้นนี้เสร็จสมบูรณ์ออกมาได้

ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องโครงการห้อง ECC-308 ที่มีส่วนช่วยและสนับสนุนในด้านต่างๆจนงานออกมาอย่างเรียบร้อย

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ และเพื่อนๆชมรม Innogen ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการยืมเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆสำหรับการทำโครงการ

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้อุปกรณ์เครื่องมือในการผสมสารเคมีต่างๆ จนทำให้งานออกมาเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ต้องขอบคุณคณะผู้จัดทำทุกคน และขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจอีกทั้ง พี่น้อง พี่น้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงต้องขอขอบคุณ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	4
1.5 โครงสร้างของปริญญานิพนธ์	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากปริญญานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซน	6
2.1 บทนำ	6
2.2 กระบวนการสร้างโอโซนโดยใช้โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	7
2.2.1 วิธีสร้างก๊าซโอโซน	8
2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับโอเล็กโตรนของโมเลกุลก๊าซ	9
2.2.3 โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	10
2.2.3.1 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	10
2.2.3.2 โอเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น	11
2.2.4 การใช้โอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้	14
2.2.5 คุณสมบัติของโอโซน	17
2.3 หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดัน	17
2.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	20
2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบ LCL	21
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า	26
2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ	26
2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย	27
2.6 พีเอส-พีดับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	4
1.5 โครงสร้างของปริญญานิพนธ์	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากปริญญานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซน	6
2.1 บทนำ	6
2.2 กระบวนการสร้างโอโซนโดยใช้โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน	7
2.2.1 วิธีสร้างก๊าซโอโซน	8
2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับโอเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ	9
2.2.3 โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน	10
2.2.3.1 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	10
2.2.3.2 โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน 2 ชั้น	11
2.2.4 การใช้โอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้	14
2.2.5 คุณสมบัติของโอโซน	17
2.3 หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดัน	17
2.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	20
2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบ LCL	21
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า	26
2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ	26
2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย	27
2.6 พีเอส-พีดับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7	สรุป	31
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน</b>	<b>32</b>
3.1	บทนำ	32
3.2	อิเล็กทรอนิกส์ทรงกรวยกรบอกแกนร่วมฉนวนแบบ 2 ชั้น	32
3.3	การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบยกรดับแรงดัน	36
3.4	อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์	39
3.5	วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณ	40
3.6	วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250	41
3.7	การสร้างสัญญาณ PS-PWM	43
3.8	สรุป	46
<b>บทที่ 4</b>	<b>การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน</b>	<b>47</b>
4.1	บทนำ	47
4.2	การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า	47
4.2.1	สัญญาณขับเกต PS-PWM แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์	48
4.2.2	กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์	51
4.2.3	แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง	54
4.3	วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า	59
4.4	การเก็บผลก๊าซโอโซนโดยการทดลองทางเคมี	61
4.5	การเก็บผลการทดลองการยัดอายุของมะม่วง	62
4.6	สรุป	65
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>66</b>
5.1	สรุปผลการทดลอง	66
5.2	ข้อเสนอแนะ	67
	<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>68</b>
	<b>ภาคผนวก</b>	<b>69</b>
	ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	70
	ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์การวัด	74
	ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ปริมาณโอโซน	78
	ภาคผนวก ง รูปโครงงานโดยรวม	83
	ภาคผนวก จ Datasheet	86

## สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน	6
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซไอโซน	8
2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ	10
2.4 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	11
2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	12
2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	12
2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดเมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า	13
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้ฉนวน	13
2.9 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE	17
2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า	20
2.11 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน	21
2.12 วงจรสมมูลของระบบ	22
2.13 วงจรสมมูลของระบบทางด้านปฐภูมิ	22
2.14 วงจรสมมูลเรโซแนนต์	23
2.15 รูปแบบการจำลองค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่าง $V_{ab}/V_o$ กับ $f_s/f_o$	25
2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุต	26
2.17 กำลังไฟฟ้า	27
2.18 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM	28
2.19 การทำงานของ PS-PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 8	29
3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน	32
3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น	32
3.3 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE	36
3.4 วงจรเรโซแนนต์	39
3.5 รูปวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F4011	40
3.6 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	41
3.7 วงจรภาคกำลัง	42
3.8 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM	43
3.9 ช่วงสัญญาณที่แบ่งเป็น 8 ช่วงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรม	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PS-PWM	45
4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน	47
4.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์	48
4.3 สัญญาณขับเคลื่อน PS-PWM (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสวิตช์ $S_1$ และ $S_4$ ที่ ความถี่ 24 kHz	48
4.4 สัญญาณขับเคลื่อน PS-PWM (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสวิตช์ $S_2$ และ $S_3$ ที่ความถี่ 24 kHz	49
4.5 แรงดันและกระแสคร่อมสวิตช์ $S_1$ และ $S_4$ การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	49
4.6 แรงดันและกระแสคร่อมสวิตช์ $S_2$ และ $S_3$ การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	50
4.7 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	50
4.8 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	51
4.9 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 25 kHz	51
4.10 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 26 kHz	52
4.11 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 27 kHz	52
4.12 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz	53
4.13 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	54
4.14 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง	55
4.15 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 26 kHz	56
4.16 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 27 kHz	57
4.17 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz	58

เอกสารนี้ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz โยชนั้นเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงกับความถี่	59
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่	59
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่	60
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับความถี่	62
4.22 รูปวันที่ 5 ของมะม่วงที่ไม่ได้แช่น้ำโอโซนมีจะเห็นได้ว่าการเน่าเสีย 2 ลูก	64
4.23 รูปวันที่ 5 ของมะม่วงที่แช่น้ำโอโซนเป็นเวลา 10 นาที ยังไม่มีการเน่าเสีย	64
รูป ก.1 เครื่องผลิตก๊าซโอโซน	80
รูป ก.2 อุปกรณ์ทดลอง	80
รูป ก.3 สารละลาย KI ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับโอโซน	81
รูป ก.4 สารละลายที่เติมกรดซัลฟูริกและน้ำแบ่ง	81
รูป ก.5 สารละลายหลังทำการไตรเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตแล้ว	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การดำเนินงานวิจัย	3
2.1 ระดับปริมาณก๊าซโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA)	7
3.1 พารามิเตอร์ของระบบ	40
4.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนเทียบกับรูปแบบสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz – 28 kHz	61
4.2 การเก็บผลอายุของมะม่วงครั้งที่ 1	63
4.3 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 2	63
4.4 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 3	63



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำก๊าซโอโซน (Ozone Gas) มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่นในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง หม่าเชื้อโรค เครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ซึ่งในโรงงานนี้เราจะนำโอโซนมาประยุกต์ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โอโซนที่ความเข้มข้นต่ำๆสามารถใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่เก็บรักษาในห้องเย็นได้ โดยสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อรา และแบคทีเรียในอากาศที่สัมผัสกับผิวของผลิตผลและยังสามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ผิวของผลิตผลได้ มีการศึกษาการใช้โอโซนในการเก็บรักษาผักและในการเก็บรักษาผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล มันฝรั่ง มะเขือเทศ สตอเบอร์รี่ บรอกโคลี แพร่ ส้ม พีช องุ่น ข้าวโพด และถั่วเหลือง แต่สิ่งที่สำคัญคือโอโซนสามารถใช้ในห้องเย็นที่ใช้เก็บรักษาผักและผลไม้เพื่อป้องกันการสุกโดยโอโซนจะไปลดการผลิตแก๊สเอทิลีนที่ผักและผลไม้ผลิตขึ้นและมีผลทำให้ผักและผลไม้สุกหรือเน่าเสียช้าลงซึ่งโอโซนมีข้อดีกว่าสารชนิดอื่นๆ คือไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างแต่ในขณะเดียวกันก๊าซโอโซนก็เป็นอันตรายกันถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองกับเยื่อผิวหนังหรือหากสูดดมในปริมาณมากอาจเป็นอันตรายถึงชีวิต

การผลิตก๊าซโอโซนจะอาศัยพลังงานจาก สนามไฟฟ้า (Electric Field) กระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพื่อให้เกิดก๊าซโอโซนขึ้น งานวิจัยทางด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวกับการผลิตก๊าซโอโซนจะใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโทรด โดยความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดหรือชนิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator) ในการทำโครงการครั้งนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟส ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full Bridge Converter) สร้างกระแสไฟฟ้าไฟฟฟ้าเอซี (AC) ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีตัวนำ 2 ตัว โดยมีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสนามไฟฟ้าเอซีที่สร้างขึ้นระหว่างตัวนำนั้นสามารถทำให้เกิดก๊าซโอโซนได้

ปริิญญาณิพนธ์นี้ได้ทดลองโดยใช้รูปสัญญาณ ฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟส ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full Bridge Converter) ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซนเพื่อเปรียบเทียบทางด้านเคมีคือปริมาณของโอโซนและทางไฟฟ้าของสัญญาณ ฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสเพื่อนำไปใช้ในการยืดอายุของผลไม้ ในขณะเดียวกันสามารถยังได้นำข้อดีของวงจรรีโซแนนต์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการทํางาน วิเคราะห์และออกแบบ เครื่องผลิตก๊าซโอโซนและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ PS-PWM พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซนสำหรับการนำไปยัดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โดยใช้พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้มีการทํางานที่ดีกว่าฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์คือที่แรงดันอินพุตกระแสตรงจะเท่ากัน ซึ่งจะให้กำลังไฟฟ้าสูงกว่า โดยที่ผ่านมามีการศึกษาทดลองรูปแบบสัญญาณแบบ PS-PWM โดยการปรับความถี่ เพื่อดูปริมาณโอโซน และเพื่อดูว่าผลไม้นํามาผ่านโอโซนนั้นสามารถยืดอายุได้นานมากกว่าผลไม้นํามาผ่านโอโซนเลยนานเท่าไร ด้วยการปรับความถี่ และใช้ความถี่สวิตซ์ในช่วงที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนต์ เพื่อลดการสูญเสียของสวิตซ์และให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกจากคอนเวอร์เตอร์สูงกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป

## 1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้างก๊าซโอโซน, การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์และวิธีการสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM

1.3.2 ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.3.3 ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า

1.3.4 ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และวงจรในแต่ละภาคส่วน

1.3.5 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า

1.3.6 เก็บผลการทดลองปริมาณก๊าซโอโซนทางเคมีและอายุการเก็บรักษาผลไม้

1.3.7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.8 เขียนปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานวิจัย

หัวข้อ	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลจากตำราบทความและวารสาร	↔									
2. ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน	↔	↔	↔	↔	↔					
3. ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า	↔	↔	↔	↔	↔					
4. ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และวงจรในแต่ละภาคส่วน				↔	↔	↔				
5. เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า						↔	↔			
6. เก็บผลการทดลองปริมาณก๊าซโอโซนทางเคมีและอายุการเก็บรักษาผลไม้						↔	↔			
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง							↔	↔		
8. เขียนปริญญานิพนธ์			↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตของปริญญาโท

- 1.4.1 ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน
- 1.4.2 สร้างวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดโอโซน
- 1.4.3 ออกแบบสร้างชุดสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM
- 1.4.4 สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้
- 1.4.5 สามารถใช้งานในการถนอมผลไม้ได้จริง

## 1.5 โครงสร้างของปริญญาโท

ในปริญญาโทฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนและวงจรแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซนรายละเอียดจะกล่าวถึงในปริญญาโทแบ่งเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย วิธีการวิจัย ขอบเขตปริญญาโท ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซนคุณสมบัติและการเกิดก๊าซโอโซนกระบวนการที่จะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายมาผลิตก๊าซโอโซนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างก๊าซโอโซน การใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันเพื่อป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งรูปแบบการสวิตซ์ของ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนเลือกและคำนวณขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน สร้างวงจร PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์

บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลอง เก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมีควบคู่กันไปโดยการปรับความถี่ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้จากปริญญาโท

- 1.6.1 สามารถศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณวงจร PS-PWM ที่ความถี่ต่างๆของ ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ทั้งทางเคมีและทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนได้
- 1.6.2 สามารถใช้ dsPIC30F4011 สร้างสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์
- 1.6.3 ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตซ์ได้จากผลของเรโซแนนซ์
- 1.6.4 ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ไอโซนเข้ากับด้านถนนผลไม้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

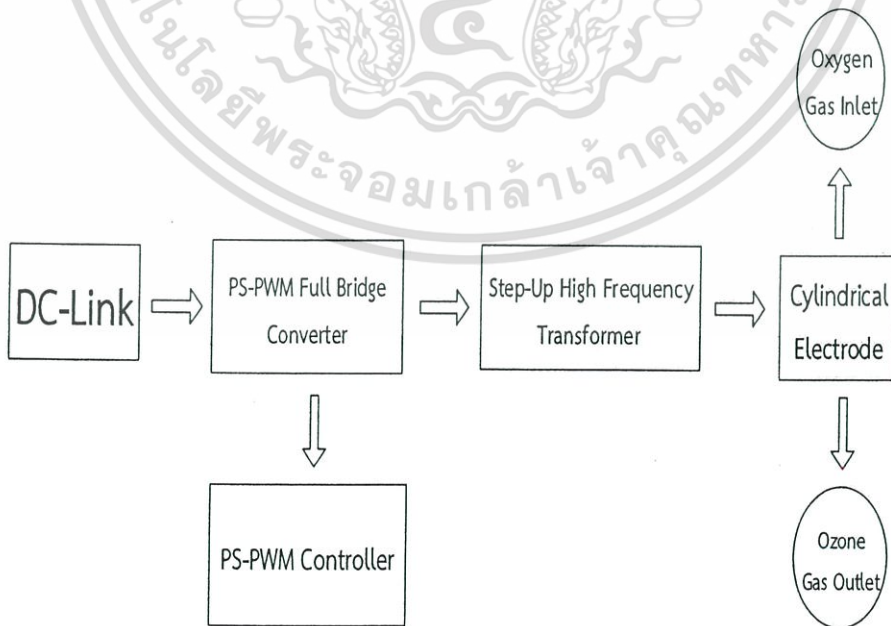
## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซน

#### 2.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบ คือการใช้งานในแหล่งที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซไม่ให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณก๊าซโอโซนเป็นปริมาณมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

ในงานวิจัยนี้เน้นผลิตโอโซนในปริมาณที่มากเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายซึ่งเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบนี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังไฟฟ้าสูง โดยโครงสร้างประกอบด้วยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน (Cylindrical Electrode) หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน (Step-Up High Frequency Transformer) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซี-เอซี (DC-AC Converter) ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมสัญญาณแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.1 เพื่อให้เข้าใจกระบวนการเกิดก๊าซโอโซนและชุดอิเล็กโทรดสร้างก๊าซโอโซนได้อย่างไร จะขอกกล่าวถึงกระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้อิเล็กโทรดเป็นอันดับแรก ต่อมาจะอธิบายถึงหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดีซี-เอซี และอธิบายรูปสัญญาณ PS-PWM และอธิบายวงจรเรโซแนนต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

ก๊าซโอโซนคืออะตอมของออกซิเจน 3 อะตอมรวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน ( $O_3$ ) ตามปกติออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันมากคือ  $O_2$  จะคงสถานะอยู่ได้หลายสภาวะหรือ กล่าวได้ว่ามีเสถียรนั่นเอง แต่  $O_3$  จะไม่คงตัวหรือไม่เสถียร เนื่องจากปัจจัยต่างๆเช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความดัน และการสัมผัสกับสารที่มีพลังงานต่ำกว่าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างรวดเร็ว ซึ่ง  $O_3$  มีปฏิกิริยาสูงถึง 2.07 V (Oxidation Potential) ถ้าปราศจากความเข้าใจ การนำไปใช้งานจะเป็นอันตรายมาก ดังนั้น IOA (International Ozone Association) จึงระบุระดับความเป็นพิษของโอโซนและผลที่เกิดขึ้นไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับปริมาณก๊าซโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA)

ระดับปริมาณโอโซน (ppm : part per million)	ผลกระทบ (Effect)
0.001-0.125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ ค่านี้อุปสรรคตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic Air Cleaner และอุปกรณ์ภายในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรมและที่สาธารณะ
0.25	เริ่มปรากฏต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เริ่มมีอาการปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย ติดเชื้อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอกรุนแรงและทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4-5.6	การทดสอบกับต้นถั่วพบว่าใน 70 วินาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดลองกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้าย

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันในชั้นบรรยากาศ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว มีสีฟ้าเข้ม 1 โมเลกุลเท่ากับ 47.998 g/mol จุดหลอมเหลวที่  $-192.5$  องศาเซลเซียส จุดเดือดที่  $-111.9$  องศาเซลเซียส การค้าและการใช้โอโซนในอุตสาหกรรมได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของโอโซนที่สามารถฆ่าเชื้อโรคและกำจัดกลิ่นได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

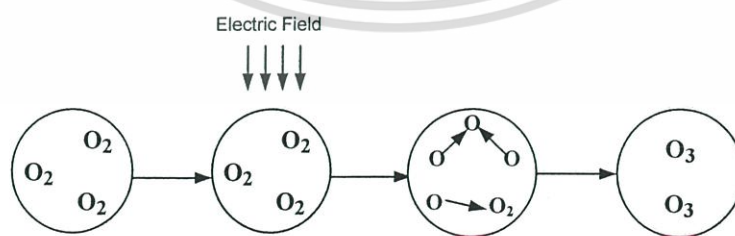
องศาเซลเซียส โดยอยู่ในรูปของของเหลวสีน้ำเงินเข้ม มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในสารละลายและอากาศ แต่ก๊าซโอโซนจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซ ออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับบริติช (Reduce) หรือได้รับความร้อน

ลักษณะการเกิดโอโซนแบ่งเป็น 2 แบบคือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติทั้งจากการรับพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 200 นาโนเมตร หรือพลังงานจากฟ้าผ่าและมนุษย์สร้างขึ้นโดยอาศัยพลังงานซึ่งเลียนแบบธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะนำพลังงานจากสนามไฟฟ้ามาใช้กระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพราะในปัจจุบันสามารถจัดหาและสร้างแหล่งจ่ายได้ง่ายโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

### 2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซโอโซน

ก๊าซโอโซนคือก๊าซที่รวมตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม ( $O_3$ ) การที่จะทำให้ออกซิเจนสลายพันธะได้นั้น จำเป็นต้องนำพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ออกซิเจน ( $O_2$ ) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ  $O_2$  เกิดเป็น  $O_3$  ดังรูปที่ 2.2 โดยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการ ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอนโมเลกุลของก๊าซนั้นเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซโดยรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์และต้องมามีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่างๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุบวก ประจุลบ และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบา(เมื่อเทียบกับประจุบวก)เคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้มันมีบทบาทที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตก๊าซโอโซนพลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างส่งถ่ายมาจากการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของออกซิเจน



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

กระบวนการไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า การโฆษณา หรือการนำข้อมูลไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพลังงานที่ถ่ายเทไม่มากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือ ไอออไนเซชัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชน ได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่าพลังงานจลน์ที่มีการเคลื่อนของอนุภาคที่มีมวลได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานศักย์สู่โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนนั่นเอง กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาอาโนดอิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้างก๊าซโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ(Dissociation Reaction) ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

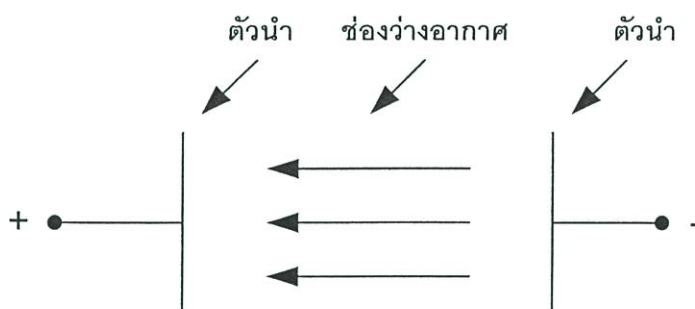
2. การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อที่ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นโอโซน (Ozone Generation)

ย่านพลังงานที่ต้องใช้ผลิตโอโซนคือ  $5.58\text{kW.h/m}^3 - 7.073\text{kW.h/m}^3$  [5]

แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่ประมาณ 21% ดังนั้นคิดเทียบแล้วพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ  $1.172 - 7.073\text{kW.h/m}^3$  จึงเพียงพอต่อการสร้างโอโซน

2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซบรรจุอยู่ เกิดสนามไฟฟ้าภายในช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซและเคลื่อนที่เข้าหาศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทางระหว่างอิเล็กตรอนกับขั้วบวกของช่องว่างอากาศด้วยความเร็วค่าๆหนึ่ง ในระหว่างทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปนั้นอาจเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลอื่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ถ้ามีระยะห่างมากขึ้น โดยอิเล็กตรอนยังมีพลังงานในการชนมากพอให้กับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่ถูกชนหลุดออกมานั้นจึงหมายความว่า แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการกลับขั้วศักย์ไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเดิมก่อนหน้านี้จะถูกวางตัวใหม่ในทิศทางตรงข้าม และเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกใหม่ อีกด้านหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วในการกลับขั้วในช่วงเวลาหนึ่งจึงเหมือนเป็นการเพิ่มระยะทางที่อิเล็กตรอนต้องเคลื่อนที่



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

ออกไป โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะได้แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงเป็นการเพิ่มแรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

### 2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

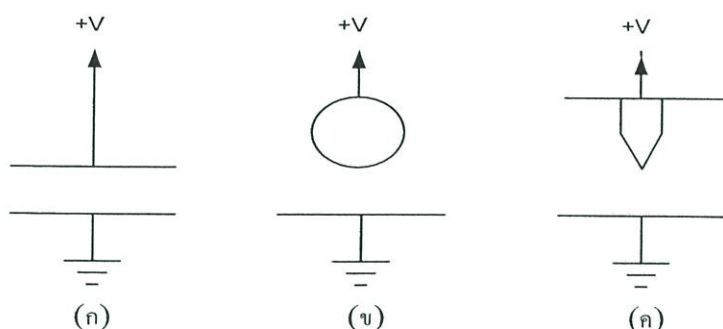
ในกระบวนการสร้างไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ พลังงานที่กระทำต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีที่จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียร จำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

#### 2.2.3.1 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

สนามไฟฟ้านั้นแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูงดังรูปที่ 2.4 ในที่นี้จะกล่าวถึง สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเพียงอย่างเดียว เพราะการนำมาใช้งานมีประโยชน์อย่างมากและได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

สนามไฟฟ้าแบบนี้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปทรงเรขาคณิต ของตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าแห่งปลายแหลมจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่สุด ดังรูปที่ 2.4 (ค) กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงก่อนเกิดการเบรกดาวนจ์จะมีกระแสไหลผ่านช่องว่างอากาศเรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) ที่บริเวณผิวปลายแหลมของตัวนำจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แต่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อวัดที่ระยะห่างออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปทรงของอิลเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

ดังนั้นจึงไม่เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นถึงแม้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตก็ตามในขณะเดียวกันจะเกิดการดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นในช่องว่างอากาศ เรียกว่า การดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) การดิสชาร์จนี้จะไม่เกิดขึ้นตลอดทั้งแนวของสนามไฟฟ้าและอาจเกิดขึ้นเป็นช่วงหรือต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลได้

#### 2.2.3.2 อิลเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

รูปทรงของอิลเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าของอิลเล็กโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่นำวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) ไม่เท่ากันซ้อนกันจึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ  $C_1$  และ  $C_2$  โดยแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถหาได้จากสมการ (2.1) และ (2.2)

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_1} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.1)$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_2} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $C_1$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F)  
 $C_2$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F)  
 $\epsilon_{r_1}$  = ค่าค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\epsilon_{r_2}$  = ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F/m)

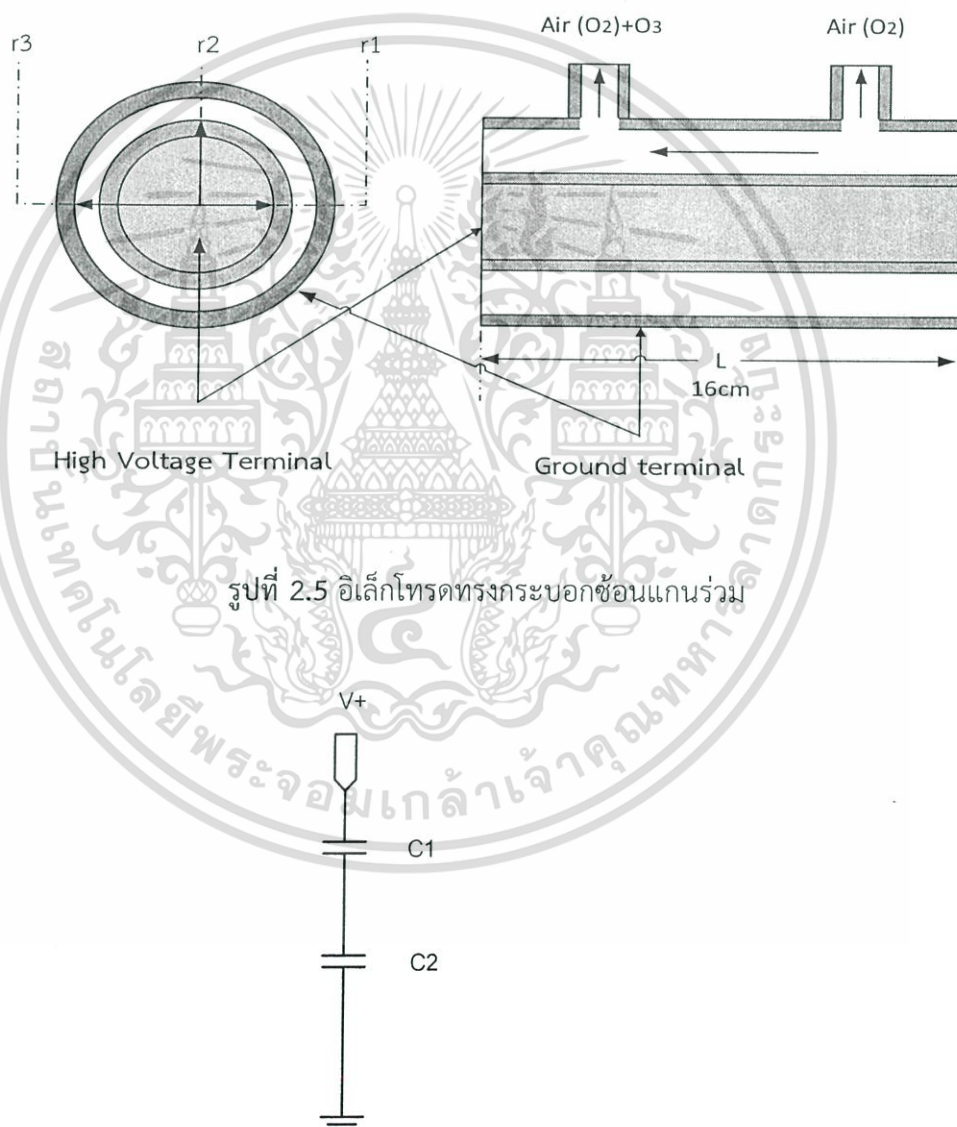
$\epsilon_0$  = ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฟรีสเปซ

$l$  = ความยาวของชุดอิเล็กโทรดหน่วยเป็น (m)

$r_1$  = รัศมีด้านในของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น (m)

$r_2$  = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น (m)

$r_3$  = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้น 2 หน่วยเป็น (m)

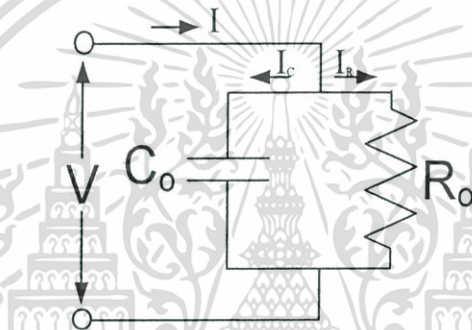


รูปที่ 2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

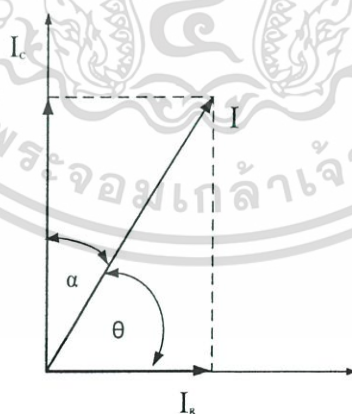
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอากาศมีสภาพความเป็นฉนวน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นเกิดมีกระแสไหลผ่าน สนามไฟฟ้าแบบมีขั้วนั้นอิเล็กตรอนจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าทำให้เกิดทิศทางและวางตัวอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อขั้วของสนามไฟฟ้าสลับไปมาเป็นผลให้การวางตัวของอิเล็กตรอนก็สลับไปมาเช่นกันทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ของอิเล็กทรอนิกส์จึงมองว่ามีค่าความต้านทานซึ่งเป็นตัววัดกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนถูกต้องขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 2.7 โดยในทางปฏิบัติเมื่อต้องการหาค่ากำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า เซอริงบริดจ์ (Schering Bridge) โดยการวัดค่ามุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันแล้วนำไปลบกับ  $90^\circ$  ให้อยู่ในรูปของ  $\tan(\alpha)$  เรียกว่า แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยมุม  $\alpha$  เรียกว่า มุมกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์เมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้ฉนวน

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.7 เป็นวงจร RC ขนาน เมื่อป้อนแรงดันรูปไซน์ (Sin Wave) ให้กับวงจร กระแสที่ไหลในวงจรเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมต่างเฟสกับแรงดันเป็นมุม  $\theta$  โดย [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอินพุตที่ป้อน

$$v(t) = v_m \sin(\omega t)$$

จะได้สัญญาณกระแส

$$i(t) = i_m \sin(\omega t + \theta)$$

จากรูปที่ 2.8 หาค่า  $R_o$  และ  $C_o$  ได้จากสมการ (2.3) และ (2.4)

โดย 
$$R_o = \frac{V_m}{I_m \cos(\theta)} \quad (2.3)$$

และ 
$$C_o = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c} \quad (2.4)$$

เมื่อ 
$$X_{C_o} = \frac{V_m}{I_m \sin(\theta)} \quad (2.5)$$

หาค่ามุม  $\alpha$  ได้โดย  $\alpha = 90^\circ - \theta$

ดังนั้น 
$$\tan(\alpha) = \frac{R_o}{X_{C_o}} \quad (2.6)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ ในฉนวนแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7) [6]

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_{r_1} \times \epsilon_{r_2} \times V}{\epsilon_x \times r_x \times \left( \epsilon_{r_1} \times \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_{r_2} \times \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $E_{r_x}$  = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ (kV/cm)

$V$  = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรด (kV)

$r_x$  = รัศมีที่จุดใดๆ (cm)

$\epsilon_x$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่ฉนวนชั้นใดๆ (F/m)

#### 2.2.4 การใช้ไอซอนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้

เทคโนโลยีการ Utilizer ของน้ำหรือการใช้สารทำความสะอาดผักและผลไม้ อาทิเช่น

คลอรีน ซึ่งเป็นสารทำความสะอาดที่นิยมใช้ทำความสะอาดผักและผลไม้สด โดยมีข้อกำหนดการใช้ที่ความเข้มข้นที่ 1 ถึง 2 log แต่ที่ความเข้มข้นนี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคน ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาไอซอนในการใช้เป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรค เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ โดยได้ศึกษาข้อมูลจากการใช้ในภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งได้มีการจัดการประชุมหลายครั้ง

เอกสารนี้ซึ่งเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยได้รับการสนับสนุนจาก Electric Power Research Institute (EPRI) รวมถึง Conference ในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โอโซนในกระบวนการผลิตผักและผลไม้สดด้วย ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาการบริโภคผักและผลไม้ในสหรัฐอเมริกาเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีผู้เจ็บป่วยเพิ่มขึ้นจากจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคในอาหารจากสารเคมี และน้ำเสีย ปัจจุบัน จำนวนของ produce associated ของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในอาหาร การเจ็บป่วยของคนจากจุลินทรีย์ดังกล่าวไม่สามารถควบคุมได้และมีมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเสื่อมเสียของผักและผลไม้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่งส่วนใหญ่เกิดจากจุลินทรีย์กล่าวคือเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยว จนถึงการบริโภคโดยมีการเสื่อมเสียมากถึง 30% การใช้คลอรีนในการทำความสะอาดและฆ่าเชือนั้นเป็นสิ่งที่สะดวกและสามารถปฏิบัติได้ง่ายในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งยังมีคุณสมบัติในการควบคุมและลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่พบในผักและผลไม้ได้ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผักและผลไม้ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่ายังไม่สามารถจะชี้ชัดได้ถึงปริมาณคลอรีนที่ใช้เพื่อยับยั้งแบคทีเรียในผักและผลไม้ได้ องค์การสภาพแวดล้อมและสุขภาพ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารทำความสะอาดและปริมาณการตกค้างเช่น Trihalomental และปริมาณสารตกค้างอื่นๆ ในน้ำเสียที่ปล่อยสู่แหล่งธรรมชาติจากการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยมีความสัมพันธ์กันกับความเป็นไปได้เกี่ยวกับการปฏิบัติงานในอนาคต ในการใช้คลอรีนเป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ คลอรีนเป็นสารเคมีกลุ่มที่มีการนำมาใช้เป็นยาฆ่าและควบคุมแมลงศัตรูพืชในกระบวนการผลิตผักและผลไม้โดยเทคโนโลยีในการผลิต Current ไม่สามารถที่จะกำจัดยาฆ่าแมลงศัตรูพืช (คลอรีน) ที่ตกค้างที่ผิวของผักและผลไม้ได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพผู้บริโภค และมีความเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อมด้วย ดังนั้นหลายประเทศจึงให้ความสนใจกับสารทำความสะอาด และสารฆ่าเชื้อ และสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร

จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโอโซน สามารถใช้แทนคลอรีนได้ และในปี 1997 โอโซนได้รับการยอมรับจาก GRAS ว่ามีความปลอดภัยในการใช้และไม่มีสารเคมีตกค้างโดย EPRI ยอมให้มีการใช้โอโซนในอุตสาหกรรมได้ โดยภาคอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจถึงวิธีการและรายละเอียดของการใช้โอโซนในการเป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ

โอโซน เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงและดีกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า ทั้งยังสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคจากอาหารได้ดีกว่าคลอรีนด้วย โดยโอโซนสามารถทำลายจุลินทรีย์ เช่น Ecoli, Listeria และจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคอื่นๆ ได้ และยังมีไม่มีสารตกค้าง โอโซนมีพลังโมเลกุลสูง มีครึ่งชีวิตในน้ำที่อุณหภูมิห้องที่ 20 นาที และสามารถแตกตัวเป็นออกซิเจนอย่างง่ายและไม่มีการตกค้างในการใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้ในการปรับสภาพน้ำที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ สำหรับกระบวนการผลิตผักและผลไม้ โดยใช้สำหรับการล้างทำความสะอาดผักและผลไม้ น้ำที่ใช้ในการทำ ความสะอาดนี้เป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการ Combination ด้วยโอโซนและผ่านกระบวนการกรอง ซึ่งเป็นน้ำที่ปราศจากแบคทีเรีย สี และสารปนเปื้อนอื่นๆ นอกจากนี้น้ำที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้งเพื่อลดการใช้น้ำได้ ระบบการใช้โอโซนนั้นไม่เหมือนกับการใช้คลอรีน กล่าวคือ น้ำที่ใช้แล้วจะถูก discharged ด้วยโอโซน ซึ่งทำให้ไม่มีสารเคมีตกค้าง และไม่ก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมและระบบน้ำใต้ดิน โอโซนสามารถกำจัดยาฆ่าแมลงและสารเคมีที่ตกค้างได้ เช่น สารตกค้างที่เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลอรีน เป็นต้น โอโซนบริสุทธิ์ ( Gaseous Ozone ) เป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคที่ดีและเป็นสาร fumigation นอกจากนี้โอโซนสามารถใช้เป็นสารทำความสะอาดในสถานที่เก็บอาหารได้ หรือใช้เป็นสารทำความสะอาดในระหว่างการขนส่งเพื่อป้องกันแบคทีเรีย รา ยีสต์ที่ผิวของอาหาร และใช้ในการควบคุมแมลงที่ผิวของอาหารด้วย โอโซนสามารถกำจัดรสชาติที่ไม่พึงประสงค์อันเกิดจากแบคทีเรียได้ และสามารถกำจัดแก๊สเอทิลีนเพื่อยืดอายุการสุกของผลไม้ได้ ดังนั้นในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาโอโซนได้รับการยอมรับว่าเป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อที่มีประสิทธิภาพสูงในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป ได้มีการใช้โอโซนในการปรับปรุงน้ำใช้และน้ำใช้ในกระบวนการผลิตอาหาร ในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้โอโซนในกระบวนการผลิตน้ำดื่มในภาชนะที่ปิดสนิท และใช้ในกระบวนการผลิตอาหารหลายชนิด จากการศึกษาพบว่าโอโซนมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งมีการนำมาใช้เป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรค ที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในอาหาร การศึกษาในปี 1840 พบว่าโมเลกุลของโอโซนประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 3 อะตอม

โอโซนสามารถใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่เก็บรักษาในห้องเย็นได้ โดยสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อรา แบคทีเรียในอากาศ ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้ ที่ความเข้มข้นของโอโซนต่ำๆ และยัง สามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ผิวของอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้ ในปี 1933 มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โอโซนในการเก็บรักษาผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล มันฝรั่ง มะเขือเทศ สตอเบอร์รี่ บร็อคเคอรี่ แพร์ Canberries ส้ม พืช องุ่น ข้าวโพด และถั่วเหลือง ในปี 1995 Barth et al ได้ศึกษาการใช้โอโซนในการเก็บรักษา Blackberries โดยเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยวถึงการเก็บรักษา โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโอโซน 0.3 ppm ผลพบว่าสามารถยืดอายุการเก็บให้นานขึ้น 20 % โดยไม่ทำให้เกิดตำหนิและไม่ทำให้สีของผลเปลี่ยนแปลงจากการเก็บรักษานาน 12 วัน การเก็บรักษาผักและผลไม้โดยใช้โอโซนนี้เป็นวิธีที่ต้ออีกวิธีหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษาสตอเบอร์รี่ เพราะสตอเบอร์รี่นั้นเสื่อมเสียได้ง่ายในสภาวะที่เปียก แต่ถ้าเก็บรักษาสตอเบอร์รี่ ลาสเบอร์รี่ Current และองุ่น โดยใช้โอโซน สามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาขึ้นเป็น 2 เท่า ที่มีความเข้มข้นของโอโซน 2-3 ppm และมีการปล่อย โอโซนไม่กี่ชั่วโมงต่อวัน ในปี 1968 Noton et al พบว่าการใช้อุณหภูมิต่างๆ ประกอบการใช้โอโซนสามารถควบคุมการเจริญของเชื้อราได้ดี ในปี 1953 Kuprianoff พบว่าสามารถยืดอายุการเก็บรักษาแอปเปิ้ลได้นานขึ้นหลายสัปดาห์โดยการใช้โอโซน 2-3 cm<sup>3</sup> / m<sup>3</sup> โดยปล่อยโอโซนประมาณ 1-2 ชั่วโมง/วัน แต่ถ้าใช้โอโซนที่ปริมาณ 10 cm<sup>3</sup> / m<sup>3</sup> มีผลทำให้แอปเปิ้ลเกิดการเสื่อมเสีย Baranovskaya et al (1979) พบว่าสามารถยืดอายุการเก็บรักษามันฝรั่งได้นานขึ้นถึง 6 เดือน โดยไม่มีผลต่อคุณภาพของมันฝรั่ง โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 6- 14 องศาเซลเซียส ที่ความชื้น 93-97 % และที่ปริมาณความเข้มข้นของโอโซน 3 ppm แต่สิ่งที่สำคัญคือโอโซนสามารถใช้ในห้องเย็นที่ใช้เก็บรักษาผักและผลไม้เพื่อป้องกันการสุก โดยโอโซนจะไปลดการผลิตแก๊สเอทิลีนที่ผิวและผลไม้ผลิตขึ้นและมีผลทำให้การสุกของผักและผลไม้ช้าลงได้

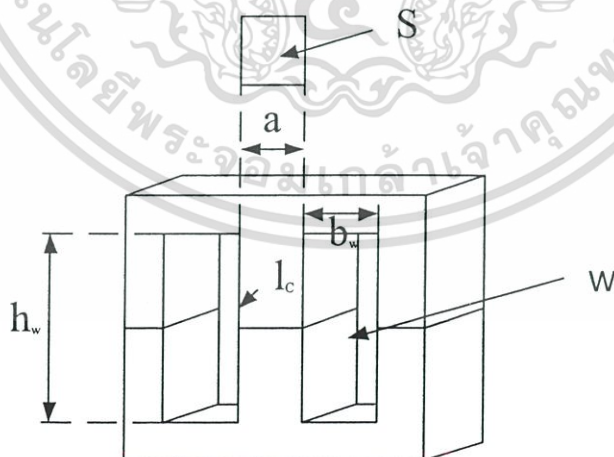
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 คุณสมบัติของโอโซน

1. มีความสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าแก๊ส โดยการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง
2. โอโซนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผนังเซลล์ของจุลินทรีย์
3. โอโซนสามารถสลายตัวได้เองและไม่มีสารพิษตกค้าง
4. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าคลอรีนและมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อโรคอื่นๆ ที่ดีกว่าคลอรีนและสารทำความสะอาดอื่นๆ
5. โอโซนเกิดจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากแสงแดด และถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ในทางการค้าจากแสง UV ที่ความถี่ 185 nm หรือ Corona discharge โดยทั่วไปจะพบ Corona discharge ที่ความเข้มข้นของอากาศ 1-3% w / w และที่ความเข้มข้นของออกซิเจน 2-12% w / w

### 2.3 หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดัน

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่อิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์ขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 310 และมีความถี่สวิตซ์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แกนของหม้อแปลงที่ใช้งานความถี่สูงโดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมียุคสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ



รูปที่ 2.9 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE

กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำเป็นแผงวางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้ ขดลวดปฐมภูมิ, ขดลวดทุติยภูมิ, และแกนเฟอร์ไรท์ ในการออกแบบหม้อแปลงนั้นเราจะมีขั้นตอนทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่า  $A_p$  โดยที่

$$A_p = \frac{V_1 \times I_{1,rms} + V_2 \times I_{2,rms}}{4 \times k \times B_{max} \times J \times f} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $A_p$  = Area Product ( $m^5$ )

$V_1$  = แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (V)

$V_2$  = แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (V)

$I_{1,rms}$  = กระแสเฉลี่ยรากที่สองด้านปฐมภูมิ (A)

$I_{2,rms}$  = กระแสเฉลี่ยรากที่สองด้านทุติยภูมิ (A)

$k$  = ค่าขีดจำกัดของหน้าต่าง มีค่า 0.3-0.9

$B_{max}$  = ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $Wb/m^2$ )

$J$  = ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $A/m^2$ )

$f$  = ความถี่สวิตชิง (Hz)

2. เมื่อหาค่า  $A_p$  จากสมการที่ 2.8 เรียบร้อยแล้วให้ไปเลือกขนาดของแกนโดย

$$A_p = S \times W \quad (2.9)$$

เมื่อ

$S$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ ( $m^2$ )

$W$  = พื้นที่หน้าต่าง (Window Area) ( $m^2$ )

ซึ่งการที่จะใช้แกนได้นั้นเราจะต้องเลือกแกนที่ทำให้ค่า  $A_p$  ในสมการที่ 2.9 มีค่ามากกว่า 2.8 ให้ได้ จึงจะสามารถใช้แกนนั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำนวณหาจำนวนรอบของลวดตัวนำ ( $N_1, N_2$ )

$$N_1 = \frac{V}{4 \times f \times B_{\max} \times S} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $N_1$  = จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ

$V$  = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)

$f$  = ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน (Hz)

$B_{\max}$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ (T)

$S$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ ( $m^2$ )

ในกรณีที่กำหนดพิกัดแรงดัน ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้แล้ว สามารถใช้สมการ (2.10) เพื่อคำนวณจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิได้

$$N_2 = N_1 \times \frac{V_2}{V_1} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $N_2$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$N_1$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

$V_2$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (V)

$V_1$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (V)

4. คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ ( $A_{w1}, A_{w2}$ )

จากสมการ 
$$A_{w1} = \frac{I_1}{J} \quad (2.12)$$

และ 
$$A_{w2} = \frac{I_2}{J} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$A_{w1}$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดด้านปฐมภูมิ

$A_{w2}$  = ขนาดหน้าตัดของลวดด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการหาค่า Skin depth ( $\delta$ ) และตรวจสอบค่าว่า  $A_{w1}, A_{w2}$  ในข้อ 4 สามารถใช้ได้หรือไม่

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \times \rho}{\mu \times \omega}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$\delta$  = Skin depth (m)

$\rho$  = สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) (Simen/m)

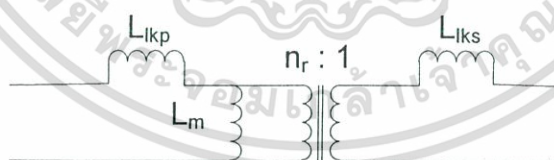
$\mu$  = Permeability (T.m/A)

$\omega$  = ความถี่เชิงมุมไฟฟ้า (รอบ/วินาที)

พอได้ค่า Skin depth เราจะสามารถเลือกเบอร์ลวดได้โดย เบอร์ลวดที่ใช้จะต้องมีรัศมีเล็กกว่าค่า Skin depth ซึ่งถ้าเราเลือกเบอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าค่า Skin depth มาใช้เลยอาจจะทำให้สายนั้นไม่สามารถทนกระแสได้ ดังนั้นเราต้องนำสายเบอร์ที่เราเลือกนั้นมาผ่านการตีเกลียวเพื่อให้สามารถทนกระแสได้

ซึ่งพอเราเราพันหม้อแปลงเสร็จแล้วเราจะต้องนำหม้อแปลงไปทดสอบเพื่อหาตัวแปรค่าต่างๆที่อยู่ในหม้อแปลงที่เราพันขึ้นดังหัวข้อที่ 2.3.1

### 2.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า [2]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์

$$L_{11} = L_{lkP} + L_m \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{22} = L_{lkS} + \frac{L_m}{n_{r1}^2} \tag{2.16}$$

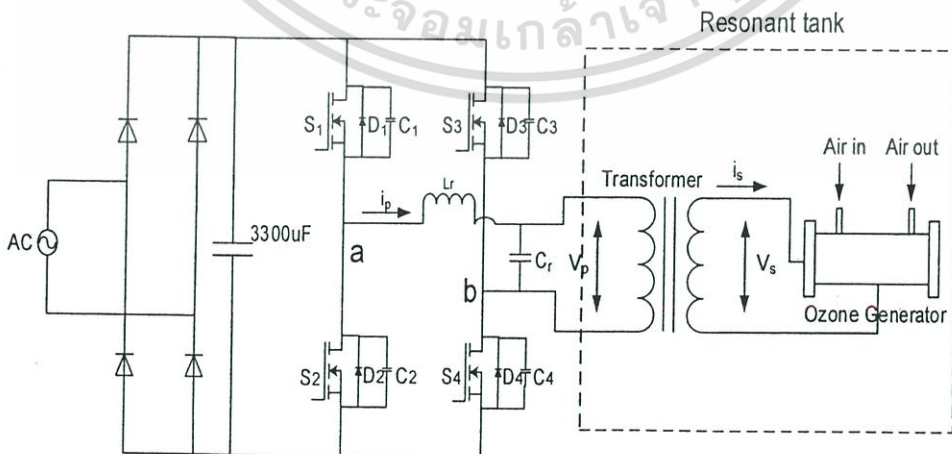
$$L_{11,S} = L_{lkP} + \frac{L_m n_{r1}^2 L_{lkS}}{L_m + n_{r1}^2 L_{lkS}} \tag{2.17}$$

$$L_{22,s} = L_{lkS} + \left( \frac{L_m L_{lkP}}{L_m + L_{lkP}} \right) \frac{1}{n_{r1}^2} \tag{2.18}$$

$$n_{r1} = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} \tag{2.19}$$

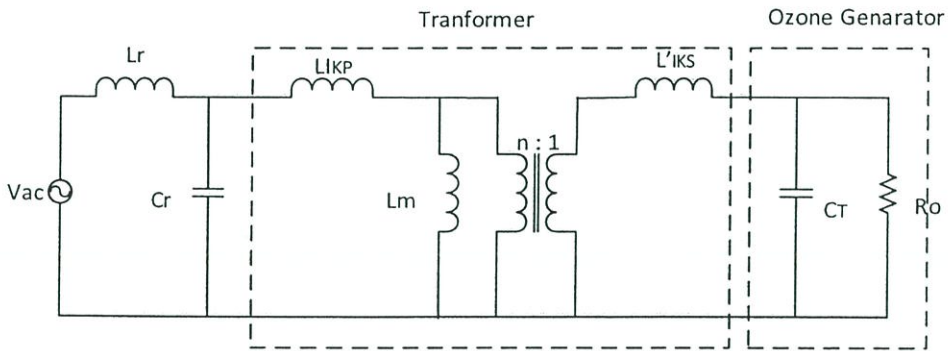
- เมื่อ
- $L_{11}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อเปิดด้านทุติยภูมิ (H)
  - $L_{11,s}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อปิดด้านทุติยภูมิ (H)
  - $L_{22}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านทุติยภูมิเมื่อเปิดด้านปฐมภูมิ (H)
  - $L_{22,s}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลงวัดด้านทุติยภูมิเมื่อปิดด้านปฐมภูมิ (H)
  - $L_{lkP}$  = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ (H)
  - $L_m$  = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน
  - $L_{lkS}$  = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ (H)

2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนาน



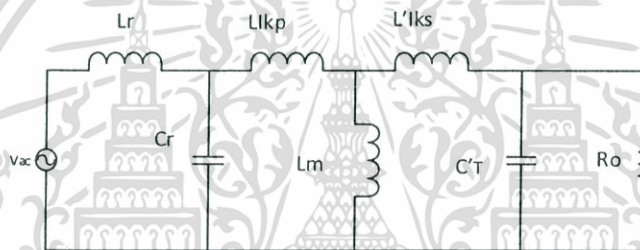
รูปที่ 2.11 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของระบบ

วงจรสมมูลโดยประมาณเมื่อย้ายค่าต่างๆทางด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของระบบทางด้านปฐมภูมิ

ในการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิไปสู่ปฐมภูมิขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ ( $N_p$ ) ต่อจำนวนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ( $N_s$ ) ยกกำลังสอง แสดงในสมการ (2.20) (2.21) และ (2.22)

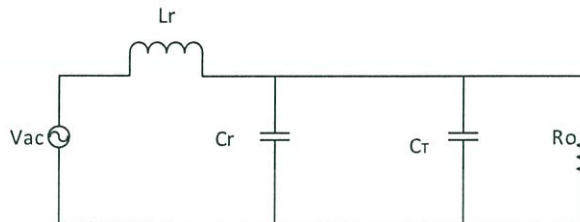
$$L'_{iks} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \times L_{iks} \tag{2.20}$$

$$R'_o = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \times R_o \tag{2.21}$$

$$C'_T = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 \times C_T \tag{2.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $L'_2$  = ค่าเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (H)  
 $R'_o$  = ค่าความต้านทานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (Ω)  
 $C'_T$  = ค่าเก็บประจุไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (F)



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลเรโซแนนซ์

$$L_r = \frac{(L_r \times (L_{lkr} + L'_{lks}))}{L_r + L_{lkr} + L'_{lks}} \quad (2.23)$$

$$C_{eq} = C'_T // C_r \quad (2.24)$$

$$R_{eq} = R_o \quad (2.25)$$

เมื่อ

$L_r$  = ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเรโซแนนซ์

$C_{eq}$  = ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล

$R_{eq}$  = ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

$C_r$  = ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์

จากรูปที่ 2.14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์

$$\frac{V_{ab}}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 - 2 \frac{X_{L_r}}{X_{C_{eq}}}) + j4 \frac{X_{L_r}}{R_{eq}} (1 - \frac{X_{L_r}}{X_{C_{eq}})}}} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $X_{C_{eq}} =$  ค่ารีแอกแตนซ์ของ  $C_{eq}$   
 $X_{L_r} =$  ค่ารีแอกแตนซ์ของ  $L_r$   
 $R_{eq} =$  ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

จัดรูปสมการที่ (2.26) ให้อยู่ในรูป  $\omega_s$  จะได้

$$\frac{V_{ab}}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 - 2\omega_s^2 L_r C_{eq})^2 + \frac{16\omega_s^3}{R^2} \sqrt{\frac{L_r^3}{C_{eq}}} (1 - \omega_s^2 L_r C_{eq})^2}} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\omega_s =$  ความถี่เชิงมุมสวิตซ์

จากรูปที่ 2.14 ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{eq}}} \quad (2.28)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_{eq}}} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\omega_0 =$  ความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์

$f_0 =$  ความถี่เรโซแนนซ์

$L_r =$  ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเรโซแนนซ์

$C_{eq} =$  ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล

ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: Q) ค่าตัวประกอบคุณภาพเป็นค่าที่นิยามเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ในการเลือกความถี่และการสูญเสียภายในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

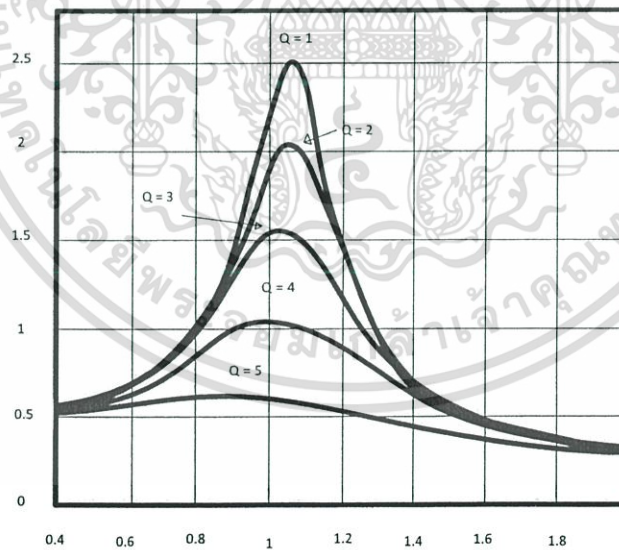
จากรูปที่ 2.14 สามารถหาตัวประกอบคุณภาพได้จาก สมการที่ (2.30)

$$Q = \frac{\omega_0 L_r}{R} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $Q$  = ค่าตัวประกอบคุณภาพ

จะได้ อัตราขยายกับค่าบรรทัดฐาน( $f_s/f_0$ ) ที่ค่า  $Q$  ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.15 โดยที่  $f_s$  = ความถี่สวิตซ์ และ  $f_0$  = ความถี่เรโซแนนต์

$$\frac{V_{ab}}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - 2\left(\frac{\omega_s}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 16\left(\frac{\omega_s}{\omega_0}\right)Q^2\left(1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_0}\right)^2\right)^2}} \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.15 รูปแบบการจำลองค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่าง  $V_{ab}/V_o$  กับ  $f_s/f_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

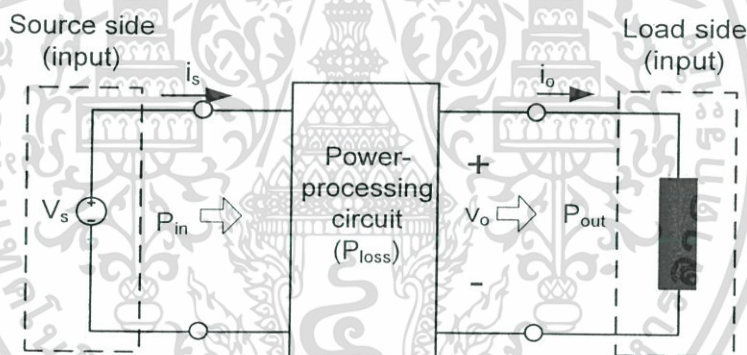
## 2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า

พิจารณาจากรูปที่ 2.16 แสดงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด ประสิทธิภาพของวงจรในรูปที่ 2.17 คำนวณได้จากสมการที่ (2.32) หรือ (2.33)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.32)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (2.33)$$

ถ้าวจรกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งอุดมคติไม่ว่าจะทำงานในสถานะ “on” หรือ “off” ก็จะไม่มีความสูญเสียเกิดขึ้นในส่วนของตัวอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร เช่น ตัวคาปาซิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวหม้อแปลง ดังนั้นประสิทธิภาพทั้งหมดของวงจรที่ทำงานส่งผ่านกำลังก็จะมีค่าเต็ม 100%



รูปที่ 2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุต

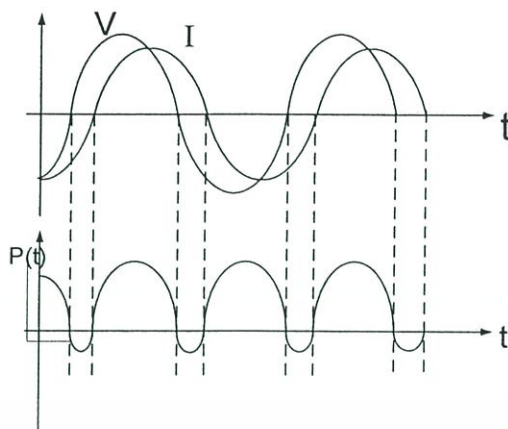
### 2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ  $p(t)$  ที่ส่งไปให้โหลดนั้นคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันชั่วขณะกับกระแสชั่วขณะที่ไหลผ่านโหลด ดังสมการที่ (2.34)

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad (2.34)$$

รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 2.17 ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นมาเป็นค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ที่เวลาที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กำลังไฟฟ้า

### 2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

ถ้ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีคาบเวลาซ้ำๆ กัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า จะหาได้จากสมการที่ (2.35) หรือ (2.36)

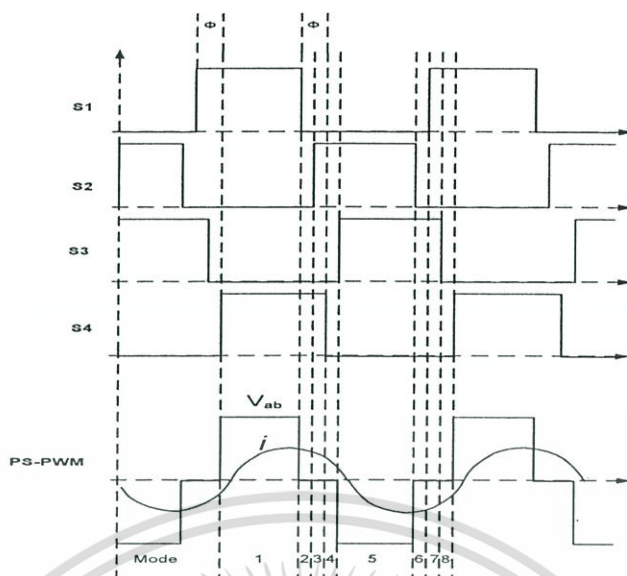
$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.35)$$

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (2.36)$$

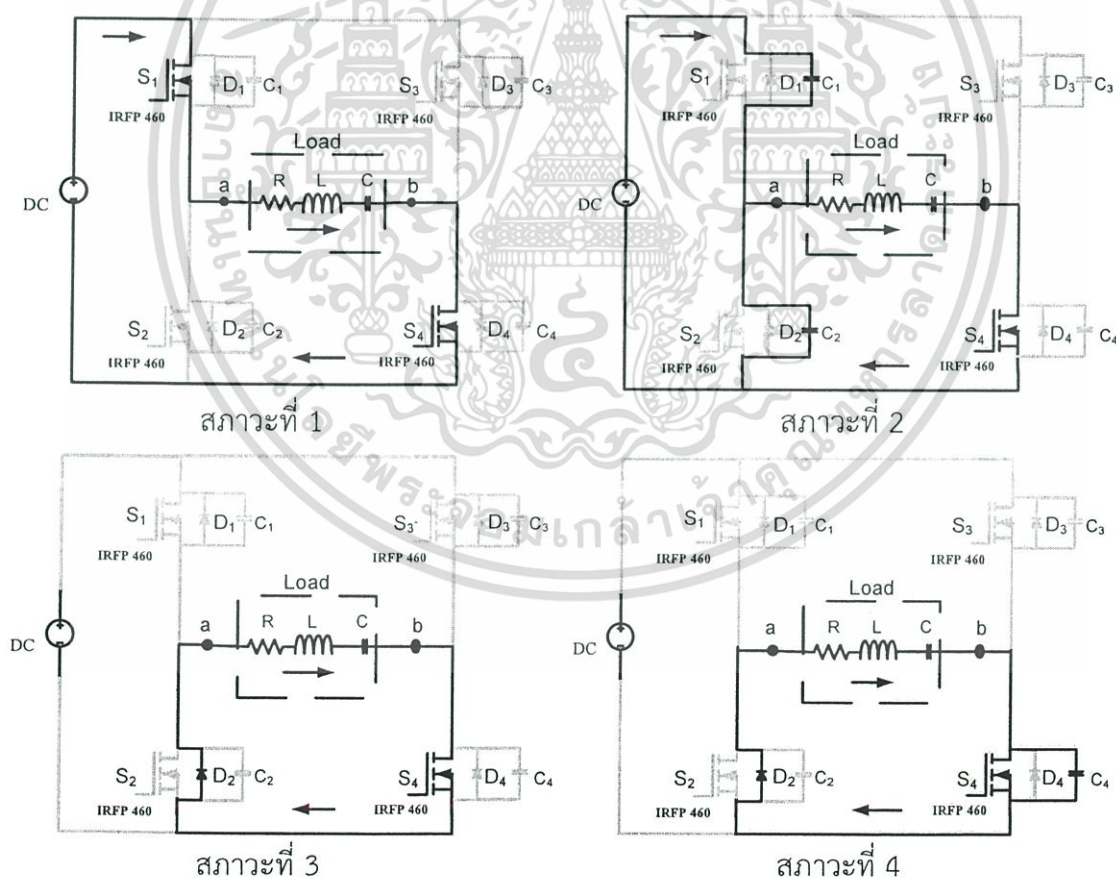
### 2.6 พีเอส-พีดีบีเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full – Bridge Converter)

พีดีบีเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Phase – Shift PWM Full – Bridge Converter) ดังรูปที่ 2.18 มีโครงสร้างเหมือนกับ พีดีบีเบิลยูเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ แต่มีลักษณะการขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์แตกต่างกัน โดยปกติสัญญาณ PWM จะทำงานเป็นคู่ๆ ให้  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแสโดยที่  $S_2$  และ  $S_3$  ยังคงหยุดนำกระแสอยู่ สลับกับการให้  $S_1$  และ  $S_4$  หยุดนำกระแส แล้วค่อยให้  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ แต่ PS-PWM ช่วงเวลา  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแส  $S_1$  จะนำกระแส ก่อน  $S_4$  เป็นเวลา  $\Phi$  และช่วงหยุดนำกระแส  $S_4$  ก็จะช้ากว่า  $S_1$  เพราะช่วงนำกระแสช้ากว่า ส่วน  $S_2$  และ  $S_3$  ก็เหมือนกัน ช่วงนำกระแส  $S_3$  จะช้ากว่า  $S_2$  เป็นเวลา  $\Phi$  และช่วงหยุดนำกระแส  $S_3$  ก็จะช้ากว่า  $S_2$

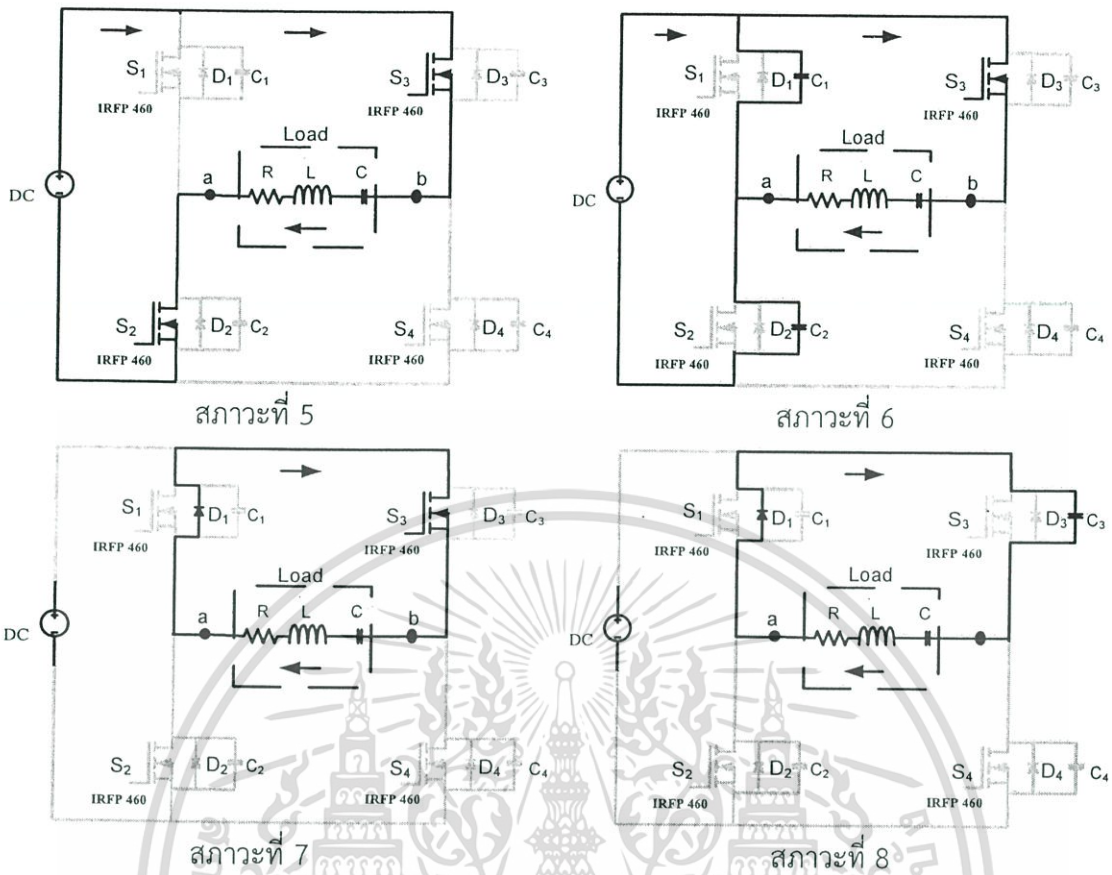
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การทำงานของ PS-PWM ที่สถานะ 1 ถึง 8

การทำงานของ PS-PWM ได้เป็น 8 สถานะโดยการกำหนดการทำงานจาก สัญญาณขั้วเกิดของอุปกรณ์สวิตช์ ดังนั้นในรูปที่ 2.18 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่จุด ab มีลักษณะคล้ายสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยที่จุดที่แรงดันเป็นศูนย์ เกิดจากการเลื่อนเฟสขั้วเกิดของคู่สัญญาณอุปกรณ์สวิตช์ วงจรของแหล่งจ่ายกำลังไม่ครบรอบ ทำให้แรงดันไม่สามารถปรากฏที่เอาต์พุต สัญญาณแรงดันที่ได้จึงเป็นศูนย์ วงจรแบบเลื่อนเฟสที่สถานะการทำงานทั้ง 8 ดังรูปที่ 2.19

สถานะที่ 1 สวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน  $S_1$  ไปสู่โหลด และไหลผ่าน  $S_4$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ  $V_{ab}$  เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายกระแสตรง  $V_{DC}$  โดยที่แรงดันตกคร่อม  $S_1, C_1$  และ  $D_1$  เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อม  $S_2, C_2$  และ  $D_2$  เท่ากับ  $V_{DC}$  แรงดันตกคร่อม  $S_3, C_3$  และ  $D_3$  เท่ากับ  $V_{DC}$  และ แรงดันตกคร่อม  $S_4, C_4$  และ  $D_4$  เท่ากับศูนย์

สถานะที่ 2 สวิตช์  $S_1$  หยุดนำกระแส ในขณะที่  $S_4$  ยังคงนำกระแสอยู่ ตามรูปแบบของสัญญาณขั้วเกิดที่จ่ายให้  $S_4$  กระแสที่ไหลต่อเนื่องผ่าน  $S_1$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_1$  แทน กระแสไหลเอ็กส่าร์นเป็นเอ็กส่าร์นที่สวงนไวสาหรับการเซิงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ขะยีนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่าน  $C_1$  ไปสู่อโหลด และ  $S_4$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร ในขณะที่เดียวกัน แรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  ลดลง เพราะ  $C_2$  ต่อขนานอยู่กับโหลด เมื่อ  $S_1$  หยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมโหลดลดลง  $C_2$  สามารถคายประจุผ่านโหลด ผ่าน  $S_4$  ครบวงจร

สภาวะที่ 3 ช่วงเวลาฟรีวิล (Free Wheeling) ในสภาวะนี้แหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสให้โหลดได้เพราะ  $S_1$  เปิดวงจรและ  $C_1$  เก็บประจุเต็ม ช่วงเวลานี้พลังงานที่สะสมในโหลด ไหลผ่าน  $S_4$  ไปสู่  $D_2$  กลับมาที่โหลดครบวงจร ช่วงเวลาฟรีวิลนี้ไดโอด  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัสทำให้ครบวงจรคืนพลังงาน เพื่อลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตซ์จากการได้รับฟอร์เวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัดได้ และแรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากสวิตซ์  $S_2$  ได้ปิดวงจร  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัส

สภาวะที่ 4 กระแสที่ไหลผ่าน  $S_4$  เปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_4$  ไหลผ่าน  $D_2$  กลับสู่อโหลด เนื่องจาก  $S_4$  เปิดวงจรพลังงานที่สะสมในโหลด ลดลงเกือบหมด และ  $S_2$  นำกระแส โดยที่  $S_4$  หยุดนำกระแส

สภาวะที่ 5  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสไหลผ่าน  $S_3$  ไปสู่อโหลดเมื่อกระแสไหลผ่านโหลด จะเกิดการสะสมพลังงาน จากนั้นโหลดผ่าน  $S_2$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหลด  $V_{ab}$  เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายแต่มีค่าติดลบเพราะกลับขั้วกับสภาวะที่ 1 โดยที่แรงดันตกคร่อม  $S_1$ ,  $C_1$  และ  $D_1$  เท่ากับ  $V_{DC}$  แรงดันตกคร่อม  $S_2$ ,  $C_2$  และ  $D_2$  เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อม  $S_3$ ,  $C_3$  และ  $D_3$  เท่ากับศูนย์ และ แรงดันตกคร่อม  $S_4$ ,  $C_4$  และ  $D_4$  เท่ากับ  $V_{DC}$

สภาวะที่ 6  $S_2$  หยุดนำกระแส ในขณะที่  $S_3$  ยังได้รับสัญญาณแรงดันขั้วเกิดและนำกระแสอยู่ในกรณีที่โหลดสะสมพลังงานกระแสจะไม่หยุดไหลอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ ลดลง ดังนั้นกระแสไหลต่อเนื่องที่ผ่าน  $S_2$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_2$  แทน  $S_2$  ที่เปิดวงจร แรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ตัวมันถูกชาร์จประจุจากกระแสโหลดที่ไหลผ่าน ตัวเหตุที่มันต่ออนุกรมกับ  $C_1$  ซึ่งเป็นตัวแบ่งแรงดันอีกครั้งที่เหลือ กระแสไหลผ่าน  $S_3$  ไปสู่อโหลด ครบวงจร บางส่วนจะไหลผ่าน  $C_2$  ไปยังแหล่งจ่ายครบวงจร

สภาวะที่ 7 ช่วงฟรีวิล เนื่องจาก  $S_2$  เปิดวงจร ตัดทางเดินกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงออก มาเป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $D_1$  ไปสู่  $S_3$  ครบวงจร ช่วงเวลาฟรีวิลนี้  $D_1$  นำกระแสเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า ที่ขาขอส เริ่มสูงกว่าขาเดรน ในกรณีนี้แรงดันตกคร่อมสวิตซ์จะถูกจำกัดให้เท่าแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อมไดโอดลักษณะที่เกิดขึ้นแบบนี้ ช่วยลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตซ์จากการได้รับฟอร์เวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัด และเนื่องจาก  $S_3$  ปิดวงจรและ  $D_1$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัส ทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 8  $S_1$  นำกระแส และ  $S_3$  หยุดนำกระแส กระแสไหลผ่าน  $S_3$  เปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_3$  กลับสู่โหลด และแรงดันที่ตกคร่อม  $C_3$  ค่อยๆเพิ่มจากศูนย์จนถึงค่าๆ หนึ่ง โหลดต่อขนานกับ  $C_3$  ดังนั้น แรงดันตกคร่อมจึงมาค่าเท่ากัน ในสภาวะนี้พลังงานที่สะสมในโหลดเกือบหมด และ หลังจากสภาวะนี้แล้ว คอนเวอร์เตอร์จะกลับไปเริ่มการทำงานที่สภาวะที่ 1 อีกครั้ง เป็นวงรอบการทำงานต่อไป

## 2.7 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนเริ่มจากการคำนวณ อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนดักชัน 2 ชั้น กระบวนการที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซน ผลของความสัมพันธ์ไฟฟ้า ต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ การใช้โอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ สมการที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความจุไฟฟ้าและความเครียดของสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนดักชัน 2 ชั้น ทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน อธิบายเกี่ยวกับคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนาน และการวัดกำลังไฟฟ้า อธิบายการทำงานของวงแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



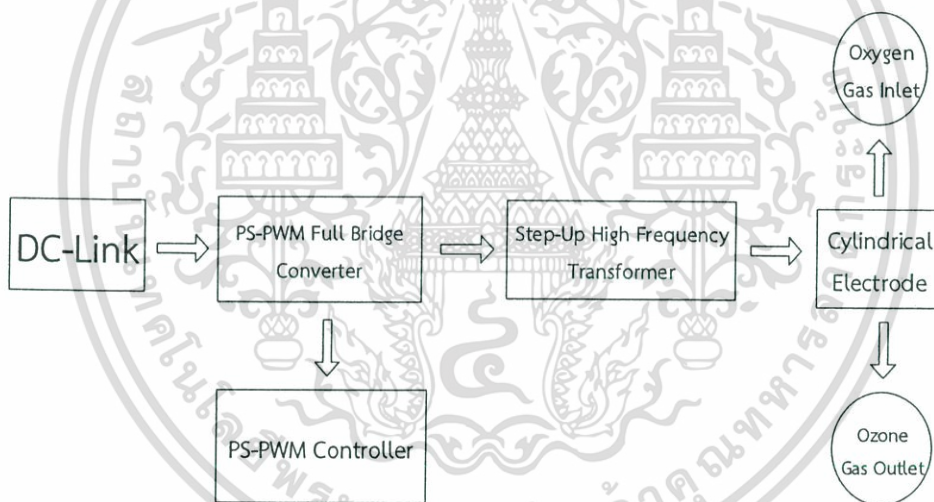
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลักๆ แล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มกรบอกร่วมกัน ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆของโหลดเสียก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่นๆที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มกรบอกร่วมกันจำนวน 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นถึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.2 อิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มกรบอกร่วมกันแบบ 2 ชั้น

ในบทความนี้ได้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุฉนวนชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผล 5 ข้อดังนี้คือ

- 1) แก้วมีคุณสมบัติในการทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง
- 2) แก้วที่คุณภาพการผลิตดีจะมีผิวเรียบและไม่มีฟองอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดการเบรกดาวนในแก้วได้
- 3) สามารถทนการชดชืดและไม่เกิดริ้วรอยได้ง่าย

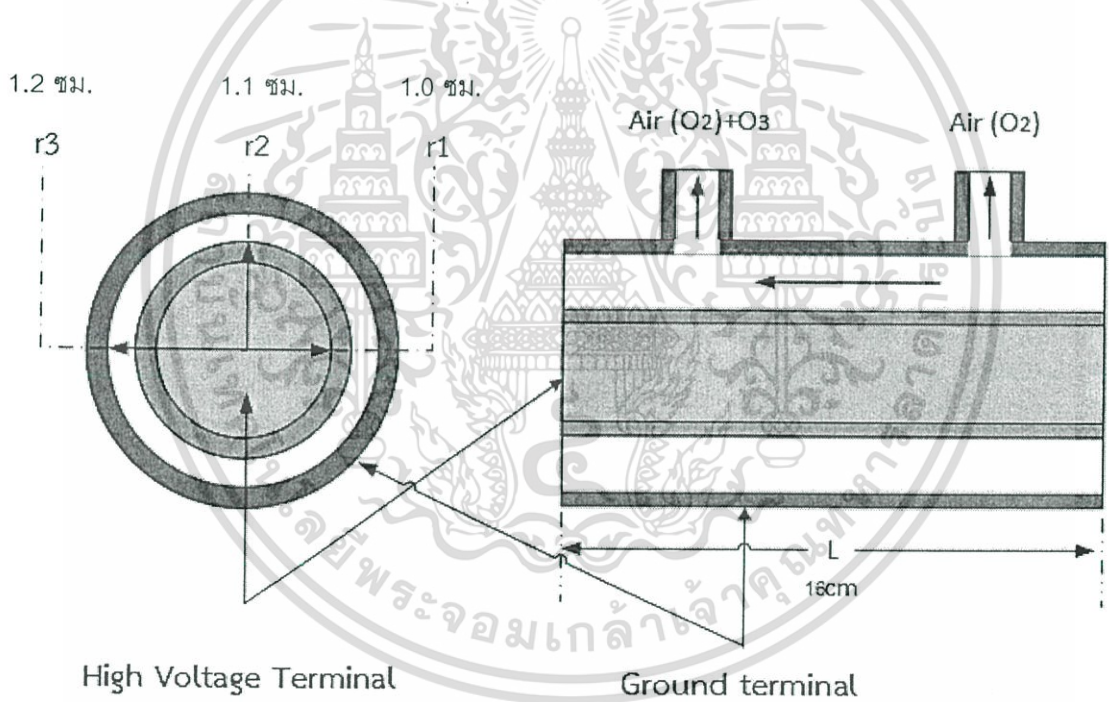
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ในกระบวนการผลิตแก้วต้องให้ความร้อนสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแก้ว ดังนั้นแก้วจึงทนความร้อนได้สูงมากก่อนที่จะหลอมละลายเสียหาย

5) แก้วเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนด้วยเช่นกัน

ในส่วนของฉนวนชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศเพื่อที่จะสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดได้ ตัวนำด้านในใช้ลวดสแตนเลสและตัวนำด้านนอกแผ่นสแตนเลสที่นำมาติดกับหลอดแก้วด้านนอก รูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 3.2

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดนั้นก็คือน้ำหนักและปริมาตรช่องว่างอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในเลือกจากและด้านนอกเพราะจะส่งผลต่อการออกแบบชุดกำลังไฟฟ้า การกำหนดขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดจะขนาดของหลอดแก้วด้านในและด้านนอกเป็นหลัก เพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดแก้วมีค่าให้เลือกไม่มากนัก



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น

ในงานวิจัยนี้เลือกหลอดแก้วด้านในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 2.2 ซม., หนา = 0.1 ซม., และยาว = 16 ซม. ในส่วนของหลอดแก้วด้านนอก เลือกใช้สแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 2.4 ซม., หนา 0.1 ซม. และยาว = 16 ซม. เมื่อนำหลอดแก้วซ้อนกัน ดังนั้นจะได้ค่า  $r_1 = 1.1$  ซม.,  $r_2 = 1.0$  , และ  $r_3 = 1.2$  ซม. ค่าเปอร์มิตติวิตีของแก้ว ( $\epsilon_{r1}$ ) อยู่ระหว่าง 5-10 และของอากาศ ( $\epsilon_{r2}$ ) ประมาณเท่ากับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัวแปรมาคำนวณหาปริมาตรของช่องว่างอากาศ (Vol.) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ( $m^3$ ) จากสมการ (3.1)

$$\text{Vol} = \pi \times (r_3 - r_2)^2 \times l \quad (3.1)$$

$$\text{Vol} = \pi \times (0.012 - 0.011)^2 \times 0.16$$

$$\text{Vol} = 5.026 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

จากหัวข้อ 2.2 ย่านพลังงานที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซนอยู่ในช่วง 1.169 kWh/ $m^3$  เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาย่านพลังงาน (W) ที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์ได้ดังนี้

$$W = 1.169 \times 10^3 \times 5.0265 \times 10^{-7} \text{ Wh}$$

$$\therefore W = 0.588 \text{ mWh}$$

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) ได้จากสมการที่ (3.2) พลังงานในสนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศ ในกรณีที่สนามไฟฟ้าแปรตามเวลานั้น สามารถวิเคราะห์ในสภาพสนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เนื่องจากในขณะที่ขนาดของแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าๆ หนึ่งก่อนถึงค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซได้ และไม่สามารถเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่และชนกับโมเลกุลก๊าซในช่องว่างอากาศให้แตกตัวได้ ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน ( $W_i$ ) ได้จึงเกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง เพราะฉะนั้นสามารถอินทิเกรตสมการ (3.2) ได้ดังนี้ [2]

$$W_i = \frac{1}{2} \times \int \epsilon_0 \times \epsilon_r \times E^2 \times d\text{Vol} \quad (3.2)$$

$$W_i = \frac{1}{2} \times \epsilon_0 \times \epsilon_r \times E^2 \times \int d\text{Vol}$$

$$\frac{2 \times W_i}{\epsilon_0 \times \epsilon_r} = E^2 \times \text{Vol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E)

$$E = \sqrt{\frac{2 \times W_i}{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times Vol}} \quad (3.3)$$

$$E = \sqrt{\frac{2 \times 0.588 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 5.026}} = 16.25 \text{ kV/cm}$$

เมื่อได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอซอนแล้วจึงคำนวณหาแรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโทรดได้จากสมการ (2.7) เราสามารถหาค่าแรงดันที่จะทำให้เกิดก๊าซไอซอนโดยการแทนค่าดังนี้

$$V = \frac{E \times r_2 \times (\epsilon_{r1} \times \ln(\frac{r_3}{r_2}) + \epsilon_{r2} \times \ln(\frac{r_2}{r_1}))}{\epsilon_{r1}} \quad (3.4)$$

$$V = \frac{16.25 \times 10^3 \times 1.1 \times (8 \times \ln \frac{1.2}{1.1} + 1 \times \ln \frac{1.1}{1.0})}{8}$$

เพราะฉะนั้น

$$V = 1.768 \text{ kV}$$

จึงได้ว่าค่าแรงดันที่ทำให้อากาศเกิดการแตกตัวจาก  $O_2$  เป็น  $O_3$  จะต้องมามีค่ามากกว่าเท่ากับ 1.768 kV  
ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กโทรดจากสมการ (2.1) และ (2.2)  
โดยแทนค่าจะได้ค่าทางทฤษฎีดังนี้

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.16}{\ln \frac{1.1}{1.0}} = 7.471 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.16}{\ln \frac{1.2}{1.1}} = 8.183 \times 10^{-10} \text{ F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 404.335 \text{ pF}$$

และจากการวัดค่าจริงด้วยเครื่อง Impedance Analyzer ได้ว่าที่ ความถี่ 50 kHz จะได้ค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุดังนี้

ค่าความต้านทานของหลอดไอโซน คือ

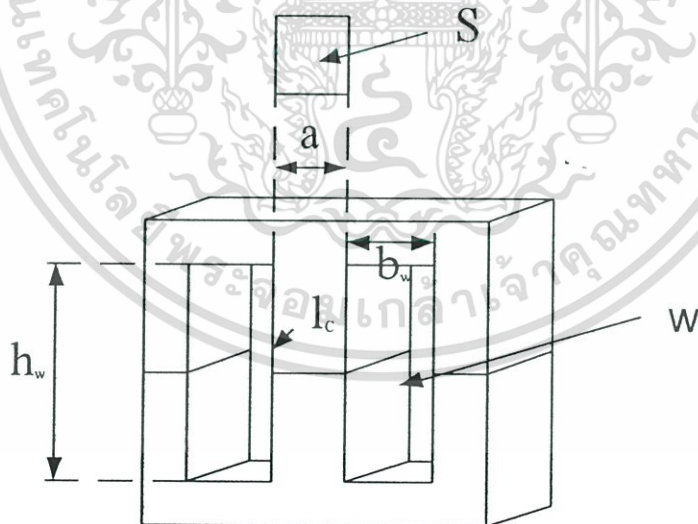
$$R_0 = 79.983 \text{ k}\Omega$$

และ ค่าของตัวเก็บประจุของหลอดไอโซน คือ

$$C_T = 405 \text{ pF}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการใช้ทฤษฎีหาค่าตอบกับค่าที่ได้จากการใช้เครื่อง Impedance Analyzer คิดจริงๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

### 3.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบยกรระดับแรงดัน



รูปที่ 3.3 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยชิ้นนี้เราจะเลือกแกนเฟอร์ไรท์ในการสร้างหม้อแปลง เนื่องจากเป็นแกนชนิดที่ทำงานได้ดีในย่านความถี่สูง และในการหาขนาดของแกนนั้นซึ่งขนาดกำลังของแกนนั้นเรากำหนดให้สามารถจ่ายกำลังสูงสุดได้ที่ 1500 W และเราจะใช้วิธี  $A_p$  Approach ในการออกแบบ ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า  $A_p$  โดยที่

$$A_p = \frac{V_1 \times I_{1,rms} + V_2 \times I_{2,rms}}{4 \times k \times B_{max} \times J \times f}$$

ซึ่ง แรงดันด้านปฐมภูมิจะมีคือ  $V_1 = 310 \text{ V}$  และแรงดันทุติยภูมิจะต้องมีค่า  $V_2 = 1.8 \text{ kV}$

ค่า  $I_{1,rms} = 5 \text{ A}$  และ  $I_{2,rms} = 0.5 \text{ A}$ , ค่าขีดจำกัดหน้ากำหนดให้  $k = 0.3$ , กำหนดให้สนามแม่เหล็กของแกน  $B_{max} = 0.3 \text{ T}$ , ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $J = 4 \text{ A/mm}^2$  และทำงานที่ความถี่  $f = 24 \text{ kHz}$  ได้ว่า

$$A_p = 2.817 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

ซึ่งจะต้องหาแกนที่มีขนาด  $A_p \geq 2.1549 \times 10^{-8} \text{ m}^4$  จึงจะสามารถใช้กับวงจรนี้ได้

2. หาขนาดของแกนที่เหมาะสมในที่จะเลือกใช้ แกนแบบ EE-80 ซึ่งจะมีค่า  $S = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  และ  $W = 800 \text{ mm}^2$  จาก

$$A_p = S \times W$$

$$A_p = 3.2 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า  $A_p = 3.2 \times 10^{-7} \text{ m}^4$  มีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ในข้อที่ 1.  $2.817 \times 10^{-8} \text{ m}^4$  ดังนั้นเราสามารถเลือกใช้แกน EE-80 ได้

3. คำนวณหาจำนวนรอบของลวดตัวนำ ( $N_1, N_2$ )

จากสมการ 
$$N_1 = \frac{V_1}{4 \times B_{max} \times S \times f}$$

ได้ว่า 
$$N_1 = 26.9 \text{ รอบ}$$

ดังนั้นจึงให้  $N_1$  เป็น 27 รอบ ซึ่งพอได้  $N_1 = 27$  รอบ แล้วเราจะสามารถหา  $N_2$  ได้ดังนี้

$$N_2 = N_1 \times \frac{V_2}{V_1}$$

ได้ว่า 
$$N_2 = 162 \text{ รอบ}$$

ดังนั้นในข้อนี้จึงสรุปได้ว่าต้องพัน  $N_1 = 13$  รอบ และ  $N_2 = 162$  รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ ( $A_{w1}, A_{w2}$ )

จากสมการ  $A_{w1} = \frac{I_1}{J}$

และ  $A_{w2} = \frac{I_2}{J}$

ได้ว่า  $A_{w1} = 1.250 \text{ mm}^2$  (รัศมี  $r_1 = 0.6307 \text{ mm}$ )

$A_{w2} = 0.125 \text{ mm}^2$  (รัศมี  $r_2 = 0.199 \text{ mm}$ )

ซึ่งจากค่าที่คำนวณหาขนาดของลวดนี้เราไม่สามารถนำไปหาเบอร์ของลวดได้เลยจำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลของ Skin depth ก่อนในข้อที่ 5 ก่อน

5.ทำการหาค่า Skin depth ( $\delta$ ) และตรวจสอบค่าว่า  $A_{w1}, A_{w2}$  ในข้อ 4 สามารถใช้ได้หรือไม่

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \times \rho}{\mu \times \omega}}$$

$$\delta = 0.318 \text{ mm}$$

ดังนั้นในที่นี้เพื่อให้ผลของ Skin depth ไปจำเป็นต้องใช้เบอร์ของลวดที่มีรัศมีต่ำกว่า 0.318 mm

ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงเลือกลวดเบอร์ SWG#31 มี  $A_w = 0.08 \text{ mm}^2$  และมีรัศมี 0.16 mm

ดังนั้นเพื่อให้สามารถทนกระแสได้เพียงพอ

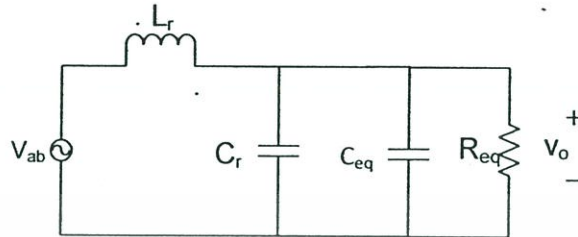
ในด้านปฐมภูมิจึงต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 20 รอบ ได้  $A_{w1} = 1.6 \text{ mm}^2$

ในด้านทุติยภูมิต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 2 รอบ ได้  $A_{w2} = 0.16 \text{ mm}^2$

ซึ่งเมื่อทำครบทั้ง 5 ขั้นตอนแล้วเราจะได้ว่าในการทำวิจัยนี้ เราสามารถใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE-80 โดยใช้ในด้านปฐมภูมิจึงต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 20 เส้น และนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกน 27 รอบ ในส่วนของด้านทุติยภูมิต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 2 เส้น และนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกนทั้งหมด 162 รอบ จะทำให้เราได้หม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราแรงดัน 310/ 1800 Volt.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนาน



รูปที่ 3.4 วงจรเรโซแนนต์

(2.15) จากรูปที่ 2.13 สามารถหาค่า  $L_r$  โดยนำที่ได้จากการทดสอบห้อมัแปลงไปแทนค่าในสมการที่

$$L_r = \frac{2.2 \times 10^{-3} \times (9.84 \times 10^{-6} + 57.70 \times 10^{-6})}{2.2 \times 10^{-3} + 9.84 \times 10^{-6} + 57.70 \times 10^{-6}}$$

เพราะฉะนั้น

$$L_r = 65.52 \mu\text{H}$$

สามารถคำนวณหาค่า  $C_{eq}$  ได้จากสมการที่ 2.29 โดยกำหนดให้ความถี่เรโซแนนต์เท่ากับ  $f_0 = 24\text{kHz}$  และ  $L_r = 65.52 \mu\text{H}$

$$C_{eq} = \frac{1}{(2 \times \pi \times (24000))^2 \times (65.52 \times 10^{-6})}$$

เพราะฉะนั้น  $C_{eq} = 0.671 \mu\text{F}$

สามารถคำนวณหาค่า  $C_r$  ได้จากสมการที่ 2.24 โดยกำหนดให้  $C_T = 12 \times 10^{-3}$

$$C_r = 0.671 \times 10^{-6} - 12.25 \times 10^{-12}$$

เพราะฉะนั้น  $C_r = 0.67 \mu\text{F}$

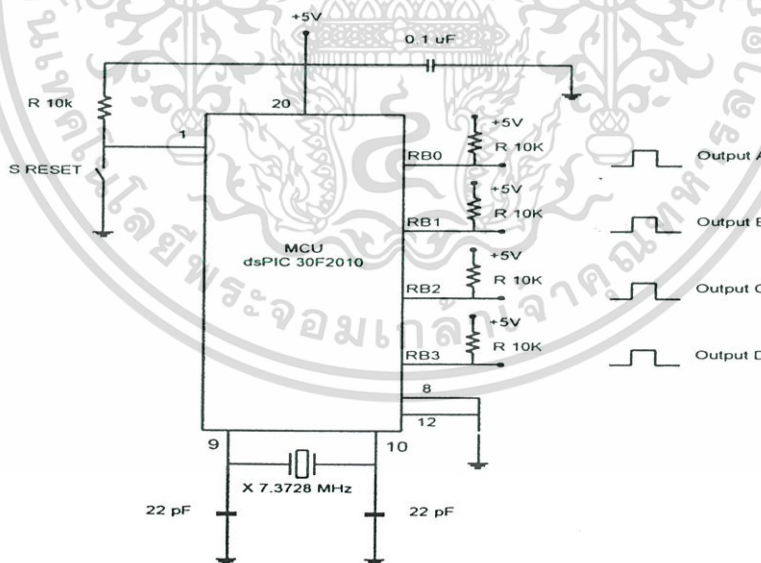
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบ

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไว้ไหลทางด้านปฐมภูมิ ( $L_{kp}$ )	9.84 $\mu$ H
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน ( $L_m$ )	1.54 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไว้ไหลทางด้านทุติยภูมิ ( $L_{ks}$ )	0.34 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเรโซแนนต์ ( $L_r$ )	0.671 $\mu$ H
อัตราส่วนรอบหม้อแปลง ( $n$ )	1/6
ความต้านทานสมมูล( $R_{eq}$ )	2221 $\Omega$
ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนต์ ( $C_r$ )	0.671 $\mu$ F
ความถี่สวิตชิง( $f_s$ )	24 kHz

### 3.5 วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณ

วงจรควบคุมที่ใช้สร้างสัญญาณ PS-PWM นั้นได้มาจากไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F4011 ดังรูปที่ 3.5 โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษา C ผ่านโปรแกรม MPLAB IDE v.8.83 ซึ่งได้เขียนให้มีเอาต์พุต ทั้งหมด 4 เอาต์พุต A, B, C, และ D ออกมาจากขาที่ RB0, RB1, RB2 และ RB3 ตามลำดับ โดยสร้างสัญญาณที่มีความถี่ 24 kHz เพื่อส่งต่อไปให้วงจรขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟต ทั้ง 4 ชุด โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ dsPIC ในการสร้างสัญญาณเพราะว่าสะดวกแก่การเปลี่ยนรูปสัญญาณให้กับชุดขับ

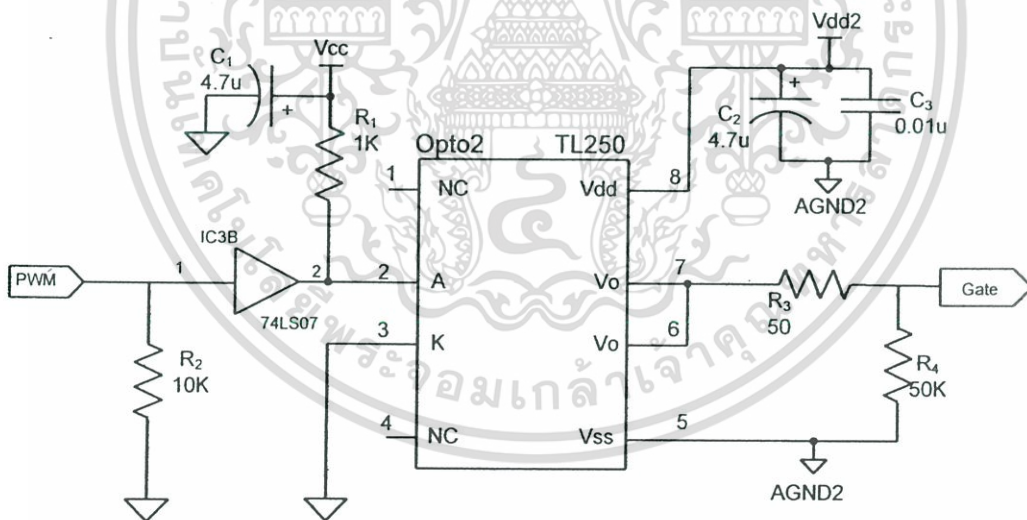


รูปที่ 3.5 รูปวงจรมิโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

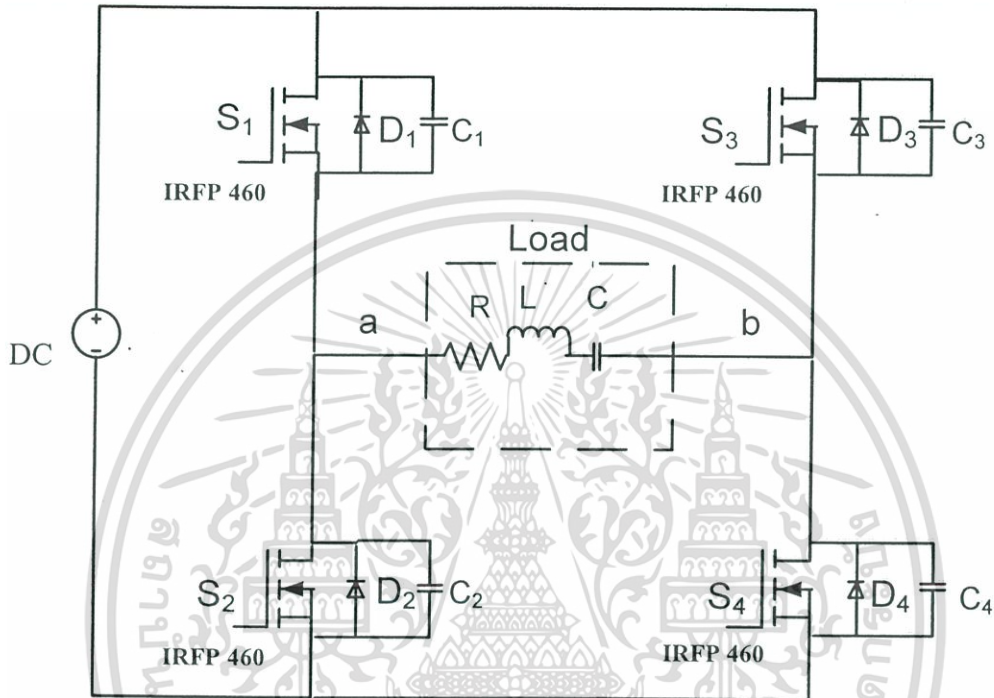
สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมสัญญาณนี้ถูกส่งไปยังวงจรสร้างสัญญาณขับนำเกต ด้วยไอซีสร้างสัญญาณขับนำเกต เบอร์ TLP250 เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต วงจรสร้างสัญญาณขับนำเกตแสดงดังรูปที่ 3.6 จากวงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีขนาดแรงดัน 0 V ถึง 5 V สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปไบอัสให้ LED ใน TLP250 นำกระแส โดยมี ความต้านทาน  $R_1$  ทำหน้าที่จำกัดกระแสในการไบอัส และใช้ไอซีบัฟเฟอร์ 74LS07 เป็นตัวป้องกันไฟ 5 V ที่จะเกิดการไหลย้อนกลับของแรงดันเข้าไปในวงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PS-PWM) เมื่อ LED นำกระแส ทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 นำกระแส แรงดันที่ขา 7 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์เท่ากับ 15 V และแรงดันที่  $V_{GS}$  ของมอสเฟตเท่ากับ 15 V กับ -5 V เมื่อแรงดัน  $V_{GS}$  มีค่าเป็นบวกสามารถทำให้มอสเฟตนำกระแสได้ ส่วนในกรณีที่แรงดันอินพุตน้อยกว่า 0.7 V LED ภายใน TLP250 หยุดนำกระแสส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 หยุดนำกระแสเช่นเดียวกัน แต่ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP จะนำกระแสแทนส่งผลให้ที่สภาวะนี้แรงดันที่ขา 7 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์มีค่าประมาณ -5 V เมื่อแรงดันที่  $V_{GS}$  มีค่าเป็น -5 V ก็จะทำให้มอสเฟตหยุดนำกระแสได้



รูปที่ 3.6 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

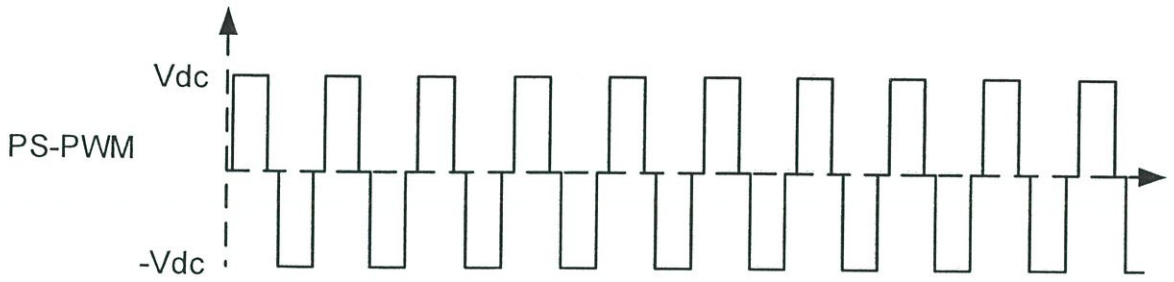
วงจรภาคกำลังนี้เป็นวงจรที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งใช้มอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 3.9 โดยจะนำกระแส และหยุดนำกระแส ตามจังหวะสัญญาณที่ถูกส่งมาจาก วงจรขับเกต ในรูปที่ 3.7 โดยวงจรขับนำเกตต้องสร้าง 4 ชุด สำหรับมอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว



รูปที่ 3.7 วงจรภาคกำลัง

มอสเฟตทั้ง 4 ตัว จะทำงานแยกอิสระจากกัน โดยรับสัญญาณ PS-PWM จากวงขับเกตด้วยความถี่ 24 kHz - 28 kHz การทำงานของสัญญาณที่ออกมาจากวงขับเกต โดยปกติการทำงานของสัญญาณ PS-PWM ช่วงเวลา  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแส  $S_1$  จะนำกระแส ก่อน  $S_4$  เป็นเวลา  $\Phi$  และช่วงเวลาหยุดนำกระแสก็ช้ากว่า  $S_1$  เพราะช่วงนำกระแส ช้ากว่านั่นเอง ส่วน  $S_2$  และ  $S_3$  ก็เหมือนกัน ช่วงนำกระแส  $S_3$  จะช้ากว่า  $S_2$  เป็นเวลา  $\Phi$  และช่วงหยุดนำกระแส ก็ช้ากว่า  $S_2$  ด้วยทำนองนี้ไปเรื่อยๆ

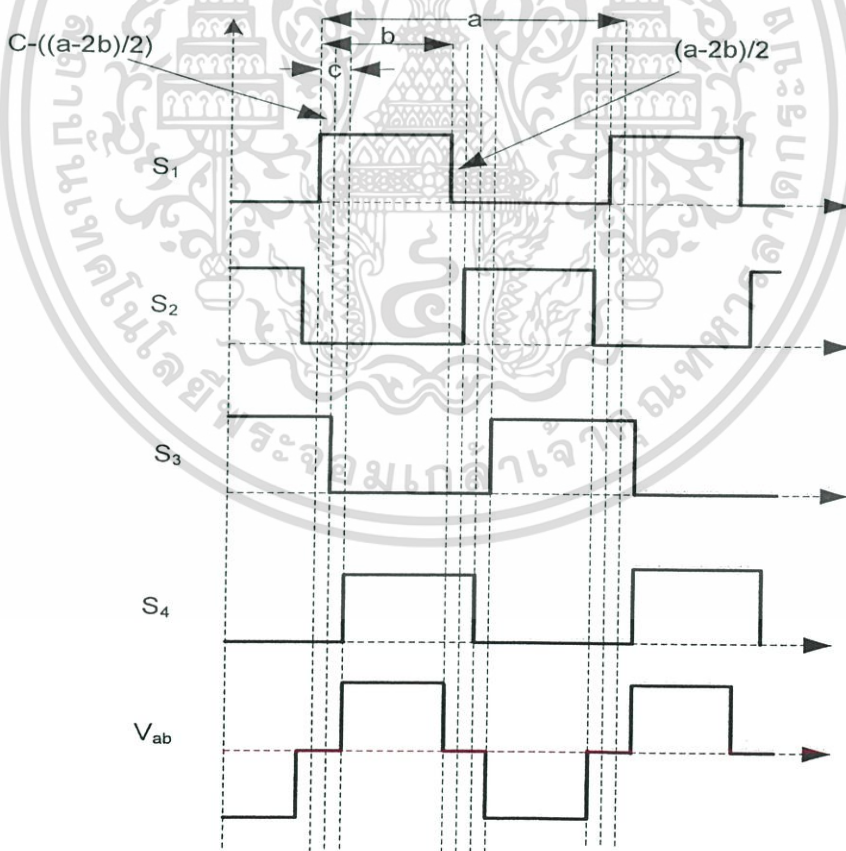
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM

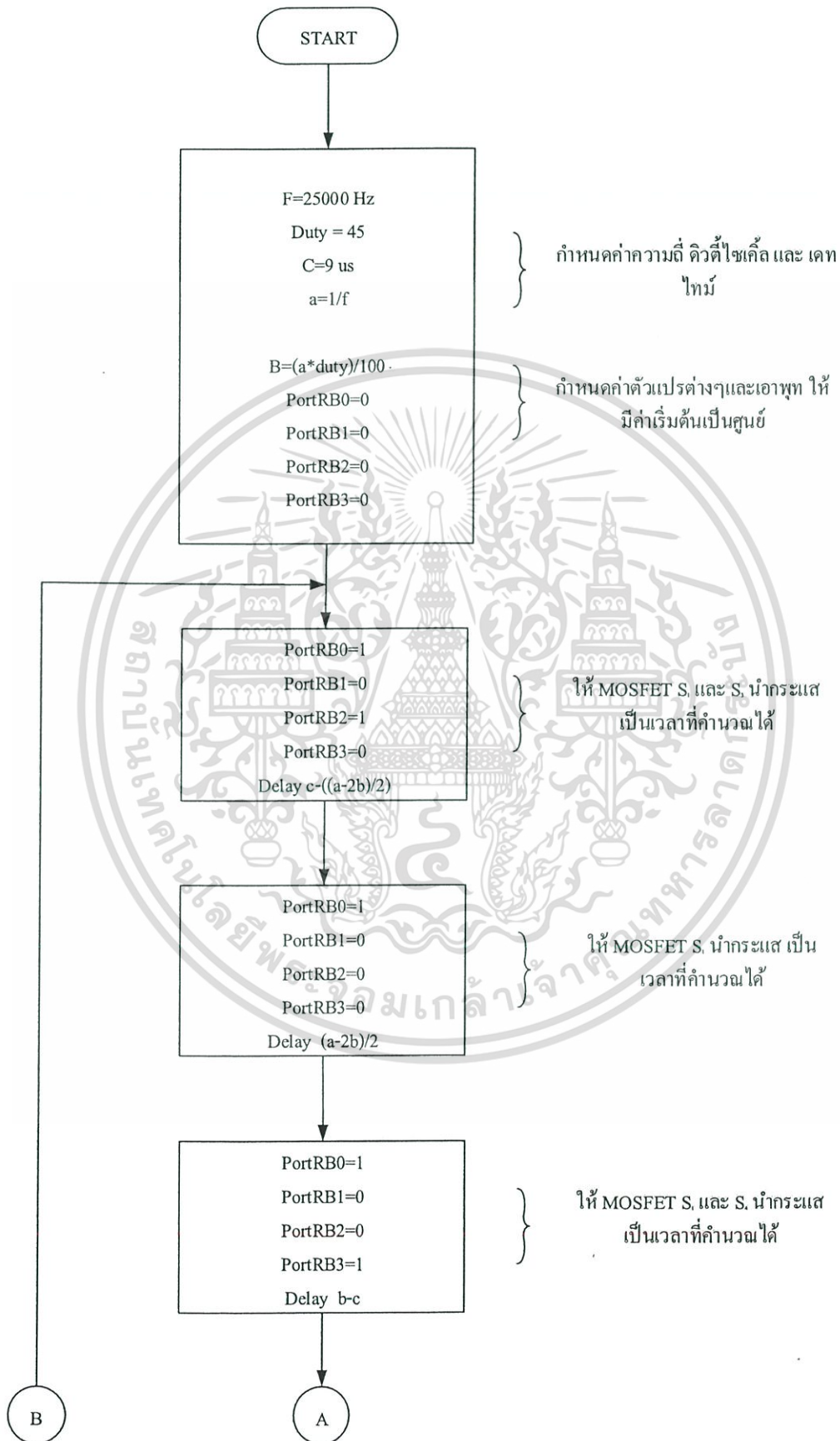
### 3.7 การสร้างสัญญาณ PS-PWM

ในการสร้างสัญญาณ PS-PWM ซึ่งได้กล่าวถึงรูปแบบสัญญาณ และสภาวะการทำงานทั้งหมดไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งได้แบ่งช่วงสัญญาณเป็น 8 ช่วง ดังในรูปที่ 3.9 เพื่อเขียนเป็นโปรแกรมในการสร้างสัญญาณดังรูปที่ 3.10

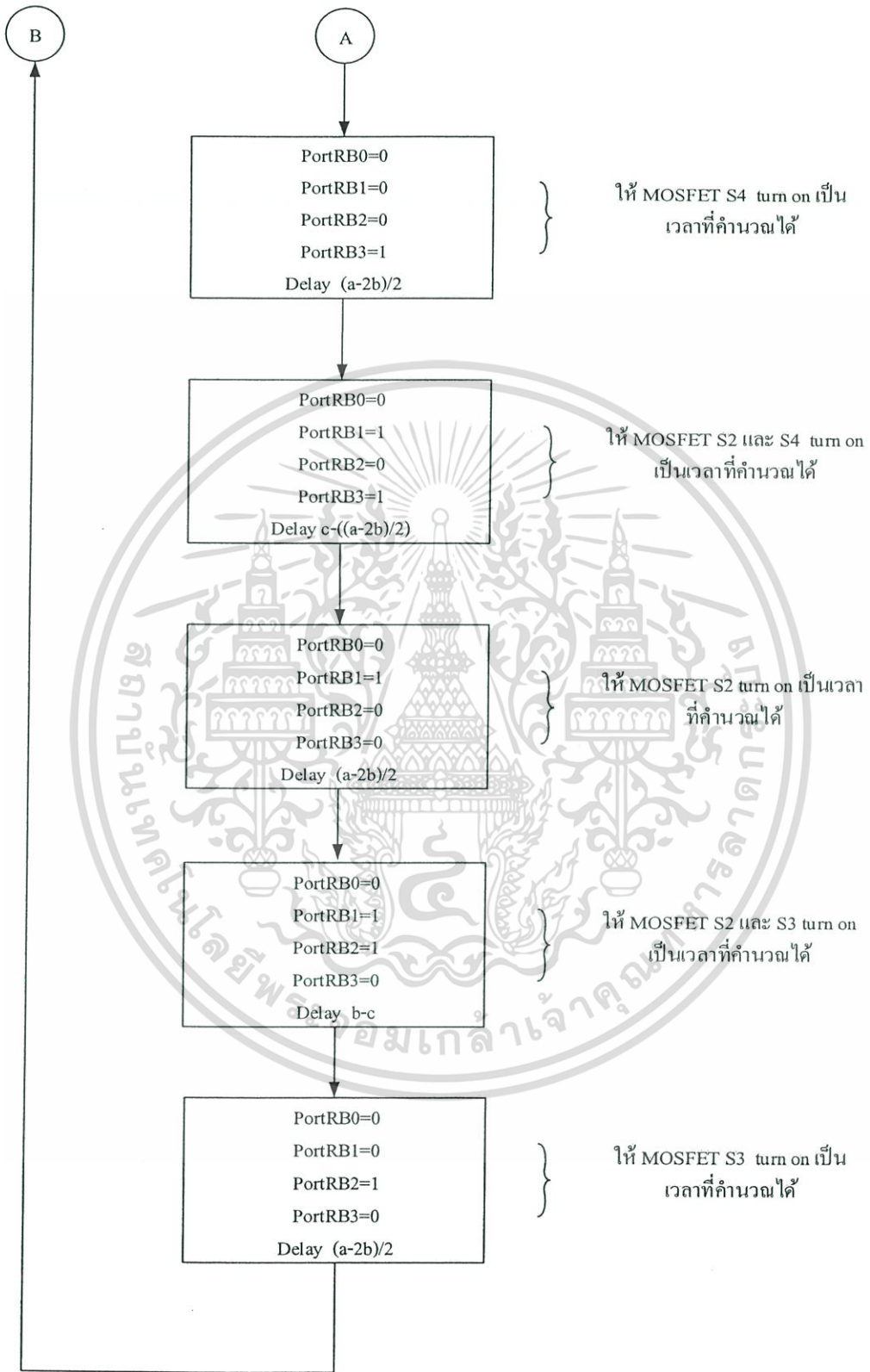


รูปที่ 3.9 ช่วงสัญญาณที่แบ่งเป็น 8 ช่วงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PS-PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.16 โปรแกรมในการสร้างรูปสัญญาณ PS-PWM เริ่มต้นจากการกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการในที่นี้กำหนดที่ 25 kHz และกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลไว้ที่ 45% แล้วจึงกำหนดค่าออกมาเป็นค่าคาบเวลาที่จะต้องทำงาน และหยุดของรูปสัญญาณแต่ละมอสเฟตดังรูปที่ 3.10

คำนวณได้ค่า  $a=40$  us,  $b=18$  us,  $c$  (ค่าช่วงเวลาที่เลื่อนเฟส) = 9 us,  $(a-2b)/2$  (ช่วงเวลาเดทโทม) = 2 us,  $c-((a-2b)/2) = 7$  us แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆให้เป็นศูนย์ และมอสเฟตทั้งหมดเริ่มต้นให้หยุดนำกระแส จากนั้นให้  $S_1$  และ  $S_3$  นำกระแส เป็นเวลา 7 us ช่วงเวลาเดทโทม  $S_1$  นำกระแสเป็นเวลา 2 us แล้ว  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแส เป็นเวลา 9 us ช่วงเวลาเดทโทม  $S_4$  นำกระแส เป็นเวลา 2 us แล้ว  $S_2$  และ  $S_4$  นำกระแส เป็นเวลา 7 us ช่วงเวลาเดทโทม  $S_2$  นำกระแส เป็นเวลา 2 us แล้ว  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส เป็นเวลา 9 us ช่วงเวลาเดทโทม  $S_3$  นำกระแส เป็นเวลา 2 us ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ

### 3.8 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ 2 ชั้นนั้นเลือกใช้แก้วเป็นฉนวนชั้นที่ 1 คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ 2 ชั้นที่สร้างขึ้น คำนวณ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโอโซนเท่ากับ 1.8 kV เราสามารถใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE-80 โดยใช้ในด้านปฐมภูมิจึงต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 20 รอบ และนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกน 13 รอบ ในส่วนของด้านทุติยภูมิต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 2 รอบและนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกนทั้งหมด 162 รอบ จะทำให้เราได้หม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราแรงดัน 310/ 1800 Volt และแสดงการคำนวณความจรระโซ่แนนด์แบบขนาน

สร้างวงจรสัญญาณควบคุม ในที่นี้เลือกใช้ dsPIC 30F4011 ในการเขียนโปรแกรมควบคุม แบบ PS-PWM และ เลือกใช้ไอซี TLP250 เป็นวงจรขับนำเกตทั้งหมด 4 ชุดกับมอสเฟต 4 ตัว มีการแสดงโหมดการทำงานของแต่ละรูปแบบสัญญาณ พร้อมทั้งแสดง Flowchart การเขียนโปรแกรมของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

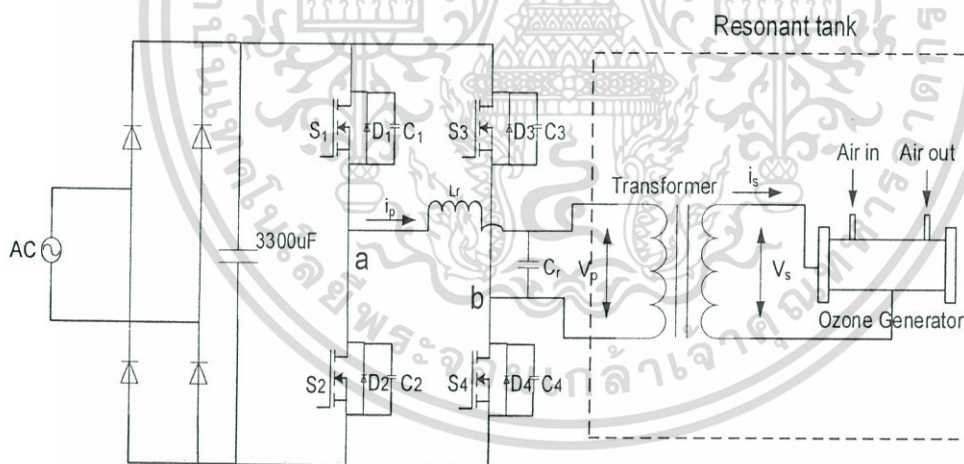
### การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองการทำงานของเครื่องต้นแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่สร้างขึ้นโดยการวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างๆและทำการเก็บผลทางเคมี โดยการปรับความถี่ เพื่อดูผลการเกิดปริมาณโอโซน พร้อมทั้งวัดสัญญาณชับเกต แรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่อง

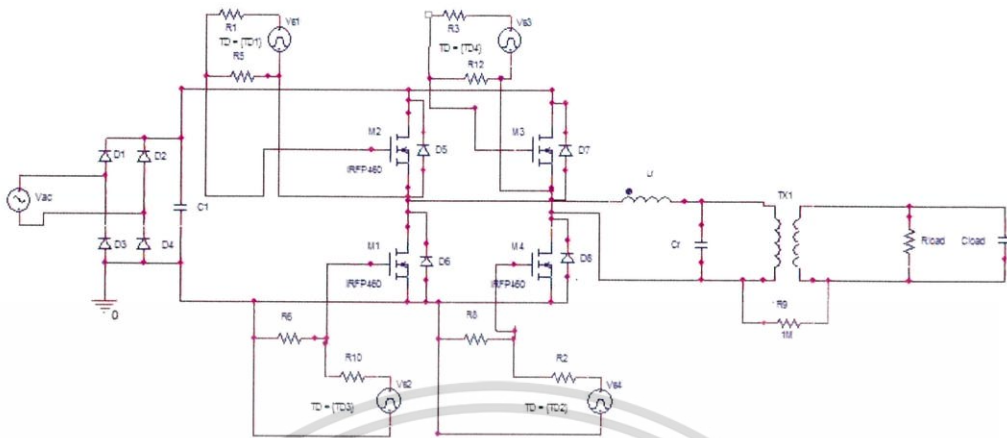
#### 4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนเครื่องต้นแบบซึ่งวงจรแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะจ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 310V และทำการปรับความถี่ 24 kHz-28 kHz ในรูปแบบสัญญาณ PS-PWM โดยทำการเก็บผลของสัญญาณชับเกต กำลังไฟฟ้า กระแส และแรงดันทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และเก็บผลของแรงดันและกระแสที่โหลดเพื่อดูปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่โหลดเมื่อทำการปรับความถี่ของสัญญาณ การทำงานของวงจรในรูปที่ 4.2 โดยใช้โปรแกรม Pspice Simulink ในการจำลองการทำงาน



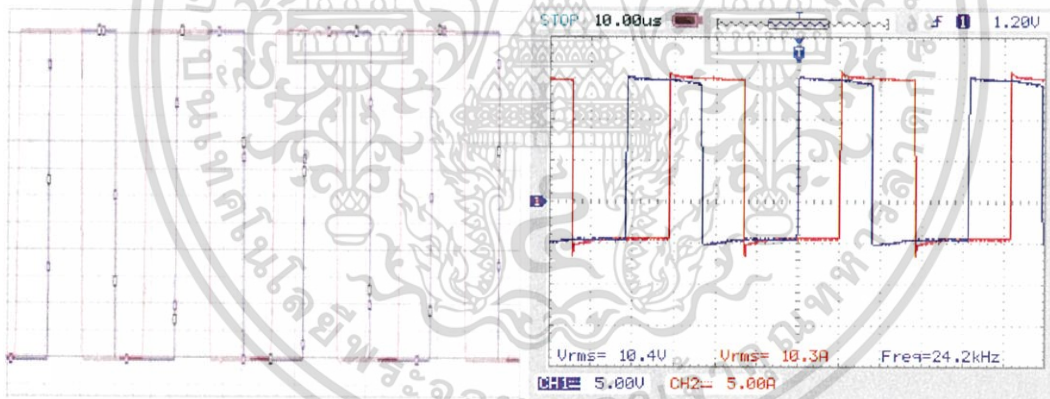
รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

4.2.1 สัญญาณขับเคลื่อน PS-PWM แรงดันและกระแสสวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  และแรงดันและกระแสอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ 24 kHz

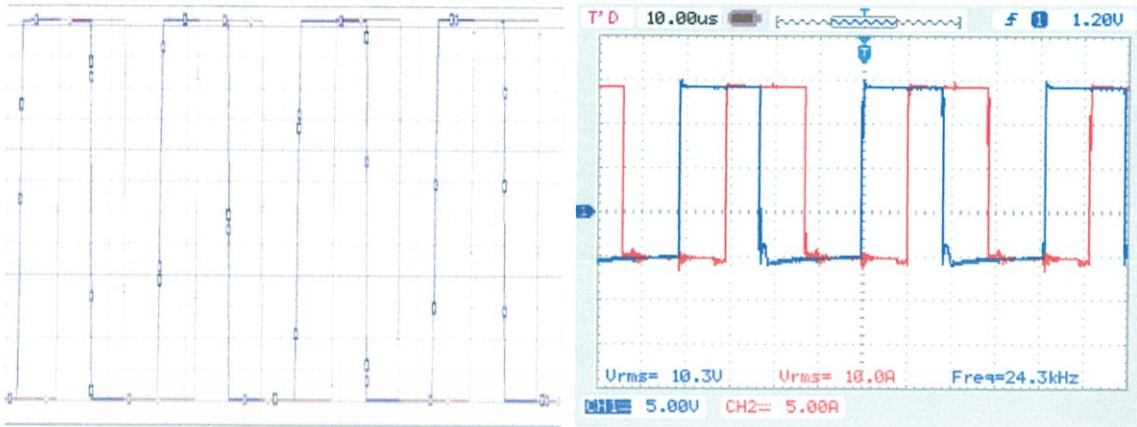


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 สัญญาณขับเคลื่อน PS-PWM (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  ที่ความถี่ 24 kHz

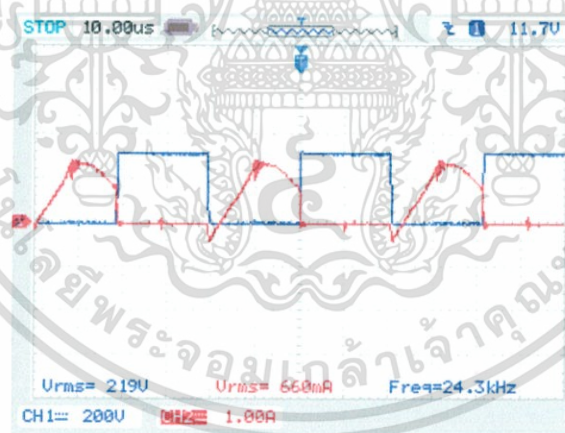
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

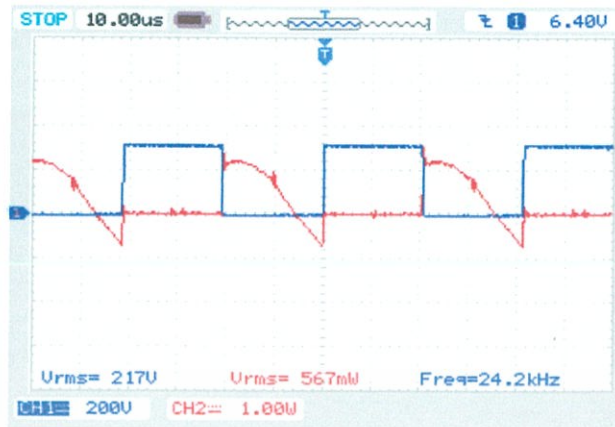
(ข)

รูปที่ 4.4 สัญญาณขับเคลื่อน PS-PWM (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสวิตช์  $S_2$  และ  $S_3$  ที่ความถี่ 24 kHz

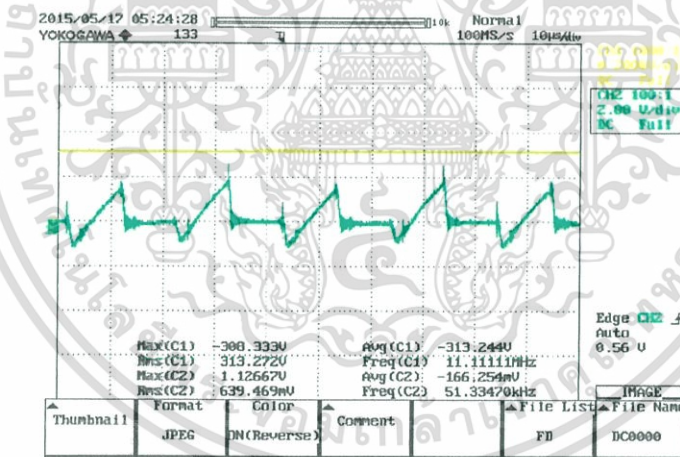


รูปที่ 4.5 แรงดันและกระแสสวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

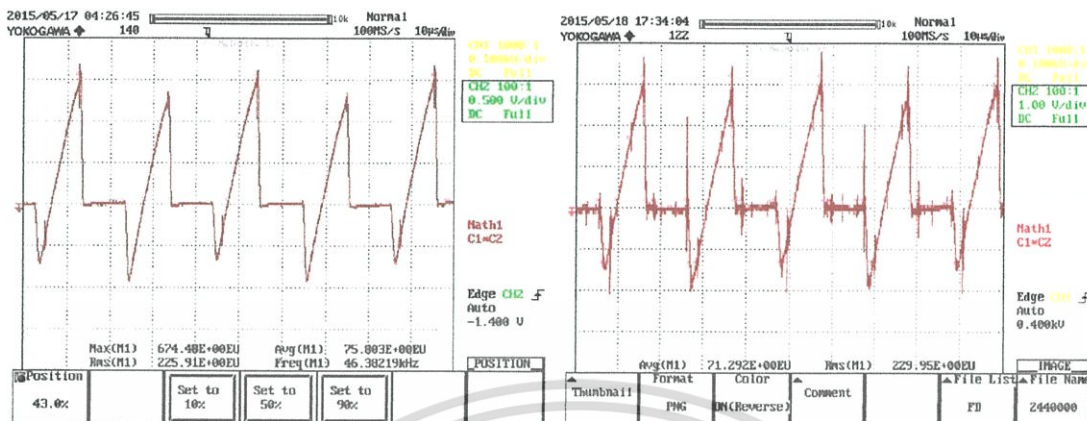


รูปที่ 4.6 แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์  $S_2$  และ  $S_3$  การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz



รูปที่ 4.7 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

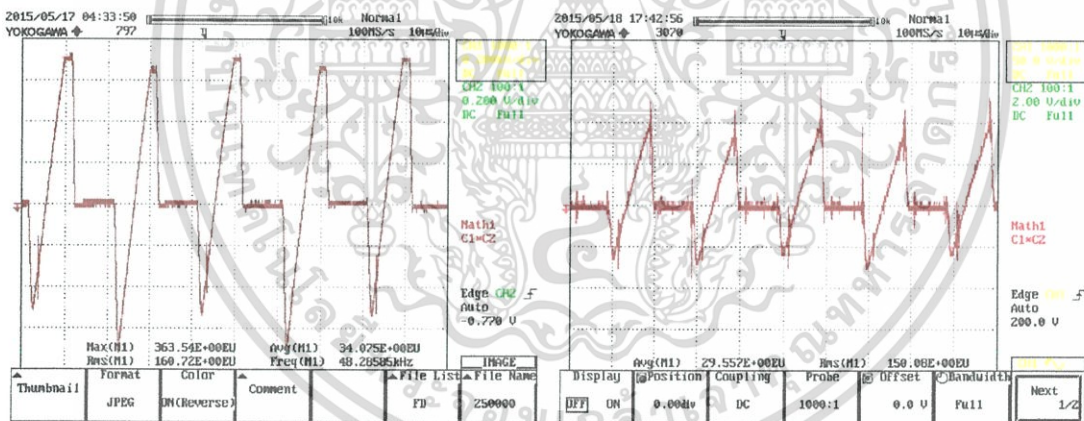
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

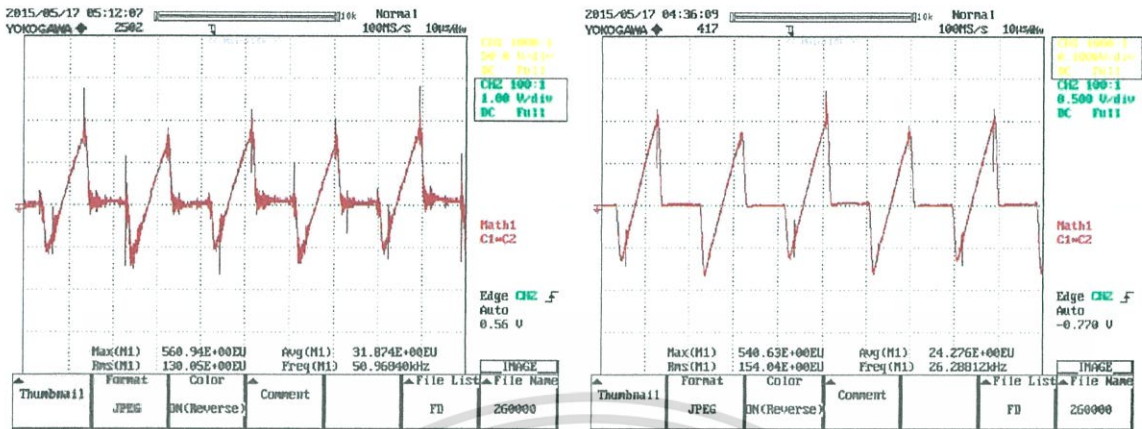


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 25 kHz

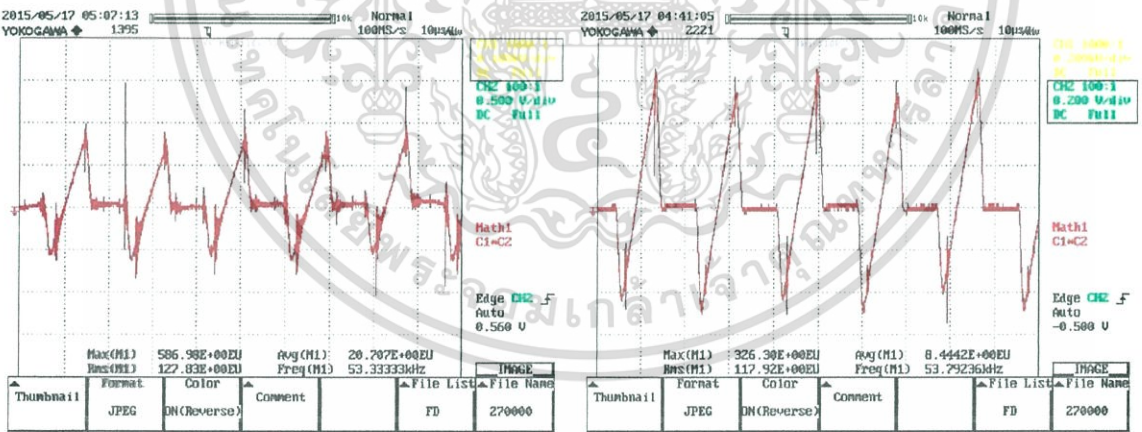
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 26 kHz

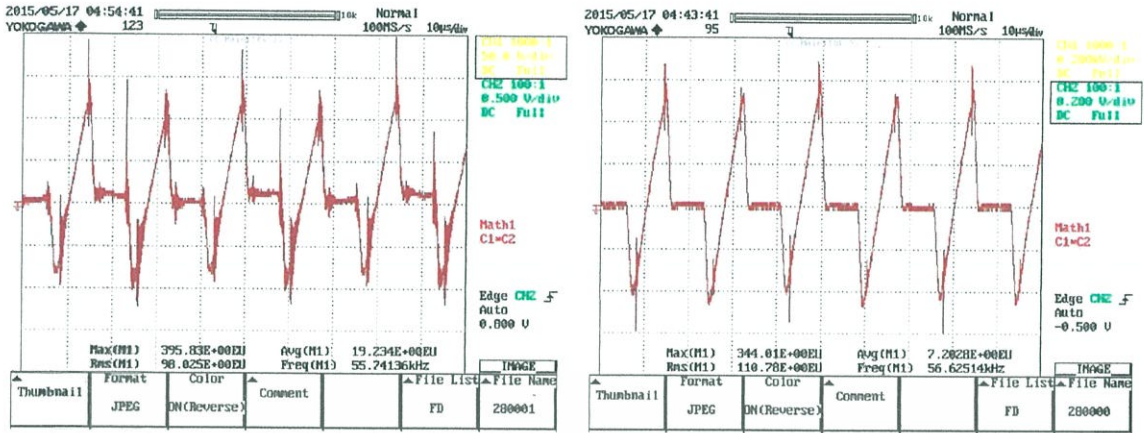


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 27 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

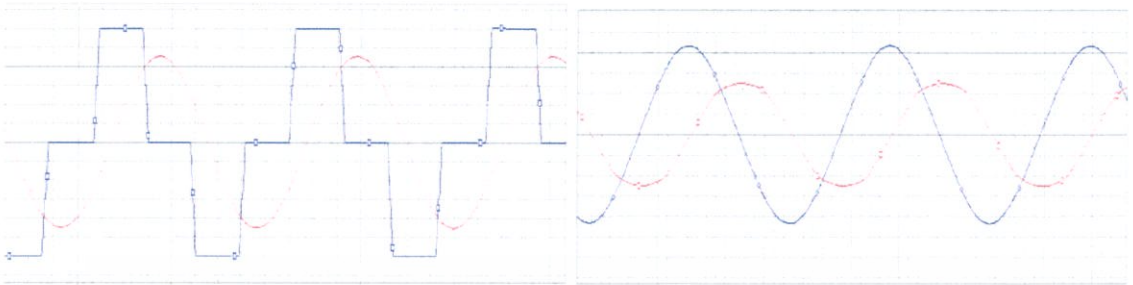
(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) กำลังไฟฟ้ายินพดอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาร์ทอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz

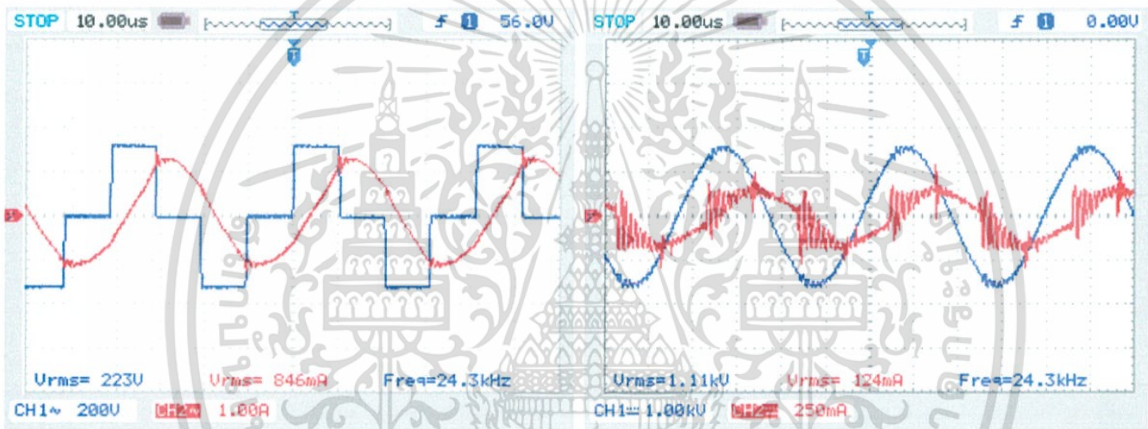


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง



(ก)



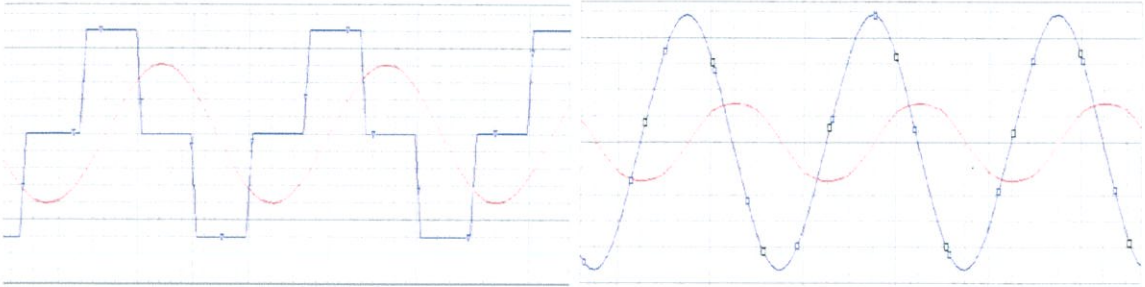
(ข)

รูปที่ 4.13 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

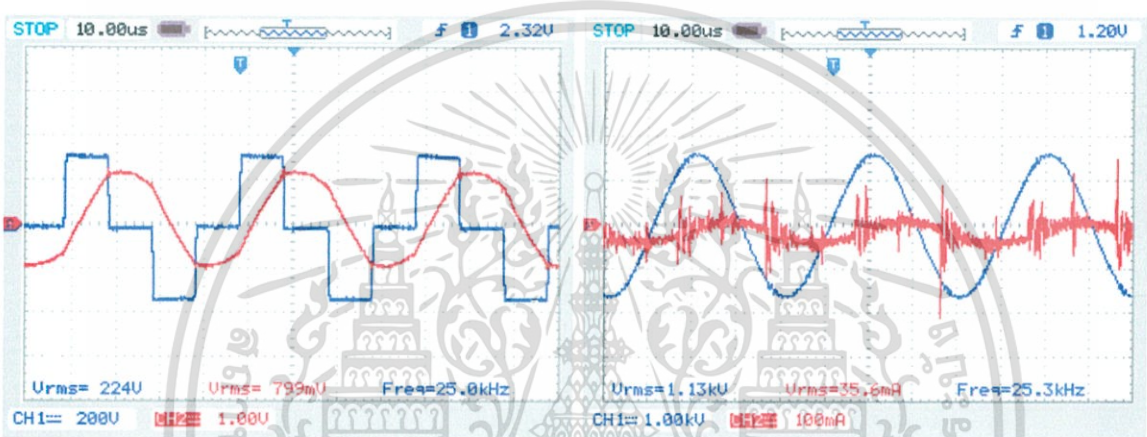
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง

ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

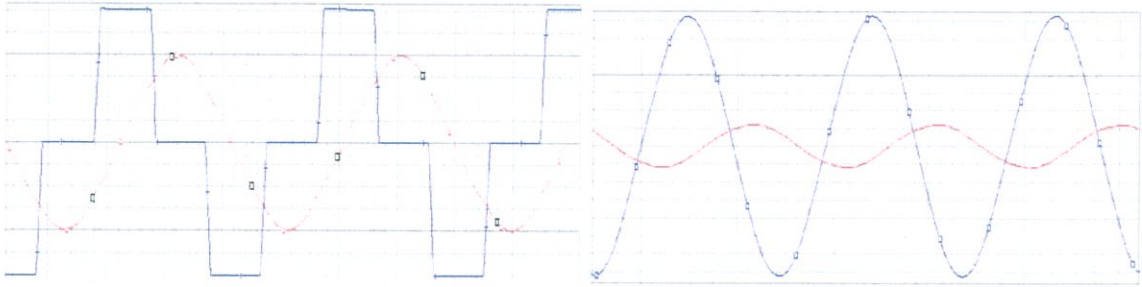


(ข)

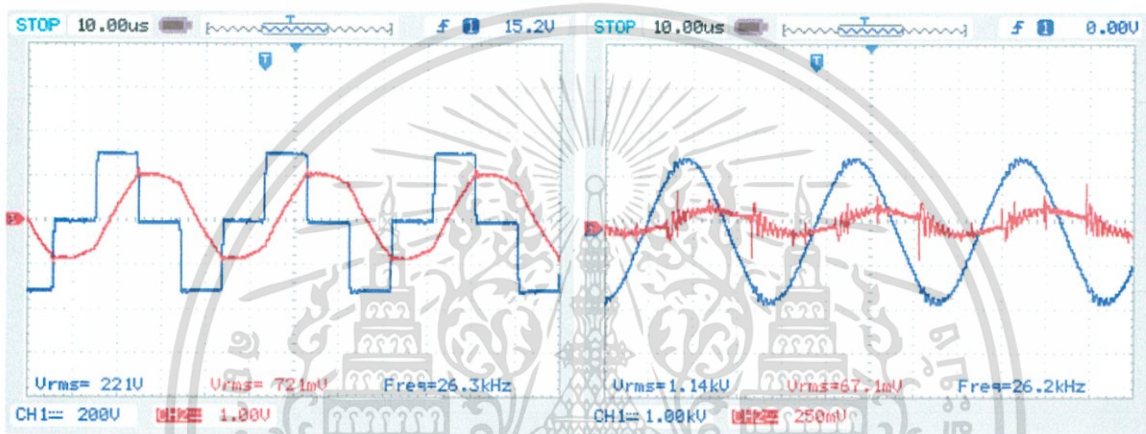
รูปที่ 4.14 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง  
ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



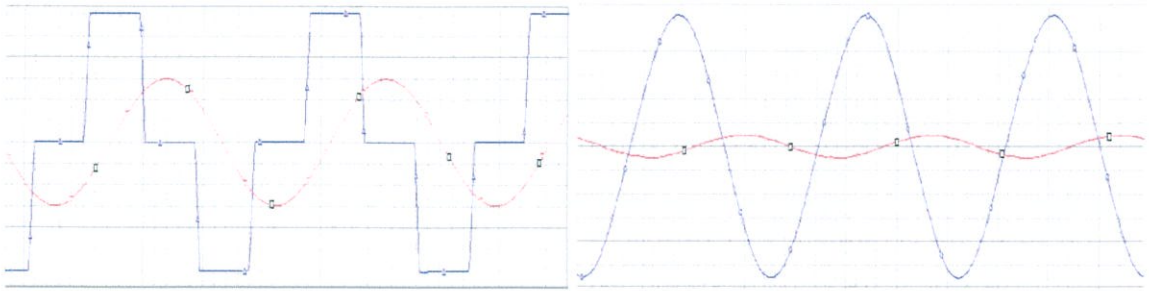
(ก)



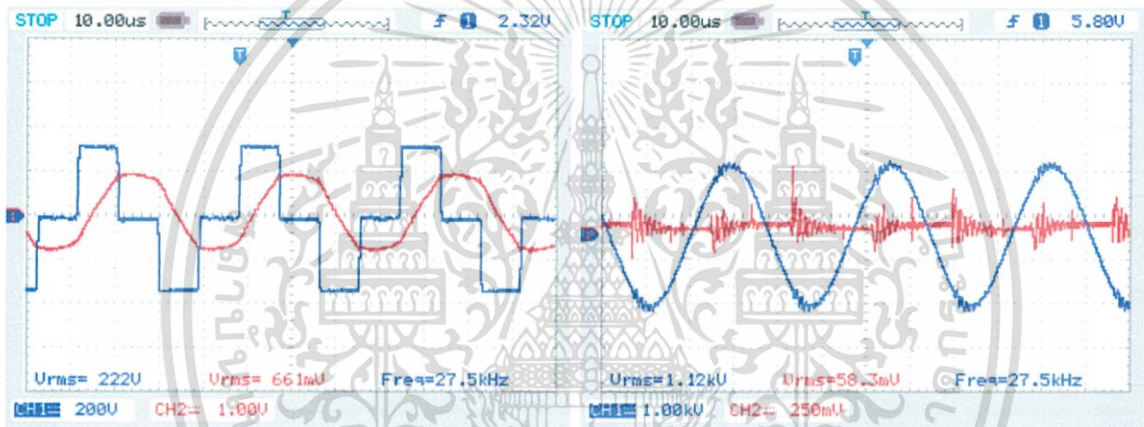
(ข)

รูปที่ 4.15 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง  
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง  
ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 26 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



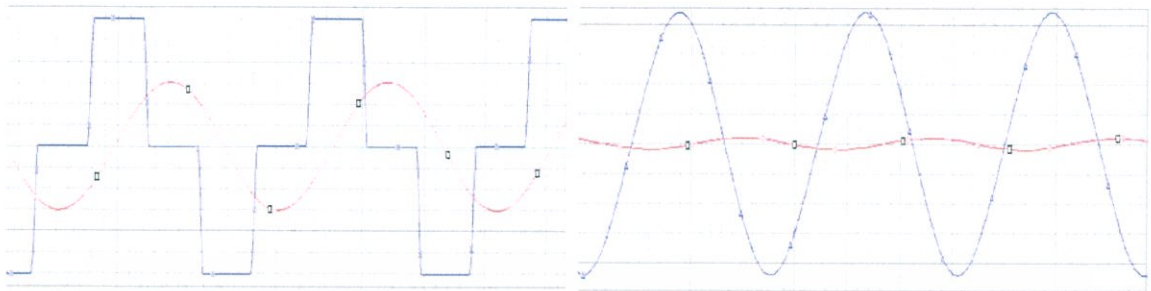
(ข)

รูปที่ 4.16 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

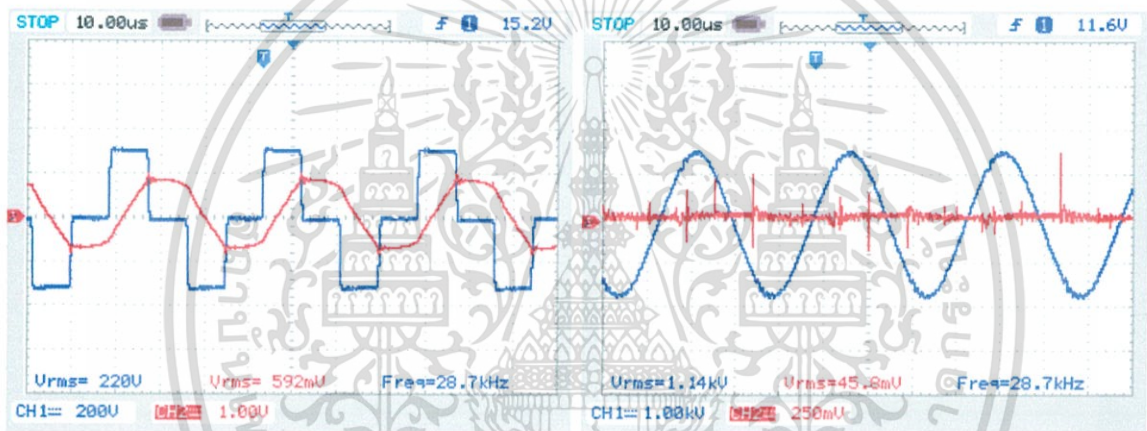
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง

ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 27 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

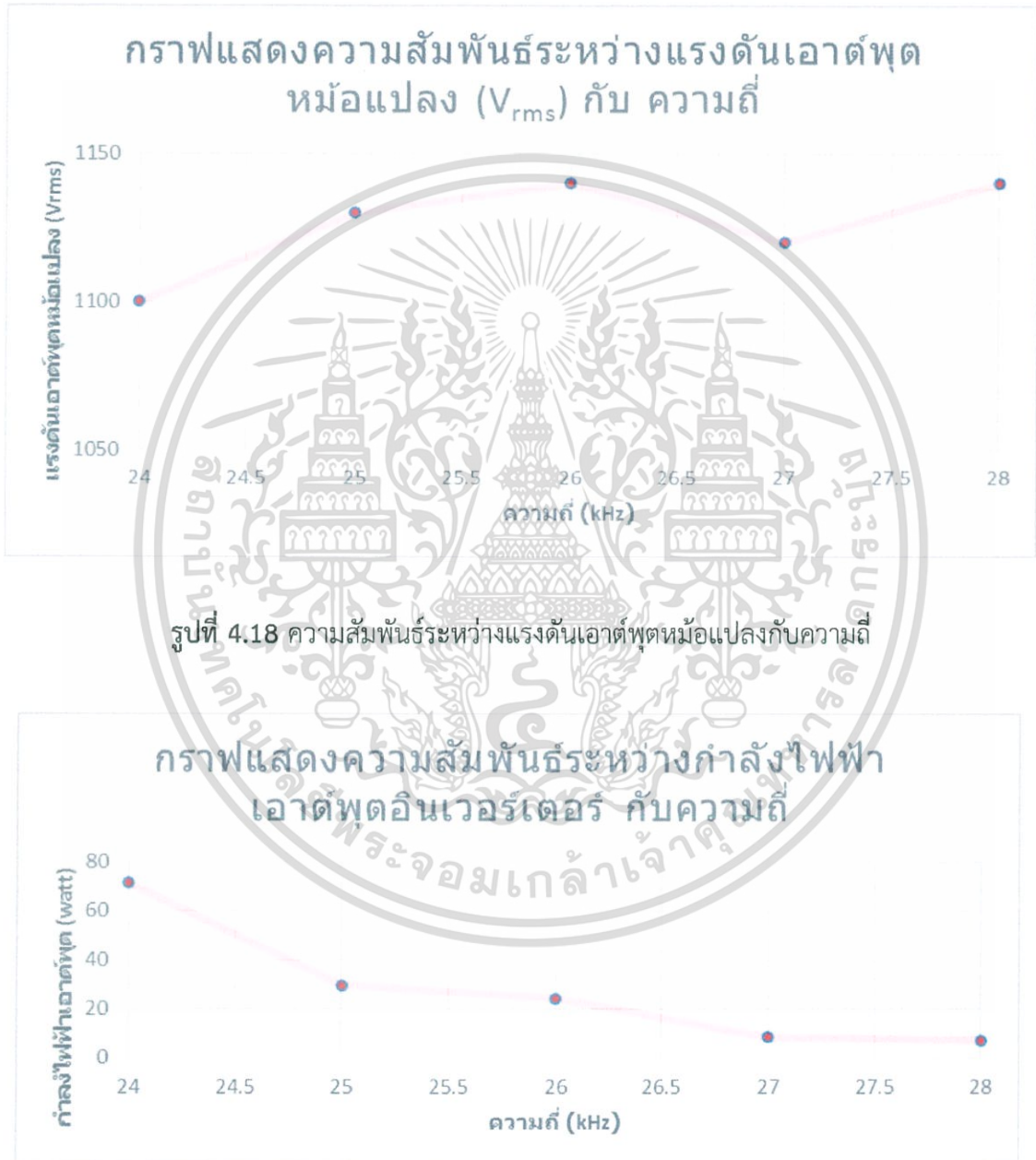
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง

ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

นำผลการทดลอง มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต ( $V_{rms}$ ) หม้อแปลงความถี่ สูงกับความถี่ กำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์กับความถี่ ประสิทธิภาพของของคอนเวอร์เตอร์กับแปลงความถี่ ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงกับความถี่

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง ( $V_{rms}$ ) กับ ความถี่ จะเห็นสัญญาณ PS-PWM มีแรงดันไฟฟ้า ( $V_{rms}$ ) จะคงที่เมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยการทดลองนี้จะคงที่แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง ( $V_{rms}$ ) ประมาณ 1300 V

จากรูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ของสัญญาณ PS-PWM จะลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และกำลังไฟฟ้าสูงสุดของสัญญาณอยู่ที่ 24 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้ความถี่เรโซแนนต์ โดยสัญญาณ PS-PWM มีกำลังสูงสุดเท่ากับ 71 W

จากรูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่ PS-PWM ประสิทธิภาพจะสูงสุดเท่ากับประมาณ 94% ที่ความถี่ 24 kHz เนื่องจากใกล้ความถี่เรโซแนนต์ และจะลดลงเมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การเก็บผลก๊าซโอโซนโดยการทดลองทางเคมี

จากการทดสอบทางไฟฟ้าที่ผ่านมาระดับไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงที่บ่อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อผลิตก๊าซโอโซนจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบสัญญาณและความถี่ ที่ภาคควบคุมคอนเวอร์เตอร์จากนั้นถึงวัดปริมาณก๊าซโอโซนโดยวิธีทางเคมี ที่เรียกว่า การไตเตรท (Titrant) การวัดผลโอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลปริมาตรของสารเคมี  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโปรแตสเซียมไอโอไดด์ KI ที่ผ่านการแพร่กระจายของก๊าซโอโซนจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 เพื่อหาปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น

$$0.1N \times \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 1\text{mL} = 2.4\text{mgO}_3 \quad (4.1)$$

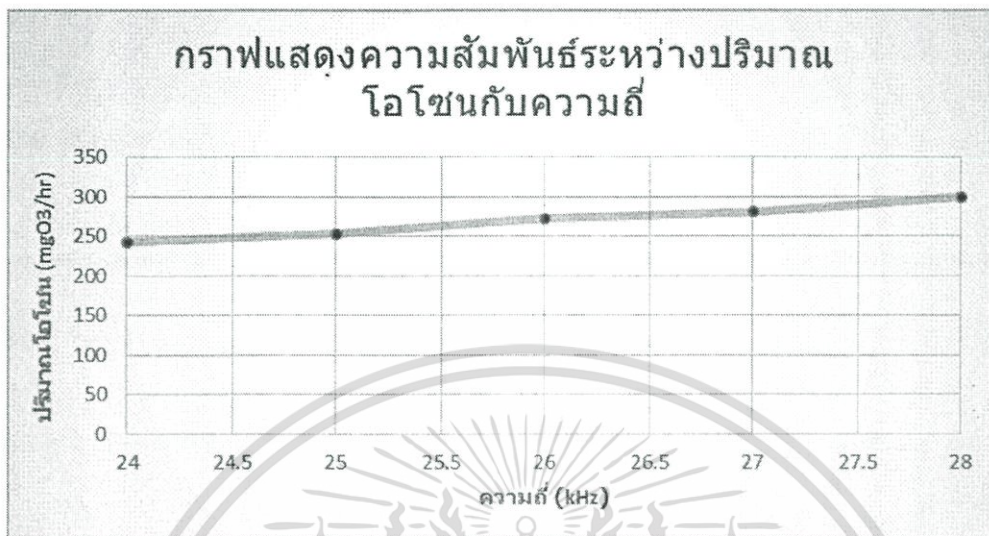
เมื่อ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  คือสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต  
 $\text{mgO}_3$  คือ ปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระดับปริมาณก๊าซโอโซนเมื่อนำปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตในแต่ละรูปแบบสัญญาณและแต่ละความถี่ โดยใช้สมการที่ 4.1 จากนั้นนำมาคูณด้วยเวลาเพื่อเทียบเป็นปริมาณต่อเวลา โดยในการทดสอบเครื่องทำงานเป็นเวลา 1 นาที ดังนั้นจึงคูณด้วย 60 จะได้เป็นปริมาณก๊าซต่อ 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบสองครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไขสัญญาณแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยที่อุณหภูมิห้องในการในวัดอยู่ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของลม 20 L/minute

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนเทียบกับรูปแบบสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz - 28 kHz

ความถี่ (kHz)	ปริมาณก๊าซโอโซน(mgO <sub>3</sub> /hr)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
24	244	240	242
25	256	254	252.5
26	274	270	272
27	282	279	280.5
28	298	300	299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับความถี่

#### 4.5 การเก็บผลการทดลองการยืดอายุของมะม่วง

โดยในการทดลองการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงนี้เราได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งแล้วนำผลของการทดลองมาค่าเฉลี่ยเพื่อหาอายุของมะม่วงโดยเราใช้ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ 242 mgO<sub>3</sub>/hr ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 24 kHz เนื่องจากที่ความเข้มข้นค่านี้สามารถกำจัดเชื้อราที่อยู่ตามผิวของผลไม้ได้โดยเราจะแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นสามกลุ่มคือ หนึ่งมะม่วงที่ไม่ผ่านกระบวนการโอโซน สองมะม่วงที่ผ่านโอโซน 242 mgO<sub>3</sub>/hr เป็นเวลา 5 นาทีและมะม่วงที่ผ่านโอโซน 242 mgO<sub>3</sub>/hr เป็นเวลา 10 นาที โดยอุปกรณ์และวัตถุดิบที่เราต้องใช้ในการทดลองมีดังนี้

- มะม่วงเขียวเสวยที่ยังไม่สุก 3 ชุด
- ถังใส่น้ำขนาด 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- เครื่องผลิตโอโซน
- ปีมล

ซึ่งขั้นตอนในการทดลองในการทำคือนำมะม่วงไปแช่ลงในน้ำที่ใสในถังขนาด 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ได้มีการปล่อยแก๊สโอโซนลงไปเป็นเวลาที่ตั้งไว้คือ 5 และ 10 นาที พอแช่ครบตามเวลาจึงนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มะม่วงขึ้นมากับไว้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยทำลักษณะนี้เป็นประจำทุกวันจนมะม่วงเริ่มเน่าเสียจนสังเกตได้ โดยผลการทดลองทั้งสามครั้งเป็นไปตามตาราง 4.2, 4.3 และ 4.4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 การเก็บผลอายุของมะม่วงครั้งที่ 1

การทดลอง	วันที่มีการเน่าเสีย (วัน)				
	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2	ลูกที่ 3	ลูกที่ 4	เฉลี่ย
ไม่แช่น้ำไอโซน	6	6	7	7	6.5
แช่น้ำไอโซน 5 นาที	6	7	7	8	7
แช่น้ำไอโซน 10 นาที	9	10	12	12	10.75

ตารางที่ 4.3 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 2

การทดลอง	วันที่มีการเน่าเสีย (วัน)					เฉลี่ย
	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2	ลูกที่ 3	ลูกที่ 4	ลูกที่ 5	
ไม่แช่น้ำไอโซน	5	5	6	7	8	6.2
แช่น้ำไอโซน 5 นาที	6	7	7	7	9	7.2
แช่น้ำไอโซน 10 นาที	11	11	13	13	13	12.2

ตารางที่ 4.4 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 3

การทดลอง	วันที่มีการเน่าเสีย (วัน)					เฉลี่ย
	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2	ลูกที่ 3	ลูกที่ 4	ลูกที่ 5	
ไม่แช่น้ำไอโซน	5	7	8	8	8	7.2
แช่น้ำไอโซน 5 นาที	6	7	8	8	9	7.6
แช่น้ำไอโซน 10 นาที	11	12	12	13	13	12.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 รูปวันที่ 5 ของมะม่วงที่ไม่ได้แช่น้ำไอโซนมีจะเห็นได้ว่าการเน่าเสีย 2 ลูก



รูปที่ 4.23 รูปวันที่ 5 ของมะม่วงที่แช่น้ำไอโซนเป็นเวลา 10 นาที ยังไม่มีการเน่าเสีย

ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสามครั้งจากตาราง 4.2, 4.3 และ 4.4 ทำให้เราสามารถที่จะหาค่าเฉลี่ยอายุของมะม่วงในการทดลองแต่ละแบบได้ดังนี้คือ กรณีที่1 ไม่ได้แช่น้ำไอโซนมีอายุเฉลี่ยคือ 6.64 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 2 แชน้ำไอโซนเป็นเวลา 10 นาที มีอายุเฉลี่ยคือ 7.27 วัน และในกรณีสุดท้าย แชน้ำไอโซนเป็นเวลา 10 นาทีที่มีอายุเฉลี่ย 11.72 วัน

โดยสรุปจะเห็นได้ว่าในกรณี 1 และกรณีที่ 2 นั้นอายุเฉลี่ยของมะม่วงนั้นแตกต่างกันไม่มากโดยที่ในกรณีที่แชน้ำไอโซนเป็นเวลา 5 นาทีนั้นจากเก็บได้นานกว่าราวๆ 1 วัน ในขณะที่กรณีสุดท้าย แชน้ำไอโซนนาน 10 นาทีนั้นมะม่วงอยู่ได้ถึง 12.2 วันซึ่งมากกว่ากรณีที่ไม่ได้แช่ประมาณ 6 วัน

#### 4.6 สรุป

บทนี้ได้เสนอผลการจำลอง ผลการทดลองทางไฟฟ้าและผลทางเคมีของเครื่องกำเนิดไอโซน โดยทางไฟฟ้าทำการวัดกระแสและแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง และทางเคมีโดยการวัดปริมาณไอโซนที่ความถี่ 24-28 kHz และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟซึ่งจะเห็นได้ว่าที่จุดใกล้เคียงแกนตั้งจะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ในด้านทางเคมีในการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณไอโซนที่เกิดขึ้นซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ความถี่สูงจะทำให้ปริมาณไอโซนสูงขึ้นไปได้ นอกจากนี้ยังได้ผลการทดลองการยืดอายุผลไม้ของมะม่วงซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ผ่านกระบวนการไอโซนจะมีอายุที่นานกว่ากรณีที่ไม่ได้ผ่านไอโซนซึ่งนอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้กับผลไม้และผักชนิดอื่น เช่น แอปเปิ้ล มันฝรั่ง มะเขือเทศ สตอเบอร์รี่ บรอกโคลี แพร์ ส้ม พืชองุ่น ข้าวโพด และถั่วเหลือง ซึ่งจะเป็นผักผลไม้ชนิดเปลือกแข็งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัจจุบันโอโซนกลายเป็นทางเลือกสำหรับปรับปรุงอากาศและน้ำมากมาย โอโซนถูกใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานและบ้านเรือน ดังเช่น การฟอกและการฆ่าเชื้อ รวมไปถึงการใช้ในกระบวนการอาหาร การเก็บรักษาอาหาร การกำจัดกลิ่น การฟื้นฟูน้ำใต้ดิน และการทำน้ำดื่ม การใช้ประโยชน์ของโอโซนได้เติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งการปรับปรุงระบบสร้างโอโซนจึงเป็นส่วนสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้ใช้วิธีการสร้างโอโซนโดยหลักการดิสชาร์จทางไฟฟ้า ในปัจจุบันการสร้างโอโซนมักจะใช้รูปแบบทรงกระบอกแกนร่วมโดยการให้แก๊ส อากาศแห้ง หรือ ออกซิเจน ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความกว้าง 1 mm ด้านหนึ่งของช่องว่าง เป็นขั้วโลหะทำหน้าที่เป็นกราวด์ และอีกด้านหนึ่งแก้วซึ่งติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างสองขั้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระแสสลับสูงพอที่จะทำให้ออกซิเจนแตกตัว ใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความถี่สูง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน และเพิ่มปริมาณโอโซนสำหรับพื้นที่ผิวที่จำกัด ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังสวิตชิ่ง บนพื้นฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น หม้อแปลงความถี่สูง MOSFET หรือ IGBT มันสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตและเพิ่มความถี่หลายๆโลเฮิร์ตซ์ได้ ดังนั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดโอโซน นอกจากนี้ยังลดขนาดอุปกรณ์และสามารถควบคุมปริมาณโอโซนได้ง่าย ในโครงการนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณโอโซนเมื่อป้อนสัญญาณ SP-PWM พูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์เพื่อเป็นทางเลือกที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนในการนำไปประยุกต์ในการยืดอายุผลไม้ จากการทดลองเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริงในงานวิจัยนี้ จะเห็นได้ว่าเราสามารถยืดอายุการใช้งานของมะม่วงด้วยการใช้โอโซนความเข้มข้น 242 mg/hr ที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 24 kHz โดยให้โอโซนเป็นเวลานาน 10 นาทีจะสามารถยืดอายุได้นานที่สุดและนอกจากนี้ในการทดลองหาปริมาณของโอโซนที่ความถี่ต่างๆยังพบว่าปริมาณโอโซนนั้นแปรผันตามความถี่ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ไหลด้นเอง โดยที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุต ให้อยู่ในพิสัยตามที่ออกแบบไว้โดยแรงดันที่ทำให้เกิดโอโซนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1.8 kV และจากการทำงานที่จุดเรโซแนนต์ก็จะทำให้ค่าของประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดที่จุดเรโซแนนต์มีประสิทธิภาพสูงถึง 94 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องผลของตัวเก็บประจุเรโซแนนต์ทำให้เกิด ZVS ขึ้นซึ่งจะลดการสูญเสียของการสวิตช์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าควรมีระบบระบายความร้อนที่อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากข้ออิเล็กทรอนิกส์เกิดความร้อนสูง เนื่องจากเมื่อหลอดร้อนเกินไปอาจทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในหลอดไอโซนเปลี่ยนไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อีระเดช เจียรวรรณ, “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน : ศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PDM และ PSPWM ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนต์สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [2] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 12 กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินตติ้ง, 2555.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [4] Anuwat Jangwanitlert, “Evaluation of an Improved zero-voltage and zero-current Switching PWM full-Bridge cd-dc Converter”, University of Arkansas, December 2004.
- [5] พรพิมล รัตน์วิเชียร, “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์,” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [6] อนุรักษ์ มั่นสุข, “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันและความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟต์-ดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [7] ยงยุทธ นาราษฎร์, “การวิเคราะห์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS และ NON ZVS ในเรโซแนนต์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยดิฟเฟอเรนเชียลที่คำนึงถึงผลของตัวเก็บประจุเดรนชอร์ส ของมอสเฟต สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
- [8] Sibylle Dieckerhoff, Michael J. Ryan and Rik W. De Doncker, “Design of an IGBT-based LCL-Resonant Inverter for High-Frequency Induction Heating”, Institute for Power Electronics and Electrical Drives.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ก**  
**บทความทางวิชาการ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การออกแบบและสร้างเครื่องโอโซนแบบฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูง  
โดยใช้เฟสชิฟต์ดับเบิลยูเอ็มสำหรับการยืดอายุผลไม้  
DESIGN AND CONSTRUCTION OF PS-PWM HIGH-FREQUENCY HIGH-VOLTAGE  
FULL-BRIDGE GENERATOR FOR PROLONGING FRUITS**

คหพัทธ์ รัชตเมธิน<sup>1</sup> เชิญจุติ อรุณภิน<sup>1</sup> กิตติทัศน์ เบญจเจริญพัฒน์<sup>1</sup> ณัฐกิตต์ ราชโส<sup>1</sup> และ อนุวัฒน์ งามวนิชเหล็ก<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ดลลวงกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: khachapat@gmail.com

### บทคัดย่อ

โครงการชิ้นนี้ได้นำเสนอเครื่องผลิตโอโซน โดยการใช้ อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูงสำหรับนำมาใช้ในการยืดอายุผลไม้ต่างๆ โดยได้มีการใช้สัญญาณแบบเฟสชิฟต์ดับเบิลยูเอ็มในการควบคุม วงจรและสามารถปรับคือกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้ โดย ความเข้มข้นของโอโซนนั้นจะถูกควบคุมด้วยการปรับค่าความถี่ของ เครื่องอินเวอร์เตอร์ เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่าโอโซนสามารถใช้ยืดอายุ ผลไม้ได้จึงได้มีการนำมามะม่วงมาทดลอง โดยการทดลองนี้ ใช้ความ เข้มข้นของโอโซนที่ 242 มิลลิกรัม/ชั่วโมงปล่อยให้กับมะม่วง โดยจะการ ทดลองนี้จะได้ว่าที่การปล่อยโอโซน 10 นาทีจะทำให้สามารถยืดอายุของ มะม่วงได้นานที่สุดมากกว่าในกรณีเวลาอื่นๆ และประสิทธิภาพสูงสุด ของอินเวอร์เตอร์นี้อยู่ที่ 93 เปอร์เซ็นต์.

**คำสำคัญ:** เครื่องผลิตโอโซน,อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูง, เฟสชิฟต์ดับเบิลยูเอ็ม, ยืดอายุมะม่วง

### Abstract

This project presents an ozone generator by using the high-frequency full-bridge inverter for applying in prolonging fruits process. The Phase-Shifted Pulse Width modulation is used for adjusting the output power of inverter. In addition, The concentration of ozone will be controlled by adjusting the operating frequency of inverter. In order to prove the mentioned prolonging mangoes. From test, the 242 mg/hr of ozone concentration at 24.3 kHz of switching frequency that spend time about 10 minute can prolong the mangoes life satisfying more than the other time including mangoes that didn't pass ozone process and the maximum efficiency of inverter is 91.7%.

**Index Term:** Ozone generator, high-frequency full-bridge inverter, PS-PWM, Prolong the mangoes.

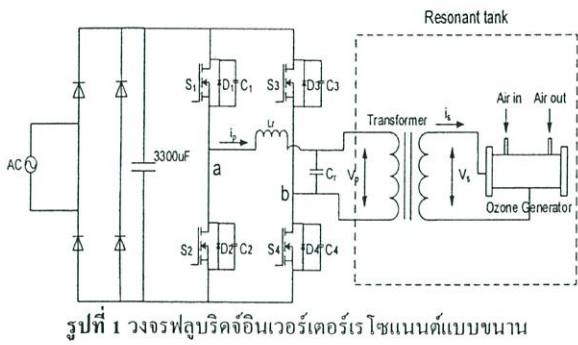
### 1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำก๊าซโอโซนมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง มาเชื้อโรค เครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ซึ่งในโครงการนี้จะนำโอโซนมาประยุกต์ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้โอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆสามารถใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่เก็บรักษาในห้องเย็นได้ โดยสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อรา และแบคทีเรียในอากาศที่สัมผัสกับผิวของผลผลิตและยังสามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ผิวของผลผลิตได้ ซึ่งในการสร้างโอโซนนี้เราได้ใช้พลังงานจาก สนาม ไฟฟ้ากระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพื่อให้เกิดก๊าซโอโซนขึ้น โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเฟสชิฟต์ดับเบิลยูเอ็ม ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สร้างกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าเอซีป้อนให้กับขดลวดเล็กทรานส์ฟอร์มที่มีตัวนำ 2 ตัวโดยมีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสนามไฟฟ้าเอซีที่สร้างขึ้นระหว่างตัวนำนั้นสามารถทำให้เกิดก๊าซโอโซนได้

### 2. เฟสชิฟต์ดับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนาน

วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนานจะประกอบไปด้วยตัวต้านประจุและตัวขดลวดของหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่ตัวต้านประจุนั้นจะมีสวิตช์ซึ่งใช้โมสเฟต (MOSFET) จำนวน 4 ตัวในการทำวงจรฟูลบริดจ์แบบทั่วไปและมีการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์และมีคาปาซิเตอร์ต่อขนานอยู่กับวงจรซึ่งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใส่เข้าไปนี้เป็นตัวที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น ในส่วนของหม้อแปลงค้ำตัวขดลวดนั้นจะเป็นโหลดในที่นี้คือหลอดโอโซนซึ่งแสดงในรูปที่ 1

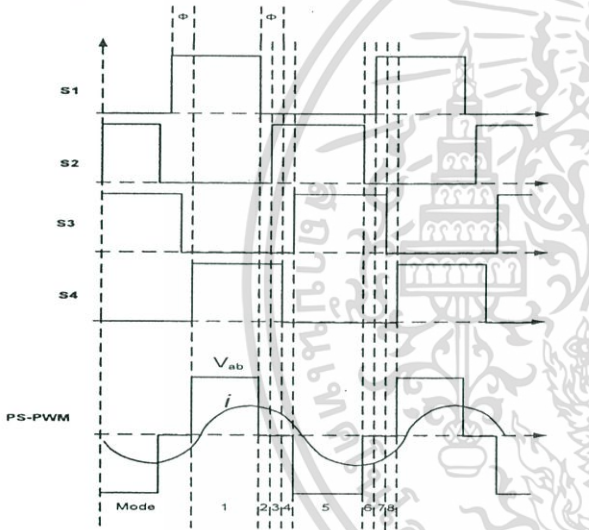
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 วงจรฟลูบริจอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนาน

3. การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร

สำหรับโหมดการทำงานเฟสชิฟต์ดับเบิลเอ็มของวงจรฟลูบริจอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนาน จะสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 8 สถานะการทำงานในหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ไคอะแกรมเวลาแสดงสถานะการทำงานของวงจร

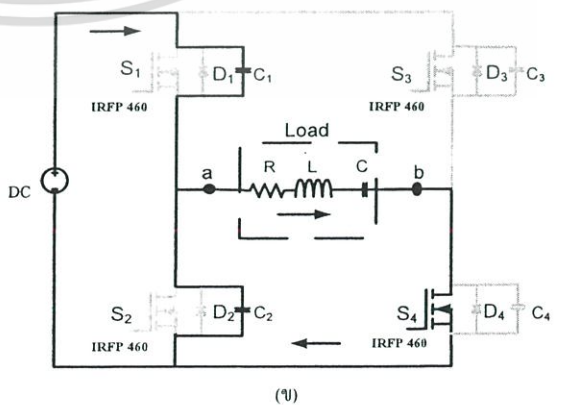
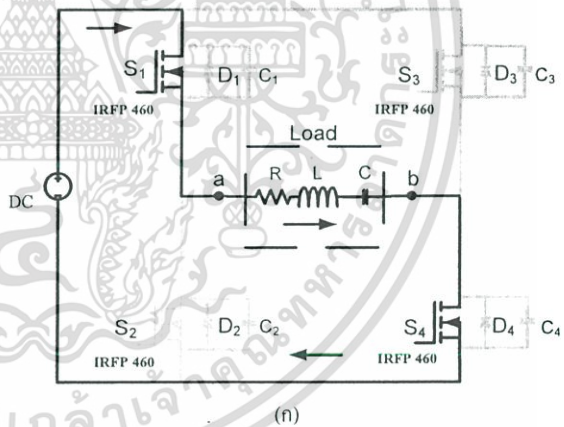
สถานะที่ 1 สวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่าย กระแสตรงไหลผ่าน  $S_1$  ไปสู่อินดักเตอร์ และไหลผ่าน  $S_4$  กลับสู่แหล่งจ่าย ควบวงจร แรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์เท่ากับ  $V_{ab}$  เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย กระแสตรง  $V_{DC}$  โดยที่แรงดันตกคร่อม  $S_1, C_1$  และ  $D_1$  เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อม  $S_2, C_2$  และ  $D_2$  เท่ากับ  $V_{DC}$  แรงดันตกคร่อม  $S_3, C_3$  และ  $D_3$  เท่ากับ  $V_{DC}$  และแรงดันตกคร่อม  $S_4, C_4$  และ  $D_4$  เท่ากับศูนย์

สถานะที่ 2 สวิตช์  $S_1$  หยุดนำกระแส ในขณะที่  $S_4$  ยังคงนำกระแส อยู่ ตามรูปแบบของสัญญาณขับเกตที่จ่ายให้  $S_4$  กระแสที่ไหลต่อเนื่อง ผ่าน  $S_1$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_1$  แทน กระแสไหลผ่าน  $C_1$  ไปสู่อินดักเตอร์ และ  $S_4$  กลับสู่แหล่งจ่าย ควบวงจร ในขณะเดียวกัน แรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$

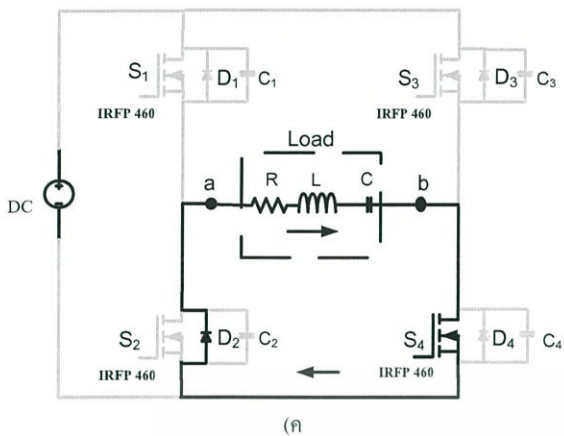
ลดลงเพราะ  $C_2$  ต่อขนานอยู่กับโหลด เมื่อ  $S_1$  หยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมอินดักเตอร์ลดลง  $C_2$  สามารถคายประจุผ่านโหลด ผ่าน  $S_4$  ควบวงจร

สถานะที่ 3 ช่วงเวลาฟรีวีล (Free Wheeling) ในสถานะนี้ แหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสให้ โหลดได้เพราะ  $S_1$  เปิดวงจรและ  $C_1$  เก็บประจุเต็ม ช่วงเวลานี้พลังงานที่สะสมในโหลด ไหลผ่าน  $S_4$  ไปสู่อินดักเตอร์ กลับมาที่โหลด ควบวงจร ช่วงเวลาฟรีวีลนี้ไดโอด  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัส ทำให้ครบวงจรคืนพลังงาน เพื่อลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตช์ จากการได้รับฟอร์เวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัดได้ และแรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากสวิตช์  $S_2$  ได้เปิดวงจร  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัส

สถานะที่ 4 กระแสที่ไหลผ่าน  $S_1$  เปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_1$  ไหลผ่าน  $D_2$  กลับสู่อินดักเตอร์ เนื่องจาก  $S_1$  เปิดวงจรพลังงานที่สะสมในโหลดลดลงเกือบหมด และ  $S_2$  นำกระแส โดยที่  $S_4$  หยุดนำกระแส ในสถานะการทำงานที่ 5-8 จะมีลำดับการทำงานที่คล้ายคลึงกับในโหมดการทำงานที่ 1-4 แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เครื่องหมายของแรงดัน และกระแสจะตรงกันข้ามกับสถานะที่ 1-4

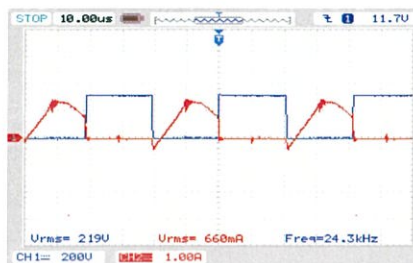


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

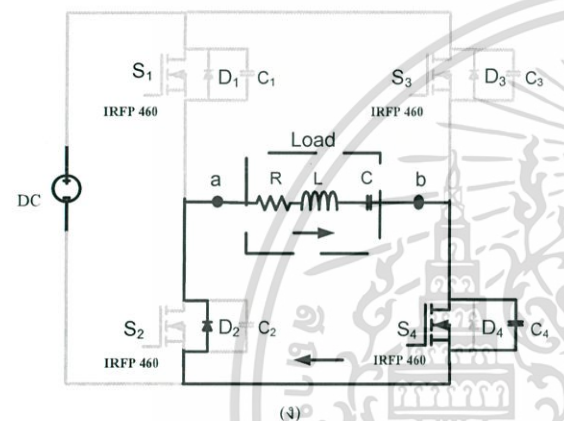


(ก)

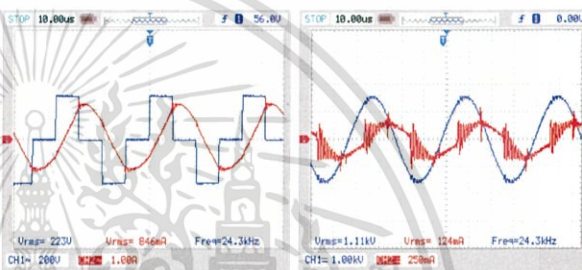
โดยได้ผลการทดสอบการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไอโซนที่จุดเรโซแนนซ์คือที่ความถี่ของสวิทซ์ 24 kHz ได้ผลดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 6 แสดงการเกิด ZVS ที่แรงดันคร่อมมอสเฟสและกระแสที่ผ่านมอสเฟส



(ง)



รูปที่ 7 แรงดันกระแสขาออกจากอินเวอร์เตอร์และแรงดันกระแสขาออกจากหม้อแปลงระดับแรงดัน

รูปที่ 4 สภาวะการทำงาน (ก) สภาวะที่ 1, (ข) สภาวะที่ 2, (ค) สภาวะที่ 3, (ง) สภาวะที่ 4

และกรณีของประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยที่ยังใกล้จุดเรโซแนนซ์ทำให้ยังทำให้ประสิทธิภาพสูงโดยในกรณีนี้ที่จุดเรโซแนนซ์ความถี่ 24 kHz นั้นมีประสิทธิภาพสูงถึง 93 % ดังรูปที่ 8

4. ผลการทดสอบทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยแรงดันขาเข้า 311 Vdc และได้ออกแบบชุดโพลคือหลอด ไอโซนซึ่งค่าพารามิเตอร์สมมูลทางของทั้งวงจรมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิด ไอโซน

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไว้หลอดทางด้านปฐมภูมิ ( $L_{mp}$ )	9.84 $\mu$ H
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน ( $L_m$ )	1.54 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไว้หลอดทางด้านทุติยภูมิ ( $L_{ms}$ )	0.34 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ )	2.26 mH
อัตราส่วนรอบหม้อแปลง ( $n$ )	1/6
ความต้านทานสมมูล ( $R_{eq}$ )	222 $\Omega$
ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์ ( $C_r$ )	121.9 nF
ความถี่สวิทซ์ ( $f_s$ )	24 kHz

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่

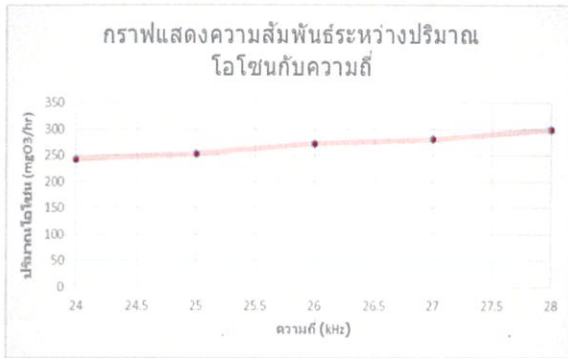


รูปที่ 8 แสดงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

6. ผลทางเคมีและการยืดอายุของมะม่วง

โดยผลจากการทดสอบนั้นหาปริมาณของไอโซนการเพิ่มความถี่เราจะพบว่ายิ่งเราเพิ่มความถี่ไปมากยิ่งทำให้ปริมาณไอโซนที่ออกมาเยอะขึ้นนั้นซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงผลของโอโซนเมื่อเปลี่ยนความถี่

และผลในเรื่องของการชื้ออายุมะม่วงซึ่งจากการทดลองนั้นพบว่าในกรณีที่เราแช่มะม่วงลงในน้ำที่ให้ออกซิเจนไว้ 10 นาทีด้วยความเข้มข้นของโอโซนที่ โอโซน 242 mgO<sub>3</sub>/hr จะทำให้เราสามารถชื้ออายุผลไม้ได้นานกว่าในกรณีที่ไม่แช่ได้เฉลี่ยถึง 6 วัน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบกรณีแช่ผลไม้แช่น้ำโอโซนในวันที่ 5 ของการเก็บรักษา โดยที่รูปซ้ายไม่ได้แช่จะให้ได้ว่ามีกรเน่าเสีย ในขณะที่รูปขวาแช่น้ำโอโซนยังไม่พบการเน่าเสียเกิดขึ้น

## 5. สรุป

วงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนานนั้นมีผลทำให้เกิด ZVS ซึ่งช่วยลดการสูญเสียของสวิตช์ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ด้วยผลของเรโซแนนต์ทำให้เราได้ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์สูงสุดที่ 93 % และทางเคมีโดยการวัดปริมาณโอโซนที่ความถี่ 24-28 kHz ซึ่งจะเห็นว่ายิ่งความถี่เพิ่มปริมาณโอโซนยิ่งเพิ่มตาม และสุดท้ายในด้านของผลการทดลองการชื้ออายุผลไม้ของมะม่วงซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ผ่านมากระบวนการโอโซนจะมีอายุที่นานกว่ากรณีที่ไม่ได้ผ่านราว 6 วัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีระเดช เจริญธรรม, “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน : ศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PDM และ PSPWM ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์ แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนต์สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน”

วิทยานิพนธ์คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2556.

- [2] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน วุฒิพล ชารินทร์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 12 กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินติ้ง, 2555.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2550
- [4] Anuwat Jangwanitlert, “Evaluation of an Improved zero-voltage and zero-current Switching PWM full-Bridge cd-dc Converter”, University of Arkansas, December 2004
- [5] อนุรักษ์ มั่นสุข, “เครื่องผลิตก๊าซ โอโซนแบบแรงดันและความถี่สูง โดยใช้แหล่งจ่ายเฟสซิงเกิ้ล-ดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์”, วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550

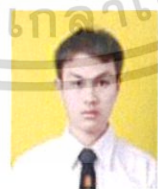
## ประวัติผู้เขียนบทความ



นายคชพัทธ์ รัชตเมธิน  
ที่อยู่ 148/5 หมู่ 4 ต.ศรีมหาโพธิ  
อ.ศรีมหาโพธิ จ.ปราจีนบุรี 25140  
เบอร์โทรศัพท์ 087-085-6270



นายเจริญจติ อรุณดิน  
ที่อยู่ 176 หมู่ 14 ต.คงสิงค์  
อ.จันทบุรี จ.ร้อยเอ็ด 45000  
เบอร์โทรศัพท์ 090-209-6624



นายกิตติทัศน์ เบญจเจริญพัฒน์  
ที่อยู่ 51/73 ถนนหทัยราษฎร์  
แขวง มีนบุรี เขตมีนบุรี  
กรุงเทพฯ 10510  
เบอร์โทรศัพท์ 088-870-5929



นายณัฐกิตต์ ราชโส  
ที่อยู่ 170/40 หมู่ 9 ต.บ้านสวน  
อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000  
เบอร์โทรศัพท์ 081-381-4445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลอุปกรณ์การวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

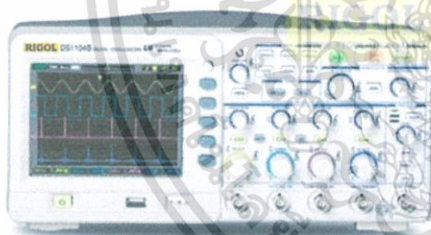


ผลิตภัณฑ์ Digital Multi Meter (Sanwa)

รุ่น CD722

รายละเอียด Vac or Vdc : 0 to 1000/1000  
Volts

Iac or Idc : 0 to 20 Amps

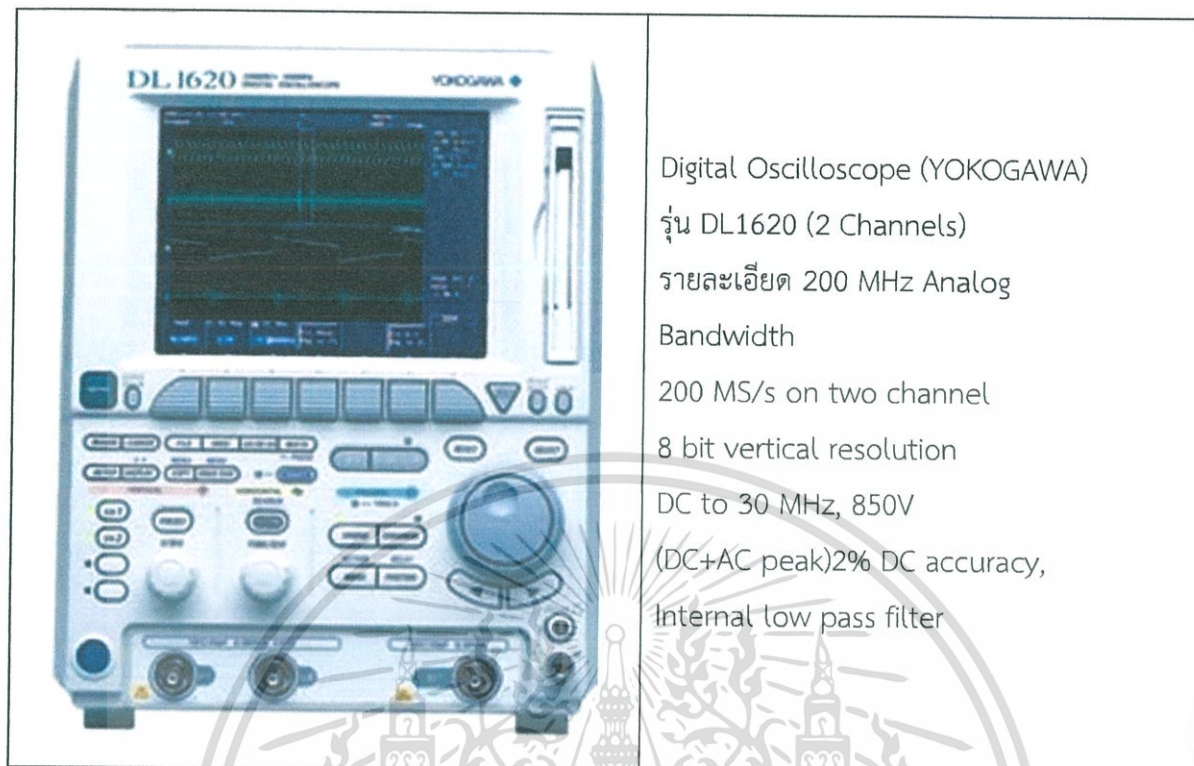


Digital Oscilloscope (Rigol)

รุ่น DS1104B

- 4 Analogue Channels
- 2GSa/s Real-Time Sample Rate
- Versatile Trigger Functions
- Waveform Record and Replay Function
- Built-in FFT and Digital Filters
- Pass/Fail Test
- High Definition Display (320 x 240)
- Connectivity: USB Host & Device,  
LAN(LXI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)

รุ่น DL1620 (2 Channels)

รายละเอียด 200 MHz Analog

Bandwidth

200 MS/s on two channel

8 bit vertical resolution

DC to 30 MHz, 850V

(DC+AC peak)2% DC accuracy,

Internal low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโอโซน

### 1.1 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI)

- ละลายสารโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.5 กรัม (g) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (mL) เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้

### 1.2 สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )

- สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ให้มีความเข้มข้น 1N  $H_2SO_4$

### 1.3 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ )

- ละลาย ( $Na_2S_2O_3$ ) จำนวน 25 g ในน้ำ 1 ลิตร (L) ให้มีความเข้มข้น 0.1 N  $Na_2S_2O_3$

### 1.4 น้ำแป้ง (1% Starch)

- ละลายน้ำแป้ง 1 กรัม (g) ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร (mL)

## 2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนโดยวิธีการทางเคมี

2.1 ดูดซึ่มก๊าซโอโซน (Absorption) จากเครื่องผลิตก๊าซโอโซนลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ละลาย (KI) กับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร (mL) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือส้ม

2.2 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 มาปรับค่า pH โดยการนำสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1 N  $H_2SO_4$  ปริมาณ 3 มิลลิลิตร (mL) และเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิลิตร (mL) (เป็นอินดิเคเตอร์) เติมลงไปนในสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองหรือสีส้ม จะกลายเป็นสีน้ำเงิน

2.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.2 มาทำการไตเตรตโดยใช้สารละลาย โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) ที่มีความเข้มข้น 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เป็นตัวไตเตรตทำการไตเตรตจนสีน้ำเงินจางหายไปจากนั้นทำการบันทึกค่าของ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

## 3. การคำนวณหาปริมาณโอโซน

จากความสัมพันธ์  $0.1\text{ N } Na_2S_2O_3\ 1\text{ mL} = 2.4\text{ mgO}_3$

ตัวอย่าง การคำนวณเช่น กรณีที่ใช้ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  ในการไตเตรต 1.5 mL และดูดซึ่มโอโซนลงน้ำ 1 นาที คือปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ประมาณ  $1.7 \times 2.4 \times 60 = 244.8\text{ mgO}_3/\text{hr}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก.1 เครื่องผลิตก๊าซไอโซน

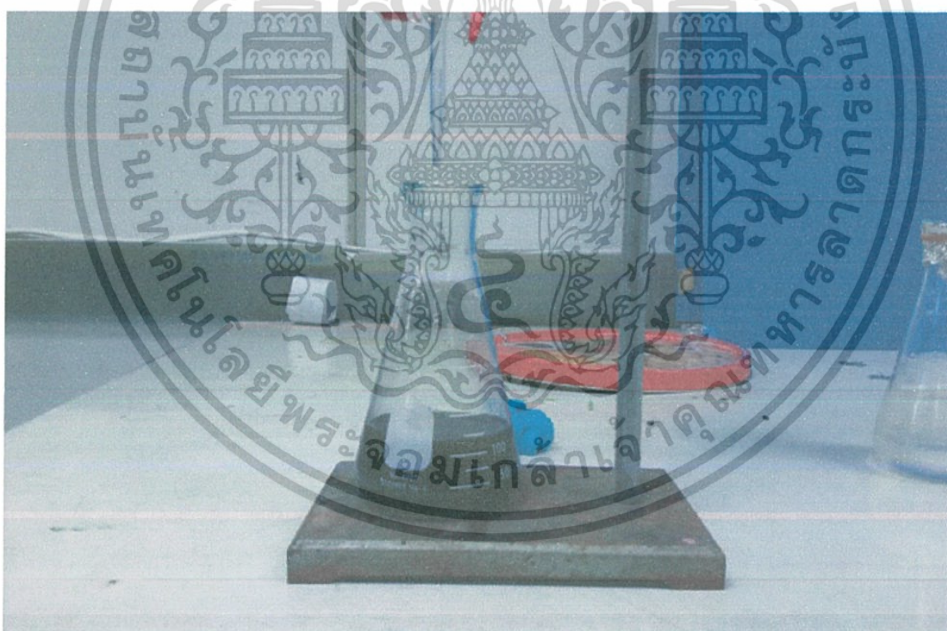


รูป ก.2 อุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

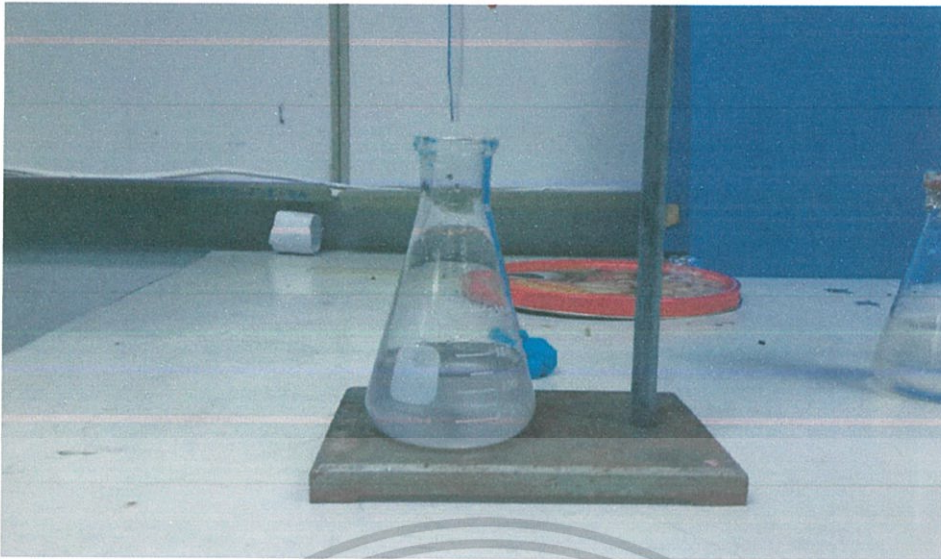


รูป ก.3 สารละลาย KI ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอโชน



รูป ก.4 สารละลายที่เติมกรดซัลฟูริกและน้ำแบ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



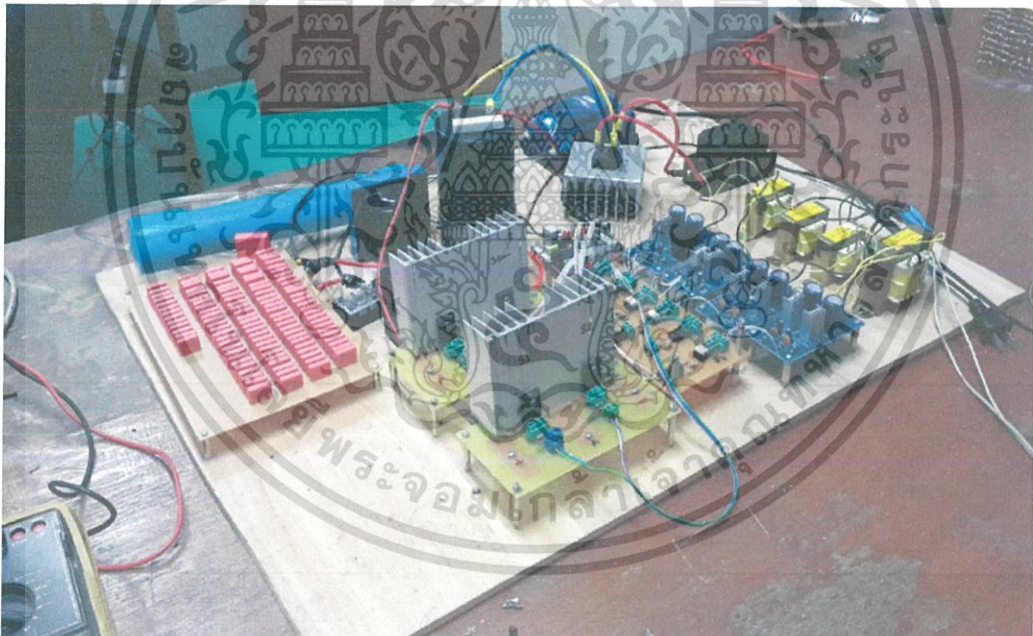
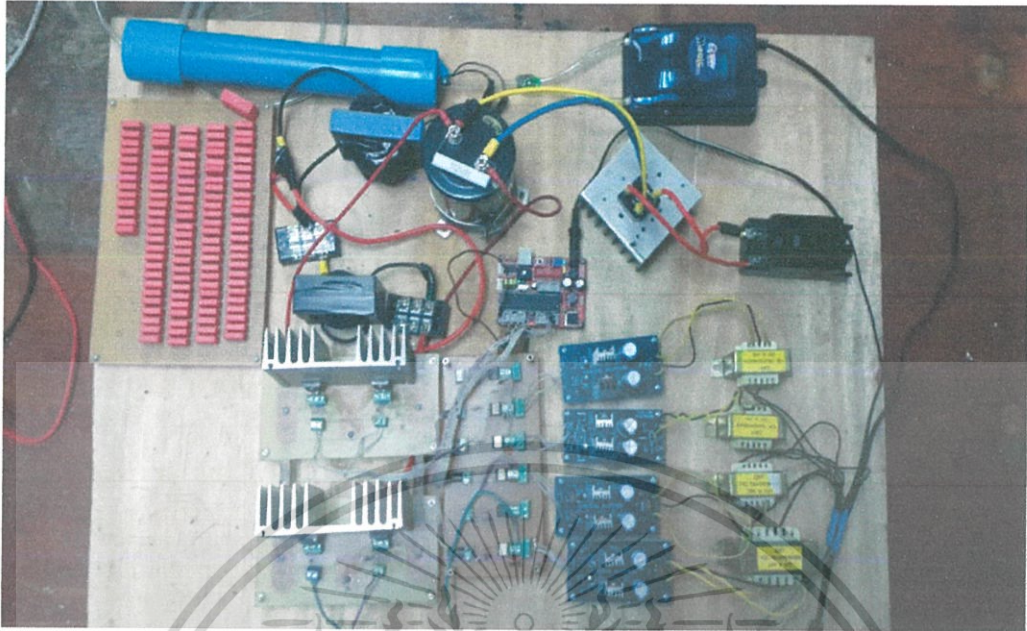
รูป ก.5 สารละลายหลังทำการไตรเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### IRFP460

### 20A, 500V, 0.270 Ohm, N-Channel Power MOSFET

This N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistor is an advanced power MOSFET designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching convertors, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA17465.

### Features

- 20A, 500V
- $r_{DS(ON)} = 0.270\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- SOA is Power Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
  - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

### Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRFP460	TO-247	IRFP460

NOTE: When ordering, use the entire part number.

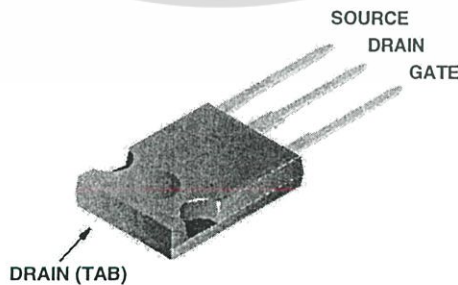
### Symbol



• S

### Packaging

JEDEC STYLE TO-247



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

**Absolute Maximum Ratings**  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

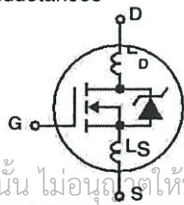
	IRFP460	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1) . . . . .	$V_{DS}$ 500	V
Drain to Gate Voltage ( $R_{GS} = 20k\Omega$ ) (Note 1) . . . . .	$V_{DGR}$ 500	V
Continuous Drain Current . . . . .	$I_D$ 20	A
$T_C = 100^\circ\text{C}$ . . . . .	$I_D$ 12	A
Pulsed Drain Current (Note 3) . . . . .	$I_{DM}$ 80	A
Gate to Source Voltage . . . . .	$V_{GS}$ $\pm 20$	V
Maximum Power Dissipation . . . . .	$P_D$ 250	W
Linear Derating Factor . . . . .	2.0	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4) . . . . .	$E_{AS}$ 960	mJ
Operating and Storage Temperature . . . . .	$T_J, T_{STG}$ -55 to 150	$^\circ\text{C}$
Maximum Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s. . . . .	$T_{\text{Leads}}$ 300	$^\circ\text{C}$
Package Body for 10s, See Techbrief 334 . . . . .	$T_{\text{pkg}}$ 260	$^\circ\text{C}$

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

- $T_J = 25^\circ\text{C}$  to  $T_J = 125^\circ\text{C}$ .

**Electrical Specifications**  $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Unless Otherwise Specified

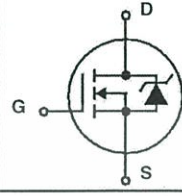
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	$V_{DS}$ DSS	$I_D = 250\mu\text{A}, V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 10)	500	-	-	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS}$ (TH)	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\mu\text{A}$	2	-	4	V
Zero Gate Voltage Drain Current	DSS	$V_{DS} = \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS} = 0\text{V}$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS} = 0\text{V}, T_J = 125^\circ\text{C}$	-	-	250	$\mu\text{A}$
On-State Drain Current (Note 2)	$I_D$ (ON)	$V_{DS} = 10\text{V}, I_D(\text{ON}) \leq I_{DS(\text{ON})\text{MAX}}, V_{GS} = 10\text{V}$	20	-	-	A
Gate to Source Leakage Current	GSS	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$	-	-	$\pm 100$	nA
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$R_{DS}$ (ON)	$I_D = 11\text{A}, V_{GS} = 10\text{V}$ (Figures 8, 9)	-	0.24	0.27	$\Omega$
Forward Transconductance (Note 2)	$g_{fs}$	$V_{DS} \geq 50\text{V}, I_{DS} > 11\text{A}$ (Figure 12)	13	19	-	S
Turn-On Delay Time	$t_{d(\text{ON})}$	$V_{DD} = 250\text{V}, I_D = 21\text{A}, R_{GS} = 4.3\Omega, R_D = 12\Omega,$ $V_{GS} = 10\text{V}$ MOSFET Switching Times are Essentially Independent of Operating Temperature	-	23	35	ns
Rise Time	$t_r$		-	81	120	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(\text{OFF})}$		-	85	130	ns
Fall Time	$t_f$		-	65	98	ns
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate-Drain)	$Q_{g(\text{TOT})}$	$V_{GS} = 10\text{V}, I_D = 21\text{A}, V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS},$ $I_G(\text{REF}) = 1.5\text{mA}$ (Figure 14). Gate Charge is Essentially Independent of Operating Temperature	-	120	190	nC
Gate to Source Charge	$Q_{gs}$		-	18	-	nC
Gate to Drain "Miller" Charge	$Q_{gd}$		-	62	-	nC
Input Capacitance	$C_{ISS}$	$V_{DS} = 25\text{V}, V_{GS} = 0\text{V}, f = 1\text{MHz}$ (Figure 10)	-	4100	-	pF
Output Capacitance	$C_{OSS}$		-	480	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	$C_{RSS}$		-	84	-	pF
Internal Drain Inductance	$L_D$	Measured from the Drain Lead, 6mm (0.25in) from Package to Center of Die	-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$	Measured from the Source Lead, 6mm (0.25in) from Header to Source Bonding Pad	-	13	-	nH
		Modified MOSFET Symbol Showing the Internal Device Inductances				
Thermal Resistance Junction to Case	$\theta_{JC}$	Free Air Operation	-	-	0.50	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	$\theta_{JA}$	Free Air Operation	-	-	30	$^\circ\text{C/W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

IRFP460

Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Continuous Source to Drain Current	$I_{SD}$	Modified MOSFET Symbol Showing the Integral Reverse P-N Junction Rectifier	-	-	20	A
Pulse Source to Drain Current (Note 3)	$I_{SDM}$		-	-	80	A
Source to Drain Diode Voltage (Note 2)	$V_{SD}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_{SD} = 21\text{A}, V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 13)	-	-	1.8	V
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_{SD} = 21\text{A}, di_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	280	580	1200	ns
Reverse Recovery Charge	$Q_{RR}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_{SD} = 21\text{A}, di_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	3.8	8.1	18	$\mu\text{C}$



- NOTES:
- Pulse test: pulse width  $\leq 300\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .
  - Repetitive rating: pulse width limited by Max junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
  - $V_{DD} = 50\text{V}$ , starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 4.3\text{mH}$ ,  $R_{GS} = 25\Omega$ , Peak  $I_{AS} = 20\text{A}$ .

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified

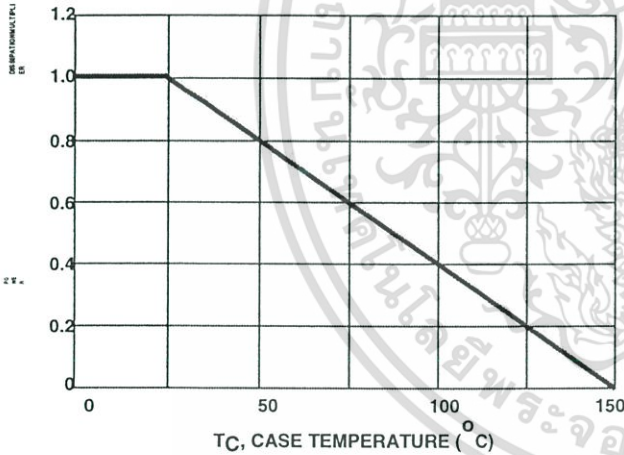


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

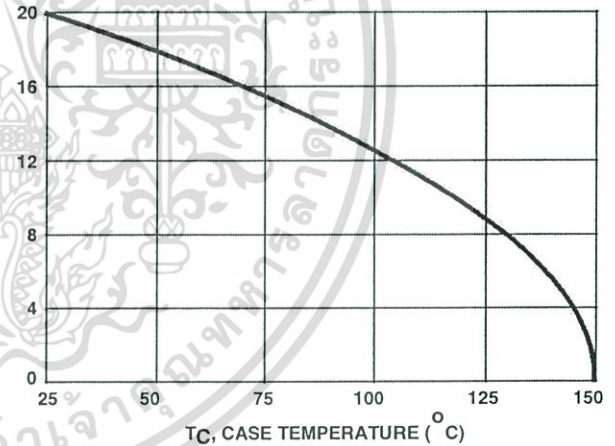


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

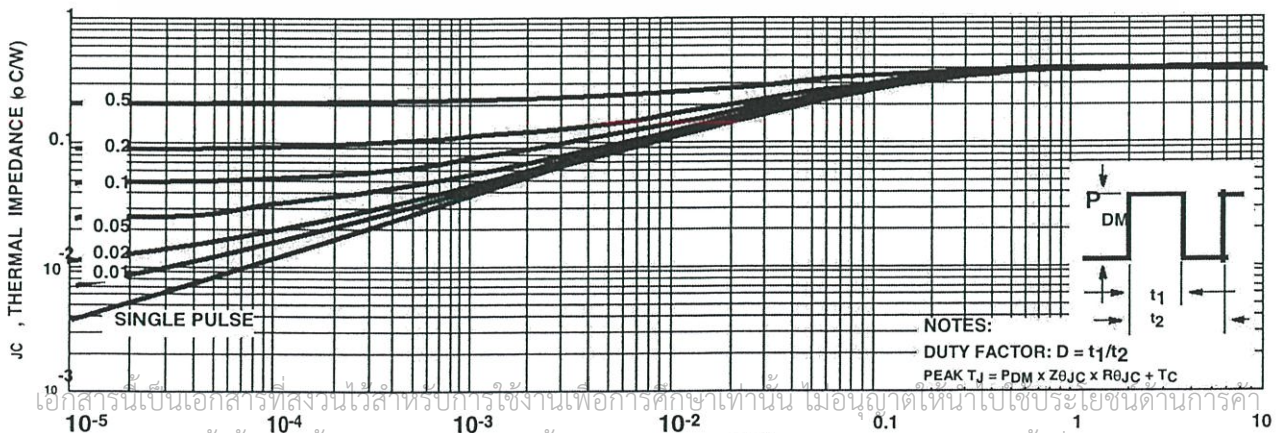


FIGURE 3. MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IRFP460

## Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

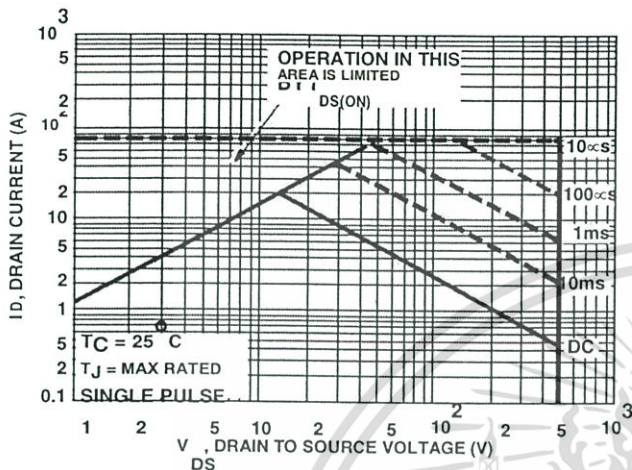


FIGURE 4. FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA

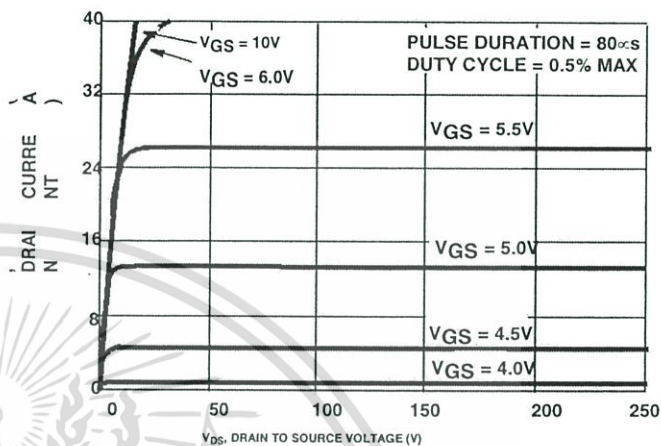


FIGURE 5. OUTPUT CHARACTERISTICS

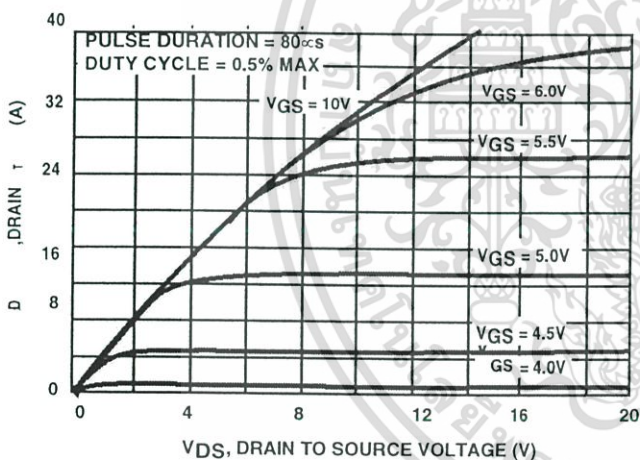


FIGURE 6. SATURATION CHARACTERISTICS

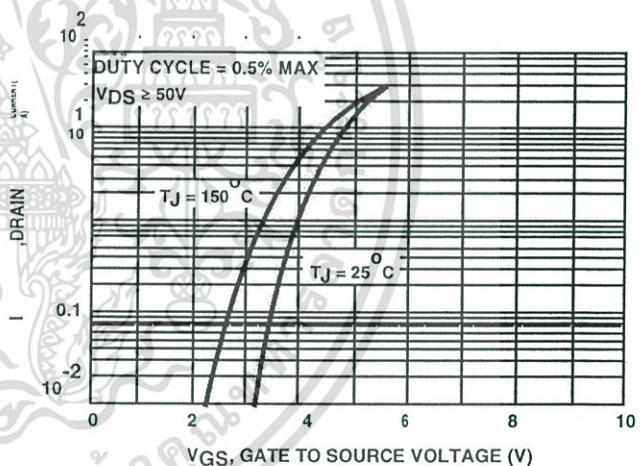


FIGURE 7. TRANSFER CHARACTERISTICS

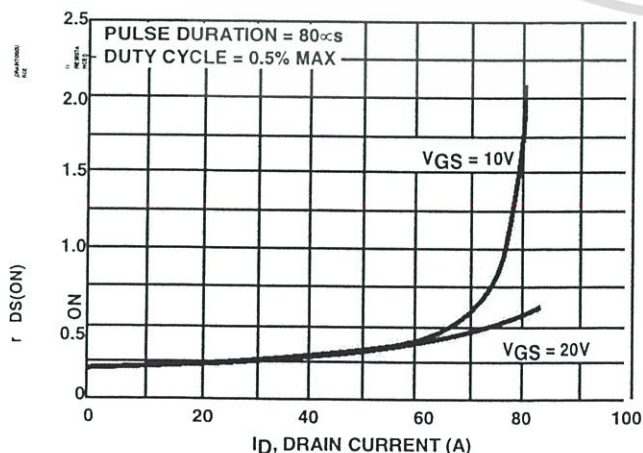


FIGURE 8. DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs GATE VOLTAGE AND DRAIN CURRENT

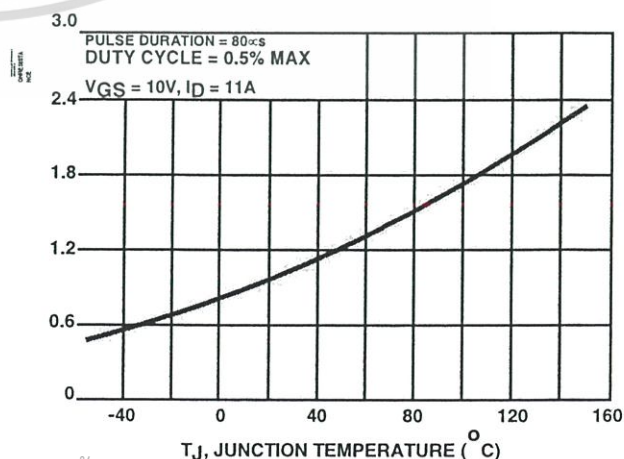


FIGURE 9. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs JUNCTION TEMPERATURE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม้ว่าใครเห็นได้ก็ให้มันเห็นเพื่อให้เห็นเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ให้ครบถ้วน

IRFP460

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

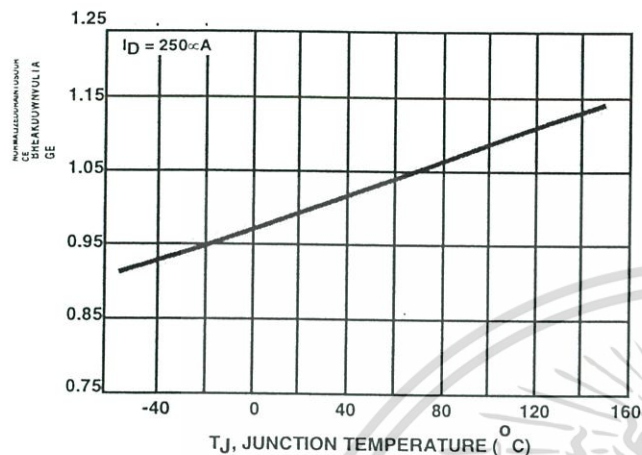


FIGURE 10. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE BREAKDOWN VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

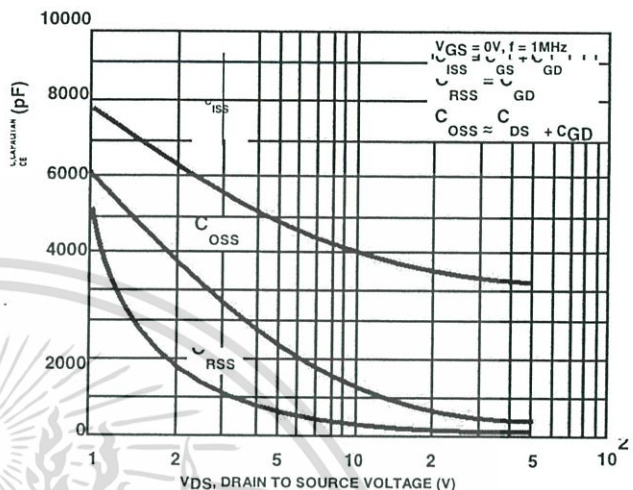


FIGURE 11. CAPACITANCE vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE

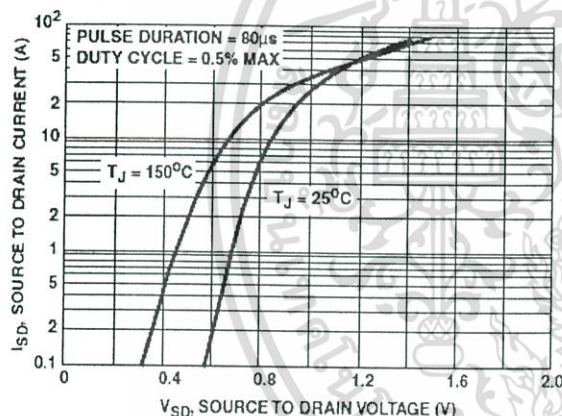


FIGURE 12. SOURCE TO DRAIN DIODE VOLTAGE

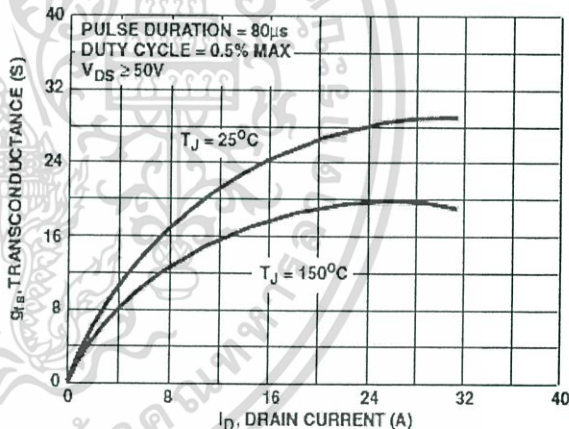


FIGURE 13. TRANSCONDUCTANCE vs DRAIN CURRENT

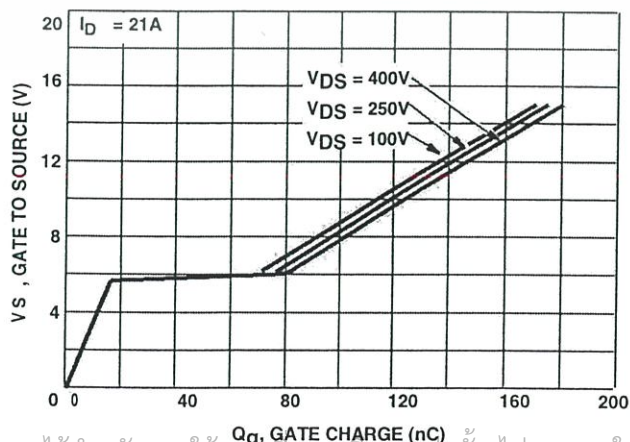


FIGURE 14. GATE TO SOURCE VOLTAGE vs GATE CHARGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Test Circuits and Waveforms

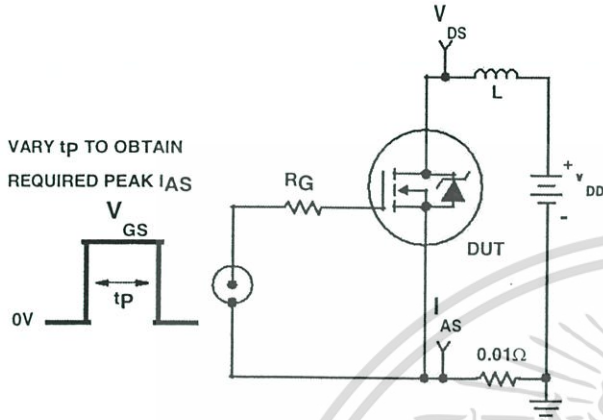


FIGURE 15. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

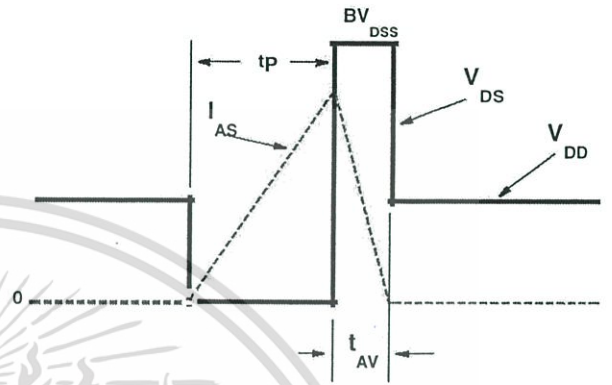


FIGURE 16. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

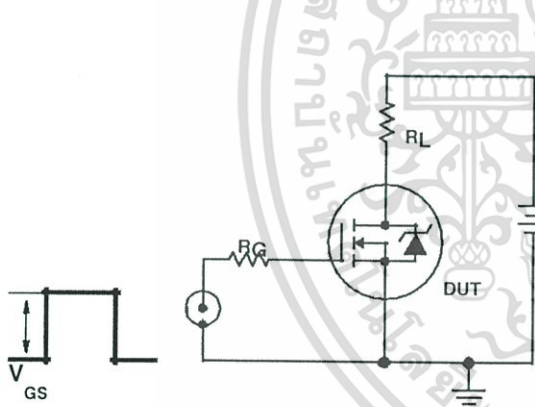


FIGURE 17. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

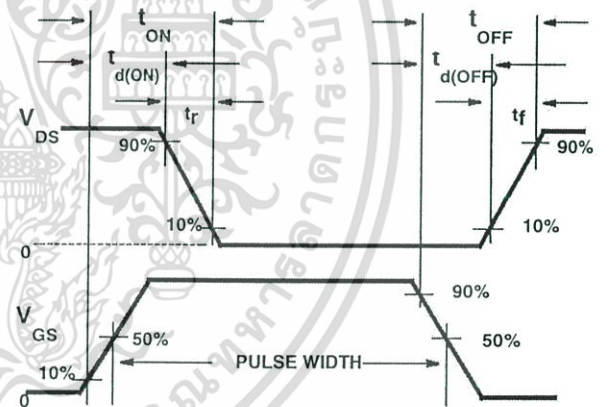


FIGURE 18. RESISTIVE SWITCHING WAVEFORMS

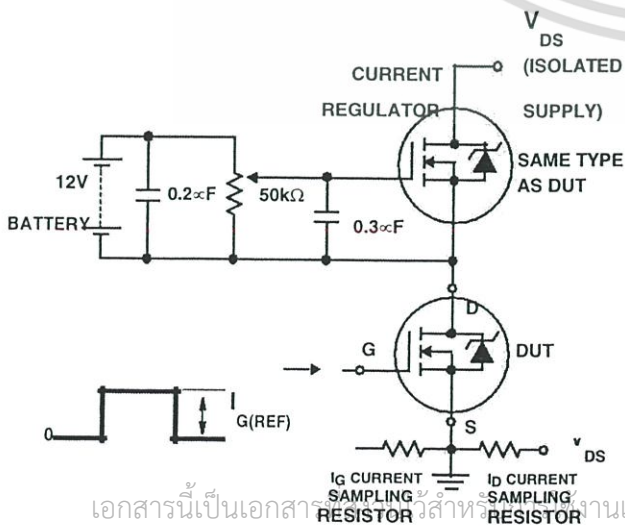


FIGURE 19. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

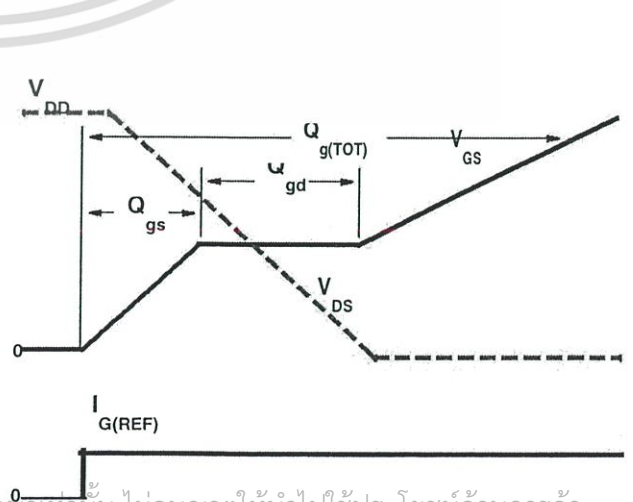


FIGURE 20. GATE CHARGE WAVEFORMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างสำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะต้องแจ้งให้ทางผู้ผลิตทราบ และต้องอ้างอิงถึงแหล่งเอกสารฉบับนี้ที่มีการแก้ไข

## TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACE <sup>x</sup> ™	FAST <sup>™</sup>	OPTOLOGIC™	SMART START™VCX™
Bottomless™	FAST <sup>r</sup> ™	OPTOPLANAR™	STAR*POWER™
CoolFET™	FRFET™	PACMAN™	Stealth™
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	POP™	SuperSOT™-3
DenseTrench™	GTO™	Power247™	SuperSOT™-6
DOME™	HiSeC™	PowerTrench <sup>™</sup>	SuperSOT™-8
EcoSPARK™	ISOPLANAR™	QFET™	SyncFET™
E <sup>2</sup> CMOS <sup>1</sup> ™	LittleFET™	QS™	TinyLogic™
EnSigna <sup>1</sup> ™	MicroFET™	QT Optoelectronics™	TruTranslation™
FACT™	MicroPak™	Quiet Series™	UHC™
FACT Quiet Series™	MICROWIRE™	SILENT SWITCHER <sup>®</sup>	UltraFET <sup>®</sup>

STAR\*POWER is used under license

## DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

## LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

## PRODUCT STATUS DEFINITIONS

### Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TLP250

Transistor Inverter  
 Inverter For Air Conditionor  
 IGBT Gate Drive  
 Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.

This unit is 8-lead DIP package.

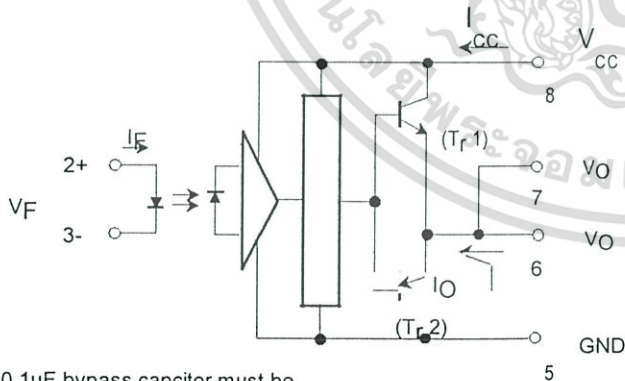
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage:  $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type  
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823  
 Maximum operating insulation voltage:  $630\text{V}_{\text{PK}}$  Highest  
 permissible over voltage:  $4000\text{V}_{\text{PK}}$

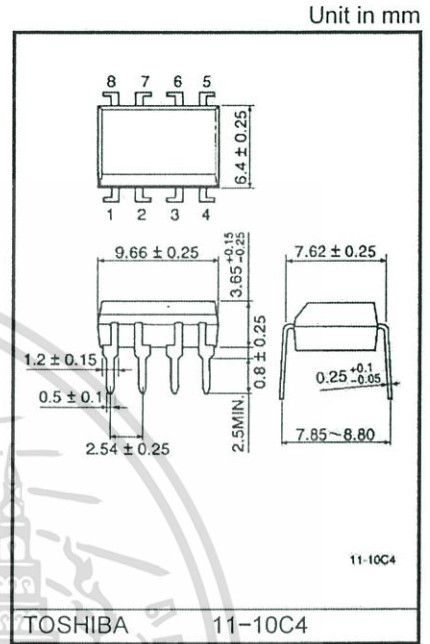
**(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"**

- Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

## Schematic

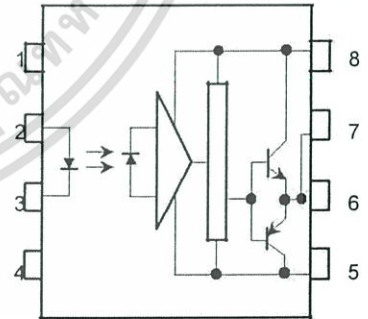


A  $0.1\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).



Weight: 0.54 g

## Pin Configuration (top view)



- 1: N.C.
- 2: Anode
- 3: Cathode
- 4: N.C.
- 5: GND
- 6:  $V_O$  (Output)
- 7:  $V_O$
- 8:  $V_{CC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

# TOSHIBA

## TLP250

### Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I <sub>F</sub>	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	ΔI <sub>F</sub> / ΔTa	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I <sub>FPT</sub>	1	A	
	Reverse voltage	V <sub>R</sub>	5	V	
	Junction temperature	T <sub>J</sub>	125	°C	
Detector	"H" peak output current (P <sub>W</sub> ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I <sub>OPH</sub>	-1.5	A	
	"L" peak output current (P <sub>W</sub> ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I <sub>OPL</sub>	+1.5	A	
	Output voltage	V <sub>O</sub>	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Supply voltage	V <sub>CC</sub>	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔV <sub>O</sub> / ΔTa	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔV <sub>CC</sub> / ΔTa	-0.73	V / °C	
	Junction temperature	T <sub>J</sub>	125	°C	
	Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz	
Operating temperature range	T <sub>opr</sub>	-20~85	°C		
Storage temperature range	T <sub>stg</sub>	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s)	T <sub>sol</sub>	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)	BVS	2500	V <sub>rms</sub>		

(Note 1) Pulse width P<sub>W</sub> ≤ 1μs, 300pps

(Note 2) Exponential waveform

(Note 3) Exponential waveform, I<sub>OPH</sub> ≤ -1.0A (≤ 2.5μs), I<sub>OPL</sub> ≤ +1.0A (≤ 2.5μs)

(Note 4) Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

(Note 5) A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input current, on	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	$V_{CC}$	15	—	30   20	V
Peak output current	$I_{OPH}$ $I_{OPL}$	—	—	$\pm 0.5$	A
Operating temperature	$T_{opr}$	-20	25	70   85	°C

# TOSHIBA

# TLP250

## Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit	
Input forward voltage	$V_F$	—	$I_F = 10 \text{ mA}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	1.6	1.8	V	
Temperature coefficient of forward voltage	$\Delta V_F / \Delta T_a$	—	$I_F = 10 \text{ mA}$	—	-2.0	—	mV / °C	
Input reverse current	$I_R$	—	$V_R = 5 \text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	—	10	mA	
Input capacitance	$C_T$	—	$V = 0$ , $f = 1 \text{ MHz}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	45	250	pF	
Output current	"H" level	$I_{OPH}$	3	$V_{CC} = 30 \text{ V}$ (*1)	$I_F = 10 \text{ mA}$ $V_{8-6} = 4 \text{ V}$	-0.5	-1.5	A
	"L" level	$I_{OPL}$	2		$I_F = 0$ $V_{6-5} = 2.5 \text{ V}$	0.5	2	
Output voltage	"H" level	$V_{OH}$	4	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ , $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200 \Omega$ , $I_F = 5 \text{ mA}$	11	12.8	—	V
	"L" level	$V_{OL}$	5	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ , $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200 \Omega$ , $V_F = 0.8 \text{ V}$	—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	$I_{CCH}$	—	$V_{CC} = 30 \text{ V}$ , $I_F = 10 \text{ mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	7	—	mA
	"L" level	$I_{CCL}$	—	$V_{CC} = 30 \text{ V}$ , $I_F = 10 \text{ mA}$	—	—	11	
				$V_{CC} = 30 \text{ V}$ , $I_F = 0 \text{ mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	$\frac{3}{4}$	7.5	$\frac{3}{4}$	
Threshold input current	"Output L→H"	$I_{FLH}$	—	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ , $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200 \Omega$ , $V_O > 0 \text{ V}$	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	$V_{FHL}$	—	$V_{CC1} = +15 \text{ V}$ , $V_{EE1} = -15 \text{ V}$ $R_L = 200 \Omega$ , $V_O < 0 \text{ V}$	0.8	—	—	V
Supply voltage	$V_{CC}$	—	—	10	—	35	V	
Capacitance (input-output)	$C_S$	—	$V_S = 0$ , $f = 1 \text{ MHz}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	1.0	2.0	pF	
Resistance(input-output)	$R_S$	—	$V_S = 500 \text{ V}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$ $R.H. \leq 60\%$	$1 \times 10^{12}$	$10^{14}$	—	W	

\* All typical values are at  $T_a = 25^\circ\text{C}$  (\*1): Duration of  $I_O$  time  $\leq 50 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)

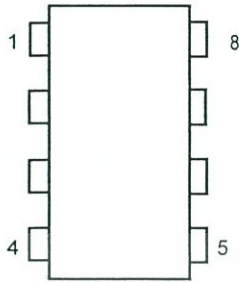
Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t <sub>pLH</sub>	6	I <sub>F</sub> = 8mA V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t <sub>pHL</sub>			—	0.15	0.5	
Output rise time		t <sub>r</sub>			—	—	—	
Output fall time		t <sub>f</sub>			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output		C <sub>MH</sub>	7	V <sub>CM</sub> = 600V, I <sub>F</sub> = 8mA V <sub>CC</sub> = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output		C <sub>ML</sub>	7	V <sub>CM</sub> = 600V, I <sub>F</sub> = 0mA V <sub>CC</sub> = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

\* All typical values are at Ta = 25°C

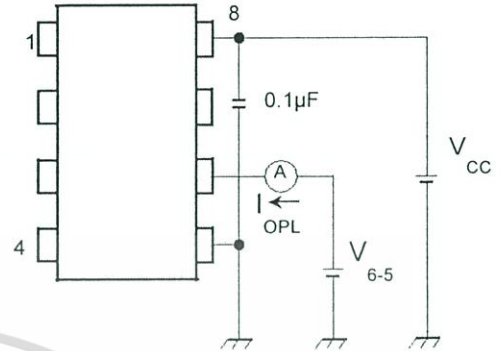


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

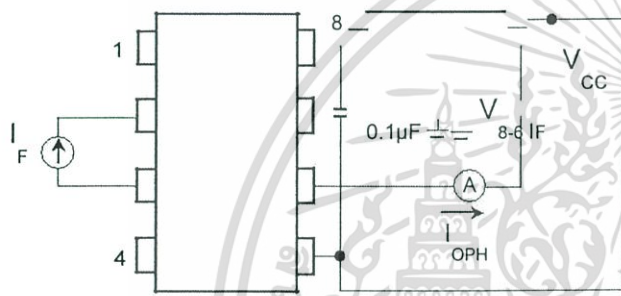
Test Circuit 1 :



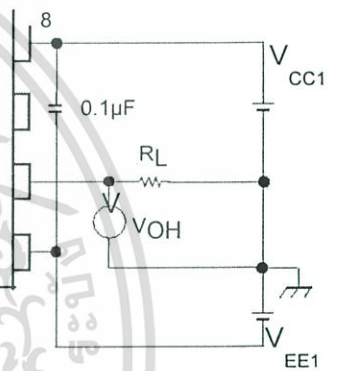
Test Circuit 2 : IOPL



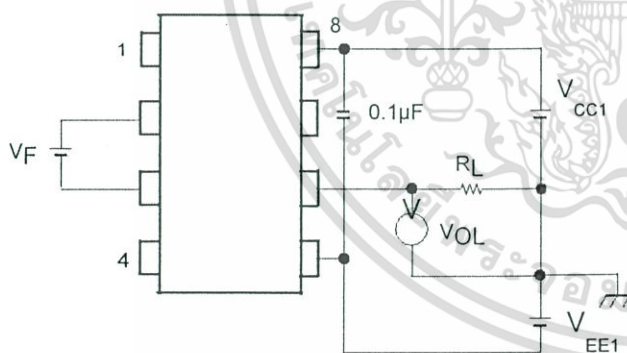
Test Circuit 3 : IOPH



Test Circuit 4 : VOH

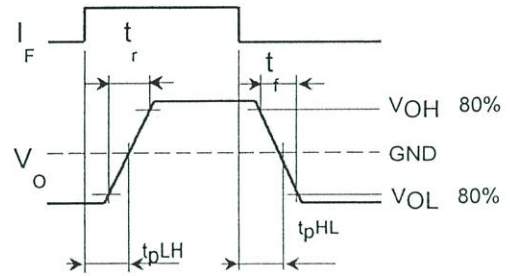
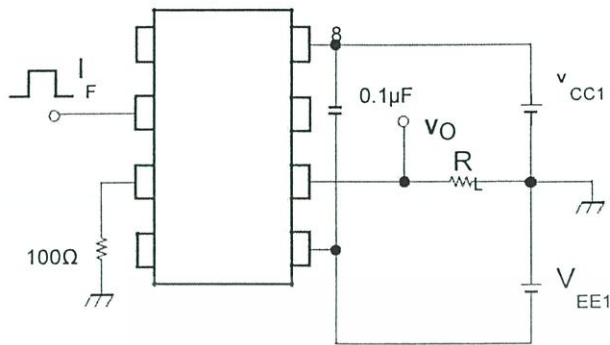


Test Circuit 5 : VOL

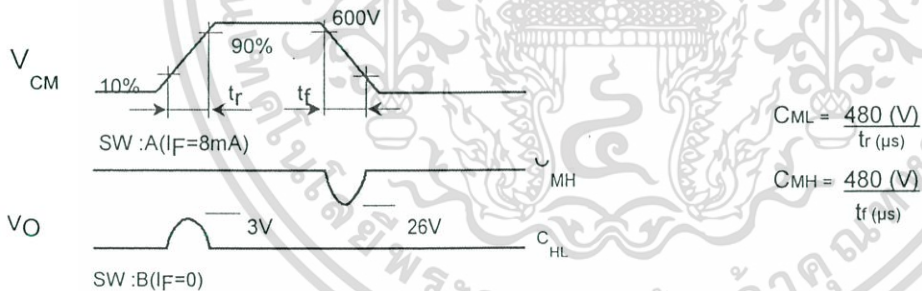
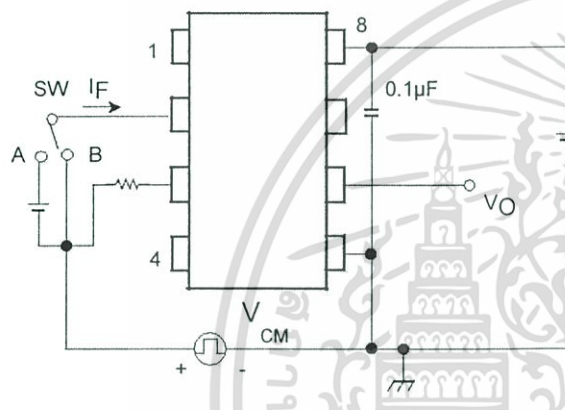


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 6:  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$

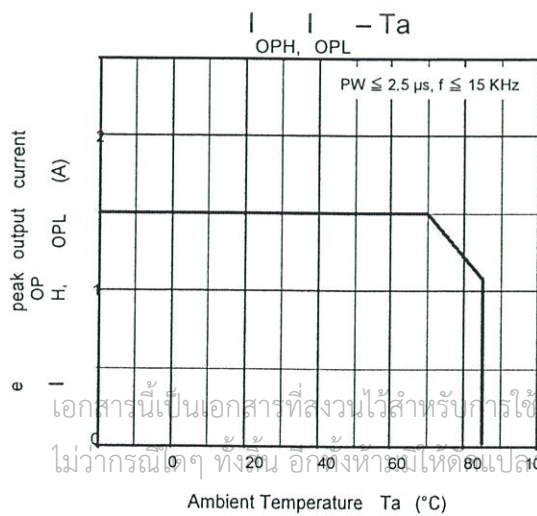
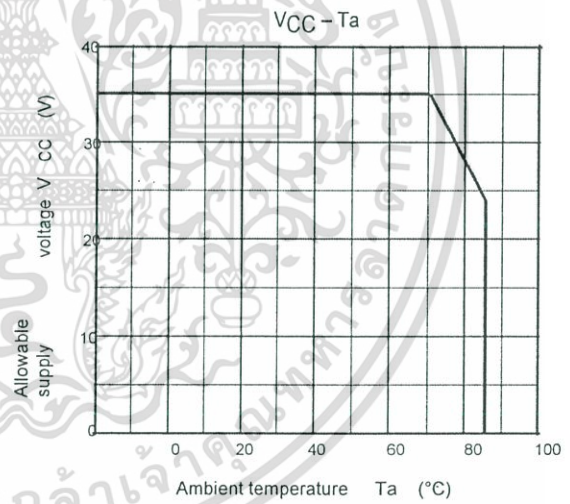
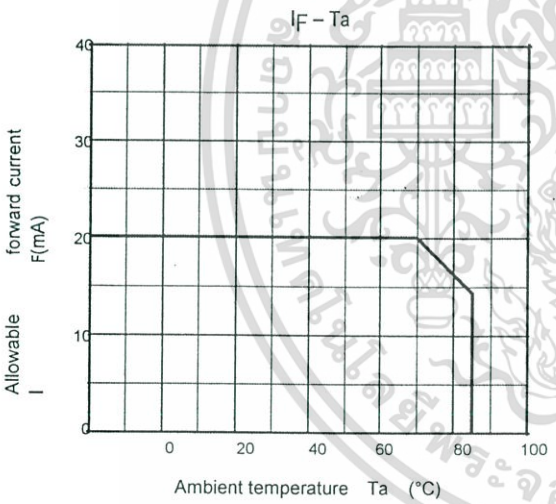
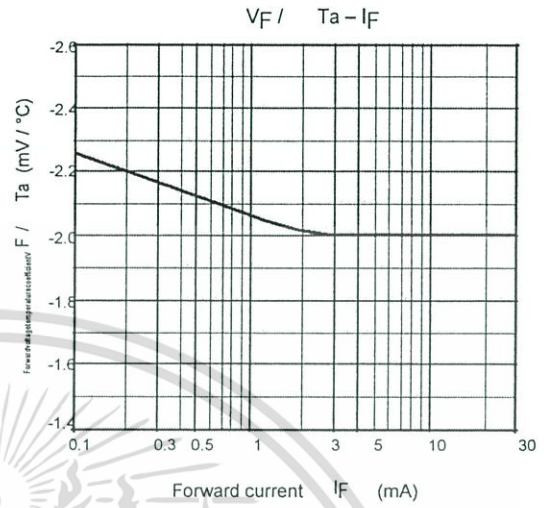
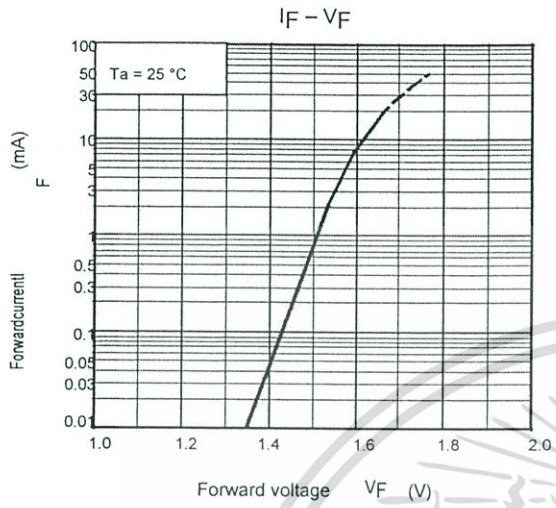


Test Circuit 7:  $C_{MH}$ ,  $C_{ML}$



$C_{ML}(C_{MH})$  is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**RESTRICTIONS ON PRODUCT USE**

000707EBC

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.  
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- Gallium arsenide (GaAs) is a substance used in the products described in this document. GaAs dust and fumes are toxic. Do not break, cut or pulverize the product, or use chemicals to dissolve them. When disposing of the products, follow the appropriate regulations. Do not dispose of the products with other industrial waste or with domestic garbage.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายคชพัทธ์ รัชตเมธิน

ที่อยู่ 148/5 หมู่ 4 ต.ศรีมหาโพธิ อ.ศรีมหาโพธิ

จ.ปราจีนบุรี 25140 เบอร์โทรศัพท์ 087-085-6270



นายเชษฐา อรุณถิ่น

ที่อยู่ 176 หมู่ 14 ต.ดงสิงห์ อ.จันทรา

จ.ร้อยเอ็ด 45000 เบอร์โทรศัพท์ 090-209-6624



นายกิตติทัศน์ เบญจเจริญพัฒน์

ที่อยู่ 51/73 ถนนหทัยราษฎร์ แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี

กรุงเทพฯ 10510 เบอร์โทรศัพท์ 088-870-5929



นายณัฐกิตต์ ราชโส

ที่อยู่ 170/40 หมู่ 9 ต.บ้านสวน อ.เมือง

จ.ชลบุรี 20000 เบอร์โทรศัพท์ 081-381-4445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้