



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2558

การใช้โอโซนยืดอายุการเก็บรักษาผลมะม่วงด้วยวงจร  
อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

OZONE FOR PROLONGING MANGOES BY USING  
HIGH FREQUENCY INVERTER

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ  
นายวาทัญญู มีศรีสุข

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กันยายน 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2558

การใช้โอโซนยืดอายุการเก็บรักษาผลมะม่วงด้วยวงจร  
อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

OZONE FOR PROLONGING MANGOES BY USING  
HIGH FREQUENCY INVERTER

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

นายวาทัญญู มีศรีสุข

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กันยายน 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2558

การใช้โอโซนยืดอายุการเก็บรักษาผลมะม่วงด้วยวงจร  
อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

OZONE FOR PROLONGING MANGOES BY USING  
HIGH FREQUENCY INVERTER

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ  
นายวาทัญญู มีศรีสุข

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สนับสนุนโดย เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ไอโซนียดอายุการเก็บรักษาผลมะม่วงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง  
แหล่งเงินจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2558

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2558

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ หัวหน้าโครงการ

นายทัญญู มีศรีสุข ผู้ร่วมวิจัย

### บทคัดย่อ

#### บทคัดย่อ

โครงการชิ้นนี้ได้นำเสนอเครื่องผลิตไอโซนียดโดยใช้อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ที่ความถี่สูงสำหรับนำมาใช้ในการยืดอายุผลไม้ต่างๆ โดยได้มีการใช้สัญญาณแบบพีดับเบิลเอ็มแบบเลื่อนเฟสในการควบคุมวงจรและสามารถปรับกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยความเข้มข้นของไอโซนียดนั้นจะถูกควบคุมด้วยการปรับค่าความถี่ของเครื่องอินเวอร์เตอร์ เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ว่าไอโซนียดสามารถยืดอายุผลไม้ได้จึงได้มีการนำมะม่วงมาทดลอง โดยการทดลองนี้ ใช้ความเข้มข้นของไอโซนียดที่ 242 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ปลอ่ยให้กับมะม่วงโดยจะการทดลองนี้จะได้ว่าที่การปลอ่ยไอโซนียด 10 นาที่ จะทำให้สามารถยืดอายุของมะม่วงได้นานที่สุดมากกว่าในกรณีเวลาอื่นๆ และประสิทธิภาพสูงสุดของอินเวอร์เตอร์นี้อยู่ที่ 93 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : ไอโซนียด อินเวอร์เตอร์ พีดับเบิลเอ็มแบบเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แ

ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Ozone for Prolonging Mangoes by Using High Frequency Inverter

Researcher: Assoc Prof. Dr. Anuwat jangwanitlert

and Mr. Watanyu Meesrisuk

Faculty: Engineering Department: Electrical Engineering

## ABSTRACT

This research 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 the test, the 242 mg/hr of ozone concentration is produced at 24.3 kHz of switching frequency. It spends time around 10 minutes that can prolong the mangoes life satisfying more than the mangoes that didn't pass ozone process. Also, the maximum efficiency of inverter is 93%.

Keywords : Ozone, Inverter, Phase-Shifted PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แ

ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
อย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนอย่างดีจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ นักศึกษาปริญญาตรีที่ช่วยจัดพิมพ์ และ นายทัญญู มีศรีสุข นักศึกษาปริญญาเอกที่ได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขในส่วนต่างๆ จนทำให้รายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้ใช้เครื่องมือในการผสมสารเคมีต่างๆ จนทำให้งานออกมาเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ต้องขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ที่ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงต้องขอขอบคุณ ณ ที่นี้ด้วย

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ  
นายทัญญู มีศรีสุข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ... .อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
Abstract	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 โครงสร้างของงานวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไอโซน	5
2.1 บทนำ	5
2.2 กระบวนการสร้างไอโซนโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	6
2.2.1 วิธีสร้างก๊าซไอโซน	7
2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ	8
2.2.3 อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	9
2.2.3.1 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	9
2.2.3.2 อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกแกนร่วมขนาด 2 ชั้น	10
2.2.4 การใช้ไอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้	13
2.2.5 คุณสมบัติของไอโซน	16
2.3 หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดัน	16
2.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนาน	21
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า	25
2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ	26
2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย	26
2.6 พีเอส-พีดับพลิวเอ็มฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full – Bridge Converter)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สรุป	30
<b>บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซน</b>	31
3.1 บทนำ	31
3.2 อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบ 2 ชั้น	31
3.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบขั้วระดับแรงดัน	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 การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน</b>	47
4.1 บทนำ	47
4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า	47
4.2.1 สัญญาณขับเกต PS-PWM แรงดันและกระแสแอสแตบิลิซเซอร์	48
4.2.2 กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์	51
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า	59
4.4 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดลองทางเคมี	60
4.5 การเก็บผลการทดลองการยึดอายุของมะม่วง	62
4.6 สรุป	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณไอโซน	70
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์การวัด	74
ภาคผนวก ค รูปโครงงานโดยรวม	76
ภาคผนวก ง Datasheet	78
ภาคผนวก จ บทความตอบรับการตีพิมพ์	94
ภาคผนวก ฉ เอกสารรับรองการใช้ประโยชน์ผลงานวิจัย	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน	5
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน	7
2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ	9
2.4 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง	10
2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	11
2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	11
2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดเมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า	12
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ย้อนให้ฉนวน	12
2.9 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE	16
2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า	19
2.11 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน	21
2.12 วงจรสมมูลของระบบ	21
2.13 วงจรสมมูลของระบบทางด้านปฐมภูมิ	21
2.14 วงจรเรโซแนนต์	22
2.15 รูปแบบการจำลองค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่าง $V_{ab}/V_0$ กับ $f_s/f_0$	25
2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุต	25
2.17 กำลังไฟฟ้า	26
2.18 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM	27
2.19 การทำงานของ PS-PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 8	28
3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน	31
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 รูปคลื่นแรงดันอินพุตของสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM	43
3.9 ช่วงสัญญาณที่แบ่งเป็น 8 ช่วงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรม	43
3.10 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PS-PWM	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์ $S_1$ และ $S_4$ การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	49
4.6	แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์ $S_2$ 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 ของสัญญาณPS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz	51
4.9	(ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณPS-PWM ที่ความถี่ 25 kHz	51
4.10	(ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณPS-PWM ที่ความถี่ 26 kHz	52
4.11	(ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณPS-PWM ที่ความถี่ 27 kHz	52
4.12	(ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณPS-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
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงกับความถี่	59
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การดำเนินงานวิจัย	2
2.1 ระดับปริมาณก๊าซไอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA)	6
3.1 พารามิเตอร์ของระบบ	40
4.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนเทียบกับรูปแบบสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz – 28 kHz	61
4.2 การเก็บผลอายุของมะม่วงครั้งที่ 1	63
4.3 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 2	63
4.4 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 3	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำก๊าซโอโซน (Ozone Gas) มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่นในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง ฆ่าเชื้อโรค เครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ซึ่งในโครงการนี้จะนำโอโซนมาประยุกต์ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โอโซนที่ความเข้มข้นต่ำๆสามารถใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่เก็บรักษาในห้องเย็นได้ โดยสามารถป้องกันการเจริญของเชื้อรา และแบคทีเรียในอากาศที่สัมผัสกับผิวของผลิตผลและยังสามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ผิวของผลิตผลได้ มีการศึกษาการใช้โอโซนในการเก็บรักษาผักและในการเก็บรักษาผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล มันฝรั่ง มะเขือเทศ สตอเบอร์รี่ บรอกโคลี แพร่ ส้ม พีช องุ่น ข้าวโพด และถั่วเหลือง แต่สิ่งที่สำคัญคือโอโซนสามารถใช้ในห้องเย็นที่ใช้เก็บรักษาผักและผลไม้เพื่อป้องกันการสุกโดยโอโซนจะไปลดการผลิตแก๊สเอทิลีนที่ผักและผลไม้ผลิตขึ้นและมีผลทำให้ผักและผลไม้สุกหรือเน่าเสียช้าลง ซึ่งโอโซนมีข้อดีกว่าสารชนิดอื่นๆ คือไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างแต่ในขณะเดียวกันถ้าโอโซนก็เป็นอันตรายกันถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองกับเยื่อผิวหนังหรือหากสูดดมในปริมาณมากอาจเป็นอันตรายถึงชีวิต

การผลิตก๊าซโอโซนจะอาศัยพลังงานจาก สนามไฟฟ้า (Electric Field) กระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพื่อให้เกิดก๊าซโอโซนขึ้น งานวิจัยทางด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวกับการผลิตก๊าซโอโซนจะใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโทรด โดยความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชุดอิเล็กโทรดหรือชนิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator) ในการทำโครงการครั้งนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีดีบีลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟส ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full Bridge Converter) สร้างกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าเอซี (AC) ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีตัวนำ 2 ตัว โดยมีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสนามไฟฟ้าเอซีที่สร้างขึ้นระหว่างตัวนำนั้นสามารถทำให้เกิดก๊าซโอโซนได้

งานวิจัยนี้ได้ทดลองโดยใช้รูปสัญญาณ พีดีบีลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟส ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full Bridge Converter) ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซนเพื่อเปรียบเทียบทางด้านเคมีคือปริมาณของโอโซนและทางไฟฟ้าของสัญญาณ พีดีบีลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟส เพื่อนำไปใช้ในการยืดอายุของผลไม้ ในขณะเดียวกันสามารถยังได้นำข้อดีของวงจรเรโซแนนต์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

รายงานฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการทํางาน วิเคราะห์และออกแบบ เครื่องผลิตก๊าซไอโซน และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ PS-PWM พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซไอโซนสำหรับการนำไปยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โดยใช้พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้มีการทํางานที่ดีกว่าฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์คือที่แรงดันอินพุตกระแสตรงจะเท่ากัน ซึ่งจะให้กำลังไฟฟ้าสูงกว่า โดยที่ผ่านมามีการศึกษาทดลองรูปแบบสัญญาณแบบ PS-PWM โดยการปรับความถี่ เพื่อดูปริมาณไอโซน และเพื่อดูว่าผลไม้ที่นำมาผ่านไอโซนนั้นสามารถยืดอายุได้นานมากกว่าผลไม้ที่ไม่ได้ผ่านไอโซนเลยนานเท่าไร ด้วยการปรับความถี่ และใช้ความถี่สวิตซ์ในช่วงที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนต์ เพื่อลดการสูญเสียของสวิตซ์และให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกจากคอนเวอร์เตอร์สูงกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป

## 1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้างก๊าซไอโซน, การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์และวิธีการสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM

1.3.2 ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

1.3.3 ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า

1.3.4 ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซไอโซน และวงจรในแต่ละภาคส่วน

1.3.5 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า

1.3.6 เก็บผลการทดลองปริมาณก๊าซไอโซนทางเคมีและอายุการเก็บรักษาผลไม้

1.3.7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.8 เขียนงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานวิจัย

หัวข้อ	ระยะที่ 1					ระยะที่ 2				
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1. ศึกษาข้อมูลจากตำราบทความและวารสาร	←→									
2. ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซน	←→									
3. ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า	←→									
4. ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซไอโซน และวงจรในแต่ละภาคส่วน										
5. เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า								←→		
6. เก็บผลการทดลองปริมาณก๊าซไอโซนทางเคมีและอายุการเก็บรักษาผลไม้								←→		
7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง								←→		
8. เขียนงานวิจัย			←→							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไอโซน
- 1.4.2 สร้างวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไอโซน
- 1.4.3 ออกแบบสร้างชุดสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM
- 1.4.4 สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้
- 1.4.5 สามารถใช้งานในการถนอมผลไม้ได้จริง

#### 1.5 โครงสร้างของงานวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างเครื่องกำเนิดไอโซนและวงจรแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับเครื่องผลิตก๊าซไอโซนรายละเอียดจะกล่าวถึงในรายงานวิจัยฉบับนี้แบ่งเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย วิธีการวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไอโซนคุณสมบัติและการเกิดก๊าซไอโซนกระบวนการที่จะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายมาผลิตก๊าซไอโซนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างก๊าซไอโซน การใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันเพื่อป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งรูปแบบการสวิตชิงของ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเลือกและคำนวณขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน สร้างวงจร PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์

บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลอง เก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมีควบคู่กันไปโดยการปรับความถี่ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 สามารถศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณวงจร PS-PWM ที่ความถี่ต่างๆของ บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ทั้งทางเคมีและทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนได้

1.6.2 สามารถใช้ dsPIC30F2011 สร้างสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

1.6.3 ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตซ์ได้จากผลของเรโซแนนซ์

1.6.4 ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ไอโซนเข้ากับด้านถนอมผลไม้

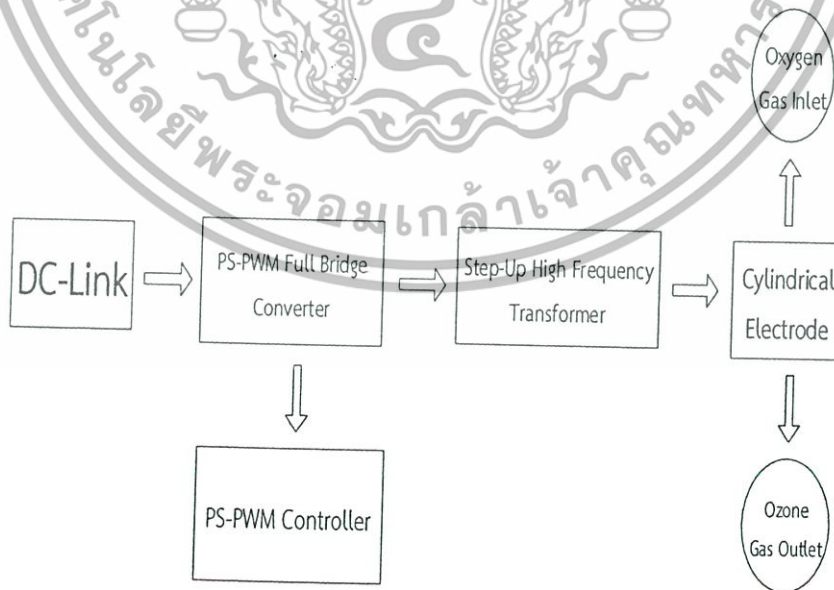
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซน

### 2.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบ คือการใช้งานในแหล่งที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณก๊าซโอโซนเป็นปริมาณมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

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



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ก๊าซโอโซนคืออะตอมของออกซิเจน 3 อะตอมรวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน ( $O_3$ ) ตามปกติออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันมากคือ  $O_2$  จะคงสภาพอยู่ได้หลายสภาวะหรือ 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 คำนีแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

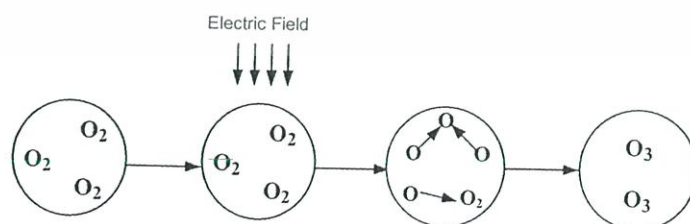
โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันในชั้นบรรยากาศ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว มีสีฟ้า มวลโมเลกุลเท่ากับ 47.998 g/mol จุดหลอมเหลวที่  $-192.5$  องศาเซลเซียส จุดเดือดที่  $111.9$  องศาเซลเซียส โดยอยู่ในรูปของของเหลวสีน้ำเงินเข้ม มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในสารละลายและอากาศ แต่ก๊าซโอโซนจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซ ออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับรีดิวซ์ (Reduce) หรือได้รับความร้อน

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

### 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 พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์และต้องมีความมากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่างๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุบวก ประจุลบ และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบามาก(เมื่อเทียบกับประจุบวก)เคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้มันมีบทบาทที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตก๊าซโอโซนพลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างซึ่งถ่ายมาจากการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของออกซิเจน



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง ถ้าพลังงานที่ถ่ายทอดไม่มากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือ ไอออไนเซชัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชน ได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่าพลังงานจลน์ที่มีการเคลื่อนของอนุภาคที่มีมวลได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานศักย์สู่โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนนั่นเอง กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาไอออนอิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้างก๊าซโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

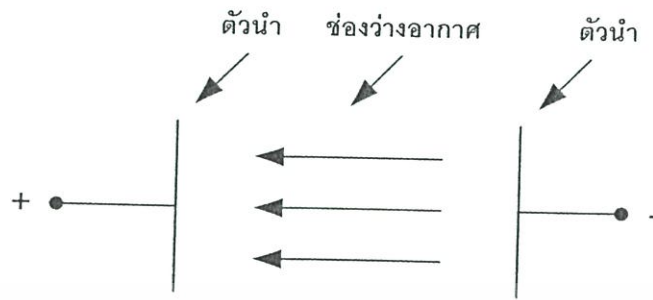
1. การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ(Dissociation Reaction) ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า
2. การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อที่ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นโอโซน (Ozone Generation)

ย่านพลังงานที่ต้องใช้ผลิตโอโซนคือ  $5.58kW.h/m^3 - 7.073kW.h/m^3$  [5]

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

2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ

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



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

ออกไป โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะได้แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มความถี่เป็นการเพิ่มแรงภายนอกที่มากระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

### 2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

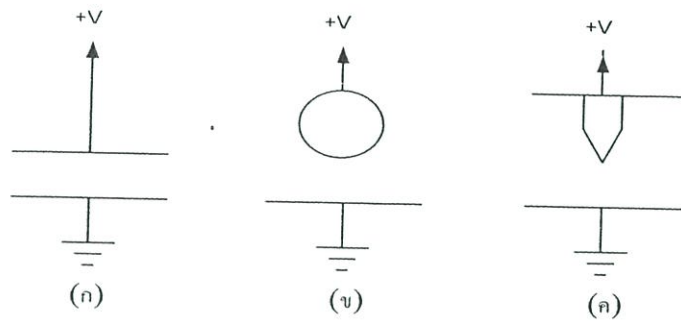
ในกระบวนการสร้างไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ พลังงานที่กระทำต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีที่จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียรจำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

#### 2.2.3.1 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

สนามไฟฟ้านั้นแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอสูงดังรูปที่ 2.4 ในที่นี้จะกล่าวถึง สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเพียงอย่างเดียว เพราะการนำมาใช้งานมีประโยชน์อย่างมากและได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

สนามไฟฟ้าแบบนี้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปทรงเรขาคณิต ของตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าที่ปลายแหลมจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่สุด ดังรูปที่ 2.4 (ค) กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงก่อนเกิดการเบรกดาวน์จะมีกระแสไหลผ่านช่องว่างอากาศเรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) ที่บริเวณผิวปลายแหลมของตัวนำจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แต่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อวัดที่ระยะห่างออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

ดังนั้นจึงไม่เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นถึงแม้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตก็ตามในขณะเดียวกันจะเกิดการดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นในช่องว่างอากาศ เรียกว่า การดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) การดีสชาร์จนี้จะไม่เกิดขึ้นตลอดทั้งแนวของสนามไฟฟ้าและอาจเกิดขึ้นเป็นช่วงหรือต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลได้

#### 2.2.3.2 อิลีกโทรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

รูปทรงของอิลีกโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าของอิลีกโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่มีวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) ไม่เท่ากันซ้อนกันจึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ  $C_1$  และ  $C_2$  โดยแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถหาได้จากสมการ (2.1) และ (2.2)

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_1} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_1}} \quad (2.1)$$

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

- เมื่อ
- $C_1$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F)
  - $C_2$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F)
  - $\epsilon_{r_1}$  = ค่าค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F/m)
  - $\epsilon_{r_2}$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

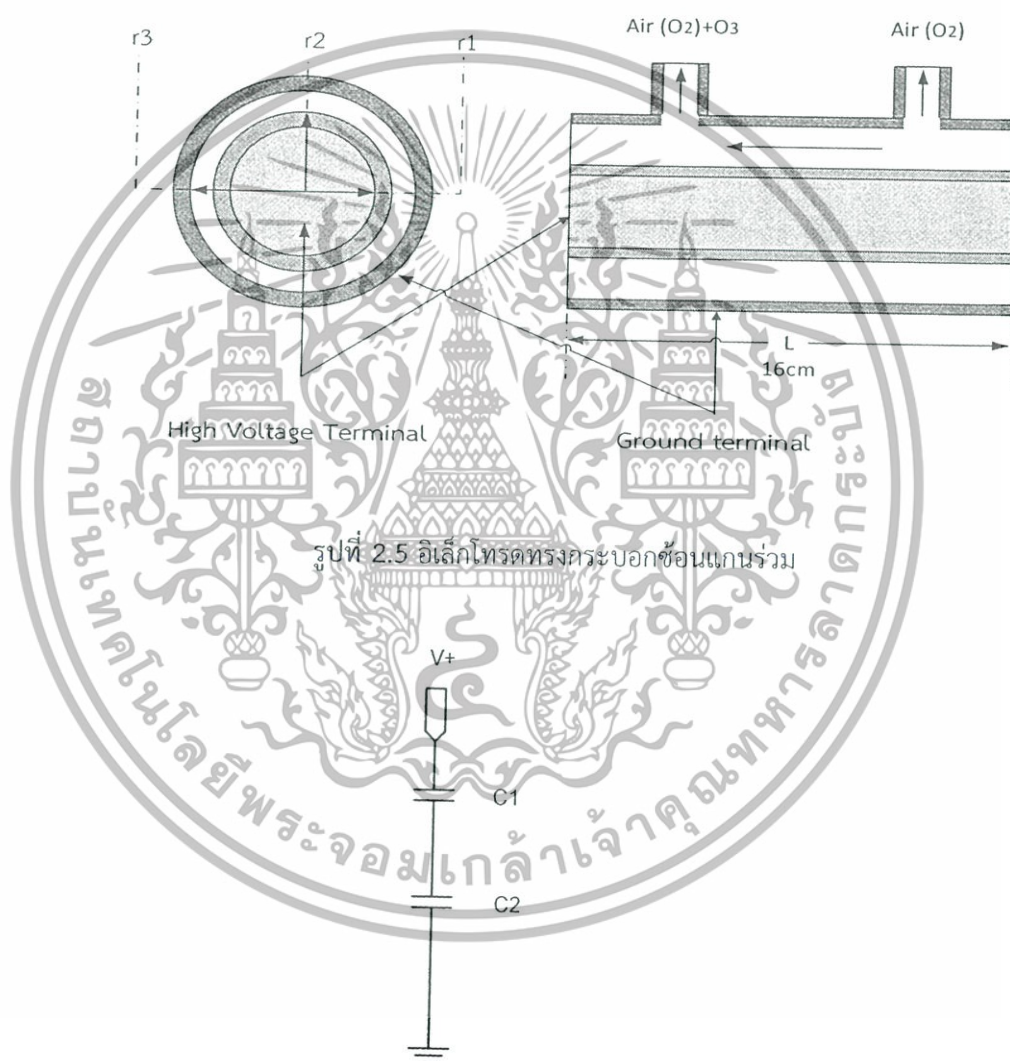
$\epsilon_0$  = ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฟรีสเปซ

$l$  = ความยาวของชุดอิเล็กโทรดหน่วยเป็น (m)

$r_1$  = รัศมีด้านในของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น (m)

$r_2$  = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น (m)

$r_3$  = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้น 2 หน่วยเป็น (m)



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

เนื่องจากอากาศมีสภาพความเป็นฉนวน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นเกิดมีกระแสไหลผ่าน สนามไฟฟ้าแบบมีขั้วนั้นอิเล็กตรอนจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าทำให้เกิดทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวางตัวอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อหัวของสนามไฟฟ้าสลับไปมาเป็นผลให้การวางตัวของอิเล็กตรอนก็สลับไปมาเช่นกันทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ของอิเล็กโทรดจึงมองว่ามีค่าความต้านทานซึ่งเป็นตัววัดกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนถูกต่อขนานอยู่กับค่าตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 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 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดเมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้ฉนวน

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

แรงดันอินพุตที่ป้อน

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

จะได้สัญญาณกระแส

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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]

$$E_x = \frac{\epsilon_1 \times \epsilon_2 \times V}{\epsilon_x \times r_x \times \left( \epsilon_1 \times \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \times \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $E_x$  = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ (kV/cm)

$V$  = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับชุดฉนวน (kV)

$r_x$  = รัศมีที่จุดใดๆ (cm)

$\epsilon_x$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่ฉนวนชั้นใดๆ (F/m)

#### 2.2.4 การใช้โอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้

เทคโนโลยีการ Utilizer ของน้ำหรือการใช้สารทำความสะอาดผักและผลไม้ อาทิเช่น คลอรีน ซึ่งเป็นสารทำความสะอาดที่นิยมใช้ทำความสะอาดผักและผลไม้สด โดยมีข้อกำหนดการใช้ที่ความเข้มข้นที่ 1 ถึง 2 log แต่ที่ความเข้มข้นนี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคน ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาโอโซนในการใช้เป็นการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรค เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ โดยได้ศึกษาข้อมูลจากการใช้ในภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งได้มีการจัดการประชุมหลายครั้ง โดยได้รับการสนับสนุนจาก Electric Power Research Institute ( EPRI ) รวมถึง Conference ในการใช้โอโซนในกระบวนการผลิตผักและผลไม้สดด้วย ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาการบริโภคผักและผลไม้ในสหรัฐอเมริกาปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีผู้เจ็บป่วยเพิ่มขึ้นจากจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรคในอาหารจากสารเคมี และน้ำเสีย ปัจจุบัน จำนวนของ produce associated ของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในอาหาร การเจ็บป่วยของคนจากจุลินทรีย์ดังกล่าวไม่สามารถควบคุมได้และมีมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเสื่อมเสียของผักและผลไม้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่งส่วนใหญ่เกิดจากจุลินทรีย์กล่าวคือเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยว จนถึงการใช้บริโภคโดยมีการเสื่อมเสียมากถึง 30% การใช้คลอรีนในการทำ ความสะอาดและฆ่าเชื้อนั้นเป็นสิ่งที่สะดวกและสามารถปฏิบัติได้ง่ายในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งยังมีคุณสมบัติในการควบคุมและลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่พบในผักและผลไม้ได้ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผักและผลไม้ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่ายังไม่สามารถจะชี้ชัดได้ถึงปริมาณคลอรีนที่ใช้เพื่อยับยั้งแบคทีเรียในผักและผลไม้ได้ องค์การสภาพแวดล้อมและสุขภาพ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารทำความสะอาดและปริมาณการตกค้าง เช่น Trihalomental และปริมาณสารตกค้างอื่นๆ ในน้ำเสียที่ปล่อยสู่แหล่งธรรมชาติจากการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยมีความสัมพันธ์กันกับความเป็นไปได้เกี่ยวกับการปฏิบัติงานในอนาคต ในการใช้คลอรีนเป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ คลอรีนเป็นสารเคมีกลุ่มที่มีการนำมาใช้เป็นยาฆ่าและควบคุมแมลงศัตรูพืชในกระบวนการผลิตผักและผลไม้โดยเทคโนโลยีในการผลิต Current ไม่สามารถที่จะกำจัดยาฆ่าแมลงศัตรูพืช (คลอรีน) ที่ตกค้างที่ผิวของผักและผลไม้ได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพผู้บริโภค และมีความเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อมด้วย ดังนั้นหลายประเทศจึงให้ความสนใจกับสารทำความสะอาด และสารฆ่าเชื้อ และสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโอโซน สามารถใช้แทนคลอรีนได้ และในปี 1997 โอโซนได้รับการยอมรับจาก GRAS ว่ามีความปลอดภัยในการใช้และไม่มีการตกค้างโดย EPRI ยอมให้มีการใช้โอโซนในอุตสาหกรรมได้ โดยภาคอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจถึงวิธีการและรายละเอียดของการใช้โอโซนในการเป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ

โอโซน เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงและดีกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า ทั้งยังสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคจากอาหารได้ดีกว่าคลอรีนด้วย โดยโอโซนสามารถทำลายจุลินทรีย์ เช่น Ecoli, Listeria และจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคอื่นๆ ได้ และยังไม่มีสารตกค้าง โอโซนมีพลังโมเลกุลสูง มีครึ่งชีวิตในน้ำที่อุณหภูมิห้องที่ 20 นาที และสามารถแตกตัวเป็นออกซิเจนอย่างง่ายและไม่มีการตกค้างในการใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้ในการปรับสภาพน้ำที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ สำหรับกระบวนการผลิตผักและผลไม้ โดยใช้สำหรับการล้างทำความสะอาดผักและผลไม้ น้ำที่ใช้ในการทำ ความสะอาดนี้เป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการ Combination ด้วยโอโซนและผ่านกระบวนการกรอง ซึ่งเป็นน้ำที่ปราศจากแบคทีเรีย สี และสารปนเปื้อนอื่นๆ นอกจากนี้น้ำที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้งเพื่อลดการใช้ซ้ำได้ ระบบการใช้โอโซนนั้นไม่เหมือนกับการใช้คลอรีน กล่าวคือ น้ำที่ใช้แล้วจะถูก discharged ด้วยโอโซน ซึ่งทำให้ไม่มีสารเคมีตกค้าง และไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและระบบน้ำใต้ดิน โอโซนสามารถกำจัดยาฆ่าแมลงและสารเคมีที่ตกค้างได้ เช่น สารตกค้างที่เกิดจากคลอรีน เป็นต้น โอโซนบริสุทธิ์ ( Gaseous Ozone ) เป็นสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคที่ดีและเป็นสาร fumigation นอกจากนี้โอโซนสามารถใช้เป็นสารทำความสะอาดในสถานที่เก็บอาหารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 และยังสามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ผิวของอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้ ในปี 1933 มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โอโซนในการเก็บรักษาผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล มันฝรั่ง มะเขือเทศ สตอเบอร์รี่ บร็อคเคอรี่ แพร Canberries ส้ม พีช องุ่น ข้าวโพด และถั่วเหลือง ในปี 1995 Barth et al ได้ศึกษาการใช้โอโซนในการเก็บรักษา Blackberries โดยเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยวถึงการเก็บรักษา โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโอโซน 0.3 ppm ผลพบว่าสามารถยืดอายุการเก็บให้มากขึ้น 20 % โดยไม่ทำให้เกิดตำหนิและไม่ทำให้สีของผลเปลี่ยนแปลงจากการเก็บรักษานาน 12 วัน การเก็บรักษาผักและผลไม้โดยใช้โอโซนนี้เป็นวิธีที่ดีอีกวิธีหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษาสตอเบอร์รี่ เพราะสตอเบอร์รี่นั้นเสื่อมเสียได้ง่ายในสภาวะที่เปียก แต่ถ้าเก็บรักษาสตอเบอร์รี่ ลาสเบอร์รี่ Current และองุ่น โดยใช้โอโซน สามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาขึ้นเป็น 2 เท่า ที่มีความเข้มข้นของโอโซน 2-3 ppm และมีการปล่อย โอโซนไม่กี่ชั่วโมงต่อวัน ในปี 1968 Noton et al พบว่าการใช้อุณหภูมิต่ำๆ 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

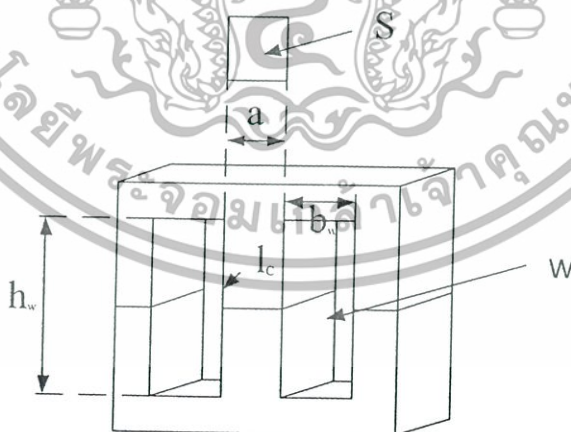
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่เล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดมีขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 310 และมีความถี่สวิตช์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แทนของหม้อแปลงที่ใช้งานความถี่สูงโดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ



รูปที่ 2.9 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง 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 ( $m^2$ )

$V_1$  = 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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) เพื่อคำนวณหาจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิได้

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

เมื่อ  $N_2$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ  
 $N_1$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ  
 $V_2$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (V)  
 $V_1$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (V)

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

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

และ  $A_{w2} = \frac{I_2}{J}$  (2.13)

เมื่อ  $A_{w1}$  = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดด้านปฐมภูมิ  
 $A_{w2}$  = ขนาดหน้าตัดของลวดด้านทุติยภูมิ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ

$\delta$  = Skin depth (m)

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

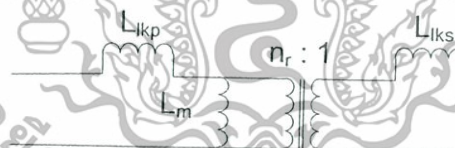
$\mu$  = Permeability (T.m/A)

$\omega$  = ความถี่เชิงมุมไฟฟ้า (รอบ/วินาที)

พอได้ค่า Skin depth เราจะสามารถเลือกเบอร์ลวดได้โดย เบอร์ลวดที่ใช้จะต้องมีรัศมีเล็กกว่าค่า Skin depth ซึ่งถ้าเราเลือกเบอร์ที่มีขนาดเล็กลงกว่าค่า Skin depth มาใช้เลยอาจจะทำให้สายนั้นไม่สามารถทนกระแสได้ ดังนั้นเราต้องนำสายเบอร์ที่เราเลือกนั้นมาผ่านการตีเกลียวเพื่อให้สามารถทนกระแสได้

ซึ่งพอเราเราพันหม้อแปลงเสร็จแล้วเราจะต้องนำหม้อแปลงไปทดสอบเพื่อหาตัวแปรค่าต่างๆที่อยู่ในหม้อแปลงที่เราพันขึ้นดังหัวข้อที่ 2.3.1

### 2.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า [2]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์

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

$$L_{22} = L_{ks} + \frac{L_m}{n_r^2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

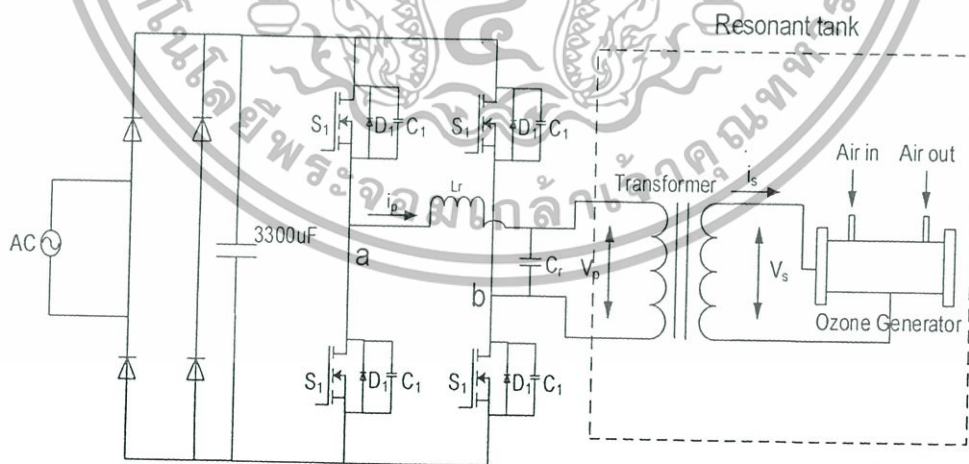
$$L_{11,s} = L_{lkP} + \frac{L_m n_{r1}^2 L_{lkS}}{L_m + n_{r1}^2 L_{lkS}} \tag{2.17}$$

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

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

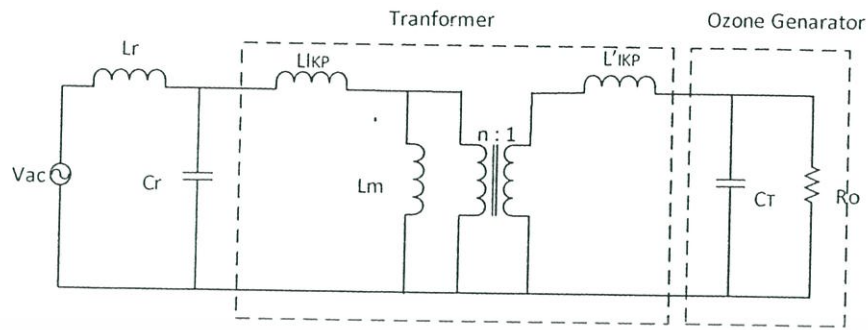
- เมื่อ
- $L_{11}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อเปิดด้านทุติยภูมิ (H)
  - $L_{11,s}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อปิดด้านทุติยภูมิ (H)
  - $L_{22}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านทุติยภูมิเมื่อเปิดด้านปฐมภูมิ (H)
  - $L_{22,s}$  = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลงวัดด้านทุติยภูมิเมื่อปิดด้านปฐมภูมิ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

2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนาน



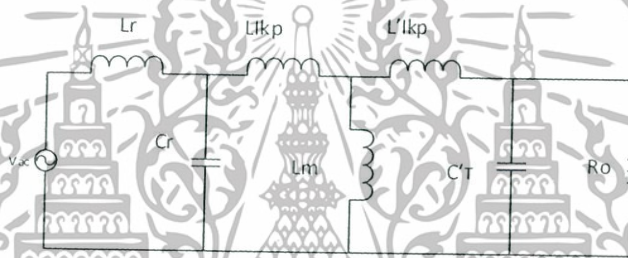
รูปที่ 2.11 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของระบบ

วงจรสมมูลโดยประมาณเมื่อย้ายค่าต่างๆทางด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของระบบทางด้านปฐมภูมิ

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

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

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

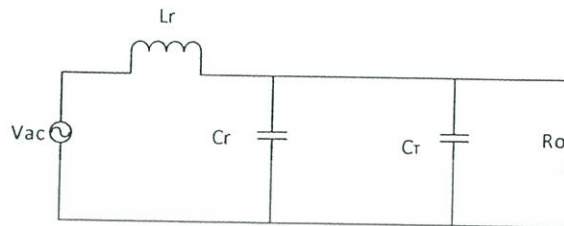
$$C'_T = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 \times C_T \tag{2.22}$$

เมื่อ  $L'_2$  = ค่าเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิเมื่อถ้ายโอนค่าแล้ว (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R'_o$  = ค่าความต้านทานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (๑)

$C'_T$  = ค่าเก็บประจุไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (F)



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลเรโซแนนซ์

$$L_r = L_r + L_{kp} + L_{ks} \tag{2.23}$$

$$C_{eq} = C_T // C_r \tag{2.24}$$

$$R_{eq} = R'_o \tag{2.25}$$

เมื่อ

$L_r$  = ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเรโซแนนซ์

$C_{eq}$  = ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล

$R_{eq}$  = ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

$C_r$  = ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์

จากรูปที่ 2.14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์

$$\frac{V_{ab}}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{X_{L_r}}{X_{C_{eq}}}\right)^2 + j\left(\frac{X_{L_r}}{R_{eq}}\right)^2}} \tag{2.26}$$

เมื่อ  $X_{C_{eq}}$  = คาร์เนกแทนซ์ของ  $C_{eq}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$X_{L_r}$  = ค่ารีแอคแตนซ์ของ  $L_r$

$R_{eq}$  = ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

จัดรูปสมการที่ (2.26) ให้อยู่ในรูป  $\omega_s$  จะได้

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

เมื่อ  $\omega_s$  = ความถี่เชิงมุมสวิตชิง

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) ค่าตัวประกอบคุณภาพเป็นค่าที่นิยมเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ในการเลือกความถี่และการสูญเสียภายในวงจร

จากรูปที่ 2.14 สามารถหาตัวประกอบคุณภาพได้จาก สมการที่ (2.30)

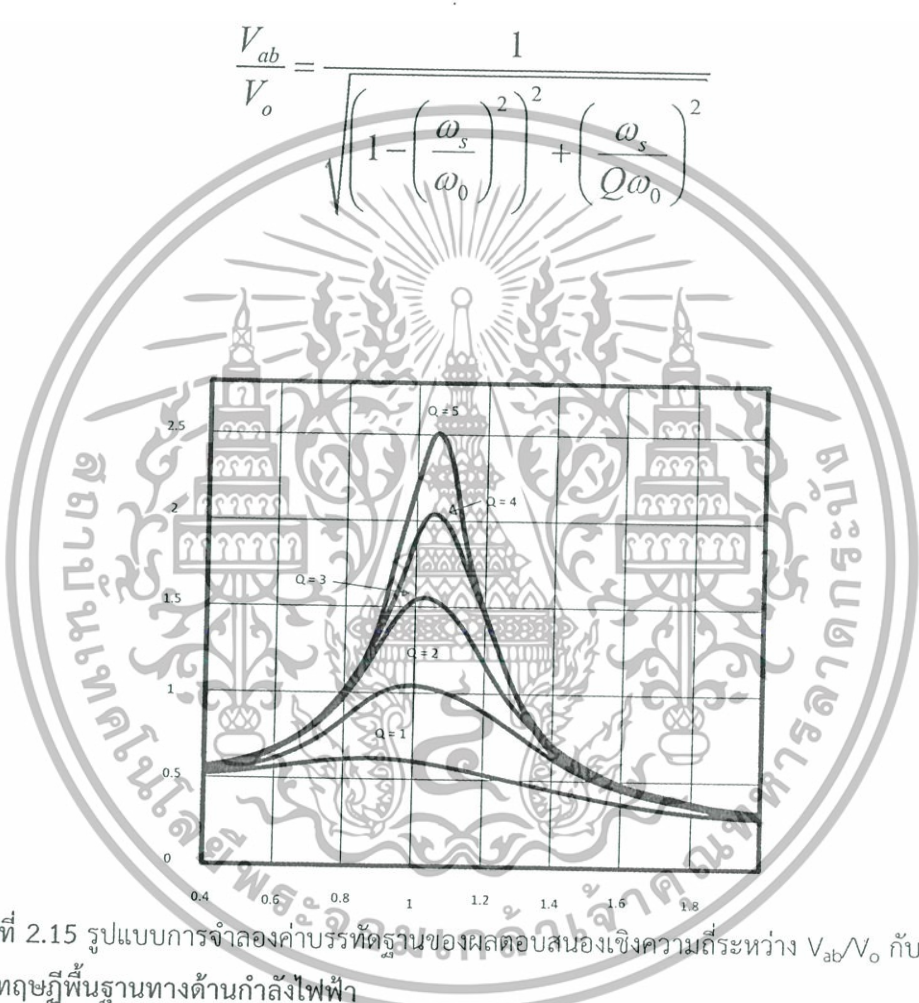
$$Q = \frac{R}{\omega_0 L_r} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $Q$  = ค่าตัวประกอบคุณภาพ

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

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



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

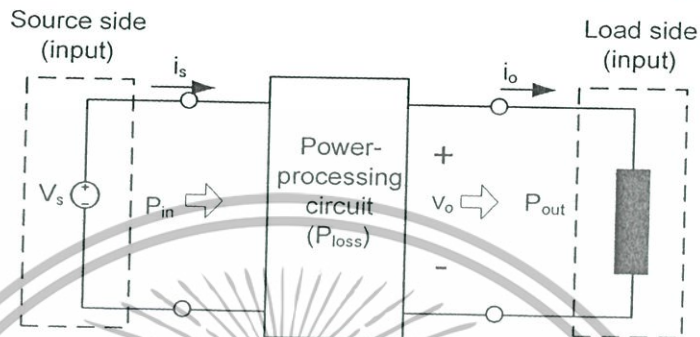
พิจารณาจากรูป ที่ 2.16 แสดงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด ประสิทธิภาพของวงจรในรูปที่ 2.17 คำนวณได้จากสมการที่ (2.32) หรือ (2.33)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{2.32}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \tag{2.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าวงจรกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอุดมคติไม่ว่าจะทำงานในสภาวะ “on” หรือ “off” ก็ จะไม่มีความสูญเสียเกิดขึ้นในส่วนของตัวอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร เช่น ตัวคาปาซิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวหม้อแปลง ดังนั้นประสิทธิภาพทั้งหมดของวงจรที่ทำงานส่งผ่านกำลังก็จะมีค่าเต็ม 100%



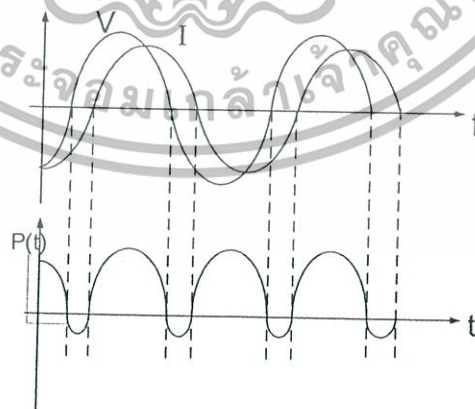
รูปที่ 2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุต

2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

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

$$p(t) = v(t) \times i(t) \tag{2.34}$$

รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 2.17 ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นมาเป็นค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ที่เวลาที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.17 กำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

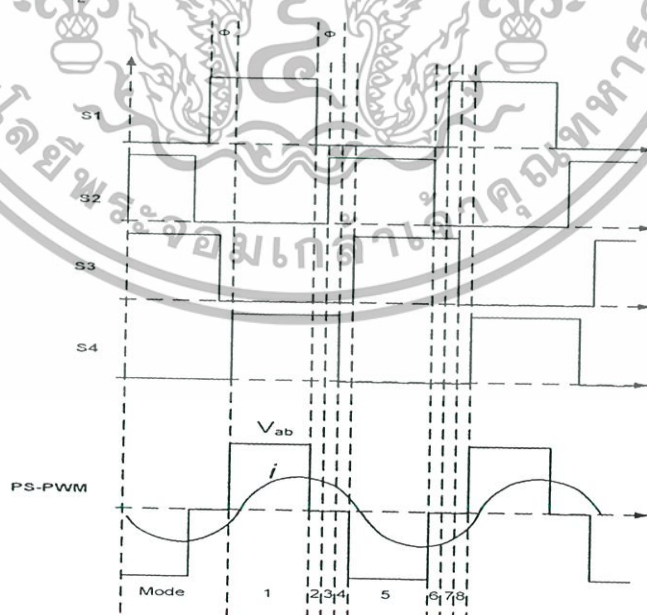
ถ้ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีคาบเวลาซ้ำๆกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า จะหาได้จากสมการที่ (2.35) หรือ (2.36)

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

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

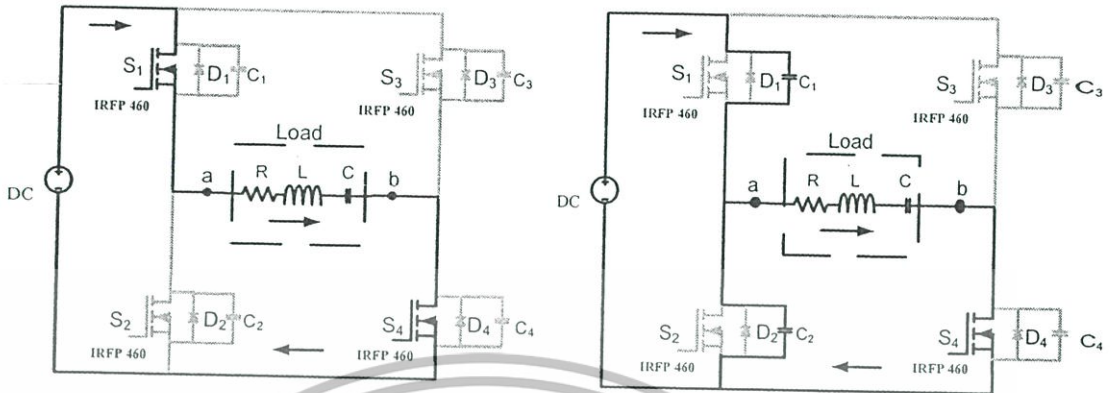
## 2.6 พีเอส-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full – Bridge Converter)

พีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Phase – Shift PWM Full – Bridge Converter) ดังรูปที่ 2.18 มีโครงสร้างเหมือนกับ พีดับบลิวเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ แต่มีลักษณะการขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตซ์แตกต่างกัน โดยปกติสัญญาณ PWM จะทำงานเป็นคู่ๆให้  $S_1$  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  $S_2$



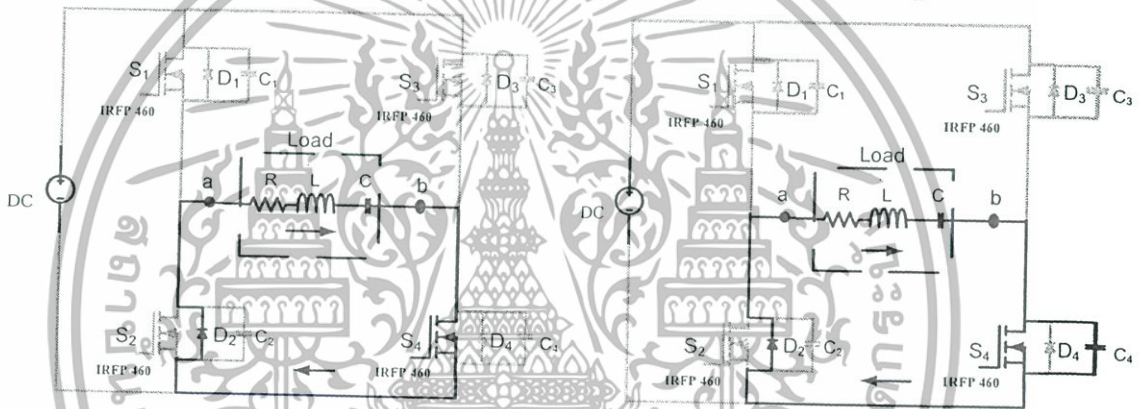
รูปที่ 2.18 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



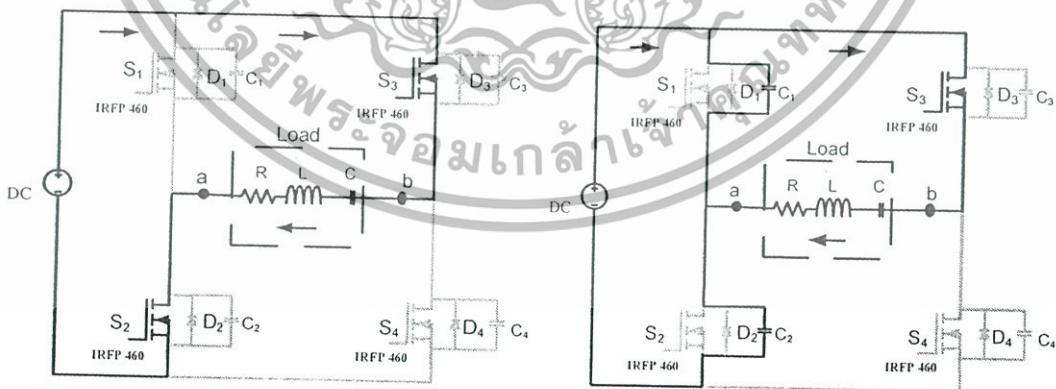
สภาวะที่ 1

สภาวะที่ 2



สภาวะที่ 3

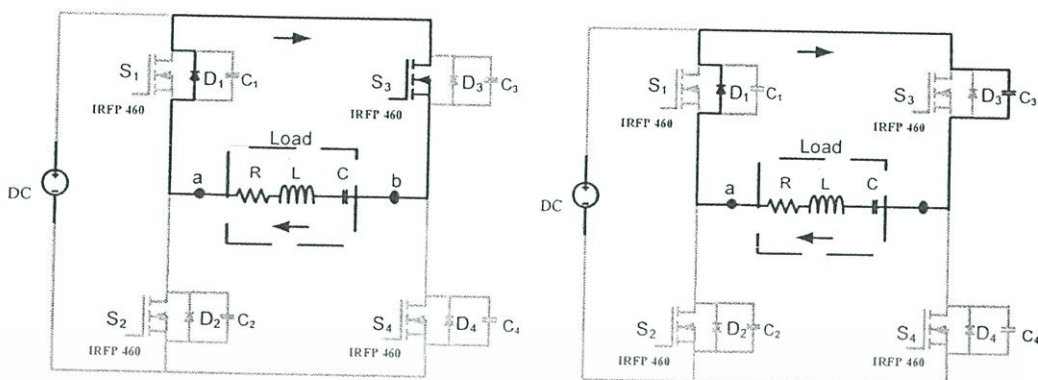
สภาวะที่ 4



สภาวะที่ 5

สภาวะที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สภาวะที่ 7

สภาวะที่ 8

รูปที่ 2.19 การทำงานของ PS-PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 8

การทำงานของ PS-PWM ได้เป็น 8 สภาวะโดยการกำหนดการทำงานจาก สัญญาณขั้วเบดของอุปกรณ์สวิตช์ ดังนั้นในรูปที่ 2.18 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่จุด ab มีลักษณะคล้ายสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยที่จุดที่แรงดันเป็นศูนย์ เกิดจากการเลื่อนเฟสขั้วเบดของคู่สัญญาณอุปกรณ์สวิตช์ วงจรของแหล่งจ่ายกำลังไม่ครบรอบ ทำให้แรงดันไม่สามารถปรากฏที่เอาต์พุต สัญญาณแรงดันที่ได้จึงเป็นศูนย์ วงจรแบบเลื่อนเฟสที่สภาวะการทำงานทั้ง 8 ดังรูปที่ 2.19

สภาวะที่ 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

สภาวะที่ 2 สวิตช์  $S_1$  หยุดนำกระแส ในขณะที่  $S_4$  ยังคงนำกระแสอยู่ ตามรูปแบบของสัญญาณขั้วเบดที่จ่ายให้  $S_4$  กระแสที่ไหลต่อเนื่องผ่าน  $S_1$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_1$  แทน กระแสไหลผ่าน  $C_1$  ไปสู่โหลด และ  $S_4$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร ในขณะเดียวกัน แรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  ลดลง เพราะ  $C_2$  ต่อขนานอยู่กับโหลด เมื่อ  $S_1$  หยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมโหลดลดลง  $C_2$  สามารถคายประจุผ่านโหลด ผ่าน  $S_4$  ครบวงจร

สภาวะที่ 3 ช่วงเวลาฟรีวีล (Free Wheeling) ในสภาวะนี้แหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสให้ โหลดได้เพราะ  $S_1$  เปิดวงจรและ  $C_1$  เก็บประจุเต็ม ช่วงเวลานี้พลังงานที่สะสมในโหลด ไหลผ่าน  $S_4$  ไปสู่  $D_2$  กลับมาที่โหลดครบวงจร ช่วงเวลาฟรีวีลนี้ไดโอด  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัดทำให้ครบวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คืนพลังงาน เพื่อลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตช์จากการได้รับรีเวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัดได้ และ แรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากสวิตช์  $S_2$  ได้ปิดวงจร  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัส

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

สถานะที่ 5  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสไหลผ่าน  $S_3$  ไปสู่โหลดเมื่อ กระแสไหลผ่านโหลด จะเกิดการสะสมพลังงาน จากนั้นไหลผ่าน  $S_2$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหลด  $V_{ab}$  เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายแต่มีค่าติดลบเพราะกลับขั้วกับสถานะที่ 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  $V_{DC}$

สถานะที่ 6  $S_2$  หยุดนำกระแส ในขณะที่  $S_3$  ยังได้รับสัญญาณแรงดันขั้วเกิดและ นำกระแสอยู่ในกรณีที่ เป็นโหลดสะสมพลังงานกระแสจะไม่หยุดไหลอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ ลดลง ดังนั้นกระแสไหลต่อเนื่องที่ผ่าน  $S_2$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_2$  แทน  $S_2$  ที่เปิดวงจร แรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  ค่อยๆเพิ่มขึ้นจากการที่ตัวมันถูกชาร์จประจุจากกระแสไหลที่ไหลผ่าน ตัวเหตุที่มันต่ออนุกรมกับ  $C_1$  ซึ่งเป็นตัวแบ่งแรงดันอีกครั้งที่เหลือ กระแสไหลผ่าน  $S_3$  ไปสู่โหลด ครบวงจร บางส่วน จะไหลผ่าน  $C_2$  ไปยังแหล่งจ่ายครบวงจร

สถานะที่ 7 ช่วงฟรีวิล เนื่องจาก  $S_2$  เปิดวงจร ตัดทางเดินกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงออก มาเป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $D_1$  ไปสู่  $S_3$  ครบวงจร ช่วงเวลาฟรีวิลนี้  $D_1$  นำกระแส เนื่องจากศักย์ไฟฟ้า ที่ขาซอส เริ่มสูงกว่าขาเดรน ในกรณีนี้แรงดันตกคร่อมสวิตช์จะถูกจำกัดให้เท่าแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อมไดโอดลักษณะที่เกิดขึ้นแบบนี้ ช่วยลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตช์จากการได้รับรีเวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัด และเนื่องจาก  $S_3$  ปิดวงจรและ  $D_1$  ได้รับฟอร์เวิร์สไบอัส ทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเท่ากับศูนย์

สถานะที่ 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 ในสถานะนี้พลังงานที่สะสมในโหลดเกือบหมด และ หลังจากสถานะนี้แล้ว คอนเวอร์เตอร์จะกลับไปเริ่มการทำงานที่สถานะที่ 1 อีกครั้ง เป็นวงรอบการทำงานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนเริ่มจากการคำนวณ อิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วม 2 ชั้น กระบวนการที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซน ผลของความถี่สนามไฟฟ้า ต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ การใช้โอโซนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ สมการที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความจุไฟฟ้าและความเครียดของสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม 2 ชั้น ทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน อธิบาย เกี่ยวกับคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนาน และการวัดกำลังไฟฟ้า อธิบายการทำงานของวงแบบ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลักๆ แล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบรวม ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆของโหลดเสียก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่นๆที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบรวมอนวน 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นถึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.2 อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบ 2 ชั้น

ในบทความนี้ได้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุฉนวนชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผล 5 ข้อดังนี้คือ

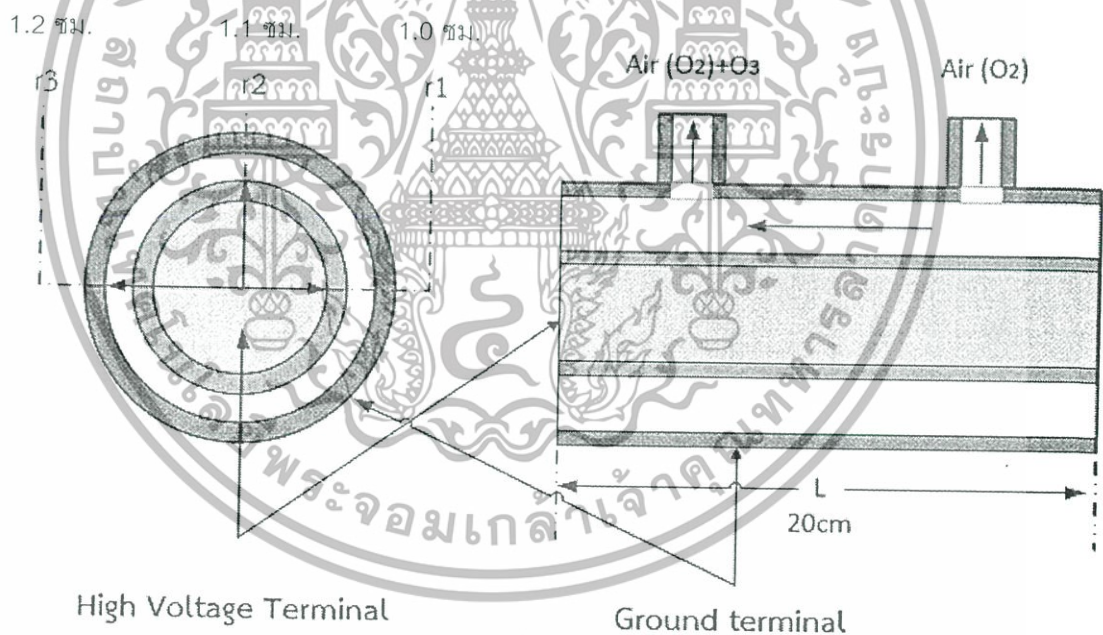
- 1) แก้วมีคุณสมบัติในการทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง
- 2) แก้วที่คุณภาพการผลิตดีจะมีผิวเรียบและไม่มีฟองอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดการเบรกดาวนในแก้วได้
- 3) สามารถทนการชุบขีตและไม่เกิดริ้วรอยได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ในกระบวนการผลิตแก้วต้องให้ความร้อนสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแก้ว ดังนั้นแก้วจึงทนความร้อนได้สูงมากก่อนที่จะหลอมละลายเสียหาย
- 5) แก้วเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนด้วยเช่นกัน

ในส่วนของฉนวนชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศเพื่อที่จะสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดได้ ตัวนำด้านในใช้ลวดสแตนเลสและตัวนำด้านนอกแผ่นสแตนเลสที่นำมาติดกับหลอดแก้วด้านนอก รูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 3.2

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดนั้นก็คือระยะห่างและปริมาตรช่องว่างอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในเลือกจากและด้านนอกเพราะจะส่งผลต่อการออกแบบชุดกำลังไฟฟ้า 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

จากหัวข้อ 2.2 ย่านพลังงานที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอเซนอยู่ในช่วง 1.169 kWh/m<sup>3</sup> เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาย่านพลังงาน (W) ที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์ได้ดังนี้

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

$$\therefore W = 0.588 mWh$$

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

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

$$W_i = \frac{1}{2} \times \epsilon_0 \times \epsilon_r \times E^2 \times \int dVol$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{2 \times W_1}{\epsilon_0 \times \epsilon_r} = E^2 \times Vol$$

ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ( $E$ )

$$E = \sqrt{\frac{2 \times W_1}{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times Vol}} \quad (3.3)$$

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

เมื่อได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอซอนแล้วจึงคำนวณหาแรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโทรดได้จากสมการ (2.7) เราสามารถหาค่าแรงดันที่จะทำให้เกิดก๊าซไอซอนโดยการแทนค่าดังนี้

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

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

เพราะฉะนั้น

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

จึงได้ว่าค่าแรงดันที่ทำให้อากาศเกิดการแตกตัวจาก  $O_2$  เป็น  $O_3$  จะต้องมีค่ามากกว่าเท่ากับ 1.768 kV

ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กโทรดจากสมการ (2.1) และ (2.2) โดยแทนค่าจะได้ค่าทางทฤษฎีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_1 \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.16}{\ln \frac{1.1}{1.0}} = 7.471 \times 10^{-10} F$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_2 \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.16}{\ln \frac{1.2}{1.1}} = 8.183 \times 10^{-10} F$$

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

และจากการวัดค่าจริงด้วยเครื่อง Impedance Analyzer ได้ว่าที่ ความถี่ 50 kHz จะได้ค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุดังนี้

ค่าความต้านทานของหลอดไอโซน คือ

$$R_0 = 79.983 k\Omega$$

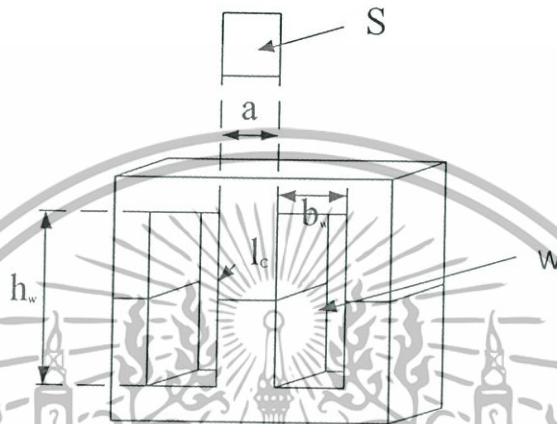
และ ค่าของตัวเก็บประจุของหลอดไอโซน คือ

$$C_T = 405 pF$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการใช้ทฤษฎีหาค่าตอบกับค่าที่ได้จากการใช้เครื่อง Impedance Analyzer คิดจริงๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบยกระดัดแรงดัน



รูปที่ 3.3 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE

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  $V_1 = 310$  V และแรงดันทุติยภูมิจะต้องมีค่า  $V_2 = 1.8$  kV

ค่า  $I_{1,rms} = 5$  A และ  $I_{2,rms} = 0.5$  A ,ค่าซีตจำกัดหน้ากำหนดให้  $k = 0.3$  , กำหนดให้สนามแม่เหล็กของแกน

$B_{max} = 0.3$  T , ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $J = 4$  A/mm<sup>2</sup> และทำงานที่ความถี่  $f = 24$  kHz ได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$A_p = S \times W$$

$$A_p = 3.200 \times 10^{-7} m^4$$

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

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

จากสมการ

$$A_{w1} = \frac{I_1}{J}$$

และ

$$A_{w2} = \frac{I_2}{J}$$

ได้ว่า

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากค่าที่คำนวณหาขนาดของลวดนี้เราไม่สามารถนำไปหาเบอร์ของลวดได้เลย จำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลของ 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

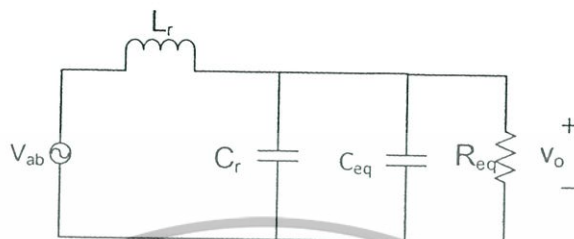
ในด้านปฐมภูมิจึงต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 20 รอบ ได้  $A_{w1} = 1.6 \text{ mm}^2$

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 รอบ และนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกน 27 รอบ ในส่วนของด้านทุติยภูมิต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 2 รอบและนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกนทั้งหมด 162 รอบ จะทำให้เราได้หม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราแรงดัน 310/ 1800 Volt.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบขนาน



รูปที่ 3.4 วงจรเรโซแนนต์

2.15 จากรูปที่ 2.13 สามารถหาค่า  $L_r$  โดยนำที่ได้จากการทดสอบห่อแปลงไปแทนค่าในสมการที่

$$L_r = 2.2 \times 10^{-3} + 9.84 \times 10^{-6} + 57770 \times 10^{-6}$$

เพราะฉะนั้น

$$L_r = 2.26 \text{ mH}$$

สามารถคำนวณหาค่า  $C_{eq}$  ได้จากสมการที่ 2.29 โดยกำหนดให้ความถี่เรโซแนนต์เท่ากับ  $f_0 = 24 \text{ kHz}$  และ  $L_r = 2.26 \text{ mH}$

$$C_{eq} = \frac{1}{(2\pi \times 24000)^2 \times (2.26 \times 10^{-3})}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_{eq} = 122.2 \text{ nF}$$

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

$$C_r = 122.2 \times 10^{-9} - 12.25 \times 10^{-12}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } C_r = 121.9 \text{ nF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

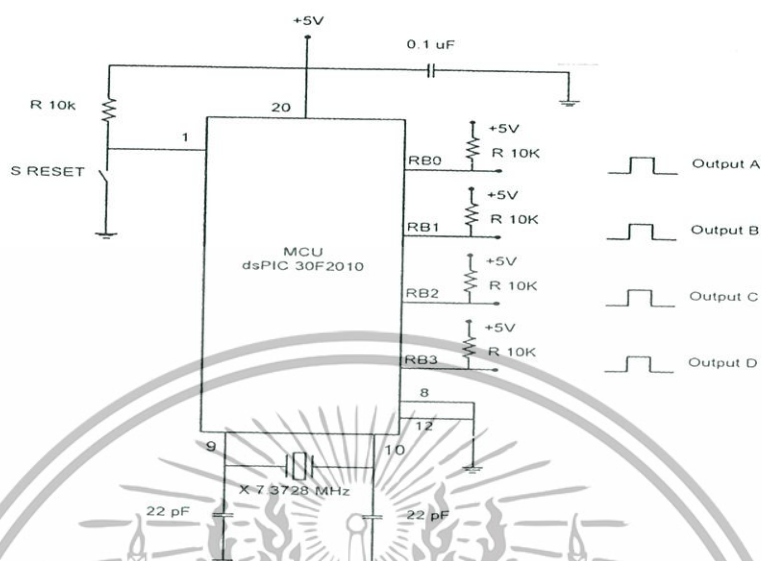
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบ

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไว้ไหลทางด้านปฐมภูมิ ( $L_{lkp}$ )	9.84 $\mu$ H
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน ( $L_m$ )	1.54 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไว้ไหลทางด้านทุติยภูมิ ( $L_{lks}$ )	0.34 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเรโซแนนต์ ( $L_r$ )	2.26 mH
อัตราส่วนรอบหม้อแปลง ( $n$ )	1/6
ความต้านทานสมมูล( $R_{eq}$ )	2221 $\Omega$
ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนต์ ( $C_r$ )	121.9 nF
ความถี่สวิตชิง( $f_s$ )	24 kHz

### 3.5 วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณ

วงจรควบคุมที่ใช้สร้างสัญญาณ PWM นั้นได้มาจากไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F4011 ดังรูปที่ 3.7 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 50 kHz เพื่อส่งต่อไปให้วงจรขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟต ทั้ง 4 ชุด โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ dsPIC ในการสร้างสัญญาณเพราะว่าสะดวกแก่การเปลี่ยนรูปสัญญาณให้กับชุดขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

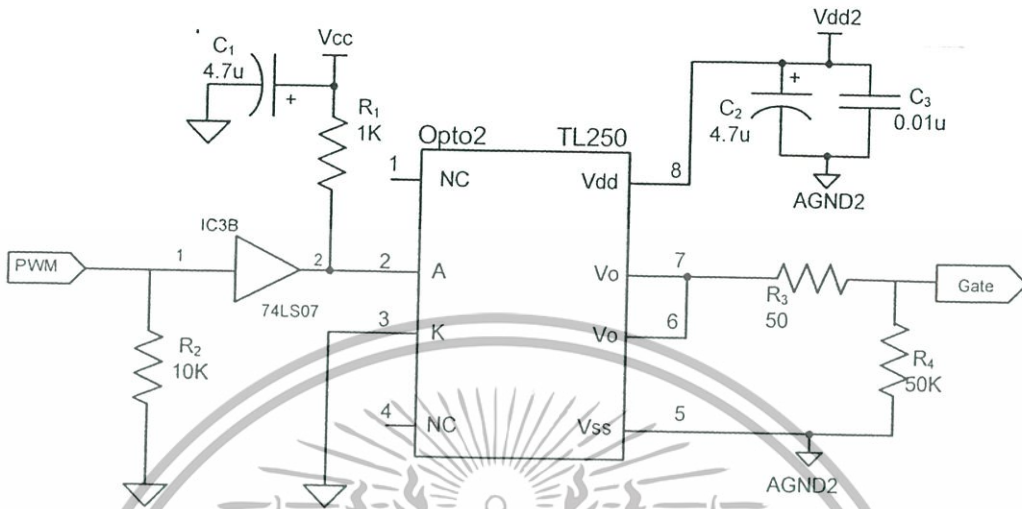


รูปที่ 3.5 รูปวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F4011

### 3.6 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

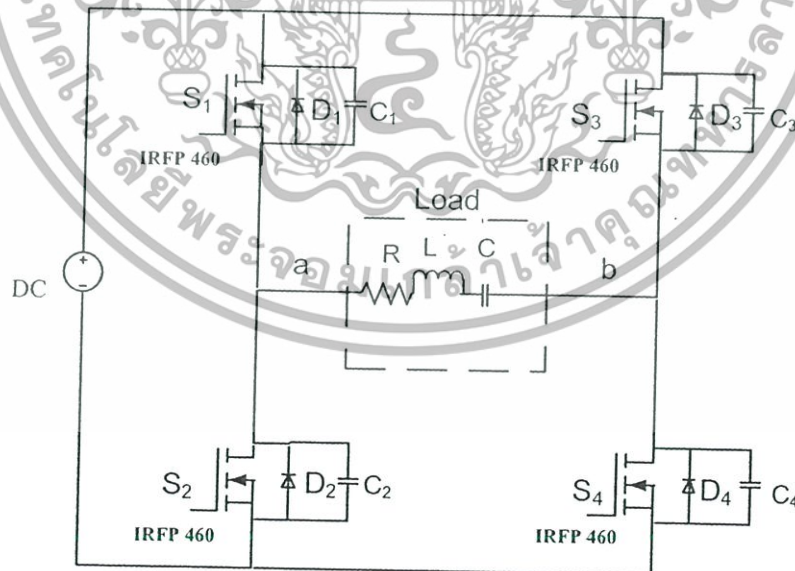
สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมสัญญาณนี้ถูกส่งไปยังวงจรสร้างสัญญาณขับนำเกตด้วยไอซีสร้างสัญญาณขับนำเกต เบอร์ TLP250 เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต วงจรสร้างสัญญาณขับนำเกตแสดงดังรูปที่ 3.8 จากวงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีขนาดแรงดัน 0 V ถึง 5 V สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปไบอัสให้ LED ใน TLP250 นำกระแส โดยมีความต้านทาน  $R_L$  ทำหน้าที่จำกัดกระแสในการไบอัสและใช้ไอซีบัฟเฟอร์ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TL250

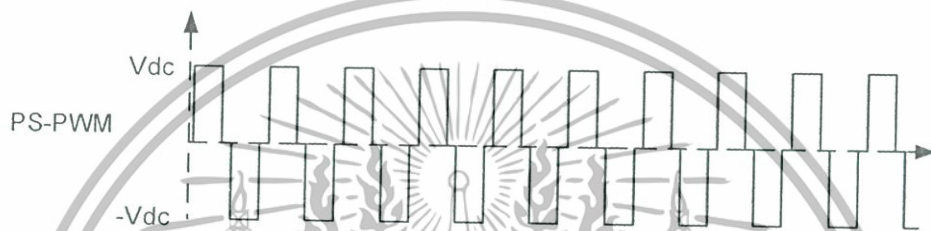
วงจรภาคกำลังนี้เป็นวงจรที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งใช้มอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 3.9 โดยจะนำกระแสและหยุดนำกระแส ตามจังหวะสัญญาณที่ถูกส่งมาจาก วงจรขับนำเกต ในรูปที่ 3.8 โดยวงจรขับนำเกตต้องสร้าง 4 ชุด สำหรับมอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว



รูปที่ 3.7 วงจรภาคกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

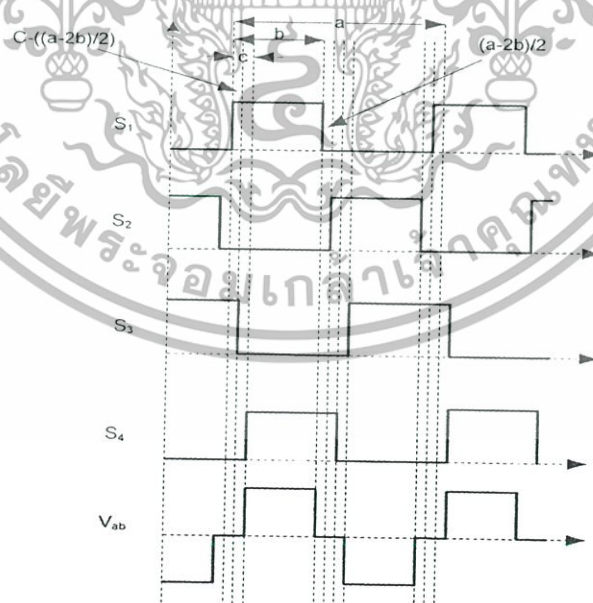
มอสเฟสทั้ง 4 ตัว จะทำงานแยกอิสระจากกัน โดยรับสัญญาณ PS-PWM จากวงจรถัดด้วย ความถี่ 24 kHz - 28 kHz การทำงานของสัญญาณที่ออกมาจากวงจรถัด โดยปกติการทำงานของสัญญาณ PS-PWM ช่วงเวลา  $S_1$  และ  $S_4$  นำกระแส  $S_1$  จะนำกระแส ก่อน  $S_4$  เป็นเวลา  $\Phi$  และช่วงเวลาหยุดนำกระแสก็ช้ากว่า  $S_1$  เพราะช่วงนำกระแส ช้ากว่านั่นเอง ส่วน  $S_2$  และ  $S_3$  ก็เหมือนกัน ช่วงนำกระแส  $S_3$  จะช้ากว่า  $S_2$  เป็นเวลา  $\Phi$  และช่วงหยุดนำกระแส ก็จะช้ากว่า  $S_2$  ด้วยทำนองนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณควบคุมแบบ PS-PWM

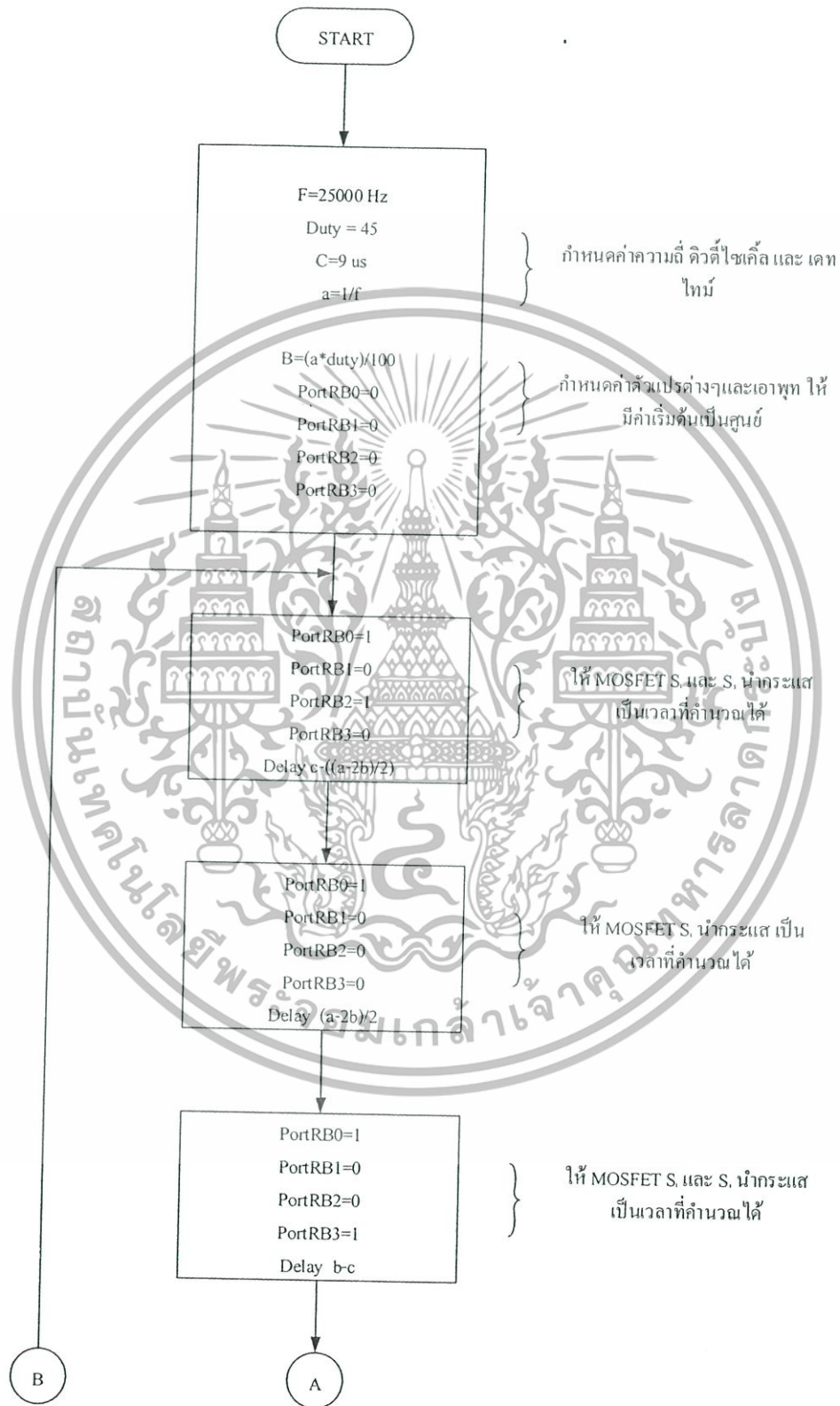
### 3.7 การสร้างสัญญาณ PS-PWM

ในการสร้างสัญญาณ PS-PWM ซึ่งได้กล่าวถึงรูปแบบสัญญาณ และสภาวะการทำงานทั้งหมดไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งได้แบ่งช่วงสัญญาณเป็น 8 ช่วง ดังในรูปที่ 3.15 เพื่อเขียนเป็นโปรแกรมในการสร้างสัญญาณดังรูปที่ 3.16

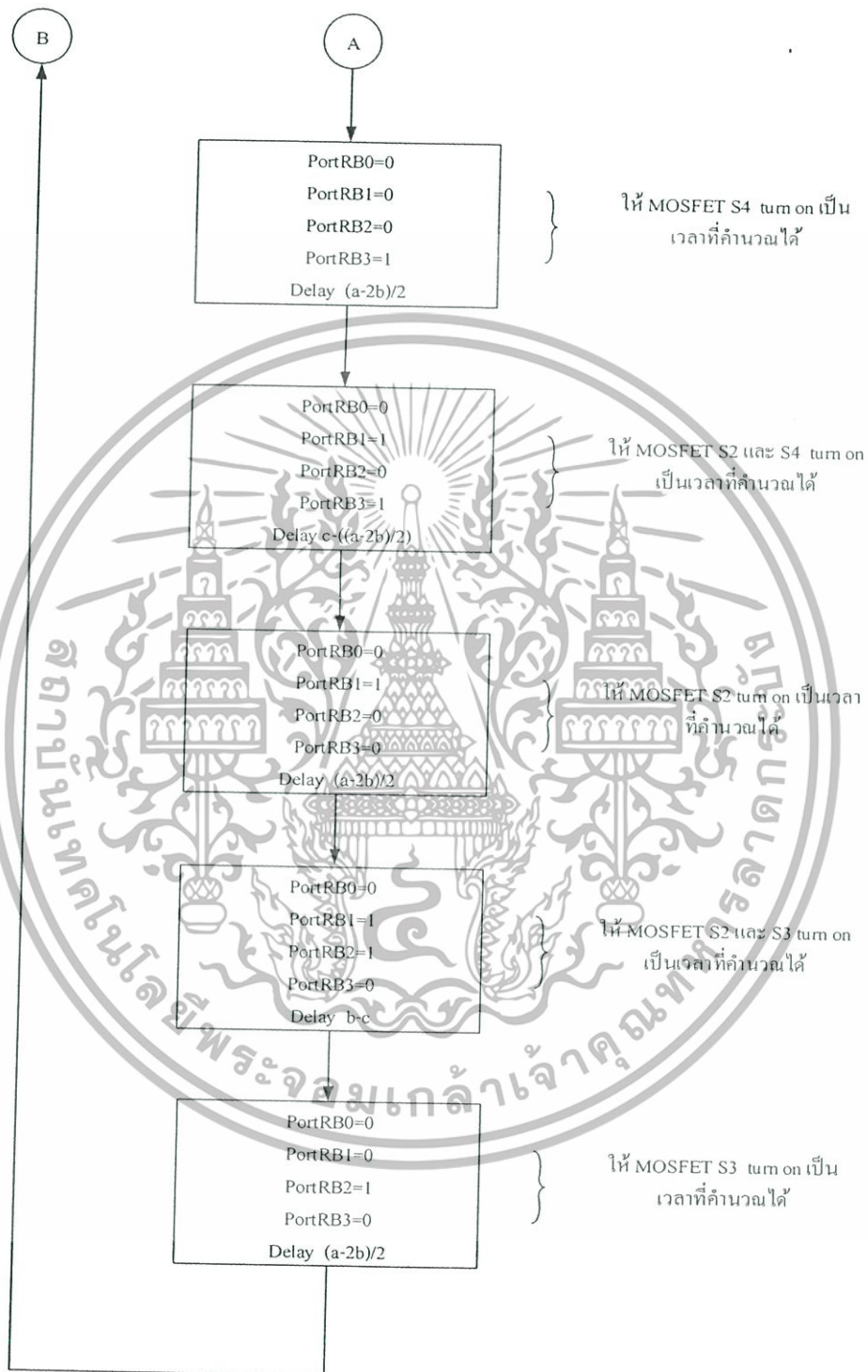


รูปที่ 3.9 ช่วงสัญญาณที่แบ่งเป็น 8 ช่วงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PS-PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.16 โปรแกรมในการสร้างรูปสัญญาณ PS-PWM เริ่มต้นจากการกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการในที่นี้กำหนดที่ 25 kHz และกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลไว้ที่ 45% แล้วจึงกำหนดค่าออกมาเป็นค่าคาบเวลาที่จะต้องทำงาน และหยุดของรูปสัญญาณแต่ละมอสเฟตดังรูปที่ 3.15

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

บทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซน โดยที่อิเล็กทรอนิกส์แชนแนลร่วม 2 ชั้นนั้นเลือกใช้แก้วเป็นฉนวนชั้นที่ 1 คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แชนแนลร่วม 2 ชั้นที่สร้างขึ้น คำนวณ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอโซนเท่ากับ 3.1 kV เราสามารถใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE-80 โดยใช้ในด้านปฐมภูมิจึงต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 20 รอบ และนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกน 13 รอบ ในส่วนของด้านทุติยภูมิต้องนำลวดเบอร์ SWG#31 มาตีเกลียวทั้งหมด 2 รอบและนำลวดตีเกลียวที่ได้มาพันรอบแกนทั้งหมด 130 รอบ จะทำให้เราได้หม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราแรงดัน 310/ 3100 Volt และแสดงการคำนวณความวงจรเรโซแนนต์แบบขนาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

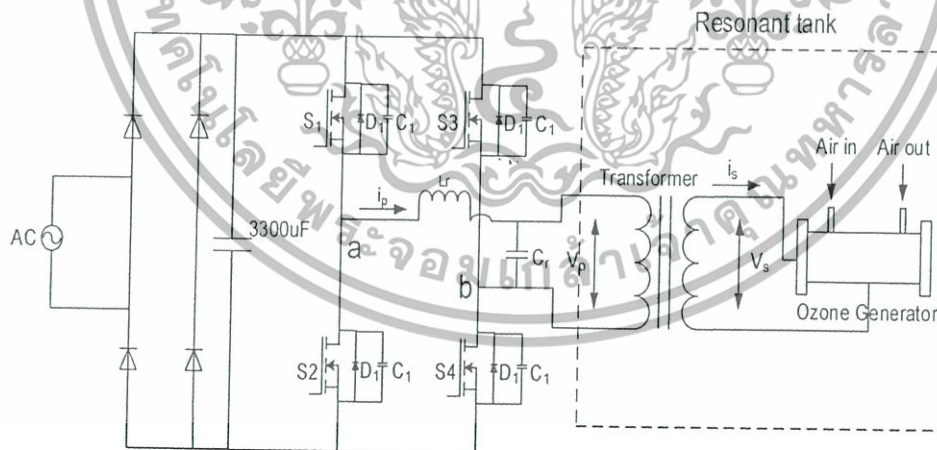
### การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองการทำงานของเครื่องต้นแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่สร้างขึ้นโดยการวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างๆและทำการเก็บผลทางเคมี โดยการปรับความถี่ เพื่อดูผลการเกิดปริมาณโอโซน พร้อมทั้งวัดสัญญาณซบเกิด แรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่อง

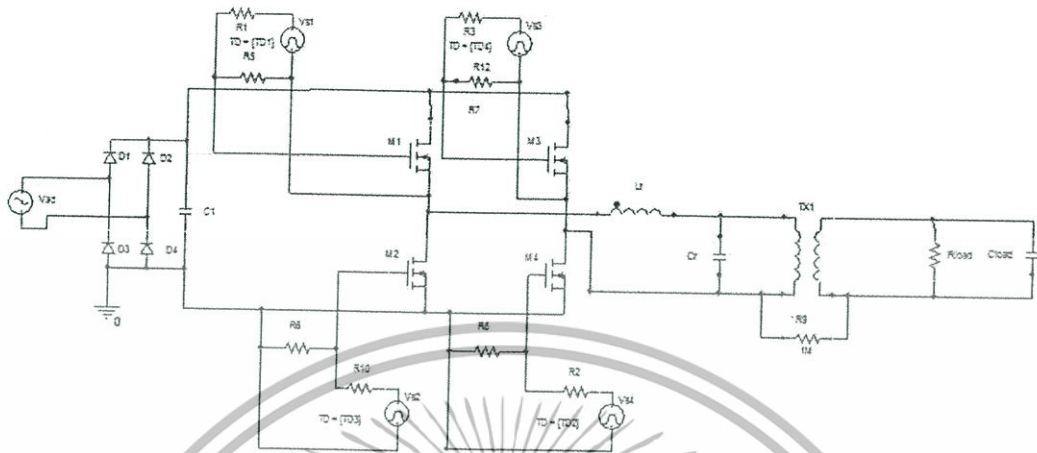
#### 4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

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



รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



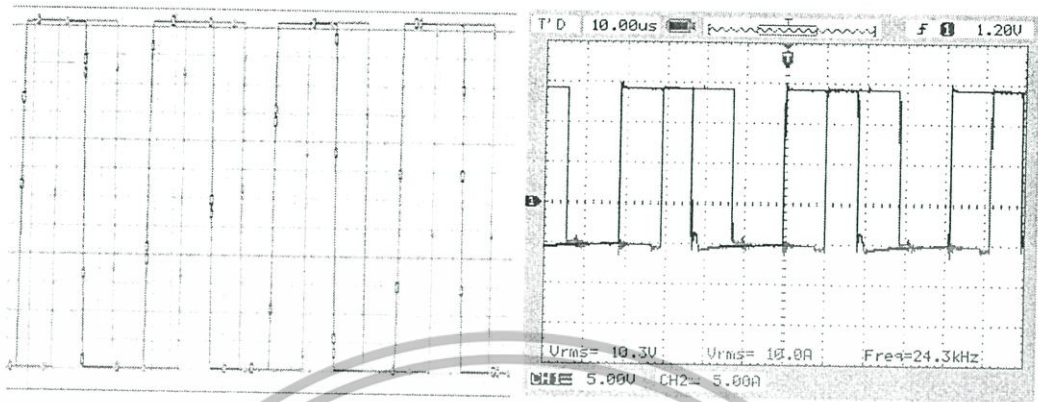
รูปที่ 4.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

4.2.1 สัญญาณขั้วเกิด PS-PWM แรงดันและกระแสสแตตกรวมสวิตช์  $S_1$   $S_2$   $S_3$  และ  $S_4$  และแรงดันและกระแสอินพุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ 24 kHz



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

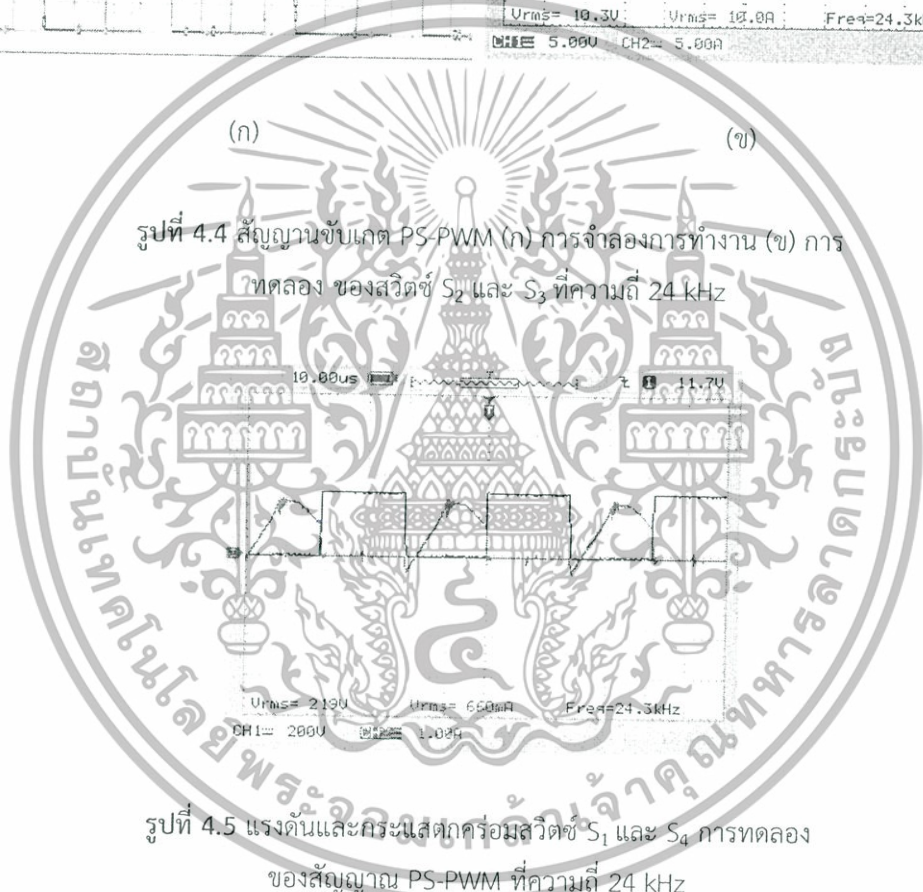
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

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

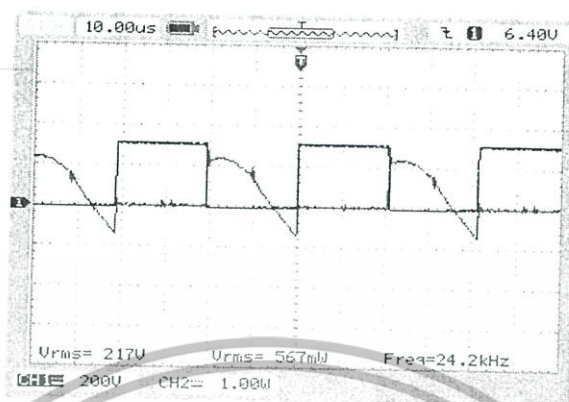


10.00us 11.7U

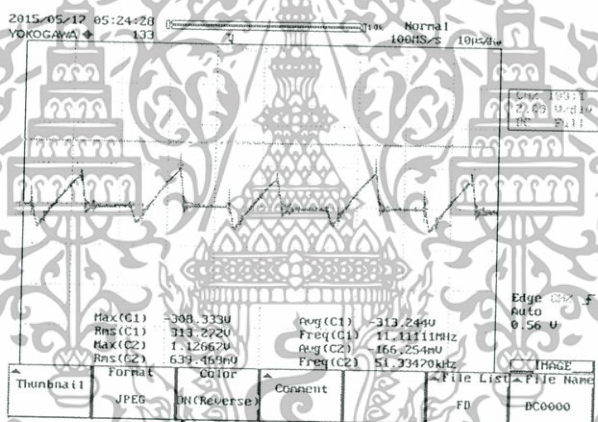
Urmس= 2.13U Urmس= 6.50mA Freq=24.3kHz  
CH1: 200U CH2: 100mA

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



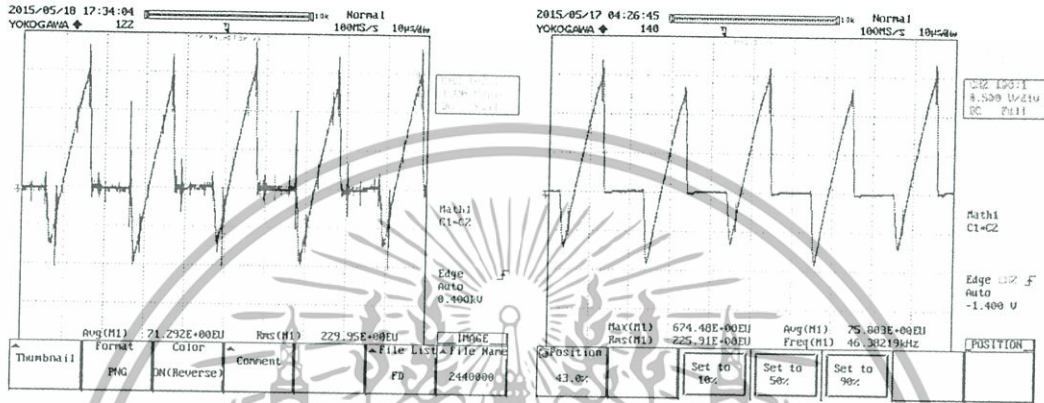
รูปที่ 4.6 แรงดันและกระแสสวิตช์  $S_2$  และ  $S_3$  การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz



รูปที่ 4.7 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

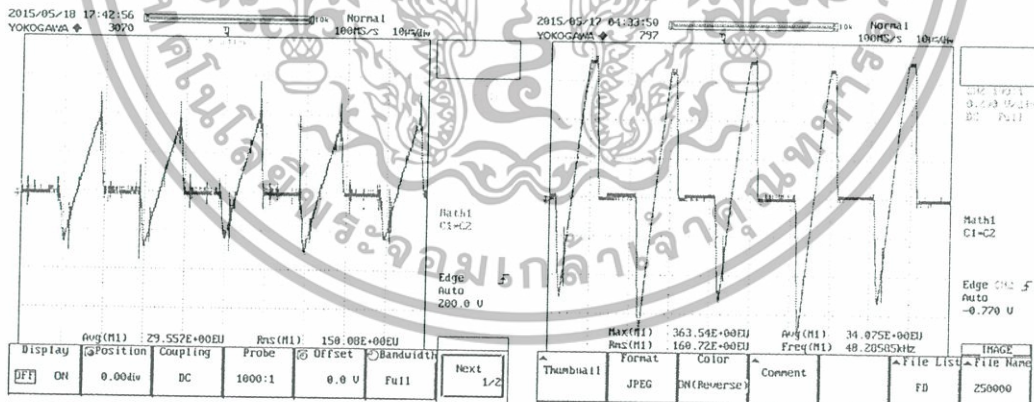
4.2.2 กำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์



(ก)

(ข)

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

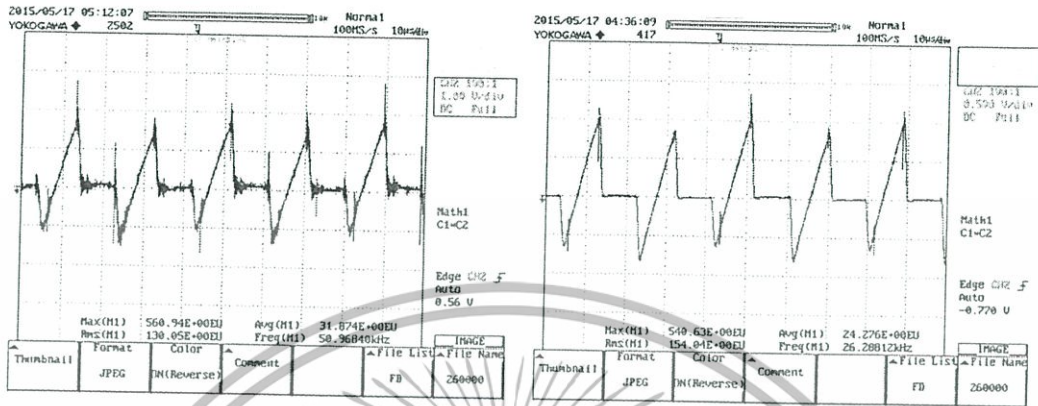


(ก)

(ข)

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

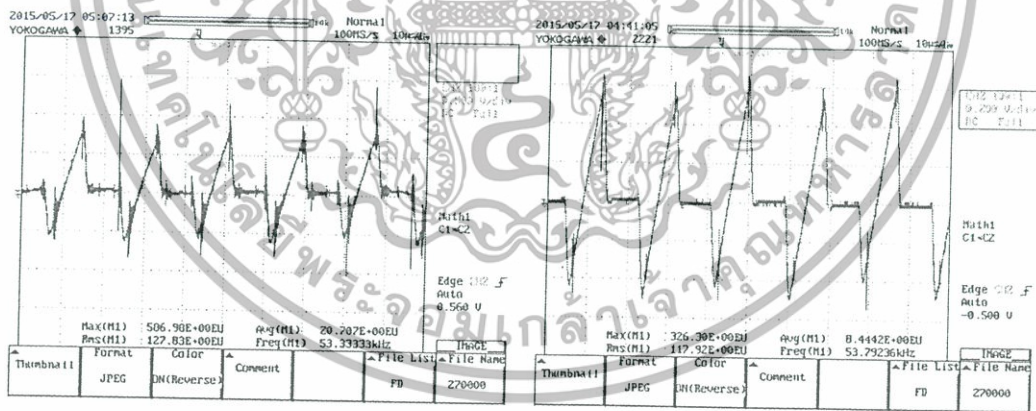
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

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

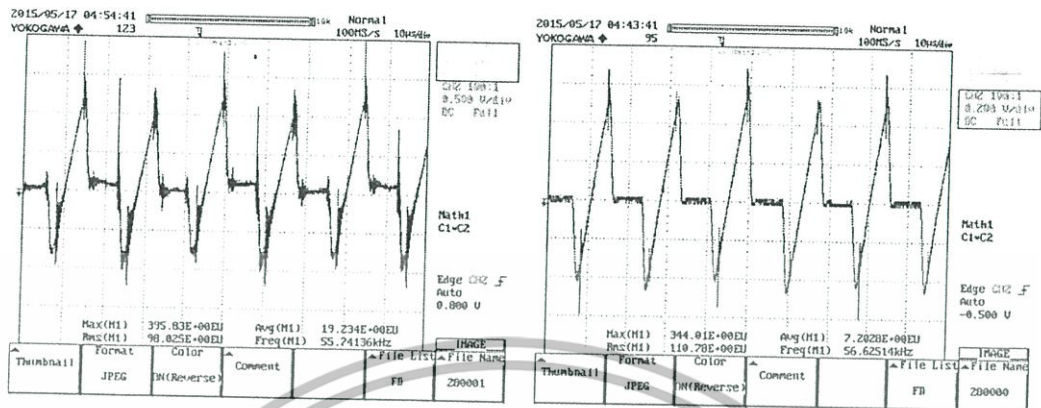


(ก)

(ข)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ (ข) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง



รูปที่ 4.13 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง  
ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง  
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง  
ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง

ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 26 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง  
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง  
ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 27 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

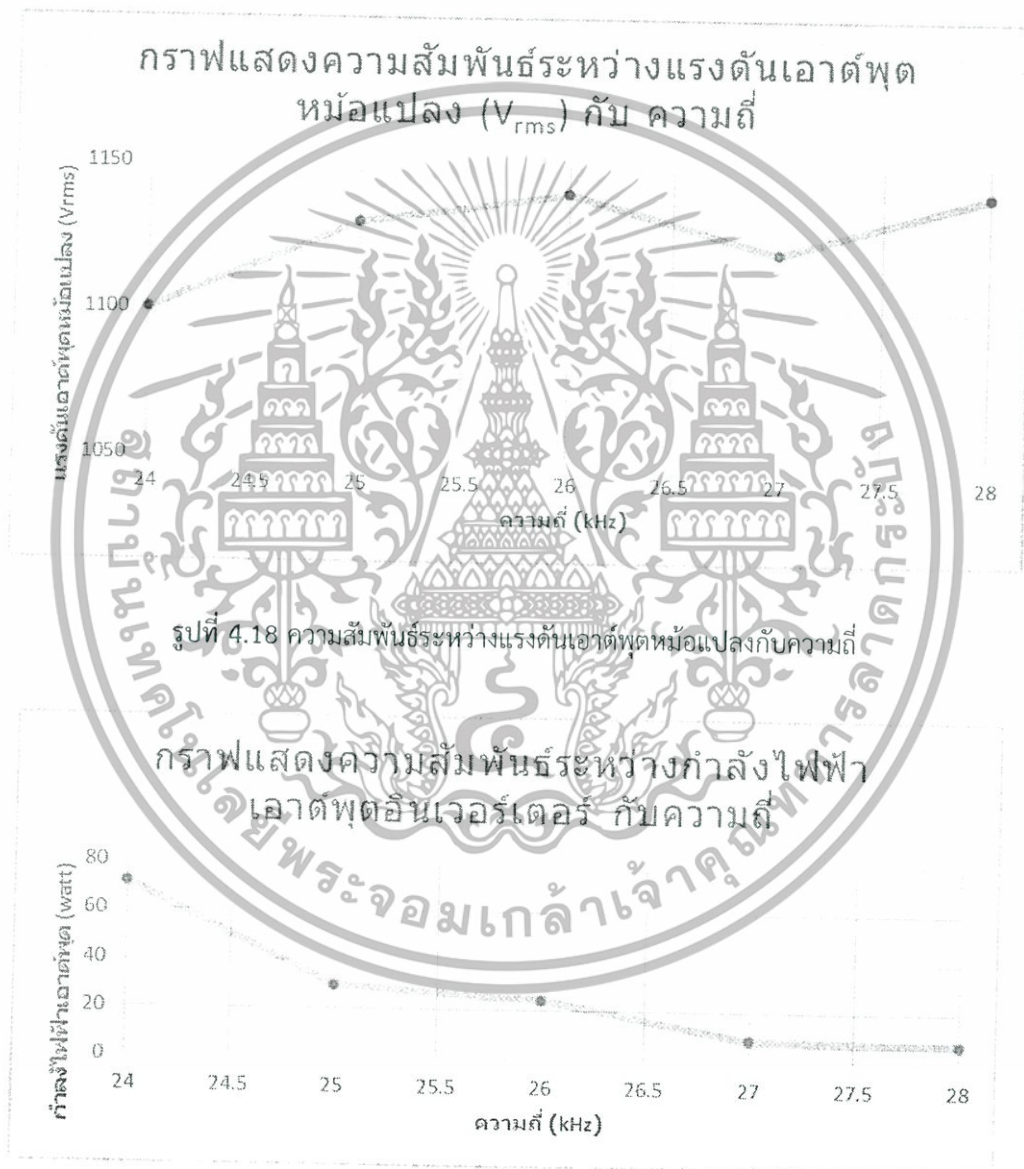


รูปที่ 4.17 แรงดันและกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง  
 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง  
 ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 28 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

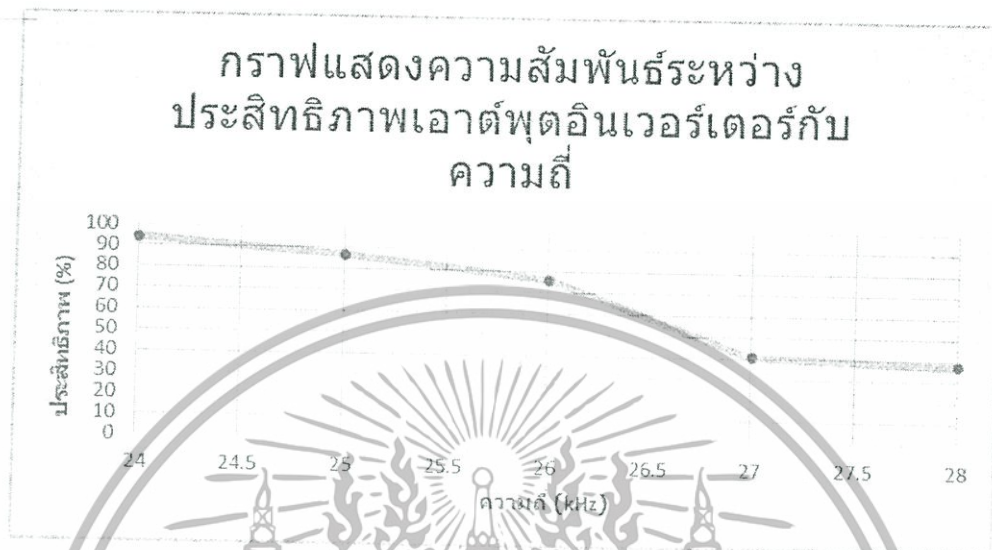
### 4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

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



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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

#### 4.4 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดลองทางเคมี

จากการทดสอบทางไฟฟ้าที่ผ่านมาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อผลิตก๊าซไอโซนจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบสัญญาณและความถี่ ที่ภาคควบคุมคอนเวอร์เตอร์จากนั้นถึงวัดปริมาณก๊าซไอโซนโดยวิธีทางเคมี ที่เรียกว่า การไตเตรท (Titrate) การวัดผลไอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลปริมาตรของสารเคมี  $Na_2S_2O_3$  ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโปรแตสเซียมไอโอไดด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KI ที่ผ่านการแพร่กระจายของก๊าซโอโซนจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 เพื่อหาปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น

$$0.1N \times Na_2S_2O_3 1mL = 2.4mgO_3 \quad (4.1)$$

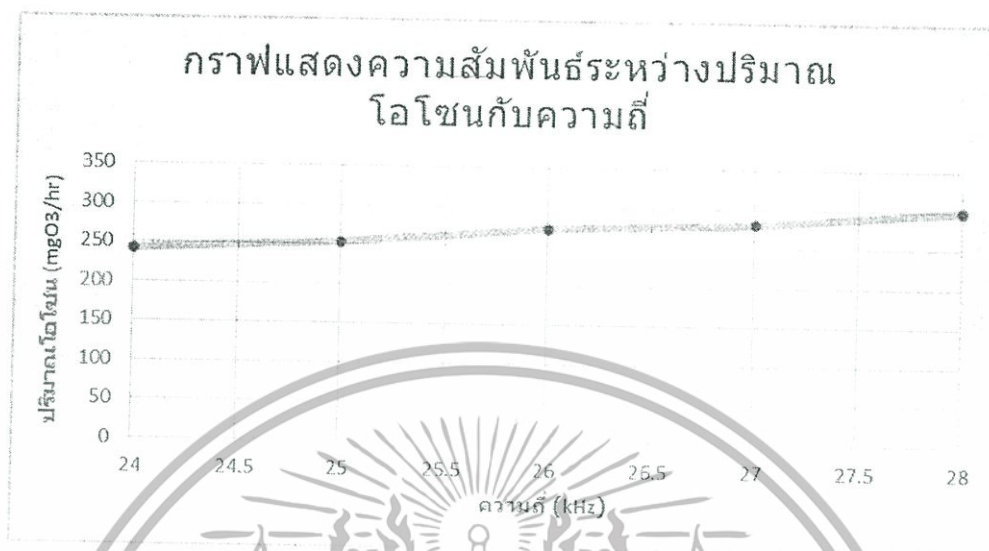
เมื่อ  $Na_2S_2O_3$  คือสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต  
 $mgO_3$  คือ ปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับความถี่

#### 4.5 การเก็บผลการทดลองการยืดอายุของมะม่วง

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

- มะม่วงที่ยังไม่สุก 3 ชุด
- ถังใส่น้ำขนาด
- เครื่องผลิตโอโซน
- บีมลม

ซึ่งขั้นตอนในการทดลองในการทำคือนำมะม่วงไปแช่ลงในน้ำที่ใสในถังขนาด - ลูกบาศก์เมตรที่ได้มีการปล่อยแก๊สโอโซนลงไปในเวลาที่ตั้งไว้คือ 5 และ 10 นาที พอแช่ครบตามเวลาจึงนำมะม่วงขึ้นมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำลักษณะนี้เป็นประจำทุกวันจนมะม่วงเริ่มเน่าเสียจนสังเกตได้ โดยผลการทดลองทั้งสามครั้งเป็นไปตามตาราง 4.2, 4.3 และ 4.4 ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

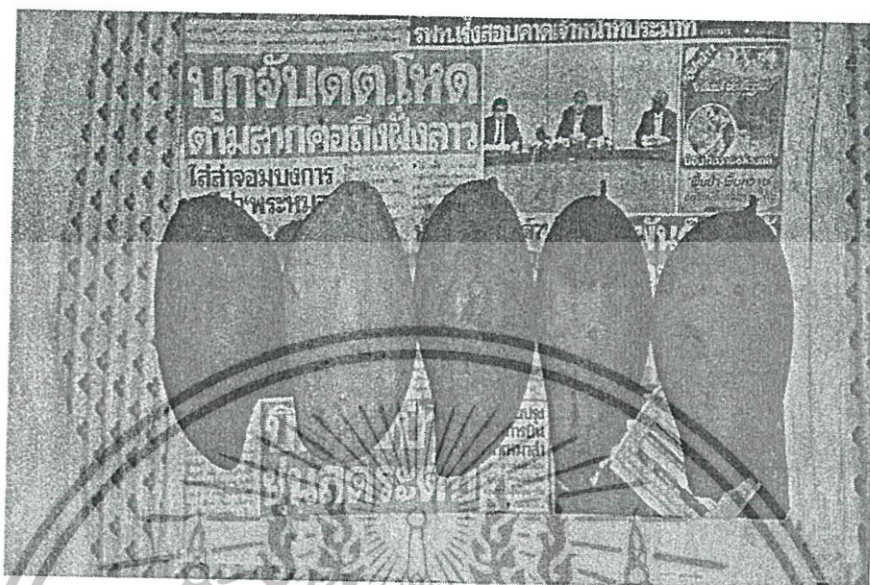
ตารางที่ 4.3 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 2

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

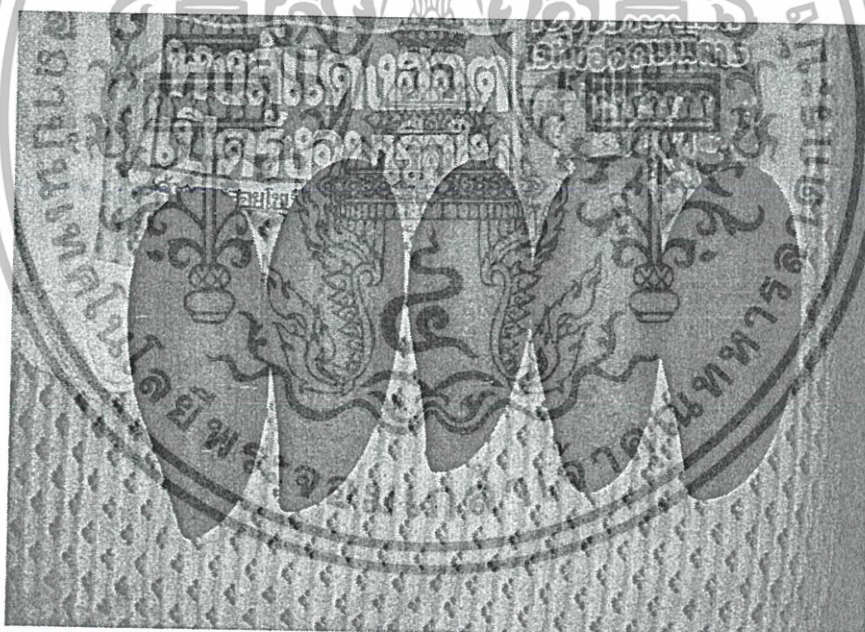
ตารางที่ 4.4 การเก็บผลของมะม่วงครั้งที่ 3

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 รูปวันที่ 5 ของมะม่วงที่ไม่ได้แช่น้ำไอโซนมิจะเห็นได้ว่าการเน่าเสีย 2 ลูก



รูปที่ 4.23 รูปวันที่ 5 ของมะม่วงที่แช่น้ำไอโซนเป็นเวลา 10 นาที ยังไม่มีการเน่าเสีย

ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสามครั้งจากตาราง 4.2, 4.3 และ 4.4 ทำให้เราสามารถที่จะหาค่าเฉลี่ยอายุของมะม่วงในการทดลองแต่ละแบบได้ดังนี้คือ กรณีที่ 1 ไม่ได้แช่น้ำไอโซนมีอายุเฉลี่ยคือ 6.64 วัน กรณีที่ 2 แช่น้ำไอโซนเป็นเวลา 10 นาที มีอายุเฉลี่ยคือ 7.27 วัน และในกรณีสุดท้าย แช่น้ำไอโซนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 10 นาที มีอายุเฉลี่ย 11.72

โดยสรุปจะเห็นได้ว่าในกรณี 1 และกรณี 2 นั้นอายุเฉลี่ยของมะม่วงนั้นแตกต่างกันไม่มากโดยที่ในกรณีที่แช่น้ำไอโซนเป็นเวลา 5 นาทีนั้นจากเก็บได้นานกว่าราวๆ 1 วัน ในขณะที่กรณีสุดท้าย แช่น้ำไอโซนนาน 10 นาทีนั้นมะม่วงอยู่ได้ถึง 12.2 วันซึ่งมากกว่ากรณีที่ไม่ได้แช่ประมาณ 6 วัน

#### 4.6 สรุป

บทนี้ได้เสนอผลการจำลอง ผลการทดลองทางไฟฟ้าและผลทางเคมีของเครื่องกำเนิดไอโซน โดยทางไฟฟ้าทำการวัดกระแสและแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง และทางเคมีโดยการวัดปริมาณไอโซนที่ความถี่ 24-28 kHz และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ และวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งทางไฟฟ้าและทางเคมี นอกจากนั้นยังได้ผลการทดลองการยืดอายุผลไม้ของมะม่วงซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ผ่านกระบวนการไอโซนจะมีอายุที่นานกว่ากรณีที่ไม่ได้ผ่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## สรุป

ปัจจุบันโอโซนกลายเป็นทางเลือกสำหรับปรับปรุงอากาศและน้ำมากมาย โอโซนถูกใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานและบ้านเรือน ดังเช่น การฟอกและการฆ่าเชื้อ รวมไปถึงการใช้ในกระบวนการอาหาร การเก็บรักษาอาหาร การกำจัดกลิ่น การฟื้นฟูน้ำใต้ดิน และการทำน้ำดื่ม การใช้ประโยชน์ของโอโซนได้เติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งการปรับปรุงระบบสร้างโอโซนจึงเป็นส่วนสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้ใช้วิธีการสร้างโอโซนโดยหลักการดิสชาร์จทางไฟฟ้า ในปัจจุบันการสร้างโอโซนมักจะใช้รูปแบบทรงกระบอกแกนร่วมโดยการให้แก๊ส อากาศแห้ง หรือ ออกซิเจน ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความกว้าง 1 mm ด้านหนึ่งของช่องว่าง เป็นขั้วโลหะทำหน้าที่เป็นกราวด์ และอีกด้านหนึ่งแก๊วซึ่งติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างสองขั้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระแสสลับสูงพอที่จะทำให้ออกซิเจนแตกตัว ใช้อย่างง่ายกำลังที่ความถี่สูง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน และเพิ่มปริมาณโอโซนสำหรับพื้นที่ผิวที่จำกัด ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังสวิตชิง บนพื้นฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น หม้อแปลงความถี่สูง MOSFET หรือ IGBT มันสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตและเพิ่มความถี่หลายกิโลเฮิร์ตซ์ได้ ดังนั้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดโอโซน นอกจากนี้ยังลดขนาดอุปกรณ์และสามารถควบคุมปริมาณโอโซนได้ง่าย ในโครงการนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณโอโซนเมื่อป้อนสัญญาณ SP-PWM พูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์เพื่อเป็นทางเลือกที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนในการนำไปประยุกต์ในการยืดอายุผลไม้ จากการทดลองเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริงในงานวิจัยนี้ จะเห็นได้ว่าเราสามารถยืดอายุการใช้งานของมะม่วงด้วยการใช้โอโซนความเข้มข้น 250 mg/hr ที่ความถี่อินเวอร์เตอร์เท่ากับ 24 kHz โดยให้โอโซนเป็นเวลานาน 10 นาทีจะสามารถยืดอายุได้นานที่สุดและนอกจากนี้ในการทดลองหาปริมาณของโอโซนที่ความถี่ต่างๆยังพบว่าปริมาณโอโซนนั้นแปรผันตามความถี่ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ไหลลั่นเอง โดยที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุต ให้อยู่ในพิสัยที่ออกแบปไว้โดยแรงดันที่ทำให้เกิดโอโซนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1.8 kV

## ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าควมมีระบบระบายความร้อนที่อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์เกิดความร้อนสูง เนื่องจากเมื่อหลอดร้อนเกินไปอาจทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในหลอดโอโซนเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อีระเดช เจียรวรรณ, “การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไอโซน : ศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PDM และ PSPWM ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนต์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [2] วีระเชษฐ์ ชันเงิน วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 12 กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง, 2555.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [4] Anuwat Jangwanitlert, “Evaluation of an Improved zero-voltage and zero-current Switching PWM full-Bridge cd-dc Converter”, Dissertation, University of Arkansas, December 2004.
- [5] พรพิมล รัตน์วิเชียร, “เครื่องผลิตก๊าซไอโซนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์”, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [6] อนรรักษ์ มั่นสุข, “เครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบแรงดันและความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสซีฟท์-ดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์”, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [7] ยงยุทธ นาราชกูร์, “การวิเคราะห์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS และ NON ZVS ในเรโซแนนต์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยดิฟเฟอเรนเชียลที่คำนึงถึงผลของตัวเก็บประจุเดรนชอร์ส ของมอสเฟต สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ”, งานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## การวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

## 1. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

## 1.1 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI)

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

1.2 สารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ )

- สารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) 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. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณไอโชนโดยวิธีการทางเคมี

2.1 ทดซึมก๊าซไอโชน (Absorption) จากเครื่องผลิตก๊าซไอโชนลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ละลาย (KI) กับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร (mL) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม

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

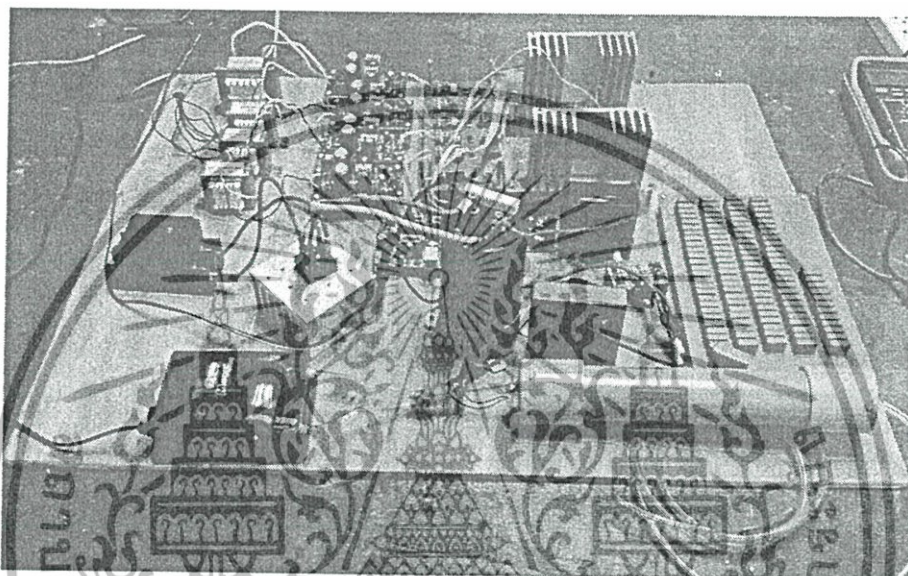
2.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.2 มาทำการไตเตรตโดยใช้สารละลาย โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) ที่มีความเข้มข้น 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เป็นตัวไตเตรตทำการไตเตรตจนสีน้ำเงินจางหายไปจากนั้นทำการบันทึกค่าของ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

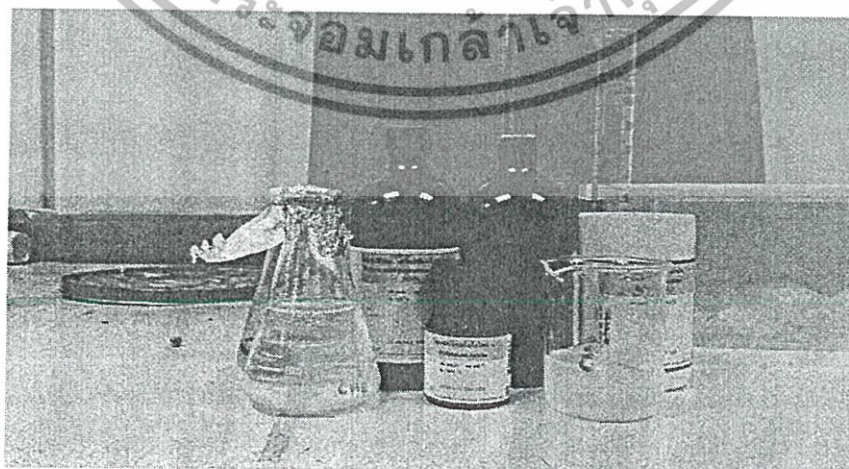
### 3.การคำนวณหาปริมาณโอโซน

จากความสัมพันธ์  $0.1 \text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$   $1 \text{ mL} = 2.4 \text{ mgO}_3$

ตัวอย่าง การคำนวณเช่น กรณีที่ใช้  $0.1 \text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ในการไตเตรต  $1.5 \text{ mL}$  และดูดซึมโอโซน  
ลงน้ำ  $1$  นาที คือปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ประมาณ  $1.7 \times 2.4 \times 60 = 244.8 \text{ mgO}_3/\text{hr}$

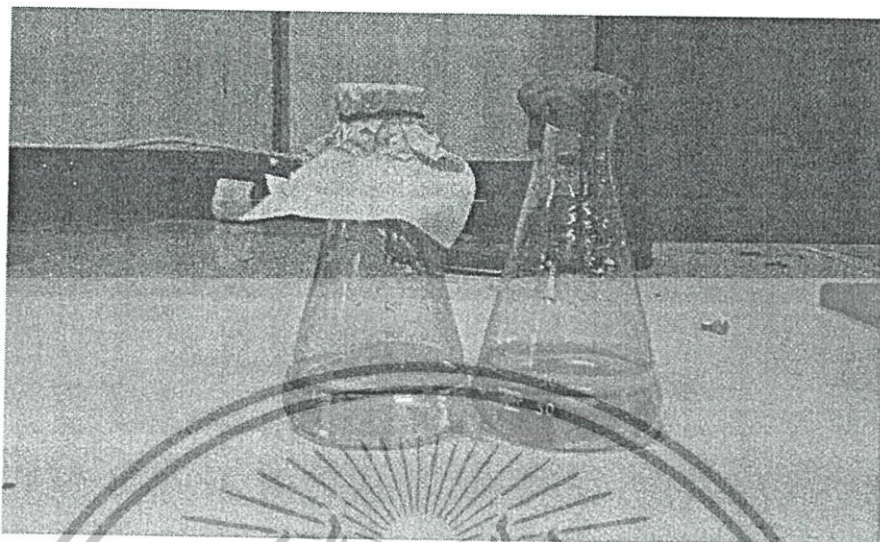


รูปก.1 เครื่องผลิตก๊าซโอโซน

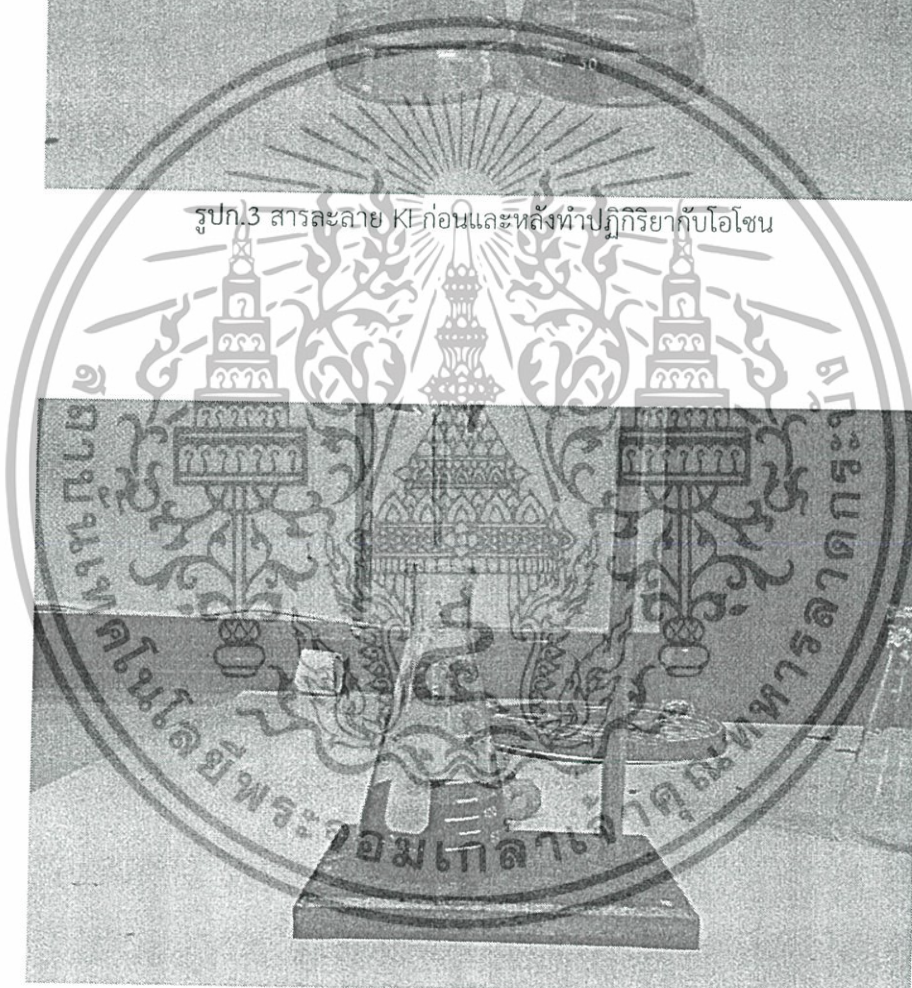


รูปก.2 อุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

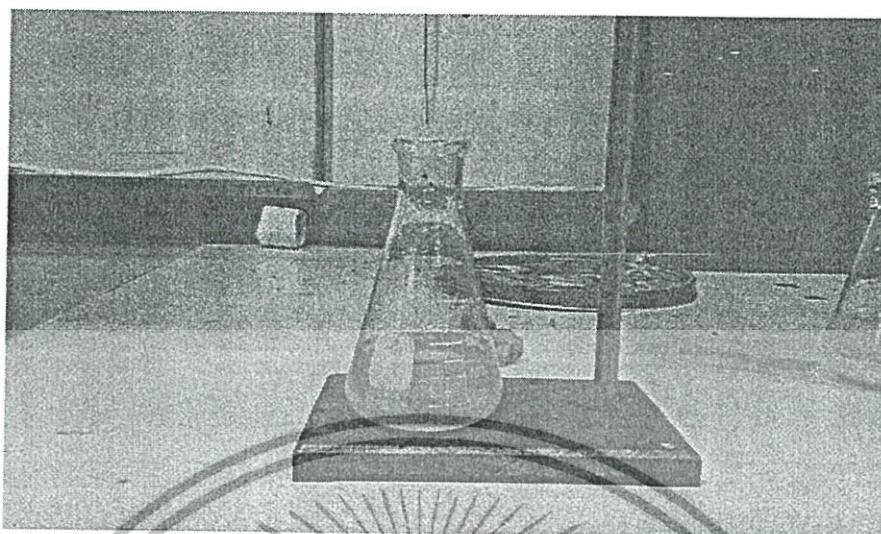


รูปก.3 สารละลาย KI ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอโอดีน



รูปก.4 สารละลายที่เติมกรดซัลฟูริกและน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



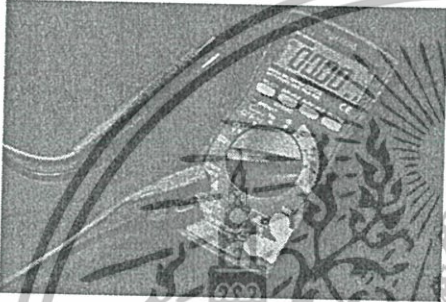
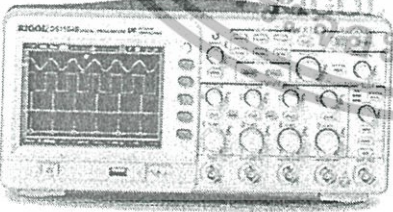
รูปก.5 สารละลายหลังทำการไตรเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตแล้ว



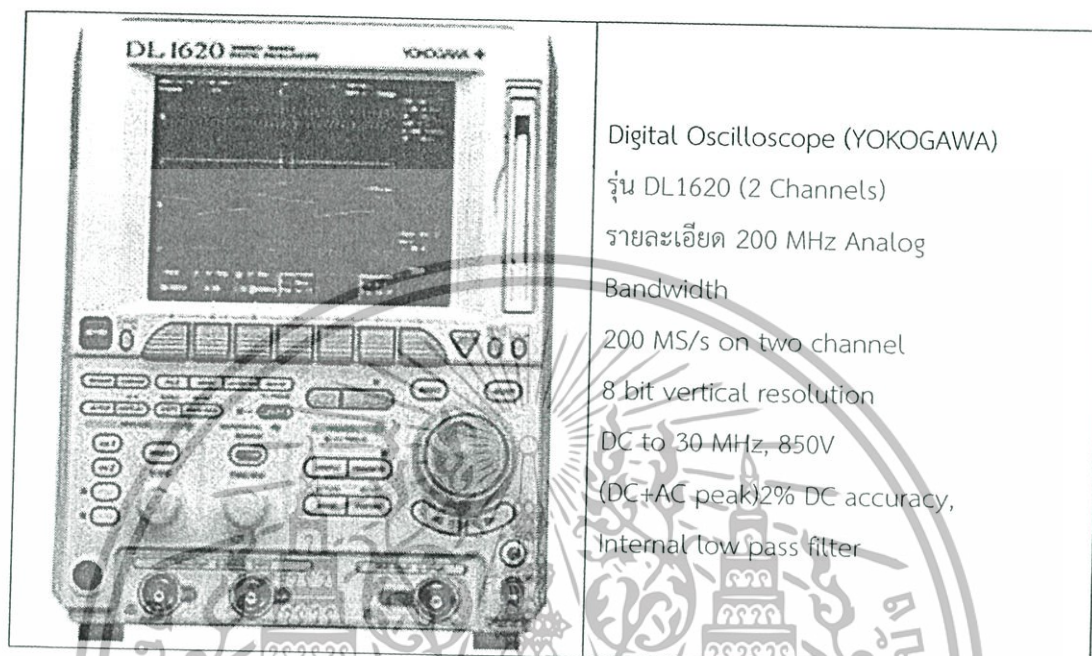
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## ข้อมูลอุปกรณ์การวัด

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Multi Meter (Sanwa) รุ่น CD722 รายละเอียด Vac or Vdc : 0 to 1000/1000 Volts Iac or Idc : 0 to 20 Amps</p>
	<p>Digital Oscilloscope (Rigol) รุ่น DS1104B</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 Analogue Channels</li> <li>- 2GSa/s Real-Time Sample Rate</li> <li>- Versatile Trigger Functions</li> <li>- Waveform Record and Replay Function</li> <li>- Built-in FFT and Digital Filters</li> <li>- Pass/Fail Test</li> <li>- High Definition Display (320 x 240)</li> <li>- Connectivity: USB Host &amp; Device, LAN(LXI)</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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

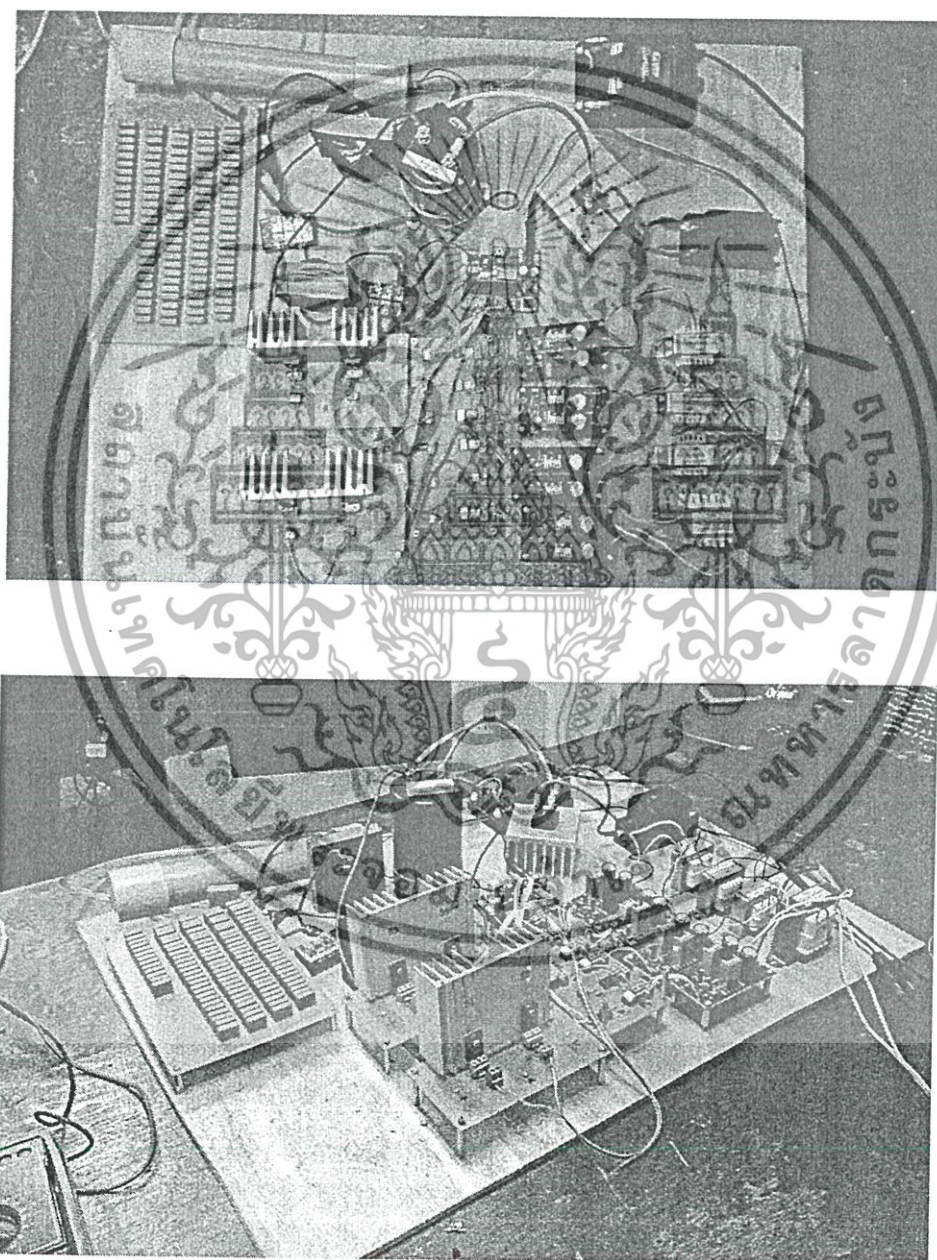
(DC+AC peak) 2% DC accuracy,

Internal low pass filter

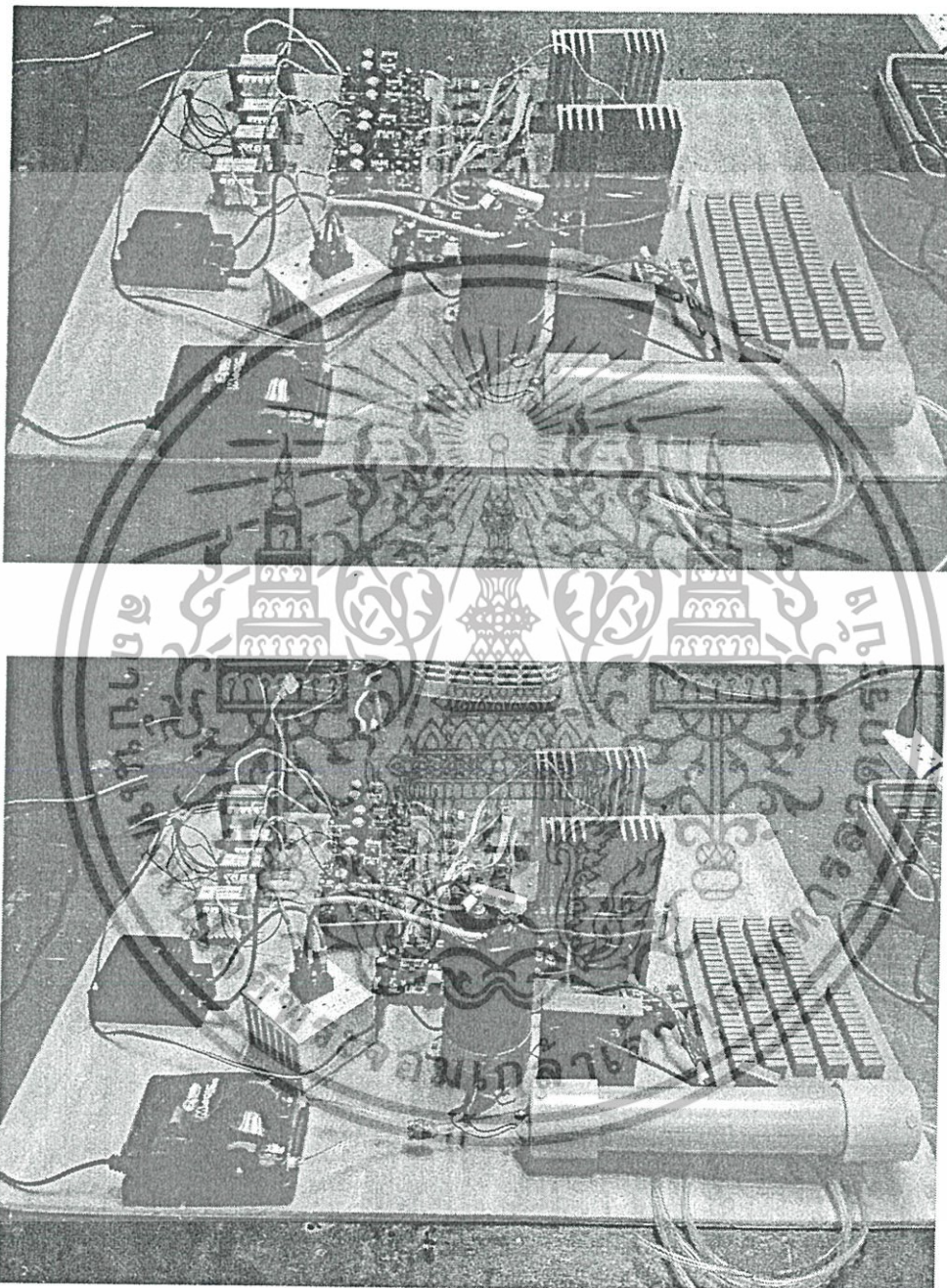
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

รูปโครงการวิจัยโดยรวม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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"

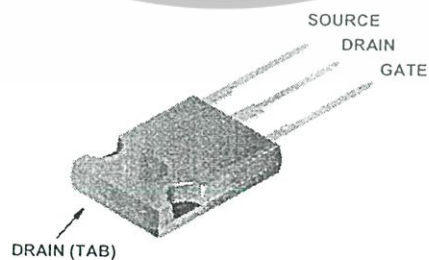
**Ordering Information**

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRFP460	TO-247	IRFP460

NOTE: When ordering, use the entire part number.

**Symbol****Packaging**

JEDEC STYLE TO-247



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Absolute Maximum Ratings  $T_C = 25^{\circ}C$ , 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 $T_C = 100^{\circ}C$ $I_D$	20	A
Pulsed Drain Current (Note 3) $I_{DM}$	12	A
Gate to Source Voltage $V_{GS}$	80	A
Maximum Power Dissipation $P_D$	$\pm 20$	V
Linear Derating Factor $W$	250	W
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4) $E_{AS}$	2.0	$W/C$
Operating and Storage Temperature $T_J, T_{STG}$	960	mJ
Maximum Temperature for Soldering Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s $T_{pk}$	-55 to 150	$^{\circ}C$
Package Body for 10s, See Techbrief 334 $T_{pk}$	300	$^{\circ}C$
	260	$^{\circ}C$

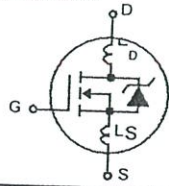
CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

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

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

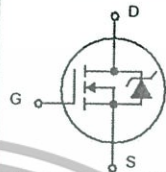
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	$V_{DS}$	$I_D = 250\mu A, V_{GS} = 0V$ (Figure 10)	500	-	-	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\mu A$	2	-	4	V
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = \text{Rated } BV_{DSS}, V_{GS}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



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:

2. Pulse test: pulse width  $\leq 300\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .
3. Repetitive rating: pulse width limited by Max junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
4.  $V_{DD} = 50\text{V}$ , 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

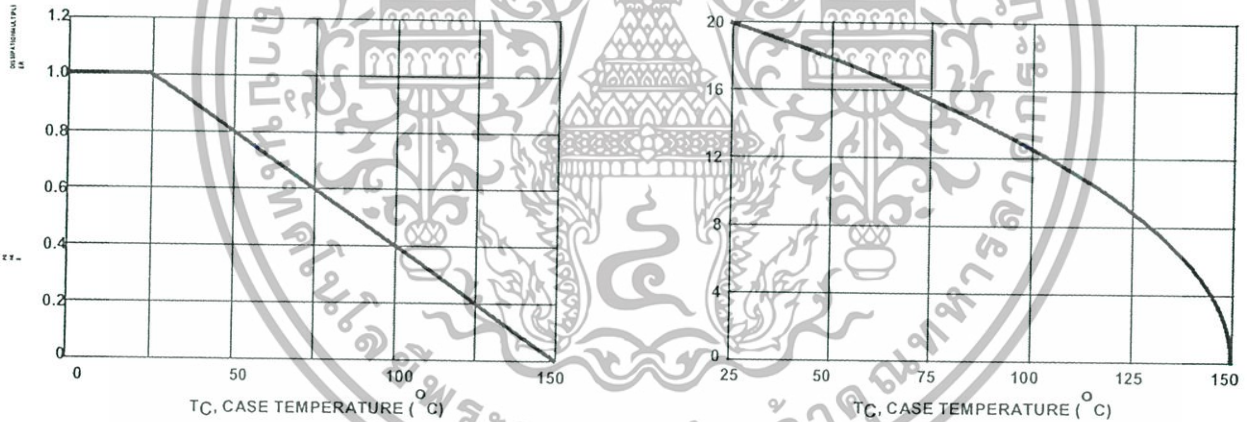
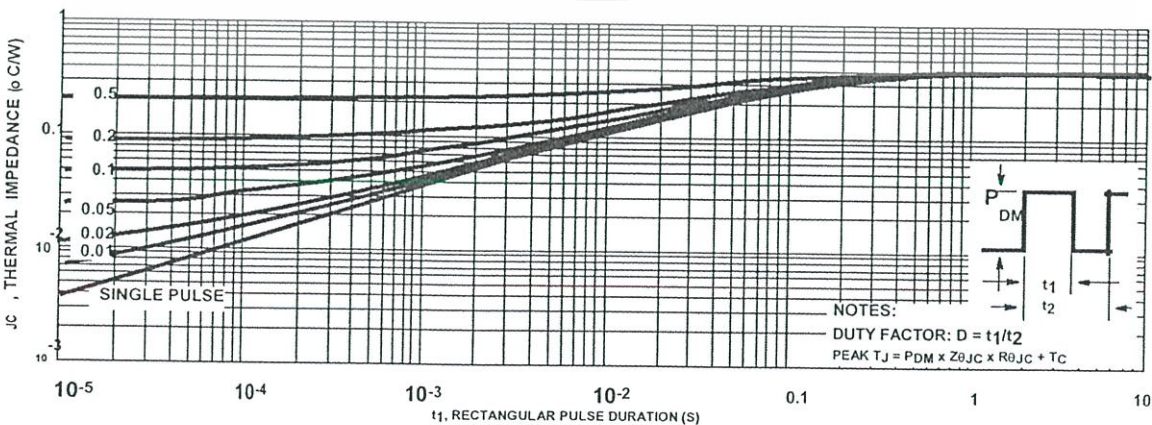


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE



NOTES:  
 DUTY FACTOR:  $D = t_1/t_2$   
 PEAK  $T_J = P_{DM} \times Z_{th(jc)} \times R_{\theta(jc)} + T_c$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทที่ออกให้มาเพื่อใช้ในการค้า  
 ไม่ควรกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

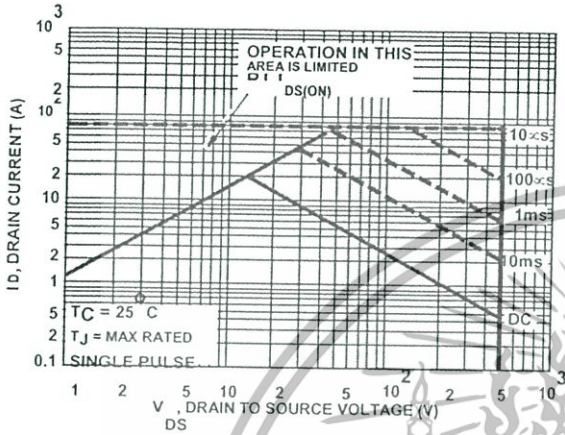


FIGURE 4. FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA

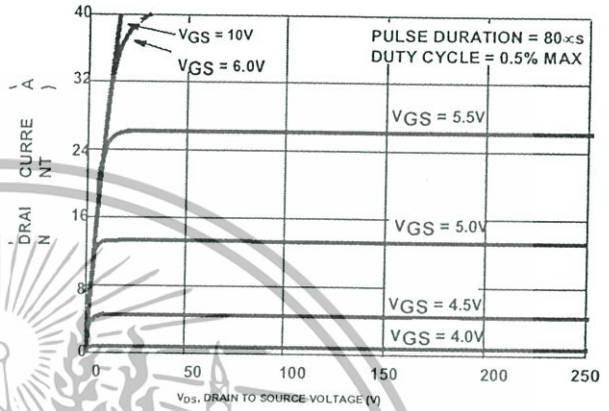


FIGURE 5. OUTPUT CHARACTERISTICS

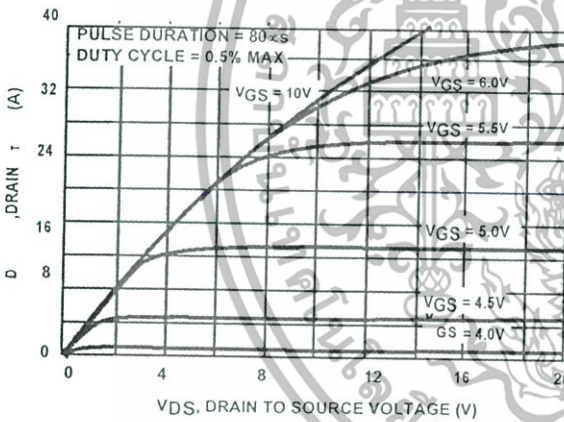


FIGURE 6. SATURATION CHARACTERISTICS

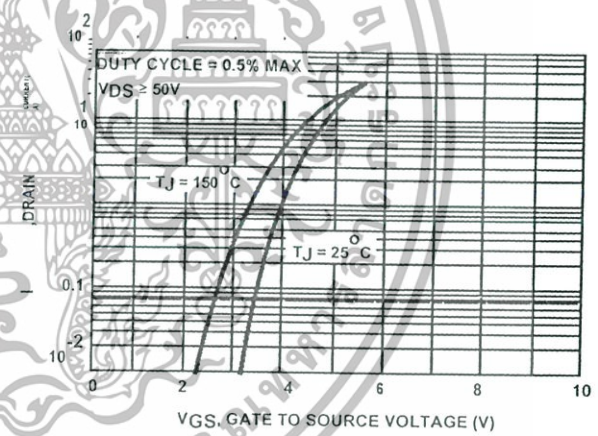


FIGURE 7. TRANSFER CHARACTERISTICS

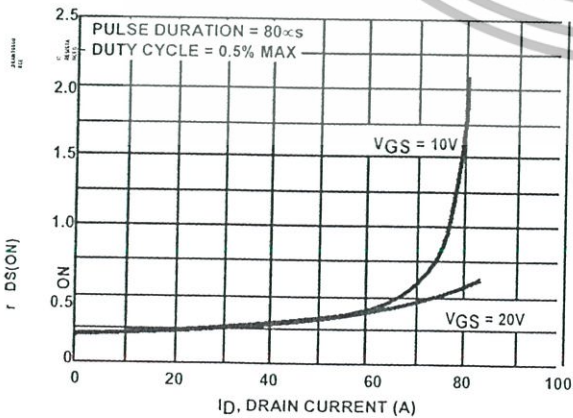


FIGURE 8. DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs GATE VOLTAGE AND DRAIN CURRENT

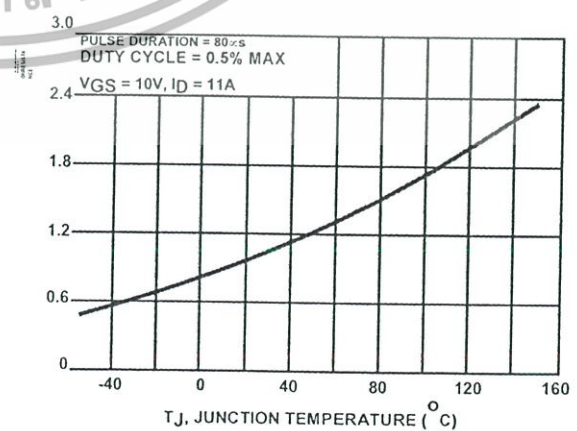


FIGURE 9. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs JUNCTION TEMPERATURE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

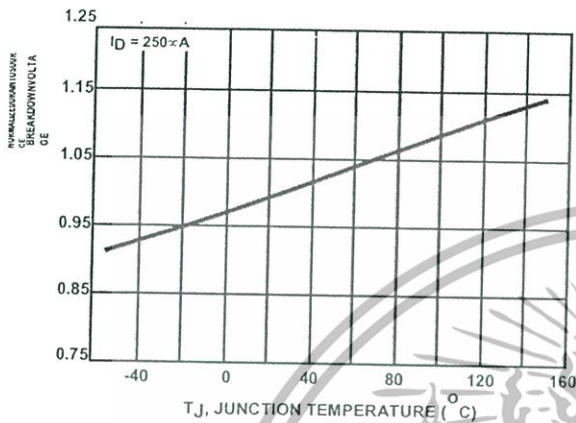


FIGURE 10. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE BREAKDOWN VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

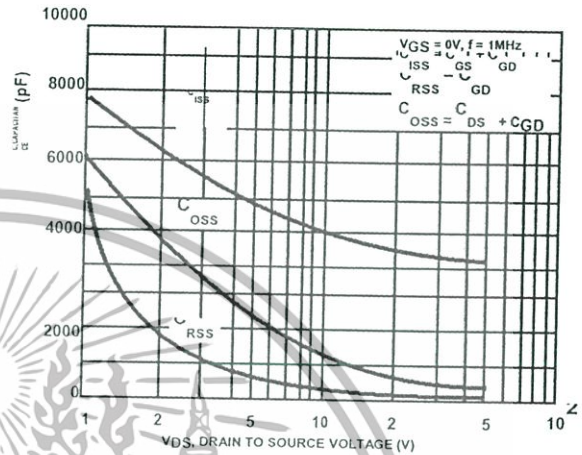


FIGURE 11. CAPACITANCE vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE

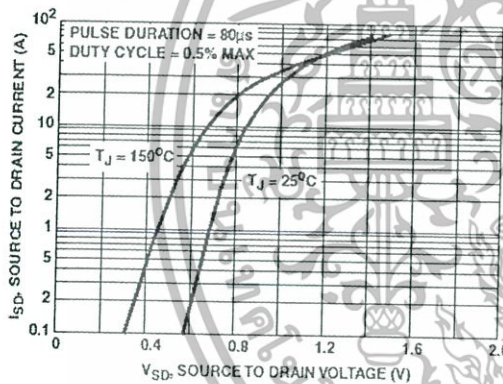


FIGURE 12. SOURCE TO DRAIN DIODE VOLTAGE

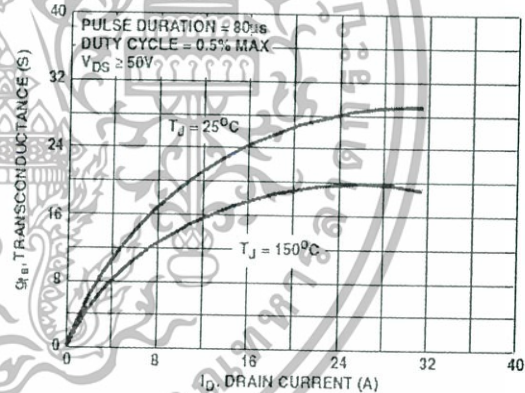


FIGURE 13. TRANSCONDUCTANCE vs DRAIN CURRENT

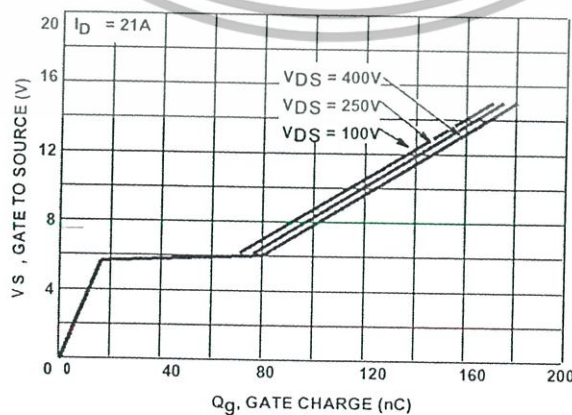


FIGURE 14. GATE TO SOURCE VOLTAGE vs GATE CHARGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Test Circuits and Waveforms

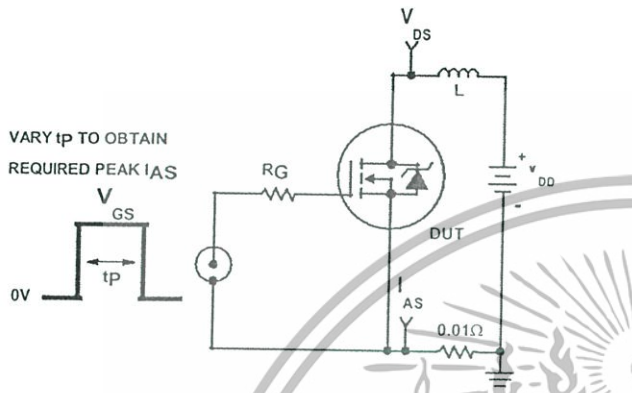


FIGURE 15. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

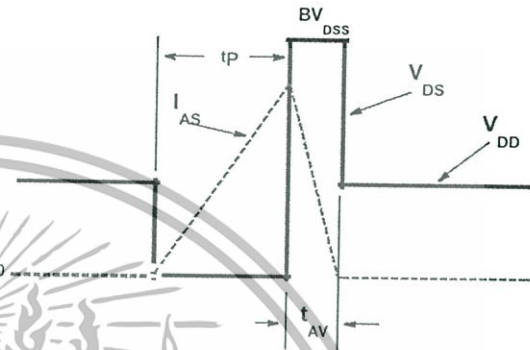


FIGURE 16. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

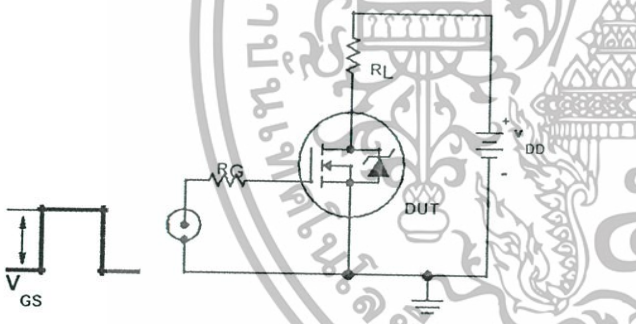


FIGURE 17. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

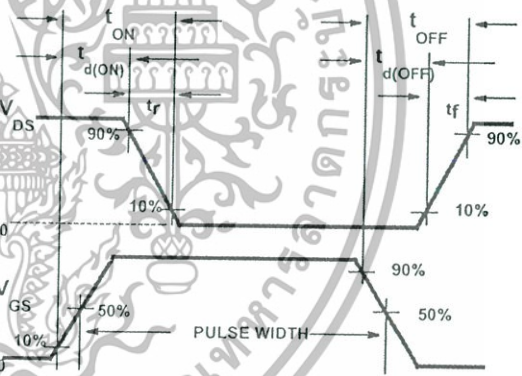


FIGURE 18. RESISTIVE SWITCHING WAVEFORMS

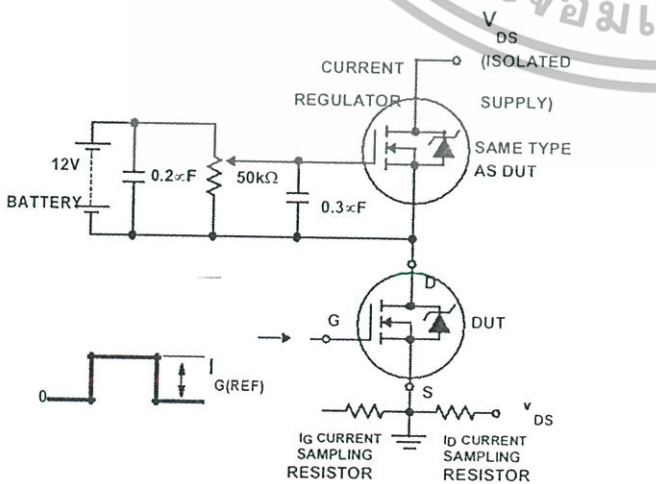


FIGURE 19. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

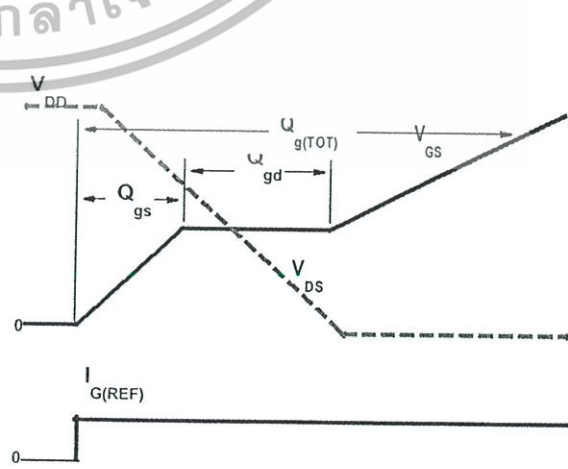


FIGURE 20. GATE CHARGE WAVEFORMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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.

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

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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TLP250

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

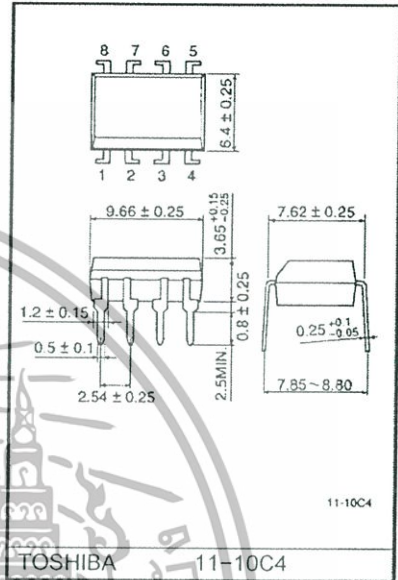
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
 This unit is 8-lead DIP package.  
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- 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: 630V<sub>PK</sub> Highest  
 permissible over voltage: 4000V<sub>PK</sub>

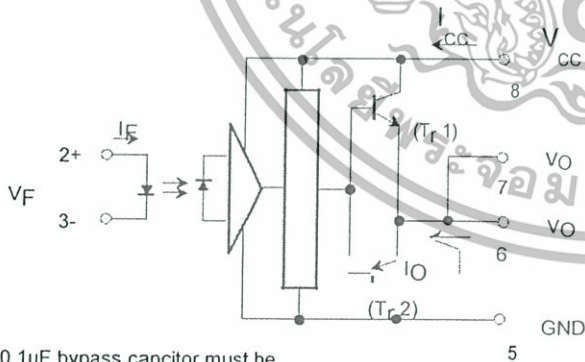
(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

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

Unit in mm

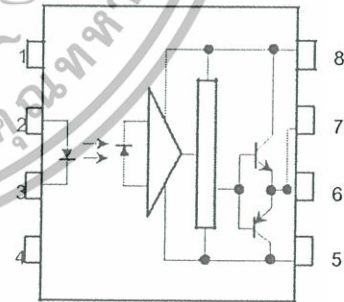


## Schmatic



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

## Pin Configuration (top view)



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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	$I_F$	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	$I_{FPT}$	1	A	
	Reverse voltage	$V_R$	5	V	
	Junction temperature	$T_J$	125	°C	
Detecto L	"H" peak output current ( $P_{WV} \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$ ) (Note 2)	$I_{OPH}$	-1.5	A	
	"L" peak output current ( $P_{WV} \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$ ) (Note 2)	$I_{OPL}$	+1.5	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_O$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_{CC}$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
Junction temperature	$T_J$	125	°C		
Operating frequency (Note 3)	$f$	25	kHz		
Operating temperature range	$opr$	-20-85	°C		
Storage temperature range	$stg$	-55-125	°C		
Lead soldering temperature (10 s)	$I_{sol}$	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)	$BVS$	2500	Vrms		

(Note 1) Pulse width  $P_{WV} \leq 1\mu s, 300pps$ 

(Note 2) Exponential waveform

(Note 3) Exponential waveform,  $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$ ,  $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$ 

(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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Input current, on	I <sub>F(ON)</sub>	7	8	10	mA	
Input voltage, off	V <sub>F(OFF)</sub>	0	—	0.8	V	
Supply voltage	V <sub>CC</sub>	15	—	30	20	V
Peak output current	I <sub>OPH</sub> / I <sub>OPL</sub>	—	—	±0.5	A	
Operating temperature	T <sub>opr</sub>	-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 <sub>F</sub>	—	I <sub>F</sub> = 10 mA, Ta = 25°C	—	1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage	ΔV <sub>F</sub> / ΔTa	—	I <sub>F</sub> = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current	I <sub>R</sub>	—	V <sub>R</sub> = 5V, Ta = 25°C	—	—	10	mA
Input capacitance	C <sub>T</sub>	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level I <sub>OPH</sub>	3	V <sub>CC</sub> = 30V (*) I <sub>F</sub> = 10 mA V <sub>8-6</sub> = 4V I <sub>F</sub> = 0 V <sub>6-5</sub> = 2.5V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level I <sub>OPL</sub>	2		0.5	2	—	
Output voltage	"H" level V <sub>OH</sub>	4	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>F</sub> = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level V <sub>OL</sub>	5		V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>F</sub> = 0.8V	—	-14.2	
Supply current	"H" level I <sub>cCH</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
	"L" level I <sub>cCL</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA	—	—	11	
		—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA Ta = 25°C	¼	7.5	¾	
Threshold input current	"Output L→H" I <sub>FLH</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L" V <sub>FHL</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage	V <sub>CC</sub>	—		10	—	35	V
Capacitance (input-output)	C <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)	R <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1 × 10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	W

\* All typical values are at Ta = 25°C (\*) : Duration of I<sub>O</sub> time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TOSHIBA**

TLP250

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

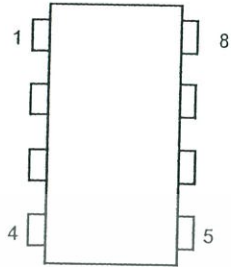
Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit	
Propagation delay time	L→H	t <sub>pLH</sub>	6	I <sub>F</sub> = 8mA V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω	—	0.15	0.5	μs	
	H→L	t <sub>pHL</sub>			—	0.15	0.5		
Output rise time		t <sub>r</sub>			—	—	—		—
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

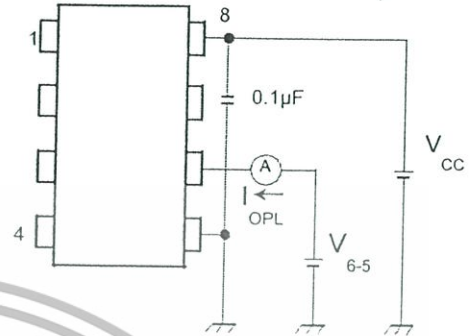


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

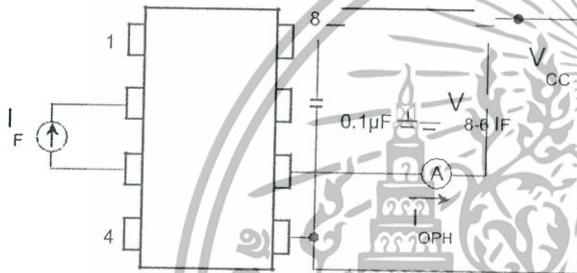
Test Circuit 1 :



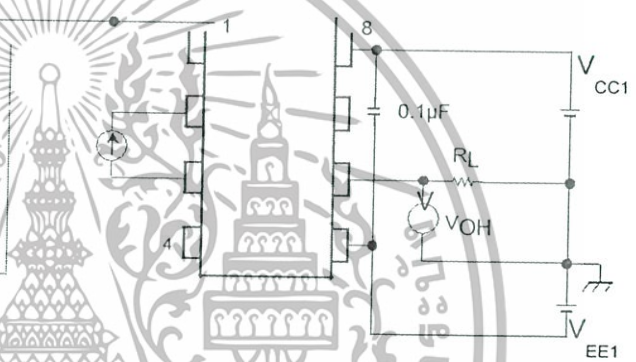
Test Circuit 2 : IOPL



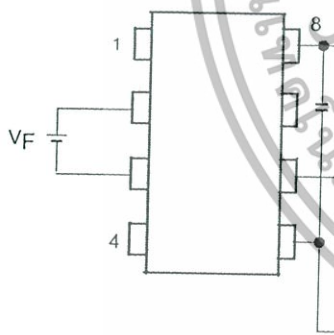
Test Circuit 3 : IOPH



Test Circuit 4 : VOH

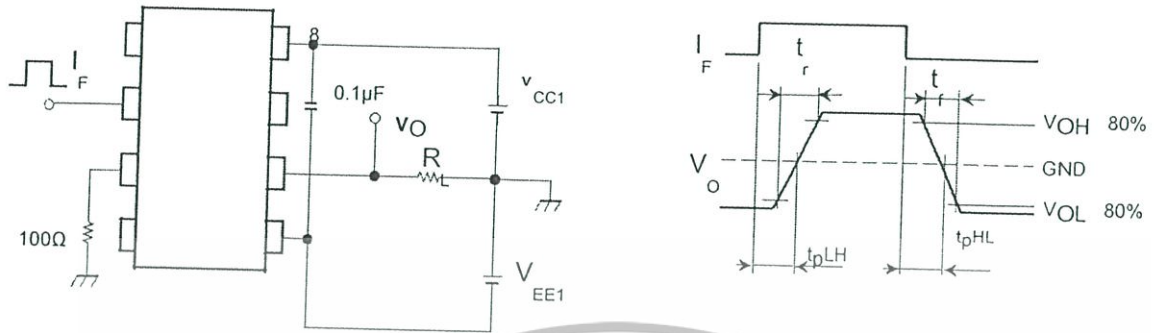


Test Circuit 5 : VOL

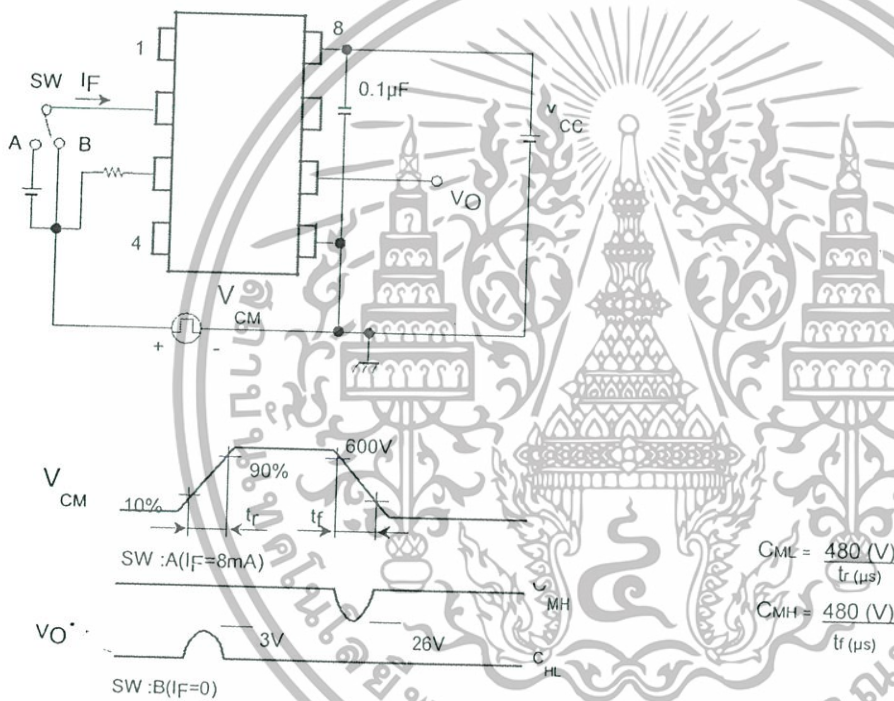


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

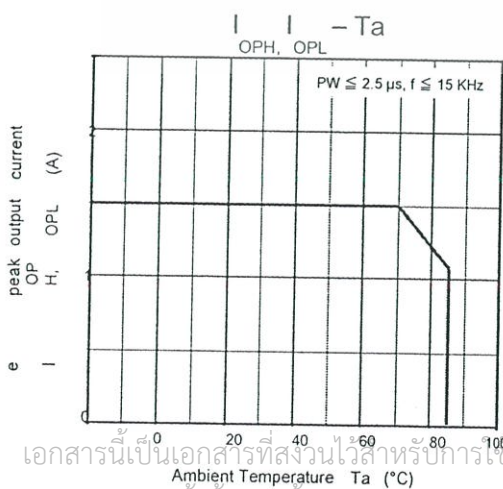
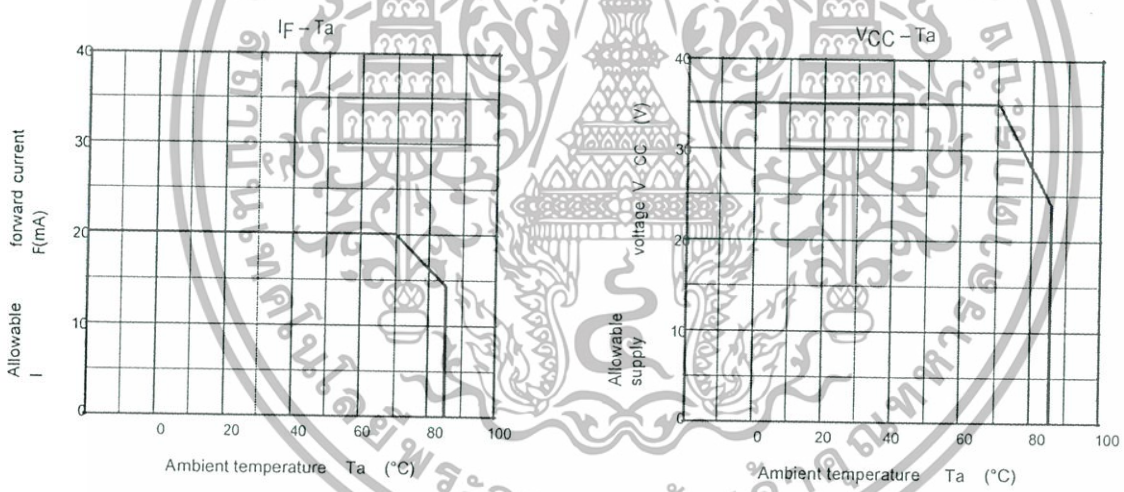
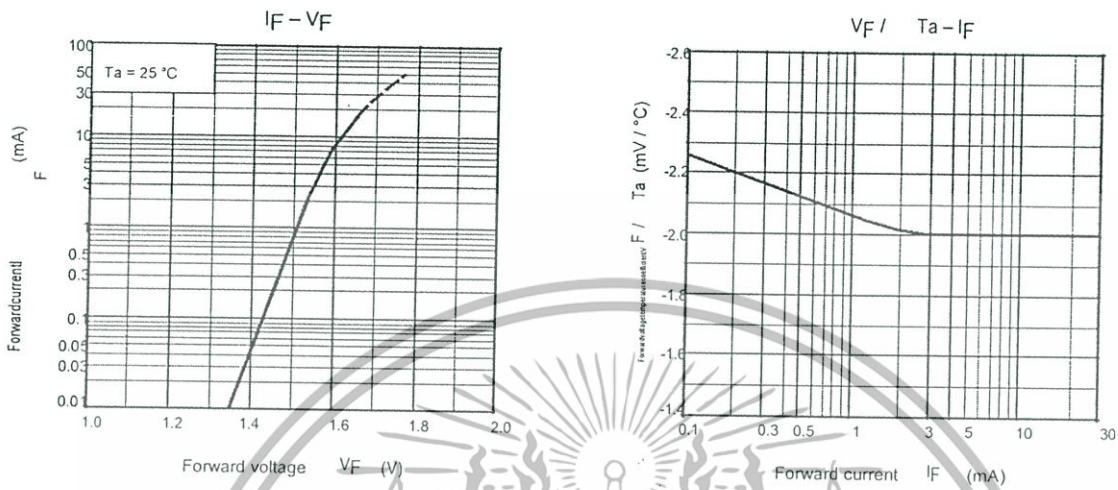


Test Circuit 7:  $CMH$ ,  $CML$



$CMH$ ( $CMH$ ) 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ต้นฉบับไม่มีเนื้อหาหน้า 94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Ozone Generator for Prolonging Fruits Using a Full-Bridge Inverter with High Frequency Transformer

W. Meesrisuk and A. Jangwanitlert

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand  
E-mail: liverpool\_fc1991@windowslive.com and jkjanuwat@gmail.com

**Abstract** — This paper presents an ozone generator by using a full-bridge inverter for applying in prolonging fruits process. The phase-shifted pulse width modulation (PSPWM) 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 principle, the ozone generator was built and test in laboratory for prolonging mangoes. From the test, the 250 mg/hr of ozone concentration at 24 kHz of switching frequency can prolong the mangoes life satisfyingly more than the other concentrations and the maximum efficiency of inverter is 93.1 %.

**Keywords** — ozone generator, full-bridge inverter, PSPWM

## I. INTRODUCTION

Nowadays, the ozone gas plays a key role in daily life of human such as wastewater treatment and disinfection. In medical technology, the ozone gas has been used in healing skin disease or cleaning germs in surgery room. As the advantages of ozone gas can defeat germs and various microorganisms, the ozone gas have been used for prolonging vegetables and fruits life in agricultural technology. Many researches in the past [1]-[5] have proposed the principle for generating ozone gas by using power electronics circuit in order to make the high frequency high voltage waveform for the ozone tube. Therefore, this research paper will propose a full-bridge inverter with high frequency transformer for generating the ozone gas to apply in keeping and extending fruits (mangoes) life. Finally, the experimental results will be shown in order to prove the proposed principle by choosing mangoes as the test samples.

## II. THE PROPOSED CIRCUIT

The proposed circuit is shown in Fig. 1, which includes three important parts. The first part is a full-bridge inverter which consists of switches ( $S_1$ - $S_4$ ) for generating the high frequency waveforms. The second part is a high frequency transformer which will be used for increasing the voltage level to be sufficient for occurring ozone gas and the third part is an ozone tube which uses the coaxial cylinder principle to create high stress electric field for generating ozone gas to apply in prolonging fruits process. In addition, the control circuit in this research uses the microcontroller as dsPIC30f4011 to generate the PSPWM signals for all switches in circuit in order to control the output power of inverter and the concentration of ozone gas. The key waveforms of proposed converter is illustrated in Fig. 2 which includes the gate signals ( $G_{S1}$  -  $G_{S4}$ ) by using PSPWM for driving all switches in circuit and the output voltage ( $V_{AB}$ ) and current ( $i_p$ ) of inverter.

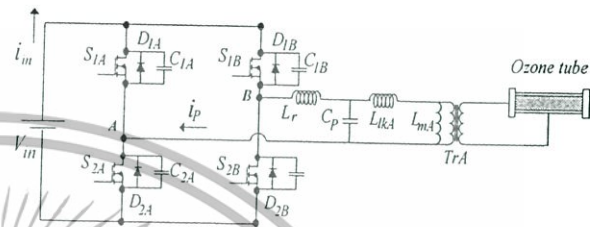


Fig. 1. The proposed circuit.

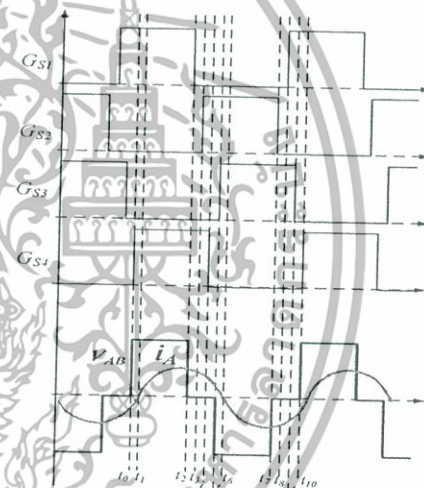


Fig. 2. The diagram shows operating states of the circuit.

## III. THE OPERATION MODES

To analyze the operation mode of proposed circuit easier, the circuit should be approximately used in Fig. 3. It can be divided into 10 modes per one cycle and described in detail of each mode as follows:

**Mode 1 ( $t_0 - t_1$ )** At  $t_0$ , switches  $S_1$  and  $S_4$  are turned ON. The current still flows in the negative direction due to the energy from  $L_{eq}$  by passing the parasitic diodes of switches  $S_1$  and  $S_4$ . So, the voltage across of them is equal to zero at this time and they will operate under the ZVS condition in next mode. The voltage across the load is equal to  $V_{in}$ . This mode can be defined as "Regenerative mode"

**Mode 2 ( $t_1 - t_2$ )** After the regenerative is finished, switches  $S_1$  and  $S_4$  conduct the current under the ZVS condition from the input voltage source ( $V_{in}$ ) to high frequency transformer ( $T_{rA}$ ). The voltage across the load still equal to  $V_{in}$  as previous mode. The energy from input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

voltage source is transferred to the load. So, this mode can be defined as “Powering mode”

**Mode 3 ( $t_2 - t_3$ )** At  $t_2$ , switches  $S_1$  stops to conduct the current while  $S_4$  still conduct the current by the formation of the gate signals of each switch. The current charges the capacitor  $C_1$  and discharges  $C_2$ . Therefore, the voltage across the load decreases linearly to zero at the end of this mode. The current still flows in the same direction as previous mode.

**Mode 4 ( $t_3 - t_4$ )** At  $t_3$ , switch  $S_2$  is turned ON but the current cannot flow via  $S_2$  in this time because switch  $S_3$  still turns OFF. So, the current still flows in the same direction as mode 3 via parasitic diode  $D_2$  and switch  $S_4$ . The voltage across the load still equals to zero as previous mode.

**Mode 5 ( $t_4 - t_5$ )** At  $t_4$ , switch  $S_4$  is turned OFF. Therefore, the current charges the parasitic capacitor  $C_4$  and discharges the parasitic capacitor  $C_3$ . This results in decreasing the voltage across the load from zero to  $-V_{in}$  at the end of this mode. The current still flows in positive direction as previous mode.

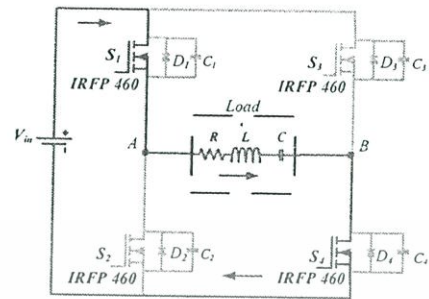
**Mode 6 ( $t_5 - t_6$ )** This mode is the regenerative mode. At  $t_5$ , switch  $S_3$  is turned ON. The current still flows in the same direction as mode 5 by using the energy from  $L_{eq}$  via the parasitic diodes of switches  $S_2$  and  $S_3$  to input voltage source. The voltage across the load equals to  $-V_{in}$ .

**Mode 7 ( $t_6 - t_7$ )** After the regenerative mode is finished, switches  $S_2$  and  $S_3$  conduct the current to load under the ZVS condition. Therefore, the current will flow in the negative direction again in this mode, the voltage across the load still equals to  $-V_{in}$ .

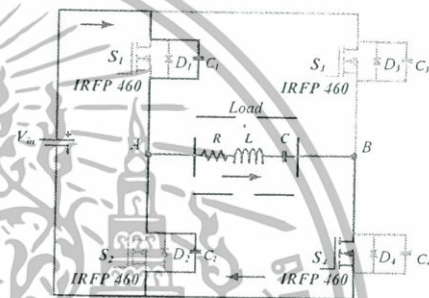
**Mode 8 ( $t_7 - t_8$ )** At  $t_7$ , switch  $S_2$  is turned OFF. After that, the current will charge the parasitic capacitor  $C_2$  and discharge  $C_1$ . The voltage across load will increase from  $-V_{in}$  to zero at the end of this mode. The current still flows in the same direction as previous mode.

**Mode 9 ( $t_8 - t_9$ )** At  $t_8$ , switch  $S_1$  is turned ON whereas the current cannot flow via  $S_1$  in this time because switch  $S_4$  still turns OFF. So, the current still flows via parasitic diode  $D_1$  and switch  $S_3$ . The voltage across the load still equals to zero as previous mode.

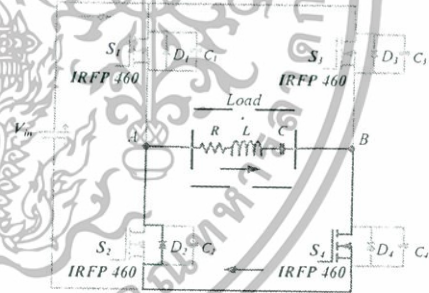
**Mode 10 ( $t_9 - t_{10}$ )** At  $t_9$ , switch  $S_3$  is turned OFF. Therefore, the current charges the parasitic capacitor  $C_3$  and discharges the parasitic capacitor  $C_4$ . This results in increasing the voltage across the load from zero to  $V_{in}$  at the end of this mode. The current still flows in negative direction as previous mode.



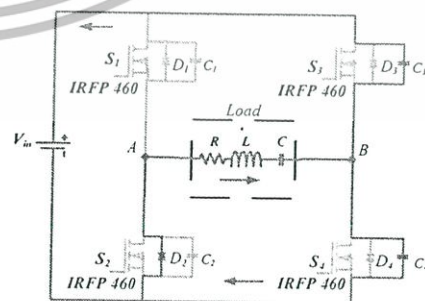
(b) Mode 2



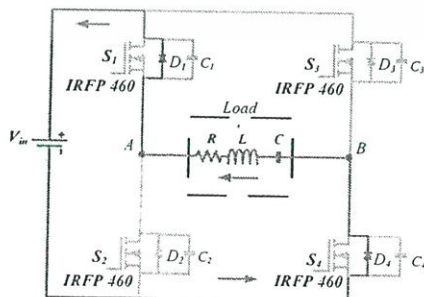
(c) Mode 3



(d) Mode 4



(e) Mode 5



(a) Mode 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

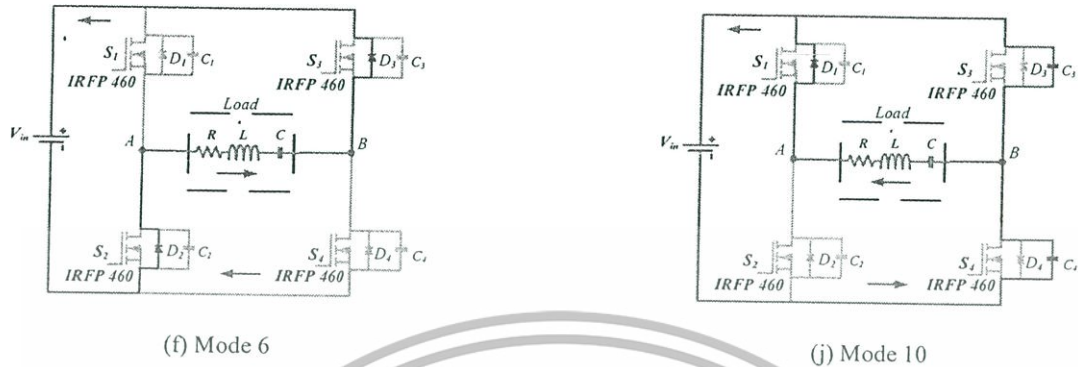
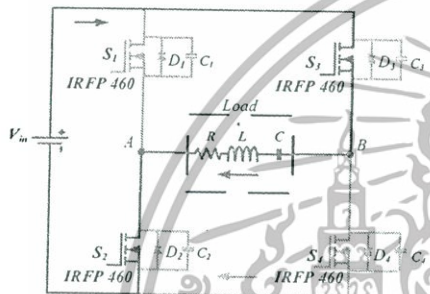
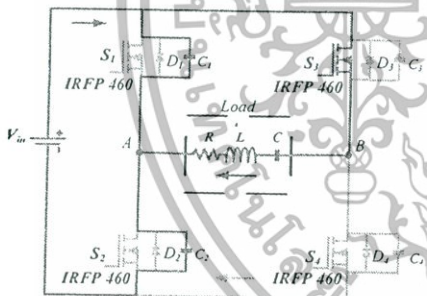


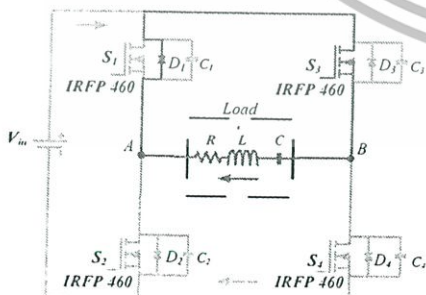
Fig. 3. The operation modes of proposed circuit.



(g) Mode 7



(h) Mode 8



(i) Mode 9

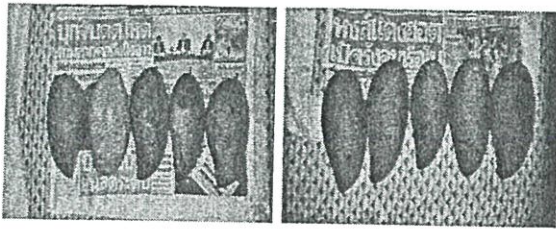
TABLE I  
PARAMETERS OF PROPOSED CIRCUIT

DC input voltage ( $V_{in}$ )	310 V
Leakage inductance ( $L_k$ )	19.28 $\mu$ H
Resonant inductance ( $L_r$ )	2.26 mH
Turn ratio of high frequency transformer ( $n$ )	1:6
Equivalent resistance ( $R_{eq}$ )	2221 $\Omega$
Resonant capacitance ( $C_r$ )	121.9 nF
Switching frequency ( $f_s$ )	24 - 28 kHz

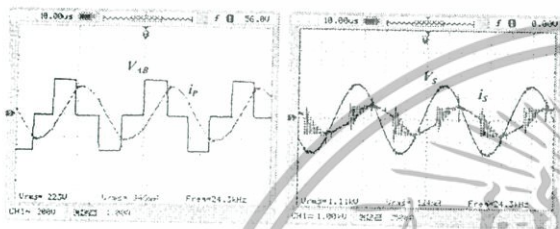
IV. EXPERIMENTAL RESULTS

In order to confirm the proposed principle, the inverter was designed, built and test for prolonging mangoes life by using the parameters as shown in TABLE I at different frequencies and concentrations. The results were compared with mangoes which do not incubate. From the test, the 250 mg/hr of ozone concentration can extend the life of mangoes more than other concentrations. Fig. 4 shows the physical feature of the test samples after 5 days in case of keeping at 250 mg/hr of ozone concentrations and without the ozone gas, respectively. It is found that the first case can prolong mangoes life more than the other case around 6 days. Figs. 5 - 7 illustrate the output voltage and current waveforms of inverter and the output voltage and current at the secondary side of high frequency transformer at 24, 25 and 26 kHz of switching frequency, respectively. In addition, Fig. 8 shows the relationship between the ozone concentration and operating frequency to illustrate that if the operating frequency is increased, then the ozone concentration will be increased as well. Fig. 9 shows the ZVS operation of switches S2 and S4, respectively. Moreover, the ZVS condition also occurs for switches S3 and S4 in circuit so that the switching losses is eliminated during turning on time of each switch which leads to increase the maximum efficiency to 93.1% at 71 W of rated power as shown in Fig. 10.

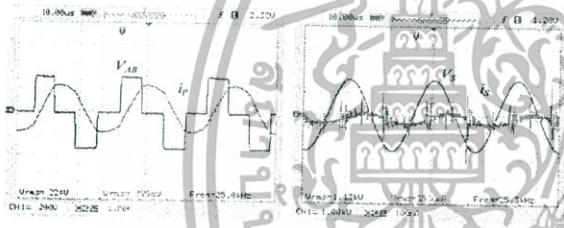
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



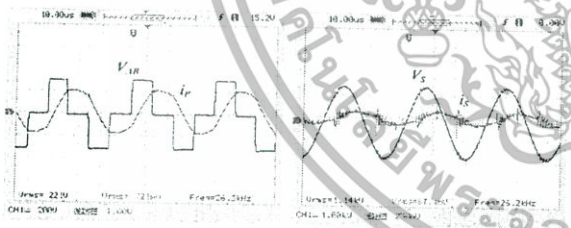
(a) keeping without ozone gas (b) keeping at 250 mg/hr of  $O_3$   
 Fig. 4. The physical feature of the test samples after 5 days.



(a) at primary side (b) at secondary side  
 Fig. 5. Voltage and current of inverter at 24 kHz.



(a) at primary side (b) at secondary side  
 Fig. 6. Voltage and current of inverter at 25 kHz.



(a) at primary side (b) at secondary side  
 Fig. 7. Voltage and current of inverter at 26 kHz.

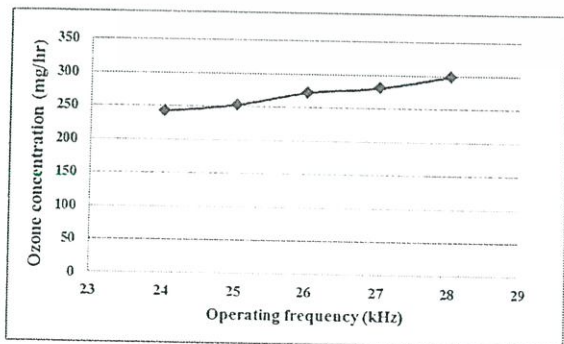


Fig. 8. Ozone concentration vs. Operating frequency.

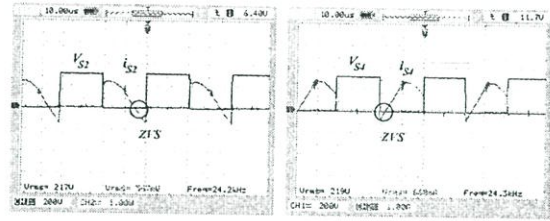


Fig. 9. Voltage and current of  $S_2$  and  $S_4$ .

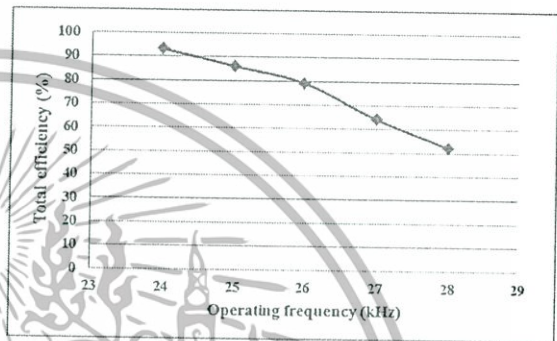


Fig. 10. Total efficiency vs. Operating frequency.

V. CONCLUSION

This research paper presents the ozone generator by using a full-bridge PSPWM inverter for prolonging mangoes life. From the test in laboratory, this technique can extend the life of mangoes by doing reaction with the skin of mangoes in order to reduce the ethylene gas from the fruits. Therefore, the life of mangoes is extended. This research illustrates that the power electronics technology can be applied in keeping agricultural productivity efficiently.

VI. REFERENCE

- [1] Amjad, M.; Salam, Z.; Facta, M.; Mekhilef, S. "Analysis and Implementation of Transformerless LCL Resonant Power Supply for Ozone Generation", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, On page(s): 650 - 660 Volume: 28, Issue: 2, Feb. 2013
- [2] V. Kinnares and P. Hothongkham, "Circuit analysis and modeling of a phase-shifted pulse width modulation full-bridge-inverter-fed ozone generator with constant applied electrode voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 7, pp. 1739-1752, Jul. 2010.
- [3] J. M. Alonso, J. Cardesin, E. L. Corominas, M. Rico-Secedes, and J. Garcia, "Low-power high-voltage high-frequency power supply for ozone generation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 2, pp. 414-421, Mar./Apr.2004.
- [4] P. Hothongkham and V. Kinnares, "High-voltage high-frequency power supply using phase shift PWM full bridge inverter fed ozone generator," presented at the IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE), Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea, Jul. 5-8, 2009.
- [5] K. Oleg, S. Wang, Y. Konishi, and M. Nakaoka, "A novel pulse density modulated high-frequency inverter for silent discharge-type ozonizer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 2, pp. 369-378, Mar./Apr.2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หนังสือรับรองการใช้ประโยชน์ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์จากหน่วยงานภายนอก  
ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) จิตัญ บิรมลิ่งม  
 ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ๑ ศส.ลค.๕ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม  
 ชื่อหน่วยงาน ที่ทำการวิจัย ปศุ ๑  
 สถานที่ตั้ง ๙๙๑ ๓. ลค.ลค.๕  
 เบอร์ติดต่อ ๐๘๑-๑๙๙๒๑๗๓  
 ขอรับรองว่าได้นำผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์/งานวิชาการ เรื่อง การใช้ไอโซนอไซด์  
ควบคุม เก็บรักษา ผลผลิต มวลชีวภาพจากวงจรอุทกวิทยาของ ความชื้น  
 ซึ่งเป็นผลงานของ (อาจารย์/ผศ./รศ.) ดร. อรุณรัตน์ งามสิทธิ์  
 สังกัดสาขา วิชาสัตวศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มาใช้ประโยชน์ในองค์กร/หน่วยงาน/กลุ่มของ  
 ข้าพเจ้า ทางด้านต่อไปนี้ (โปรดเลือกรูปแบบการนำไปใช้ประโยชน์และสามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)  
 การใช้ประโยชน์เชิงวิชาการ ระบุ.....  
 โดยเริ่มนำมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 ถึงวันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 การใช้ประโยชน์ในเชิงสาธารณะ ระบุ ยื่นขอสิทธิบัตรเพื่อใช้รักษา มะม่วง  
 โดยเริ่มนำมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่วันที่ 1 เดือน เมษายน พ.ศ. 2558  
 ถึงวันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558  
 การใช้ประโยชน์ในเชิงนโยบาย ระบุ.....  
 โดยเริ่มนำมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 ถึงวันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ระบุ.....  
 โดยเริ่มนำมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 ถึงวันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....  
 ทั้งนี้ ผลจากการที่องค์กร/หน่วยงาน/กลุ่ม ได้นำผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์/งานวิชาการ  
 ดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในองค์กร/หน่วยงาน/กลุ่ม พอสรุปได้คือ สิ้นมาขอ  
ใช้ ไอโซนอไซด์ ควบคุม เก็บรักษา ผลผลิต มวลชีวภาพ ได้จริง  
 ข้าพเจ้าขอลงนามในหนังสือรับรองการนำไปใช้ประโยชน์ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ของ  
 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อเป็นหลักฐานการนำ  
 ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ มาใช้ประโยชน์ดังกล่าว

ลงลายมือชื่อ จิตัญ บิรมลิ่งม  
 (นางจิตัญ บิรมลิ่งม)  
 ตำแหน่ง ผศ. ๑ ศส.ลค.๕  
 วันที่ 18 / ๕ / ๕8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ใบแนบหลักฐานการใช้ประโยชน์ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์จากหน่วยงานภายนอก  
ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

หลักฐานที่แนบมาพร้อมนี้ เพื่อเป็นการยืนยันการนำผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ไปใช้ประโยชน์  
(สามารถเลือกได้มากกว่า 1 ข้อ)

- (✓) ภาพถ่ายกิจกรรม/โครงการ/ผลงานที่ได้พัฒนาจากผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์
- ( ) เอกสารที่แสดงให้เห็นว่ามีการใช้ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ไปปรับปรุงหรือพัฒนา
- ( ) ผลงาน ผลิตภัณฑ์ หรือรางวัลที่เกิดขึ้น อันมีผลจากการใช้ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์  
ไปปรับปรุงหรือพัฒนา
- ( ) ผลประกอบการขององค์กร/หน่วยงาน/กลุ่ม ด้านบัญชี หรือรายได้ที่แสดงให้เห็นว่าเพิ่มขึ้นจากการได้พัฒนาจากผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์
- ( ) ผลงานหรือหลักฐานอื่น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาพการใช้ผลงานวิจัยสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วง



รูปที่ 1 สวนมะม่วงที่ได้นำผลงานวิจัยไปใช้งานจริง  
ณ หมู่ 9 ต.สระสี่มุม อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม



(ก) มะม่วงที่ไม่ได้รับการบ่มโอโซน

(ข) มะม่วงที่ได้รับการบ่มโอโซน

รูปที่ 2 กลุ่มตัวอย่างของมะม่วงที่ได้รับการบ่มโอโซนเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างที่เก็บในอากาศตามธรรมชาติหลังจากผ่านระยะเวลาเก็บรักษา 5 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้