

ศึกษาเวลาของอากาศที่ไหลผ่านช่องอากาศของแท่งอิเล็กโทรดสำหรับ
เครื่องผลิตโอโซน

THE STUDY OF ACTIVE TIME OF AIR FLOW BETWEEN ELECTRODE GAP
ON THE OZONE GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMUTL-2009-EN-M-020-170

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ศึกษาเวลาของอากาศที่ไหลผ่านช่องอากาศของแท่งอิเล็กโทรดสำหรับ
เครื่องผลิตโอโซน

THE STUDY OF ACTIVE TIME OF AIR FLOW BETWEEN ELECTRODE GAP
ON THE OZONE GENERATOR



T105462

จตุพงษ์ ดารารัตน์

JATUPONG DARARASH

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...105462
วัน,เดือน,ปี... 24 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-020-170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY OF ACTIVE TIME OF AIR FLOW BETWEEN ELECTRODE GAP
ON THE OZONE GENERATOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2009
KMITL-2009-EN-M-020-170**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

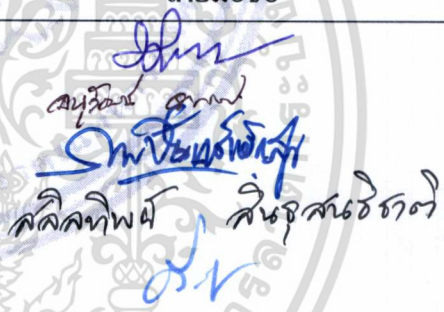
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ศึกษาเวลาของอากาศที่ไหลผ่านช่องอากาศของแท่งอิเล็กโทรดสำหรับเครื่องผลิตโอโซน
Thesis Title The Study of Active Time of Air Flow Between Electrode Gap on the Ozone Generator
นักศึกษา นายจตุพงษ์ คารารัตน์
รหัสประจำตัว 47060257
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-170

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิจิตร	กิตเรศ	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ.ดร.สถิตทิพย์	สินธุสนธิชาติ	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ศึกษาเวลาของอากาศที่ไหลผ่านช่องแคบของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องผลิตไอโซน
นักศึกษา	นายจตุพงษ์ คารารัตน์
รหัสนักศึกษา	47060257
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการหาเวลาของอากาศที่ไหลผ่านแคบอากาศของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไอโซน แบบโคโรน่าคิสซาร์จ แรงดันสูงความถี่สูง โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ตามลำดับ ส่วนช่องแคบอากาศของแท่งอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าเท่ากับ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ทำการทดสอบโดยการปรับอัตราการใช้ของอากาศเพื่อหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างแคบที่เกิดโคโรน่า เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของการเกิดแตกตัวของอากาศที่ทำให้เกิดก๊าซไอโซนที่สูงสุดสำหรับชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนวงจรไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายในการผลิตก๊าซไอโซนเป็นแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันหม้อแปลง 5 kVp ความถี่ 25 kHz มีการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม แมทแลป/ซิมูลิงค์ เพื่อเปรียบเทียบและให้ผลที่สอดคล้องกัน ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาการสร้างก๊าซไอโซนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ตลอดจนสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่าย

Thesis Title The Study of Active of Air Flow Between Electrode Gap on the Ozone Generator
Student Mr. Jatupong Dararash
Student ID 47060257
Degree Master of Engineering
Program Electrical Engineering
Year 2009
Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This thesis presents the active time of air flow in the electrode tubes to generator ozone using the discharge corona with high voltage = high frequency operating condition. The electrode length is designed at 30 cm, 60 cm and 90 cm, while the gap are 0.1 cm, 0.25 cm and 0.4 cm respectively. The adjustable of air flow rate between the corona gap to analyze the proper ion of the air to product the peak ozone generation. The full bridge converter is designed as the power supply unit with 5 kVp 25 kHz. The simulaed result using MATLAB/SIMULINK are compared with the mesument results with a good argument. The research work can be developed the new ozone generating prototype with high performed and reasonable cost.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดปริมาณไอโซนตลอดจนสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวัด

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย EMC และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือสถานที่ ที่จำเป็นต้องใช้ในการงานวิจัยนี้และขอบคุณพี่น้องห้องปฏิบัติการทุกคน

ขอขอบคุณบริษัท พี.เอส.ซี เทคคิงแอนคิวิตีเวลลือปเมนต์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ ที่จำเป็นต้องใช้ในการงานวิจัยนี้และขอบคุณพี่น้องภายในบริษัททุกคน

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณคุณแม่ที่ๆเพื่อนๆน้องๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จ

สำหรับความความดีอันได้ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จตุพงษ์ คารารัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ก๊าซไอโซน.....	6
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	7
2.2.2 ความเป็นพิษของก๊าซไอโซน.....	7
2.2.3 การออกซิเดชันของก๊าซไอโซน.....	9
2.2.4 ระบบบำบัดข้างต้นของก๊าซไอโซน.....	10
2.2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ไอโซนกับคลอรีน.....	10
2.3 กระบวนการแตกตัวของก๊าซและการสร้างก๊าซไอโซน.....	12
2.3.1 สนามไฟฟ้า.....	14
2.3.2 ลักษณะสนามไฟฟ้า.....	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ปิจจัยที่มีผลต่อแรงดันเบรคดาวน์.....	18
2.3.4 วิธีการสร้างโอโซน.....	18
2.3.5 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ.....	19
2.3.6 อิเล็กโทรตรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	20
2.3.7 อิเล็กโทรตรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	20
2.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	22
2.5 ฟูลบริคจ์คอนเวอร์เตอร์.....	27
2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีคดับลิวเอ็มฟูลบริคจ์ คอนเวอร์เตอร์.....	29
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	30
3.1 บทนำ.....	31
3.2 อิเล็กโทรตรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	31
3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	43
3.4 การออกแบบฟูลบริคจ์คอนเวอร์เตอร์.....	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	49
4.1 บทนำ.....	49
4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	49
4.3 การจำลองการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	119
4.4 การเก็บผลก๊าซ โอ โซน โดยการทดลองทางเคมี.....	124
4.5 การคำนวณหาค่าเวลาที่ไหลผ่านแกปอากาศ.....	124
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	135
5.1 บทนำ.....	135
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	133
5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี.....	143
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	144
เอกสารอ้างอิง.....	148

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	150
ภาคผนวก ก.	151
ภาคผนวก ข.	162
ประวัติผู้เขียน.....	168



สารบัญตาราง

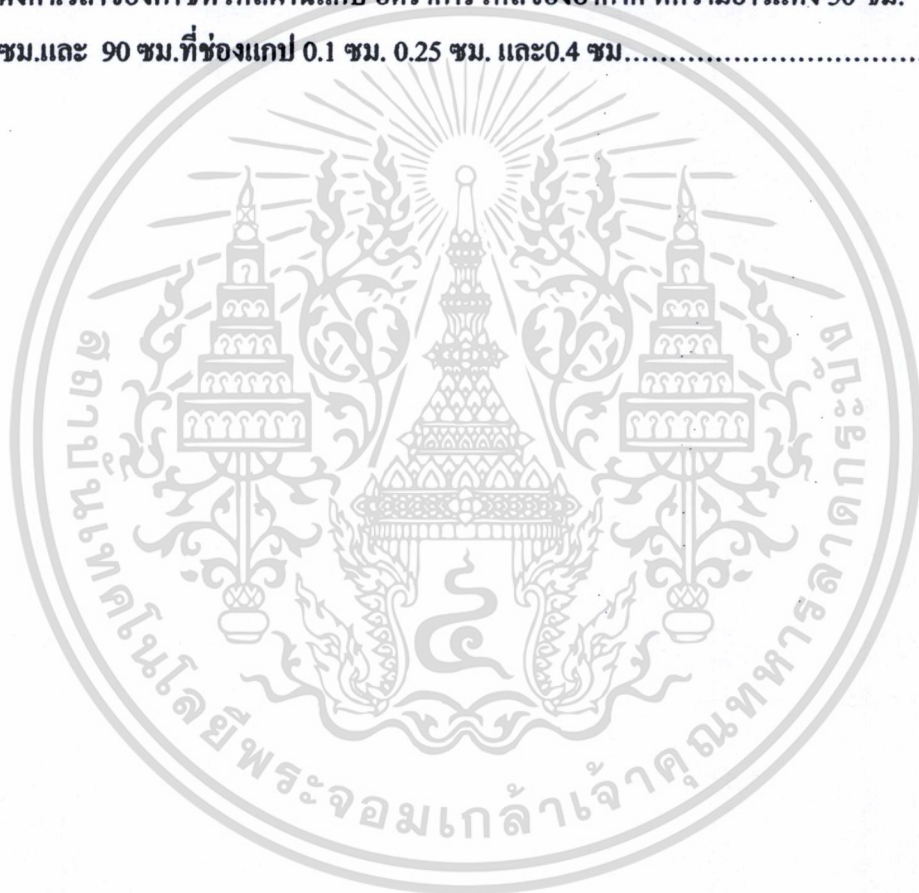
ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิจัย.....	3
2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซน.....	7
2.2 ระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA : International Ozone Association).....	8
2.3 ความสามารถในการฆ่าเชื้อ (99%) ที่เป็นอันตรายของสารประกอบคลอรีนเทียบกับ โอโซน.....	9
2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน.....	11
3.2 รายละเอียดของแท่งอิเล็กโทรด.....	32
3.3 แสดงค่าของปริมาตรและย่านพลังงานที่ความยาวของแท่งอิเล็กโทรด และช่องแก๊บที่ขนาดต่างๆ.....	36
4.1 แสดงรายละเอียดค่าที่ต้องการวัด.....	50
4.2 แสดงข้อกำหนดและเงื่อนไขในการทดสอบ.....	50
4.3 แสดงรายละเอียดการเก็บค่าการทดลอง.....	51
4.4 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและ กระแสทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม.....	74
4.5 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและ กระแสทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 60 ซม.....	96
4.6 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและ กระแสทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม.....	117
4.7 แสดงค่าปริมาตรช่องแก๊บอากาศของแท่งอิเล็กโทรดที่แก๊บ.....	125
4.8 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม.แก๊บอากาศ 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊บ.....	126
4.9 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม.แก๊บอากาศ 0.25 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊บ.....	126
4.10 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม.แก๊บอากาศ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊บ.....	127

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบ.....	129
4.12 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.25 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบ.....	129
4.13 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ.....	130
4.14 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ.....	132
4.15 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.25 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ.....	132
4.16 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ.....	133
5.1 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบ ปริมาณ โอโซนเทียบกับกระแสด้าน อินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	137
5.2 แสดงค่าแรงดัน ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลัง ไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของ คอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม.....	137
5.3 แสดงค่าแรงดัน ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลัง ไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของ คอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม.....	139
5.4 แสดงค่าแรงดัน ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลัง ไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของ คอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.....	140
5.5 แสดงประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. 60 ซม และ 90 ซม.....	142
5.6 ตารางแสดงปริมาณ โอโซนที่ความยาวและช่องแกบในช่วงต่างๆ.....	143

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.1 แสดงปริมาณ โอโซนสูงสุดของแต่ละความยาวแท่งอิเล็กโตรดที่แกป 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ.....	145
6.2 แสดงอัตราการไหลของอากาศเทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกปอากาศที่ทำให้ อัตราการเกิด โอโซนสูงสุดที่แท่งยาว 30 ซม.60 ซม.และ 90 ซม. ช่องแกป 0.1 ซม.....	146
6.3 แสดงค่าเวลาของก๊าซที่ไหลผ่านแกป อัตราการไหลของอากาศ ที่ความยาวแท่ง 30 ซม. 60 ซม.และ 90 ซม.ที่ช่องแกป 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ0.4 ซม.....	146



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	4
2.1 การทำงานของไอโซนในการออกซิไดซ์ (Oxidation) สารปนเปื้อน2.2 กระบวนการเกิดก๊าซไอโซน.....	9
2.2 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน.....	12
2.3 แสดงกลไกการผลิต ไอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry 2.5 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	14
2.4 คุณสมบัติสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโตรดต่างกัน.....	15
2.5 รูปทรงของอิเล็กโตรด.....	15
2.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V_p และ E_n ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่.....	17
2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ2.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของ แหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิทช์โหมคคอนเวอร์เตอร์.....	20
2.8 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	21
2.9 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือน ในชุดอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	22
2.11 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด.....	23
2.12 รูปความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
2.13 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิทช์โหมคคอนเวอร์เตอร์.....	27
2.14 วงจรที่คัปปลิงเต็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	28
2.15 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	29
3.1 โครงสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	30
3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันรวม 2 ชั้น.....	31
3.3 แท่งอิเล็กโตรดที่มีความยาว 30 ซม. 60 ซม.และ 90 ซม.....	32
3.4 แท่งแก้วที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.41 ซม. 0.38 ซม.และ 0.35 ซม.....	33
3.5 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80.....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 มอสเฟสเบอร์ IRFP460 ต่อคร่อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 5 nF.....	46
3.6 วงจรสร้างสัญญาณ PWM.....	37
3.7 วงจรแยกกราวด์.....	38
4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซ โอ โชนและตำแหน่งของการวัดค่าทางไฟฟ้า.....	50
4.2 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ 110 V 50 Hz ขณะไม่มีโหลด.....	52
4.3 สัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz ขณะไม่มีโหลด.....	52
4.4 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 25 kHz ขณะไม่มีโหลด.....	53
4.5 แรงดันเอาต์พุตที่พหุห้อมแปลงที่ความถี่ 25 kHz ขณะไม่มีโหลด.....	53
4.6 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	54
4.7 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	55
4.8 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	55
4.9 แรงดันและกระแสเอาต์พุตพหุห้อมแปลง.....	56
4.10 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	56
4.11 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	57
4.12 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	57
4.13 แรงดันและกระแสเอาต์พุตพหุห้อมแปลง.....	58
4.14 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	58
4.15 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	59
4.16 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	59
4.17 แรงดันและกระแสเอาต์พุตพหุห้อมแปลง.....	60
4.18 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	60
4.19 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	61
4.20 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	61
4.21 แรงดันและกระแสเอาต์พุตพหุห้อมแปลง.....	62

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	62
4.23 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	63
4.24 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	63
4.25 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	64
4.26 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	64
4.27 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	65
4.28 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	65
4.29 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	66
4.30 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	66
4.31 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	67
4.32 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	67
4.33 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	68
4.34 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	68
4.35 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	69
4.36 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	69
4.37 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	70
4.38 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	70
4.39 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	71
4.40 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	71
4.41 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	72
4.42 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	72
4.43 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	73
4.44 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	73
4.45 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุทและเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์เทียบกับ อัตราการใช้ของอากาศที่ความยาวแท่ง 30 ซม.....	75
4.47 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	76
4.48 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	76
4.49 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	77
4.50 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	77
4.51 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	78
4.52 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	78
4.53 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	79
4.54 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	79
4.55 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	80
4.56 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	80
4.57 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	81
4.58 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	81
4.59 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	82
4.60 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	82
4.61 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	83
4.62 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	83
4.63 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	84
4.64 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	84
4.65 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	85
4.66 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	85
4.67 สัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.68 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	86
4.69 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	87
4.70 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	87
4.71 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	88
4.72 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	88
4.73 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	89
4.74 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	89
4.75 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	90
4.76 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	90
4.77 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	91
4.78 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	91
4.79 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	92
4.80 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	92
4.81 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	93
4.82 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	93
4.83 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	94
4.84 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	94
4.85 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	95
4.86 แรงดันและกระแสเอาต์พุทหม้อแปลง.....	95
4.87 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุทและเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์เทียบกับ อัตราการใช้ของอากาศ.....	96
4.88 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	97
4.89 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์.....	98
4.90 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์.....	98

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.91 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	99
4.92 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	99
4.93 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	100
4.94 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	100
4.95 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	101
4.96 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	101
4.97 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	102
4.98 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	102
4.99 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	103
4.100 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	103
4.101 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	104
4.102 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	104
4.101 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	105
4.103 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	105
4.104 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	106
4.105 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	106
4.106 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	107
4.107 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	107
4.108 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	108
4.109 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	108
4.110 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	109
4.111 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	109
4.112 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	110
4.113 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	110

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.114 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	111
4.115 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	111
4.116 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	112
4.117 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	112
4.118 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	113
4.119 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	113
4.120 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	114
4.121 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	114
4.122 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	115
4.123 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz.....	115
4.124 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์.....	116
4.125 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์.....	116
4.126 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง.....	117
4.127 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ เทียบกับอัตราการใช้ของอากาศ.....	118
4.128 วงจรจำลองการทำงานของฮาร์ดแวร์รีดักคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ โปรแกรมMatLAB, Simulink.....	119
4.129 (ก)และ(ข) สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสจากการจำลอง.....	119
4.130 (ก) กระแส (ข) แรงดันเอาต์พุตของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง.....	120
4.131 (ก) กระแส (ข) แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงจากการจำลอง.....	120
4.132 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการวัดทางไฟฟ้า.....	121
4.133 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการวัดทางไฟฟ้า.....	122
4.134 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการวัดทางไฟฟ้า.....	123

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.135 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกปอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ.....	127
4.136 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกปอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.เทียบกับเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแกป.....	128
4.137 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกปอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ.....	130
4.135 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกปอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.เทียบกับเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแกป.....	131
4.136 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกปอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ.....	135
4.137 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกปอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.เทียบกับเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแกป.....	134
5.1 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้ เครื่องวัด Power Meter YOKOGAWA รุ่น WT200.....	135
5.2 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์.....	136
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตคอนเวอร์เตอร์กับ เวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกปของแท่งอิเล็กโตรดยาว 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม.....	136
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกปของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม.....	138
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกปของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม.....	139
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกปของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.....	141

รอยต่อ (Junction) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำอุปกรณ์สวิตช์เป็นผลให้อุปกรณ์สวิตช์ไม่สามารถหยุดนำกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทน ในขณะที่วิธีการขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟสมีวงรอบการคืนพลังงานแต่ละครั้งคาบเวลาอยู่จึงสามารถตัดการส่งผ่านพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ ในขณะที่เดียวกันสามารถที่จะนำข้อดีของวิธีการควบคุมสัญญาณของรีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอเพราะสามารถลดกำลังสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ได้โดยการกำหนดความถี่สวิตช์ซึ่งให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานที่แรงดันและกระแสเป็นศูนย์ ผลคูณของกำลังงานสูญเสียจึงเท่ากับศูนย์[9]

เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator) ขนาดใหญ่ส่วนมากใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบที่ดับบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์ (PWM Converter) สร้างสนามไฟฟ้าเอซี ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีตัวนำ 2 ตัว โดยมีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสามารถมองเป็นโหลดตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าได้ คอนเวอร์เตอร์แบบนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมความถี่ทางด้านเอาต์พุตได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมระดับปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนได้เช่นกัน แต่ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ทำได้ยากและมีกำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์เพิ่มขึ้นอีกทั้งประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซโอโซนนั้นยังไม่สูงสุด ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งคือการเลือกอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อที่จะสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้สูงสุดแต่เมื่อแท่งอิเล็กโทรดมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศก็ต้องการเปลี่ยนตามไปด้วยเพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้จะสนใจเรื่องของความเร็วของอากาศที่ผ่านแท่งเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้สูงสุดและสามารถที่จะลดขนาดของเครื่องผลิตโอโซนให้มีขนาดเล็กลง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่ดับบลิวเอ็มแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สร้างสนามไฟฟ้าเอซีป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งวงจรสามารถจ่ายกำลังงานได้สูงกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบที่ดับบลิวเอ็มฮาร์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรจะมีขนาดเล็กกว่าและหาความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านแท่งอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับความยาวของแท่งอิเล็กโทรดในการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนให้เหมาะกับการใช้งานมากที่สุดเพื่อลดต้นทุนและเครื่องผลิตก๊าซโอโซนสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการทํางานวิเคราะห์ ออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่ดับบลิวเอ็มแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) และหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแท่งอิเล็กโทรดให้เหมาะสม เพื่อสะดวกในการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนให้มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซโอโซนเหมาะกับงานที่ใช้และมีขนาดเล็กลง โดยคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้จะสามารถจ่ายกำลังงานได้มากกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบที่ดับบลิวเอ็มฮาร์ฟบริดจ์คอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวอร์เตอร์ ซึ่งข้อที่คิดวาก็คือ ขนาดของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนนั้นจะมีขนาดเล็กลงแต่ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซไอโซนนั้นสามารถผลิตก๊าซไอโซนได้สูงกว่าและช่วยในการลดต้นทุนของผู้ผลิตสูงกว่าและช่วยในการลดต้นทุนของผู้ผลิต

1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา เอกสาร บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้างก๊าซไอโซนและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีคดับลิวเอ็มแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter)

1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

1.3.3 ทดสอบวงจรในส่วนต่างๆและนำมาทดลองเพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย

1.3.4 สร้างชุดแท่งอิเล็กโตรดที่มีความยาวและแกปอากาศที่ต่างกัน

1.3.5 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า

1.3.6 เก็บผลการทดลองทางเคมีที่สอดคล้องกับการเก็บผลทางไฟฟ้า

1.3.7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.8 เขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 สร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีคดับลิวเอ็มแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter)

1.4.2 สร้างชุดแท่งอิเล็กโตรดที่มีความยาว 30 ซม. และ 60 ซม. และ 90 ซม. และแกปอากาศต่างกันว่า 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.

1.4.3 วิเคราะห์หาความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านแกปของแท่งอิเล็กโตรดที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไอโซน

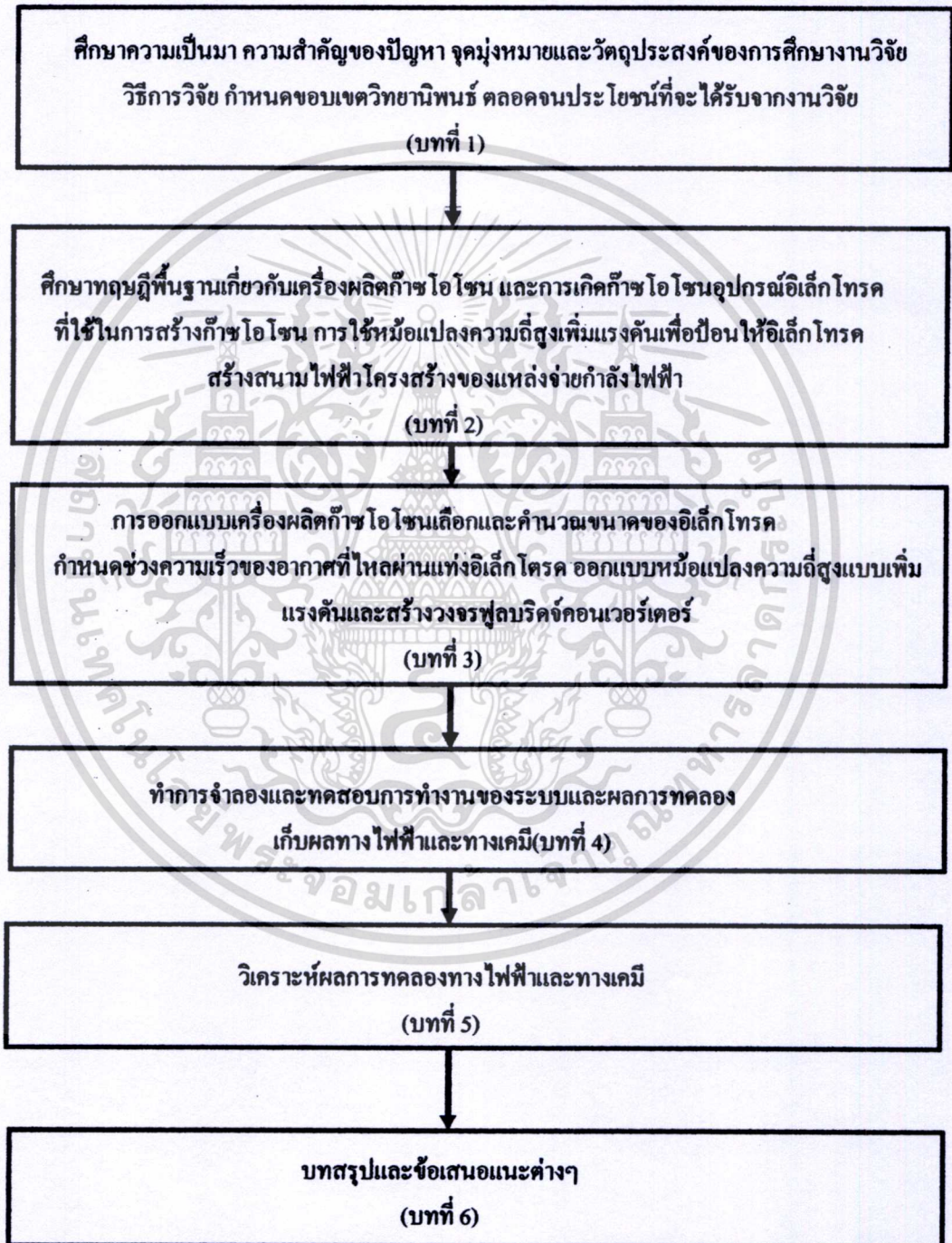
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิจัย

รายการ		ข้อกำหนด
พิกัดแรงดันด้านเข้า	ใช้ Variable	220 Vac 50 Hz
พิกัดคอนเวอร์เตอร์	ตัวสวิทช์	มอสเฟส IRFP460
	ความถี่ในการสวิทช์	25 kHz
	แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	150 Vdc
	แรงดันไฟฟ้าด้านออก	150 Vp
	กำลังไฟฟ้าสูงสุด	400 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างวงจรพูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซนรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 5 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.6.1 สามารถนำวงจรพีคดับลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มาเป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.6.2 สามารถทราบถึงเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแปกอากาศของชุดแท่งอิเล็กโตรดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโอโซนเพื่อนำไปออกแบบอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสม

1.6.4 สามารถเลือกอัตราการไหลของอากาศให้เหมาะสมกับแท่งอิเล็กโตรด

1.6.5 สามารถออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนให้เหมาะสมและสามารถรองรับกับงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6.5 สามารถลดขนาดและต้นทุนของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

2.1 บทนำ

โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้นทางการค้าและอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของโอโซนที่สามารถแก้ปัญหาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านมลภาวะ แวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประโยชน์ของโอโซนที่รู้จักกันแล้ว โอโซนยังมีโทษรุนแรงด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรู้ความเข้าใจและการนำไปใช้งาน การออกแบบเครื่องผลิตโอโซนจำเป็นต้องรู้ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกตัวของก๊าซในสนามไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสามารถออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างปรากฏการณ์การแตกตัวของอากาศภายในเก็บอากาศที่ออกแบบได้ ดังนั้นจึงต้องมีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบพื้นฐานของระบบรวมทั้งการทำงาน และการออกแบบซึ่งจะนำเสนอในบทนี้เช่นกัน โดยทั่วไปเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบ คือ การใช้งานในบริเวณที่มีผู้คนอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซไม่ให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณก๊าซโอโซนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

2.2 ก๊าซโอโซน

โอโซน (Ozone: O_3) เป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักและสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าสารเคมีอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่แบบเดียวกัน คือ เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidize) นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่อื่น ๆ ได้อย่างดีซึ่งจะกล่าวต่อไป ในบทนี้จะเป็นการแนะนำให้รู้จักโอโซนโดยกล่าวถึงคุณสมบัติ หน้าที่ ข้อดี ข้อเสีย และ วิธีการผลิต โอโซน เป็นก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจนจับตัวกัน 3 อะตอมในสภาวะกึ่งเสถียร (Meta-stable state) จากข้อมูลในเฉพาะของโอโซนดังกล่าวใน [15] ได้ระบุข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ของ โอโซนแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซนจาก [15]

Section	Detail	
1. Product Identification	Product Name	OZONE
	Synonyms	Activated Oxygen , Triatomic Oxygen
	Chemical Family	Oxidizer
	Molecular Formula	O ₃
	Molecular Weight	48
2. Hazardous Ingredients	Component	Ozone Gas
	Concentration	0-4 % by weight
3. Health Hazard Data	Permissible Exposure	0.1 ppm. (in Air)
	Symptoms	Irritation for sensitive tissues as eyes, nose and throat. Pungent smell, notice at 0.04 ppm. High concentration of OZONE destroyed lung.
	Toxicological Property	High concentration of OZONE endanger human respiratory organs. Effect on chromosomes structure. Destroyed the exposed tissues.

2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี [4]

สารเป้าหมายในการทำปฏิกิริยาของโอโซนแบ่งเป็นหมวดหมู่ดังนี้

- 1) สารอินทรีย์ เช่น ไอออนโลหะหนักพวก เหล็ก, แมงกานีส และ สารประกอบคลอรีน (THM: Trihalomethane) เป็นต้น
- 2) สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น สิ่งปนเปื้อนขนาดเล็ก (micro pollutant) ต่าง ๆ เช่น สารไฮโดรคาร์บอน, สารประกอบอะโรมาติก, สารประกอบแอมโมเนีย และ ยาฆ่าแมลง
- 3) โครงสร้างเซลล์ในสิ่งมีชีวิตเช่น คาร์โบไฮเดรต, กรดอะมิโน และ กรดไขมัน เป็นต้น

2.2.2 ความเป็นพิษ [18]

โอโซนเป็นสารเคมีที่ไม่เคยตรวจพบในการใช้งานเลยว่าเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมา ในขณะที่สารผลิตภัณฑ์ของคลอรีนหลายชนิดเป็นพิษอย่างรุนแรง นอกจากนี้ โอโซนยังจัดว่าเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อและปลอดเชื้อที่สมบูรณ์แบบ จาก [17] แต่โดยคุณสมบัติตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันแล้ว โอโซนเป็นก๊าซพิษ ค่าศักย์ออกซิเดชันสูงถึง 2.07 V (สำหรับ คลอรีน 1.36 V) ดังนั้น ถ้าปราศจากความรู้และความเข้าใจ การใช้งานจึงมีอันตรายมาก จาก [19] ระบุระดับความเป็นพิษของโอโซนและผลที่เกิดขึ้นไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA : International Ozone Association)

Ozone Level (ppm. : part per million)	Effect
0.001-0.125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ ค่านี้แปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และ อุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรม และที่สาธารณะ
0.3	เริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิด การระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เกิดอาการปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย คิดเชื่อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอก และทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4-5.6	การทดสอบกับคนพบว่าใน 70 วินาที ใบแก้วเกิดอาการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่ง น่าจะเป็นขั้นสุดท้ายแล้ว

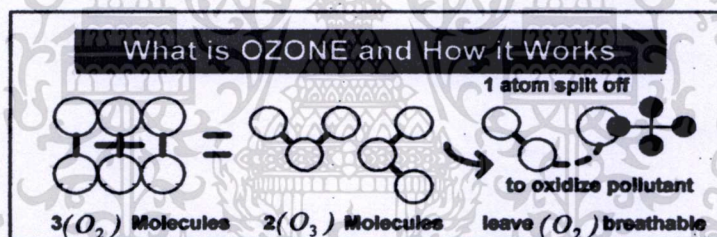
สารเคมีหลายชนิดมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค โดยเฉพาะสารประกอบคลอรีน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ โอโซนแล้วจะเห็นข้อแตกต่างทางความสามารถที่ชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการฆ่าเชื้อ (99%) ที่เป็นอันตรายของสารประกอบคลอรีนเทียบกับ โอโซน ที่ pH 6-7 จาก [4]

Microorganism	Disinfectant (mg * min/L)			
	Free Chlorine	Performed Chloramine	Chlorine Dioxide	Ozone
<i>E. Coli</i>	0.034-0.05	95-180	0.4-0.75	0.02
<i>Polio I</i>	1.1-2.5	770-3740	0.2-6.7	0.1-0.2
<i>Rotavirus</i>	0.01-0.05	3810-6480	0.2-2.1	0.006-0.06
<i>Phage f2</i>	0.08-0.18	-	-	-
<i>G. Lambia cysts</i>	47-150	-	-	0.5-0.6
<i>G. Muris cysts</i>	30-630	1400	7.2-18.5	1.8-2.0

2.2.3 ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) [4]

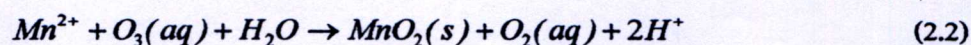
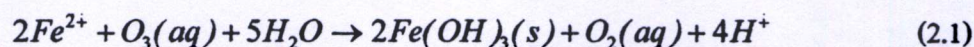
หน้าที่หลักที่สำคัญและเป็นลักษณะเด่นของ โอโซนคือทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตัวอย่างเช่น



รูปที่ 2.1 การทำงานของ โอโซนในการออกซิไดซ์ (Oxidation) สารปนเปื้อน

1) เหล็กและแมงกานีส

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือการทำให้ไอออนของเหล็กและแมงกานีสกลายเป็นของแข็งและตกตะกอน ดังแสดงในสมการที่ 2.1-2.2



ปริมาณโอโซนที่ใช้คือ 0.43 mgO₃/mgFe และ 0.88 mgO₃/mgMn แต่ ถ้าเป็นสารเคมีชนิดอื่น ๆ เช่นคลอรีน (ClO₂) ต้องใช้ 1.20 mg/mgFe และ 2.45 mg/mgMn เป็นต้น

2) กำจัดสี (Color abatement)

สีที่พบในน้ำแบ่งออกเป็น สีจริง (True color) กับสีปรากฏ (Apparent color) ซึ่งแล้วแต่สารประกอบที่ทำให้เกิดการกระเจิงของแสงออกมาสู่สายตามนุษย์ โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบเหล่านี้และกำจัดให้หมดไปได้

2.2.4 ระบบบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment process)

โอโซนอาจถูกใช้เป็นขั้นตอนย่อยก่อนการบำบัดน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดหลัก หรือ ลดความต้องการใช้สารเคมีต่าง ๆ ลง เช่น คลอรีน หรือเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกวนน้ำ แล้วตกตะกอนเป็นต้น โอโซนช่วยให้ค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในระบบบำบัดลดลงได้ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยใน [16], [20] เป็นต้น

2.2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

ตัวอย่างระบบบำบัดที่มีปัญหาจากสารเคมีที่ใช้ในปัจจุบันที่ชัดเจนคือ สระว่ายน้ำ เนื่องจากการสัมผัสโดยตรงของน้ำกับร่างกายของผู้ใช้บริการทำให้ความรุนแรงของการทำปฏิกิริยาของคลอรีนส่งผลกระทบต่อร่างกายของผู้ใช้สระโดยตรง โอโซนมีการทำปฏิกิริยาที่รุนแรงกว่าคลอรีน แต่มีช่วงเวลาสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาเนื่องจากโอโซนสามารถสลายตัวง่าย ดังนั้น ในต่างประเทศจึงมีการนำโอโซนมาใช้งานในสระว่ายน้ำอย่างกว้างขวางเนื่องจากไม่มีโทษต่อผู้ใช้และยังมีประโยชน์ต่อการรักษาโรคผิวหนังบางชนิดอีกด้วย แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ภายใต้การตรวจสอบและดูแลอย่างดี เนื่องจากในสระว่ายน้ำต้องไม่มีโอโซนหลงเหลืออยู่แล้วจาก [16], [20] นอกจากนี้อันตรายที่พบจากการใช้งานคลอรีนในระบบที่น้ำสัมผัสโดยตรงกับเนื้อเยื่อที่อ่อนบางของมนุษย์ โดยเฉพาะสาร ไครเคน (Chloroform) ซึ่งเป็นสารจำพวก THM: Trihalomethane ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นโทษต่อร่างกายมนุษย์ ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของโอโซนเมื่อเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับคลอรีน

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

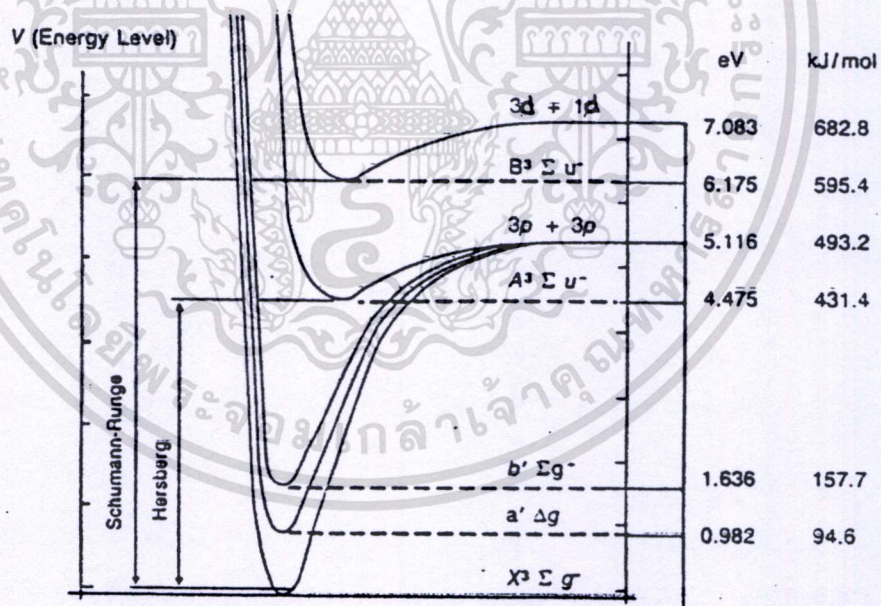
Chlorine	Ozone
1. มีความเป็นพิษสูง และเป็นก๊าซพิษ	1. ระดับความเป็นพิษอยู่ที่ 1 mg/l (ระบุโดย EPA สหรัฐอเมริกา) มีกลิ่นฉุน เริ่มสังเกตได้ที่ระดับ 0.01 mg/l ที่ระดับสูงกว่านี้มีการระคายเคืองสูงมาก
2. คลอรีนจะถูกเก็บที่ภาชนะบรรจุกความดันสูงและสามารถเป็นอันตรายได้เมื่อมีการรั่วไหลเกิดขึ้น	2. โอโซนต้องทำการผลิต ณ ตำแหน่งที่ใช้ งานไม่สามารถเก็บได้
3. คลอรีนเมื่อผสมกับยูรีนและเหงื่อจะทำให้เกิดสารประกอบโครเคน ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองตาและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	3. โอโซนมีวงชีวิตสั้น หลังทำปฏิกิริยาสลายตัวเป็นออกซิเจน
4. ราคาคลอรีนสูง	4. ราคาโอโซนต่ำลงเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีและการใช้พลังงานน้อยลงในการผลิตในปัจจุบัน
5. คลอรีนมีค่าความรุนแรงในการทำปฏิกิริยา (Oxidation potential) 1.36 V	5. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาสูงสุด เนื่องจากค่า Oxidation potential 2.07 V
6. คลอรีนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้	6. โอโซนที่ค่าความเข้มข้นเดียวกับคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่าคลอรีน 600-3000 เท่า
7. คลอรีนมีกลิ่นรุนแรงตกค้างหลังการบำบัด	7. โอโซนไม่มีกลิ่นตกค้าง แต่สามารถกำจัดกลิ่นของยูรีน, คาวิน, อาหาร และ สีได้
8. คลอรีนทำงานกับตะไคร่น้ำได้ผลดีมาก กำจัดตะไคร่น้ำได้ดี	8. โอโซนพบปัญหาการเติบโตของตะไคร่น้ำ ต้องใช้คลอรีนช่วยโดยการทำ Shock treatment
9. คลอรีนทำงานได้ดีต้องควบคุม pH ให้อยู่ในย่าน 7.0-7.4	9. โอโซนไม่ต้องมีการควบคุม pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการแตกตัวของก๊าซและการสร้างโอโซน

อากาศมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซไนโตรเจน (N_2) 79% และก๊าซออกซิเจน (O_2) 21% โดยประมาณนอกนั้นเป็นก๊าซเฉื่อยและไอน้ำ โอโซนเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอม จับตัวกันอยู่ในสถานะไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายขึ้นอยู่กับเงื่อนไขแวดล้อมและความหนาแน่นของปริมาณที่ผลิต ขั้นตอนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจน (free radical) จากโมเลกุลก๊าซออกซิเจนในอากาศ หลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน O_3 ซึ่งนำไปใช้ในระบบบำบัดทางอุตสาหกรรมต่อไป

กระบวนการเกิดโอโซนเกิดได้จากปรากฏการณ์ 2 ชนิดคือ กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ กระบวนการแตกตัว (Dissociation) จาก [8] และ [2] ในกระบวนการแตกตัวของก๊าซนั้น ไอออไนเซชันคือการเพิ่มของประจุแบบทวีคูณ (Electron avalanche) นำไปสู่การเบรกดาวน์ในฉนวนที่พิจารณา ทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งทะลุผ่านฉนวน สิ่งที่เกิดตามมาคือความร้อนเนื่องจากกระแสที่ไหลจากการเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้น ทำให้โอโซนซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำเกิดการสลายตัว ดังนั้นในการผลิตโอโซนจึงไม่ควรเกิดการเบรกดาวน์ขึ้น นั่นคือพลังงานที่อิเล็กตรอนรับจากสนามไฟฟ้าควรมีค่าน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (W) แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมออกซิเจนออกจากกัน



Source: Masschelein (1977).

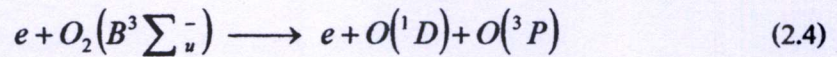
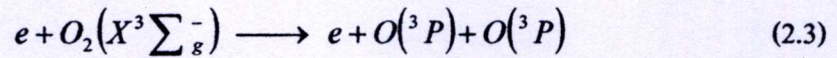
รูปที่ 2.2 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน

เมื่อพิจารณาจากระดับพลังงานของออกซิเจนในรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับซึ่งออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็นโอโซนได้มี 2 ระดับด้วยกันคือ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

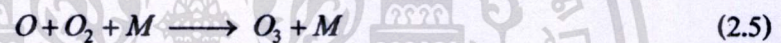
a) การแตกโครงสร้าง โมเลกุลก๊าซออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction)

ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานในงานวิจัยที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงเทียบกับระดับพลังงานของออกซิเจนแล้วแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4

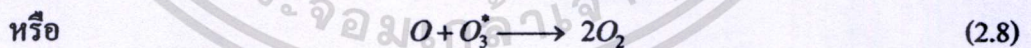


อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานมากกว่า พลังงานพันธะของโมเลกุลก๊าซจากรูปที่ 2.2 โดยประมาณ คืออยู่ในช่วง 6-9 eV หรือ 493.2 kJ/mol ถึงกว่า 700 kJ/mol

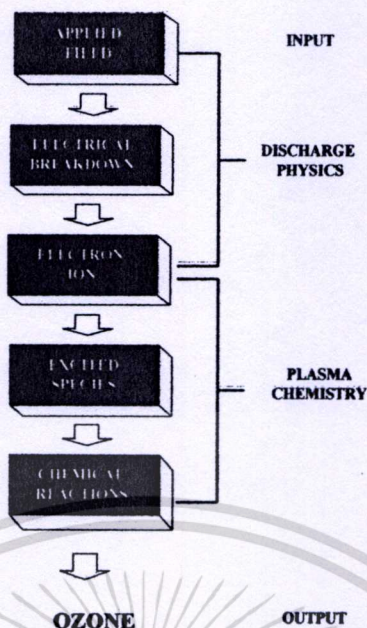
b) การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นโอโซน (Ozone Generation)



เมื่อ M คือ ก๊าซอื่นอาจเป็น O_2 หรือ N_2 ซึ่งเป็น 3rd Collision partner ช่วงเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยานี้อยู่ในย่าน 1-2 μs แต่ข้อควรระวังคือ ในช่วงเวลาสั้น ๆ นี้เองสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งเป็นผลเสียต่อกระบวนการผลิตด้วยเช่น



เมื่อ O_3^* คือ โอโซนที่สภาวะถูกกระตุ้นชั่วขณะ (Transient excited state) ซึ่งเป็นสภาวะเริ่มของการจับตัวระหว่าง O กับ O_2 จากสมการที่ 2.5 ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.6 และ 2.8 เกิดเนื่องจากความหนาแน่นของอะตอมออกซิเจนอิสระมากเกินไป



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการผลิตโอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry

2.3.1 สนามไฟฟ้า (Electric field)

สนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามแฟคเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างอิเล็กโทรดลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$\eta^* = \frac{E_{max}}{E_{av}} \tag{2.9}$$

เมื่อ E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด

E_{av} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นในแก๊สระหว่างอิเล็กโทรด

1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $\eta^* = 1$ นั่นคือกรณีที่ป้อนแรงดันให้ชุดอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบนี้ ถ้าค่า E_{max} ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับค่าความคงทนของฉนวนต่อสนามไฟฟ้า (E_0) จะเกิดเบรกดาวน์ทันที เนื่องจากสนามไฟฟ้าเฉลี่ย (E_{av}) ทุกจุดเท่ากัน

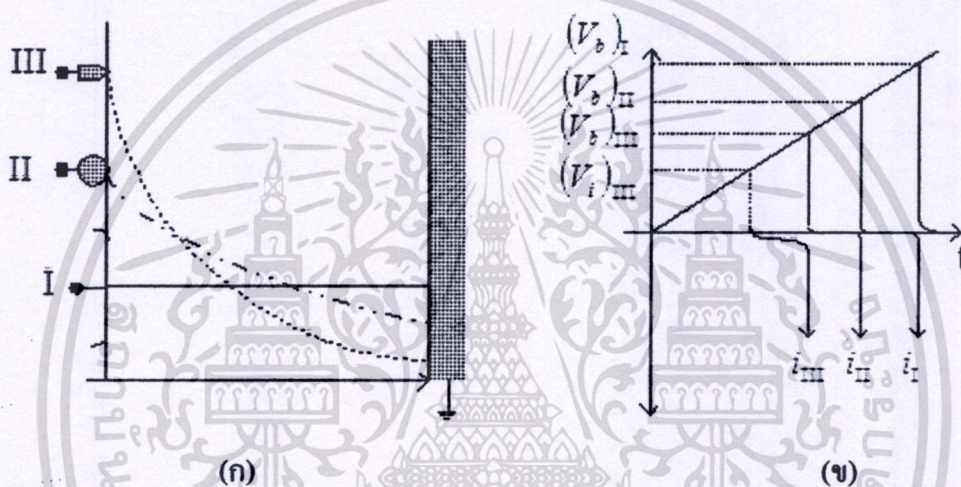
2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field)

- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $100\% < \eta^* \leq 40\%$ คุณสมบัติใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมาก

- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $\eta^* \leq 20\%$ คุณสมบัติที่โดดเด่นของสนามไฟฟ้าแบบนี้คือมีผลของประจุค้างเกิดขึ้นทำให้

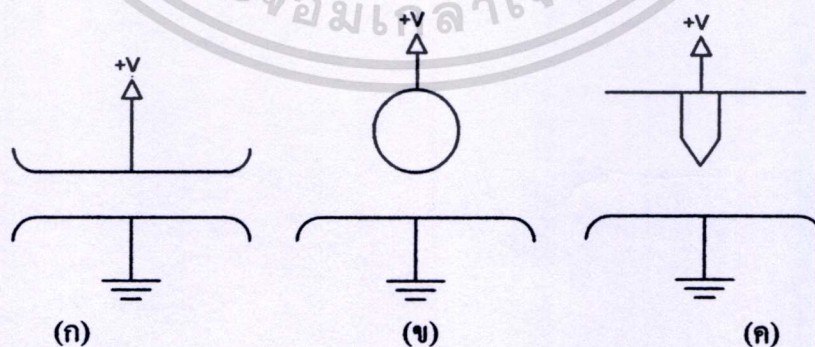
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ จะเกิดกระแสไหลก่อนเกิดเบรกควาน์นานมาก เรียกว่ากระแสโคโรนา (Corona current) ดังแสดงในกราฟ i_{III} ในรูปที่ 2.4 (ข) และความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจากอิเล็กโทรดออกไปจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ใน [1] อิเล็กโทรดที่ III เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติแตกตัวของอากาศแล้วแต่สนามไฟฟ้าบริเวณอื่นยังต่ำมาก จึงไม่เกิดการเบรกควาน์ผ่านตลอดช่องว่างอากาศ แต่ค่าแรงดันที่อากาศเริ่มแตกตัวคือ V_i (Ignition voltage) ในสนามไฟฟ้าชนิดนี้การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกควาน์ทำได้ยากเนื่องจากผลของประจุค้างทำให้สนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามลักษณะทางเรขาคณิต



รูปที่ 2.4 คุณสมบัติสนาม ไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโทรดต่างกัน

- I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
- II) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
- III) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง



รูปที่ 2.5 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ลักษณะสนามไฟฟ้าอย่างง่าย

รูปร่างอิเล็กโตรดที่เกี่ยวเนื่องกับการผลิตโอโซนมีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ สูงเช่นทรงกลมขนาดเล็กมาก (ปลายแหลม) และรูปทรงกระบอกแกนร่วม ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสมการทางเรขาคณิตได้

2.3.2.1 ทรงกลมเดี่ยวในอากาศ

สมมติว่าจุดรวมประจุอยู่ที่ศูนย์กลางทรงกลม สนามไฟฟ้า E จะตั้งฉากกับผิวทรงกลม โดยที่กำลังพิจารณาทรงกลมลูกเดียว รัศมีของอิเล็กโตรดที่เป็นกรวดคืออยู่ไกลมาก ($r_2 = \infty$) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ใด ๆ หาได้จาก

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.10)$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกลม

$$E_{MAX} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r_1^2} = \frac{V}{r_1} \quad (2.11)$$

ในทางปฏิบัติการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาจะสร้างทรงกลมเป็นโล่ (Shield) ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_C (ในสนามสม่ำเสมอใช้ $E_C = 30 \text{ kV}_{peak}/\text{cm}$ ในทางปฏิบัติใช้ $E_C = 25 \text{ kV}_{peak}/\text{cm}$)

2.3.2.2 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

เส้นฟลักซ์สนามไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า โดยอาศัยสมการที่ 4 ของ Maxwell $Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$ สำหรับทรงกระบอกแกนร่วมยาว l รัศมี r ($r_1 \leq r \leq r_2$) หาค่าสนามไฟฟ้าได้จาก

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \frac{1}{r}$$

แรงดัน V ที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้ง 2

$$V = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

ได้
$$E_r = \frac{V}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad r_1 < r < r_2 \quad (2.12)$$

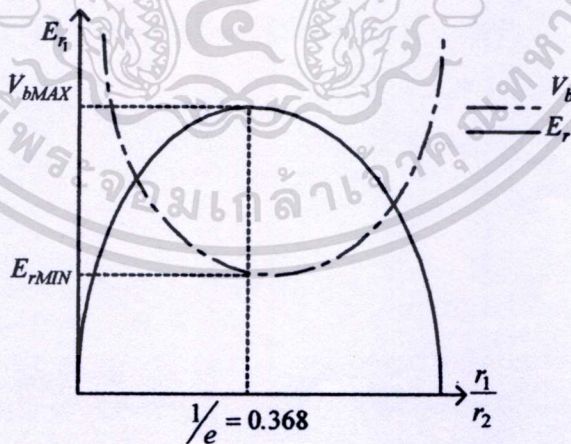
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกระบอกวงใน

$$E_{MAX} = E_{r_1} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.13)$$

2.3.2.3 มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มิติที่พอเหมาะคือลักษณะการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดทนต่อแรงดันได้สูงที่สุด ตัวอย่างเช่น ในกรณีกำหนดรัศมีอิเล็กโทรดนอก r_2 ให้ ถ้าอิเล็กโทรดในรัศมี r_1 ใกล้เคียงกับ r_2 มาก ๆ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดนอกและในคือ $d = r_2 - r_1$ มีค่าน้อยเกิดเบรกดาวน์ง่าย แต่การลดรัศมี r_1 ลงเพื่อเพิ่มค่า d จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำเพิ่มสูงขึ้นมาก จนถึงค่าวิกฤติและเกิดโคโรนาได้ง่าย การหาค่าจุดที่พอเหมาะของ r_1 ที่อยู่ระหว่าง $0 - r_2$ ที่ทำให้ระบบทนแรงดันได้สูงสุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อนดังกล่าวใน [1] กรณีอิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมคือ

$$\left(\frac{r_2}{r_1} \right)_{opt} = e \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V_b และ E_r ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่

2.3.3 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกคาวน์

2.3.3.1 รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration)

รูปร่างอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกคาวน์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้า กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับความเครียดเฉลี่ยจะต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรกคาวน์เป็นค่าเดียวกัน คือเมื่อ ระยะเวลาชั่ววิกฤตได้ตามเงื่อนไขเบรกคาวน์ทันที ไม่มีโคโรนาเกิดก่อนเบรกคาวน์ แต่กรณีที่สนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง ระยะแกปกว้างมากเมื่อเทียบกับรัศมีอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้น (V_i) จะต่ำกว่าแรงดันเบรกคาวน์อย่างชัดเจน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_m) เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.15)$$

เมื่อ d คือระยะช่องว่างอากาศ และ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

2.3.4 วิธีการสร้างก๊าซไอออน

ก๊าซไอออนคือก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้น จะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน (O_2) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ O_2 และ O_3 ดังรูปที่ 2.7 โดยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการ ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอน โมเลกุลของก๊าซนั้นมีค่าประจุเป็นบวกและอิเล็กตรอนวิ่งชน โมเลกุลของก๊าซโดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์ และต้องมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกทั่ว ๆ ไปเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตไอออน พลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นส่งถ่ายมาจากการชนอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลก๊าซออกซิเจน

กระบวนการ ไอออไนเซชัน โดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่า ๆ หนึ่งไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง ถ้าพลังงานที่ถ่ายทอดไม่มากพอถึงพลังงานให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือ ไอออไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้น เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่า พลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีมวลได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานศักย์สู่มอเลกุลของก๊าซที่ถูกชนนั่นเอง กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาฮาโลนอิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction)

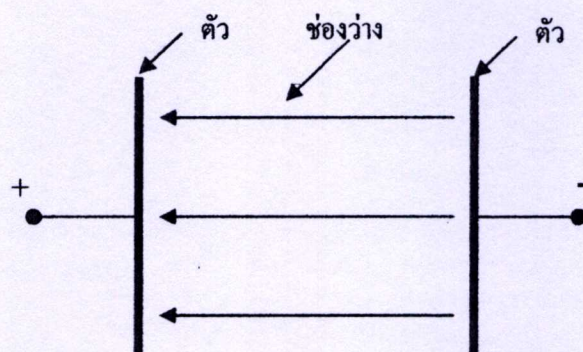
ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

2. การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นโอโซน (Ozone Generation)

ในการผลิตโอโซนนั้นย่านพลังงานที่ต้องใช้คือ $5.58 \text{ kW.h/m}^3 - 7.073 \text{ kW.h/m}^3$ [6] แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่โดยประมาณ 21 % ดังนั้นคิดเทียบแล้วพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ $1.172 \text{ kW.h/m}^3 - 7.073 \text{ kW.h/m}^3$ จึงเพียงพอต่อการเกิดก๊าซโอโซน

2.3.5 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับช่องว่างที่มีโมเลกุลของก๊าซบรรจุอยู่ เกิดสนามไฟฟ้าภายในช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซและเคลื่อนที่เข้าหาศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทางระหว่างอิเล็กตรอนกับขั้วบวกของช่องว่างอากาศด้วยความเร็วค่า ๆ หนึ่ง ระหว่างทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปนั้นอาจเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซอื่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถ้าระยะ ทางนั้นมีความยาวมากขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนยังมีพลังงานในการชนมากพอให้กับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่ถูกชนหลุดออกมานั้นจึงหมายความว่า แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนที่ของ โมเลกุลก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการกลับขั้วศักย์สนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเดิมก่อนหน้านี้นี้จะถูกวางตัวใหม่ในทิศทางตรงข้าม และเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกใหม่ อีกด้านหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วในการกลับขั้วในช่วงเวลาหนึ่งจึงเสมือนเป็นการเพิ่มระยะทางที่อิเล็กตรอนต้องเคลื่อน ที่ออกไป โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะได้แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกันดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงเป็นการเพิ่มแรงดันภายนอกที่มากกระทำ



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

2.3.6 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

ในกระบวนการสร้างก๊าซไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ พลังงานที่กระทำต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่าง โมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีที่จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียรจำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

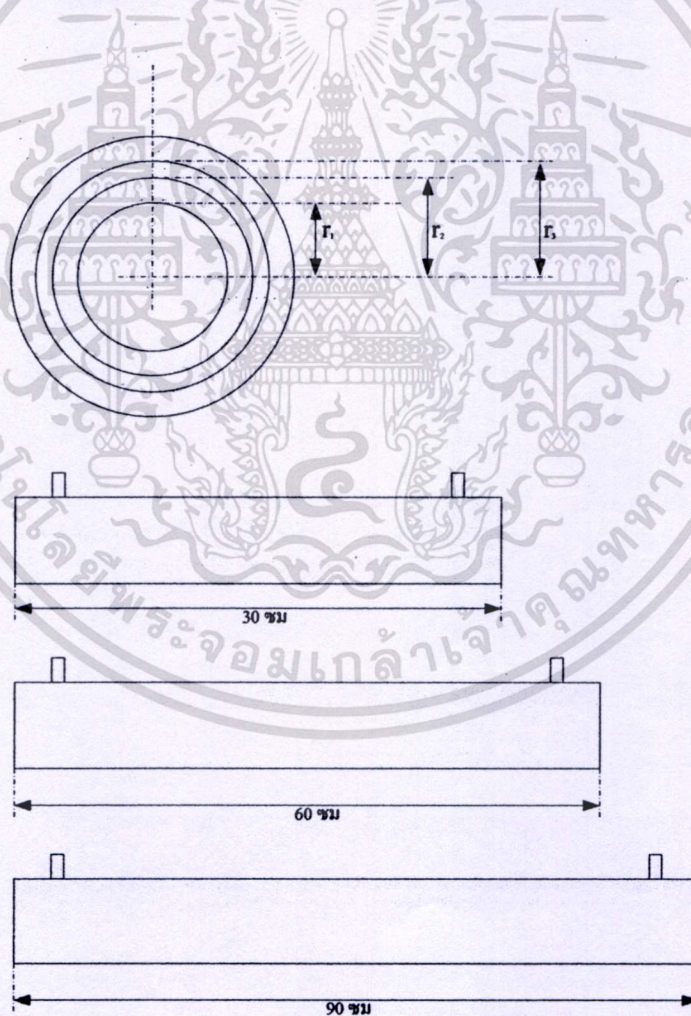
2.3.7 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วมฉนวน 2 ชั้น

รูปทรงของอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังรูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่น่าวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ) ไม่เท่ากันซ้อนกัน จึงกลายเป็นการนำสาร ไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ C_1 และ C_2 โดยแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถหาได้จากสมการ (2.16) และ (2.17) [10]

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.16)$$

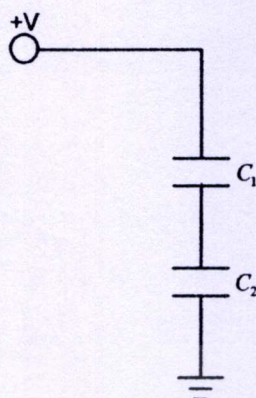
$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_2} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.17)$$

- เมื่อ
- C_1 = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F)
 - C_2 = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F)
 - ϵ_{r_1} = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F/m)
 - ϵ_{r_2} = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F/m)
 - ϵ_0 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฟรีสเปซ
 - l = ความยาวของชุดอิเล็กทรอนิกส์หน่วยเป็น (m)
 - r_1 = รัศมีด้านในของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น (m)
 - r_2 = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (m)
 - r_3 = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (m)



รูปที่ 2.8 อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบบ็อกซ์อินเทอร์เน็ท

ความเค้นสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ในฉนวนแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.18) [11]

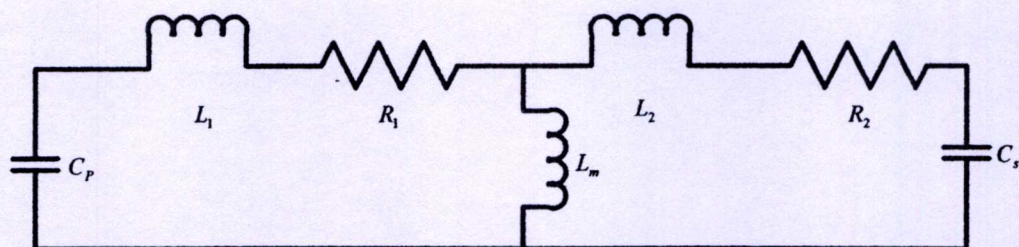
$$E_x = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_x \times V}{\epsilon_x \times r_x \times \left(\epsilon_1 \times \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \times \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \tag{2.18}$$

- เมื่อ E_x = ความเค้นสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ (kV/cm)
- V = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ (kV)
- r_x = รัศมีที่จุดใด ๆ (cm)
- ϵ_x = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่ฉนวนชั้นใด ๆ (F/m)

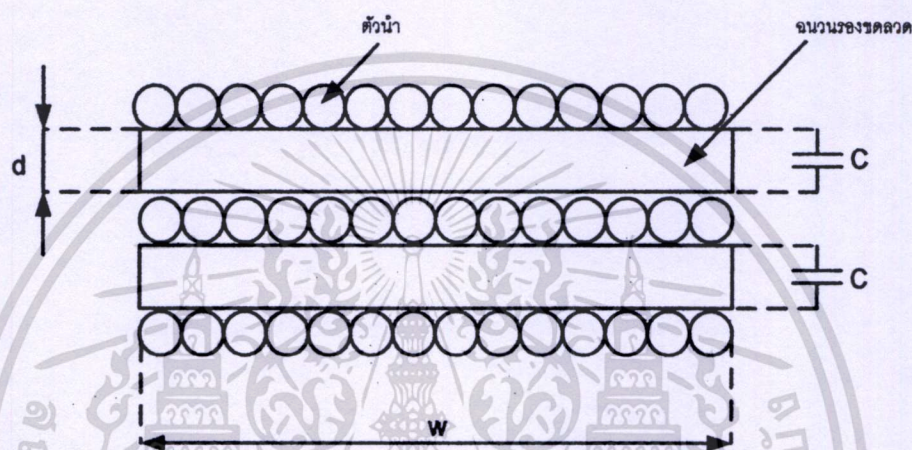
2.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

การส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์มีขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 150 V และมีความถี่สวิทช์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แทนของหม้อแปลงที่ใช้ในงานความถี่สูงโดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 2.11 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด

โดยพื้นฐานของหม้อแปลงความถี่สูงจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปแต่แตกต่างกันตรงวัสดุที่ใช้ทำแกนและวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitance) ปรากฏขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทั้งด้านด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแสดงดังรูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุทั้งสอง (C_p และ C_s) เกิดจากการนำวัสดุฉนวนมารองระหว่างชั้นของขดลวดเพื่อป้องกันการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันระหว่างชั้นทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น เมื่อนำวัสดุฉนวนมาวางกันจึงเสมือนมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมอยู่ระหว่างชั้น แสดงในรูปที่ 2.8 ในกรณีที่จำนวนชั้นมีมากกว่า 1 ชั้น เมื่อทำการคลี่ชั้นของขดลวดออกจึงกลายเป็นการนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกัน สมการที่ใช้คำนวณต่อความจุแฝงได้จาก (2.19)

$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times \frac{w}{d} \quad (2.19)$$

เมื่อ C = ตัวเก็บประจุแฝงของหม้อแปลงความถี่สูง (F/m)

ϵ_0 = ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของสุญญากาศ

ϵ_r = ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน

w = ความกว้างของชั้นขดลวด (m)

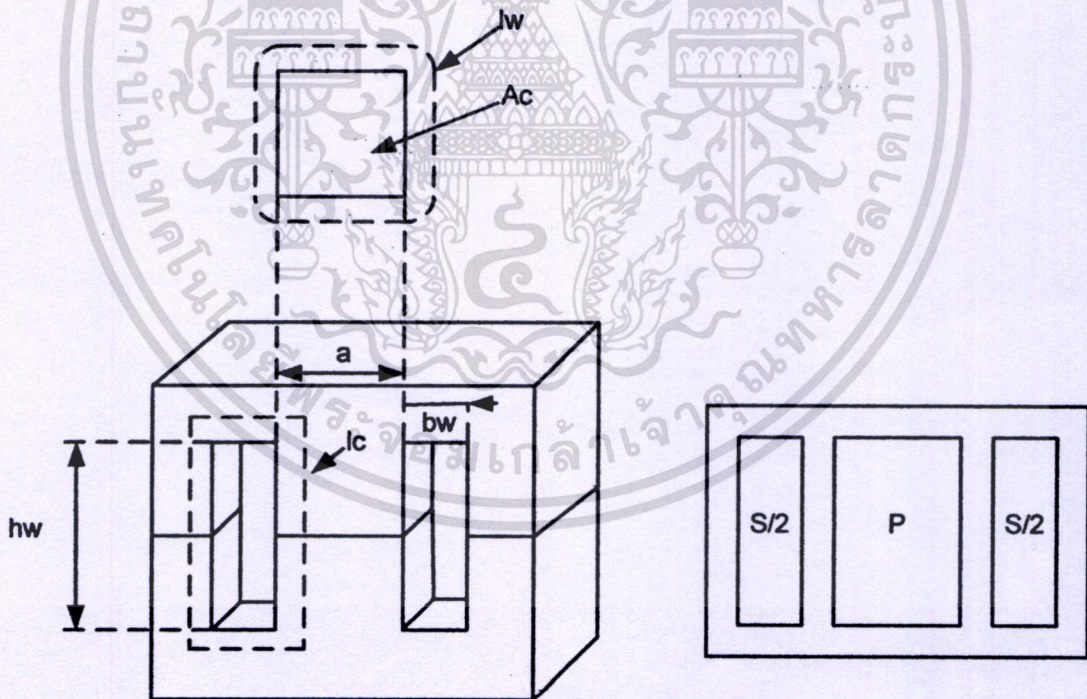
d = ความหนาของวัสดุฉนวน (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core) นั้นมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กได้ต่ำ ดังนั้นจึงเกิดเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่ไม่ได้ไหลผ่านแกนแต่จะไหลผ่านช่องว่างอากาศ เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Inductance) ซึ่งเป็นผลให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรนั้นก็คือค่า L_l และ L_l สามารถใช้สมการ (2.20) คำนวณได้ [12] โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.12

$$L_{leakage} = \frac{\mu_o \times N^2 \times l_w \times b_w}{3 \times s^2 \times h_w} \tag{2.20}$$

- เมื่อ
- $L_{leakage}$ = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (H)
 - μ_o = ค่าเปอร์แมบิลิตี (Permeability) ของสูญญากาศ
 - N^2 = จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด
 - l_w = ความยาวเฉลี่ยรอบแกน (m)
 - b_w = ความกว้างขดขี้ผึ้ง (m)
 - h_w = ความสูงของขดขี้ผึ้ง (m)
 - s = จำนวนช่องการพันสลักระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 2.12 รูปความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านแกน เกิดจากกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ดังนั้น จึงเกิดค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (Magnetizing Inductance) ขึ้นในวงจร คำนวณได้จากสมการ (2.21)

$$L_m = N_{pr}^2 \times \frac{\mu_0 \times \mu_r \times A_c}{l_c} \quad (2.21)$$

เมื่อ	L_m	=	ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน	(H)
	N_{pr}	=	จำนวนรอบของขดลวดค้ำปฐมภูมิ	
	A_c	=	พื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรท์ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน (m ²)	
	l_c	=	ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์	(m)

ค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ในตัวนำทองแดงที่ใช้ทำขดลวดทางค้ำปฐมภูมิและทุติยภูมิ คำนวณได้จากสมการ (2.22)

$$R = \rho_{cu} \frac{l_{cu}}{A_{cu}} \quad (2.22)$$

เมื่อ	R	=	ค่าความต้านทานของลวด	(H)
	ρ_{cu}	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานกระแสของวัสดุที่ใช้ทำขดลวด (Ω -m)	
	l_{cu}	=	ความยาวของขดลวด	(m)
	A_{cu}	=	พื้นที่หน้าตัดของขดลวด	(m ²)

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้ ขดลวดปฐมภูมิ, ขดลวดทุติยภูมิ, และแกนเฟอร์ไรท์ ในการออกแบบหม้อแปลงอันดับแรก ต้องกำหนดพิกัดกระแสและแรงดันทั้งทางค้ำปฐมภูมิและทุติยภูมิเสียก่อน จากนั้นจึงเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถคำนวณเบอร์ขดลวดและจำนวนรอบของขดลวดได้ ในการออกแบบจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิจะใช้สมการ (2.23) ในการคำนวณ

$$N = \frac{V}{4xf \times B_m \times A_c} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	N = จำนวนรอบของขดลวด	
	V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน	(V)
	f = ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน	(Hz)
	B_m = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์	(T)
	A_c = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์	(m ²)

ในกรณีที่กำหนดพิกัดแรงดัน ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้แล้ว สามารถใช้สมการ (2.24) เพื่อคำนวณจำนวนรอบทางคานทุติยภูมิได้

$$N_s = N_p \times \frac{V_s}{V_p} \quad (2.24)$$

เมื่อ	N_s = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ	
	N_p = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ	
	V_s = แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ	(V)
	V_p = แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ	(V)

เมื่อได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงในส่วนของการคำนวณ เบอร์ลวดที่ใช้พัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

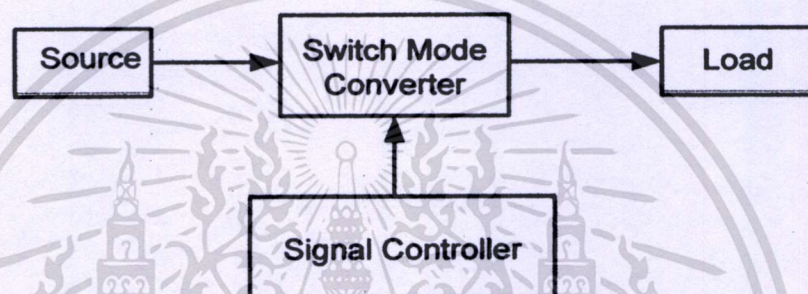
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพิกัดกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านขดลวด (A/mm²) โดยส่วนใหญ่กำหนดอยู่ที่ระหว่าง 3-5 A/mm² ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงการเลือกค่า A/mm² ดังข้างเป็นทางเลือกที่ดี เพราะผลจากปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) จะทำให้พื้นที่การไหลของกระแสลดลงเนื่องจากกระแสจะมาไหลที่ผิวของตัวนำแทนหรือใช้วิธีแบ่งลวดออกเป็นเส้นเล็ก ๆ หลายเส้น โดยให้ผลรวมจำนวนพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเส้นเล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของลวดที่คำนวณได้

ขั้นตอนที่ 2 นำพิกัดกระแสที่กำหนดคูณกับค่า A/mm² ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดมาแล้ว จึงนำไปเทียบกับตารางขนาดสายเพื่อแปลงเป็นเบอร์ของขดลวด ซึ่งในประเทศไทยนิยมใช้มาตรฐานเบอร์ลวดอยู่ 2 แบบ คือ AWG และ SWG เป็นหลัก

2.5 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ปัจจุบันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ได้ถูกนำมาใช้ทดแทนแหล่งจ่ายกำลังแบบลิเนียร์มากขึ้น เพราะคุณสมบัติทางด้านประสิทธิภาพที่สูงกว่า ขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่าที่พิกัดกำลังงานเท่ากัน รองรับระบบได้มากกว่า สามารถทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ แหล่งจ่าย (Source) ของวงจรเป็นได้ทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับจากนั้นส่งผ่านสู่สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์โดยมีวงจรควบคุมสัญญาณ (Signal Controller) เป็นตัวกำหนดการทำงานที่ส่งผ่านกำลังงานไปสู่โหลด โครงสร้างการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.10

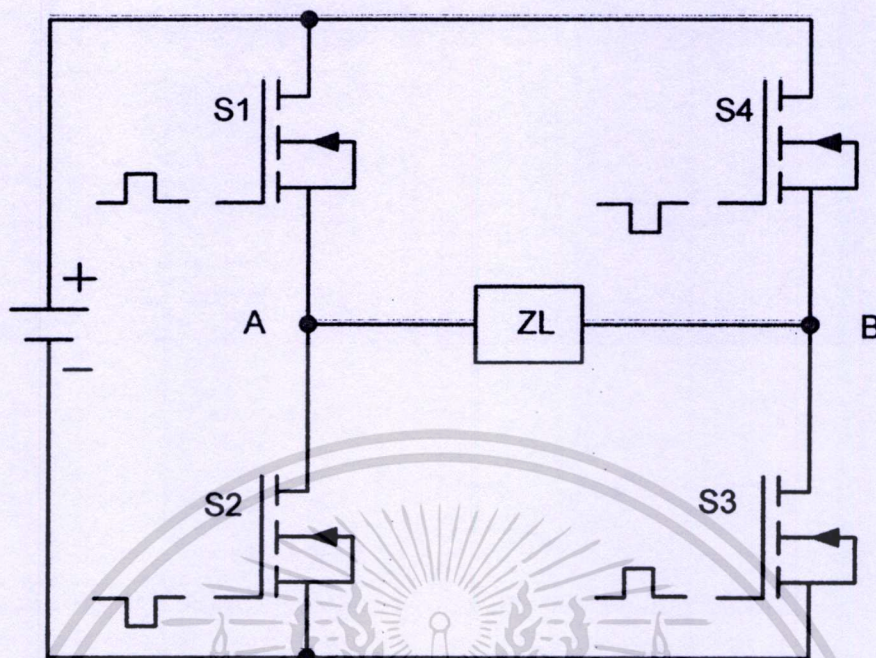


รูปที่ 2.13 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์

การใช้งานแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์นั้นเปิดกว้างและค่อนข้างหลากหลายด้วย เพราะแหล่งจ่ายกำลังงานนั้นมีหลายแบบรองรับงาน โดยทั่วไปได้อย่างเพียงพอ พิกัดกำลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ที่ 500 W ไปจนถึง หลายร้อยกิโลวัตต์ แต่แหล่งจ่ายแบบนี้ก็มีข้อเสียคือราคาค่อนข้างแพง การสร้างและควบคุมยุ่งยากซับซ้อน สัญญาณรบกวนสูง แต่ปัญหาเหล่านี้กำลังลดน้อยลงเพราะนักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อแก้ไขปัญหาล่าช้าอยู่ตลอดเวลา และด้วยเทคโนโลยีที่สูงขึ้น การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างแหล่งจ่ายกำลังงานแบบนี้ราคาถูกลงส่งผลให้ต้นทุนของแหล่งจ่ายกำลังแบบนี้มีราคาถูกลงเช่นกัน

2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับที่ค้ำบลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์

ที่ค้ำบลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) เป็นรูปแบบหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์มีหลักการการทำงาน โดยอาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่โหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว ด้วยกันคือ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 วงจรของที่ค้ำบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.14 การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่ $S_1 - S_3$ และ $S_2 - S_4$ ทำงานสลับกันคู่ละครึ่งคาบเวลาการสวิตช์



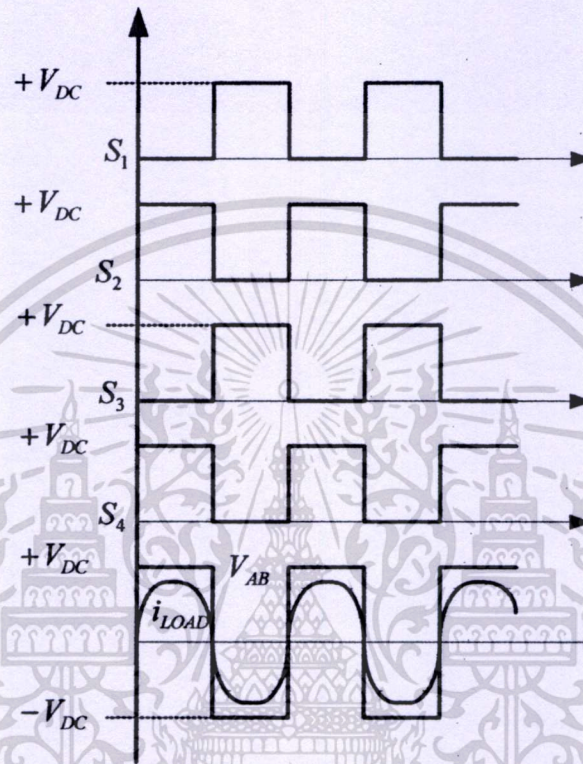
รูปที่ 2.14 วงจรที่คัปปลิงเอ็มพลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

เมื่อคู่อุปกรณ์สวิตช์ $S_1 - S_3$ ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{DC} ตกคร่อมโหลด Z_L วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ $+V_{DC}$ จากนั้นที่ครึ่งคาบหลังคู่อุปกรณ์ $S_1 - S_3$ หยุดทำงานและ $S_2 - S_4$ ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{DC} ตกคร่อมโหลด Z_L วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ $-V_{DC}$ การทำงานจะสลับกันไปตามคาบสัญญาณการสวิตช์แสดงในรูปที่ 2.15

ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน การสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์ (Hard Switch) ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์สูง สาเหตุเพราะการถ่ายเทพลังงานออกจากอุปกรณ์สะสมพลังงานในช่วงเวลาขณะที่อุปกรณ์สวิตช์กำลังหยุด (turn off) หรือนำกระแส (turn on) แรงดันที่ตกคร่อมกับกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ในช่วงเวลานี้ คือ กำลังงานสูญเสีย กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสูญเสียขณะสวิตช์ (Switching Loss) การลดการสูญเสียขณะสวิตช์เรียกว่า ซอฟต์สวิตช์ (Soft Switch) วิธีการทำได้โดยการกำหนดความถี่สวิตช์ (Switching Frequency) ให้สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) เล็กน้อย จากรูปที่ 2.15 ขณะที่ $S_1 - S_3$ turn on แรงดันตกคร่อมค่อย ๆ ลดลง กระแสที่ไหลผ่านเป็นลบ จากนั้นเมื่อแรงดันลดลงเป็นศูนย์กระแสจึงค่อยเพิ่มขึ้น ผลคูณของกระแสและแรงดันจึงเท่ากับศูนย์ การสวิตช์แบบนี้ อุปกรณ์สวิตช์ถูกบังคับให้ทำงานที่แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสที่ไหลผ่านจะไหลผ่านจึงเรียกว่า Zero Voltage Switch (ZVS) ในขณะที่ $S_1 - S_3$ turn off กระแสเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อขนานอยู่กับอุปกรณ์สวิตช์แทน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์แรงดันที่ตกคร่อมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ตัวเก็บประจุถูกชาร์จ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์เป็นศูนย์ ผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสจึงเป็นศูนย์ การสวิตช์แบบนี้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานขณะกระแสที่ไหลผ่านเป็นศูนย์ก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นเรียกว่า Zero Current Switch (ZCS)



รูปที่ 2.15 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

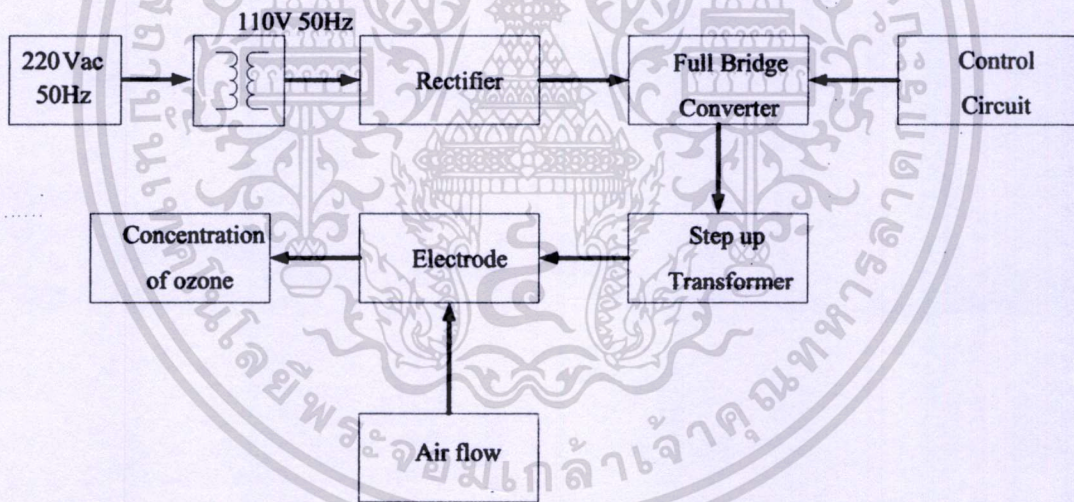
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลัก ๆ แล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโพลดีเลย์ก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วมจำนวน 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นถึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

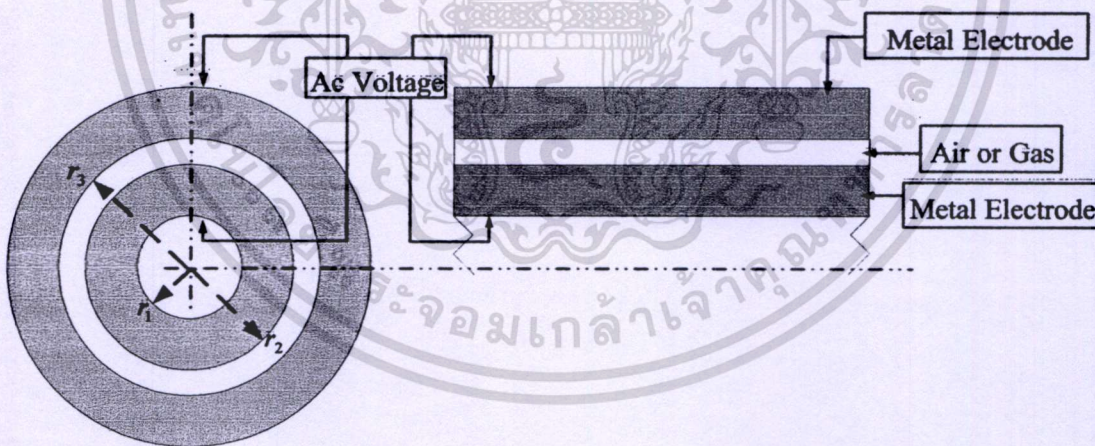
3.2 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

ในบทความนี้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุฉนวนชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผล 5 ข้อดังนี้คือ

- 1) แก้วมีคุณสมบัติในการทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง
- 2) แก้วที่คุณภาพการผลิตดีจะมีผิวเรียบและไม่มีฟองอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดการเบรกดาวน์ในแก้วได้
- 3) สามารถทนการชุบซิคและไม่เกิดริ้วรอยได้ง่าย
- 4) ในกระบวนการผลิตแก้วต้องให้ความร้อนสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียสเพื่อหลอมทรงซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแก้ว ดังนั้นแก้วจึงทนความร้อนได้สูงมากก่อนที่จะหลอมละลายเสียหาย
- 5) แก้วเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนเช่นกัน

ในส่วนของฉนวนชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศเพื่อที่จะสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดได้ คิวนำด้านในและด้านนอกใช้ฝอยสแตนเลสและท่อสแตนเลสตามลำดับ รูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 3.2

การกำหนดขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดจะเลือกจากขนาดของหลอดแก้วก่อนเป็นหลักเพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดแก้วมีให้เลือกไม่มากนัก จากนั้นจึงเลือกขนาดของท่อสแตนเลส ซึ่งผู้ผลิตได้จัดทำตารางขนาดท่อไว้แล้วจึงจะสะดวกต่อการนำค่ามาใช้งาน



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

ในงานวิจัยนี้เลือกหลอดแก้วทั้งหมด 3 ขนาดด้วยกันเพื่อออกแบบแท่งอิเล็กโทรดให้มีแกปอากาศที่ต่างกันซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 3.5 ซม., 3.8 ซม. และ 4.1 ซม. หนา = 0.2 ซม. และยาว =

30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. เหตุผลในการเลือกนั้นเพราะจากการคำนวณร่วมกับทอสมแดนเลสหลาย ๆ ขนาดแล้วหลอดแก้วขนาดนี้ใช้แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ไม่สูงมากนักและความยาวก็มากกว่าหลอดแก้วขนาดอื่น ๆ ในส่วนของทอสมแดนเลสเลือกใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 4.3 ซม., หนา 0.2 ซม. และยาว = 30 ซม. และ 60 ซม. เมื่อนำหลอดแก้วซ้อนเข้าไปในทอสมแดนเลส ดังนั้นจะได้ค่า r_1 , r_2 และ r_3 ทั้งหมด 3 ชุดดังตารางที่ 3.2

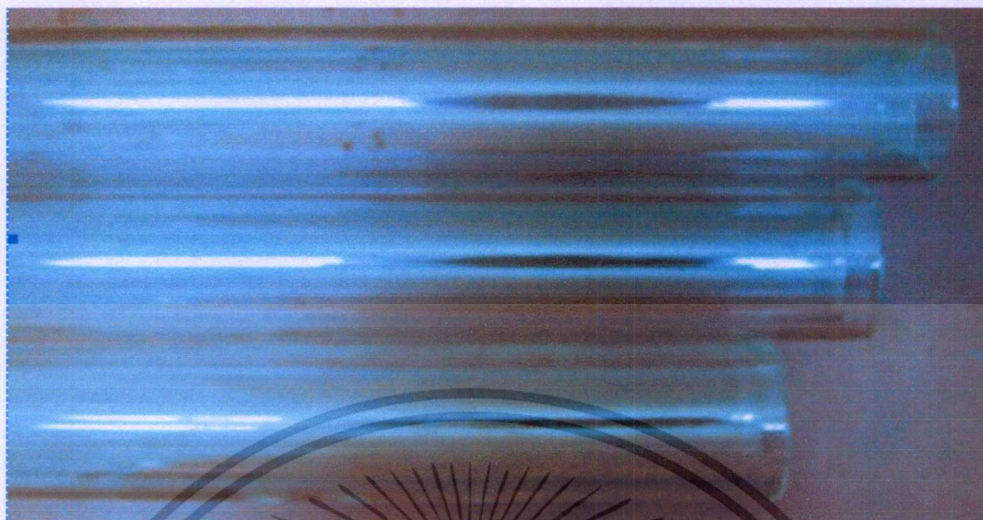
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแท่งอิเล็กโตรด

ความยาวแท่งอิเล็กโตรด(ซม.)	แกปอากาศ (ซม.)	r_1 (ซม.)	r_2 (ซม.)	r_3 (ซม.)
30	0.1	1.85	2.05	2.15
	0.25	1.7	1.9	2.15
	0.4	1.55	1.75	2.15
60	0.1	1.85	2.05	2.15
	0.25	1.7	1.9	2.15
	0.4	1.55	1.75	2.15
90	0.1	1.85	2.05	2.15
	0.25	1.7	1.9	2.15
	0.4	1.55	1.75	2.15



รูปที่ 3.3 แท่งอิเล็กโตรดที่มีความยาว 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แท่งแก้วที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.41 ซม. 0.38 ซม. และ 0.35 ซม.

ซึ่งที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม. ที่แกปอากาศ 0.4 ซม. $r_1 = 1.55$ ซม., $r_2 = 1.75$ ซม. และ $r_3 = 2.15$ ซม. ที่แกปอากาศ 0.25 ซม. $r_1 = 1.7$ ซม., $r_2 = 1.9$ ซม. และ $r_3 = 2.15$ ซม. และที่แกปอากาศ 0.1 ซม. $r_1 = 1.85$ ซม., $r_2 = 2.05$ ซม. และ $r_3 = 2.15$ ซม. ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 60 ซม. ที่แกปอากาศ 0.4 ซม. $r_1 = 1.55$ ซม., $r_2 = 1.75$ ซม. และ $r_3 = 2.15$ ซม. ที่แกปอากาศ 0.25 ซม. $r_1 = 1.7$ ซม., $r_2 = 1.9$ ซม. และ $r_3 = 2.15$ ซม. และที่แกปอากาศ 0.1 ซม. $r_1 = 1.85$ ซม., $r_2 = 2.05$ ซม. และ $r_3 = 2.15$ ซม. ค่าเปอร์มิตติวิตีของแก้ว (ϵ_{r1}) อยู่ระหว่าง 5-10 และของอากาศ (ϵ_{r2}) ประมาณเท่ากับ 1 กำหนดให้ตัวนำด้านในของอิเล็กโทรดที่มีความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม. จะยาว (l) 25 ซม. ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 60 ซม. จะยาว (l) 55 ซม. เนื่องจากในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนใช้ค่าความยาวตัวนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเป็นตัวแปรในสมการซึ่งแปรผันกัน ดังนั้น ถ้าเลือกค่าความยาวมากก็จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามากส่งผลให้กระแสไหลลดีมีค่าสูงขึ้นพิกัดของอุปกรณ์ก็จะสูงขึ้น แต่ถ้าความยาวสั้นเกินไปก็จะทำให้อากาศที่ไหลผ่านสนามไฟฟ้ามีระยะทางสั้น และโอกาสที่โมเลกุลของอากาศจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็น้อยลงเช่นกัน นำตัวแปรมาคำนวณหาปริมาตรของช่องว่างอากาศ (Vol) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.3) ได้จากสมการ (3.1)

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

ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 30 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0205)^2 \times 0.25$$

$$Vol = 0.78 \times 10^{-6} \quad m^3$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0190)^2 \times 0.25$$

$$Vol = 4.91 \times 10^{-6} \quad m^3$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0175)^2 \times 0.25$$

$$Vol = 12.56 \times 10^{-6} \quad m^3$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0205)^2 \times 0.55$$

$$Vol = 1.73 \times 10^{-6} \quad m^3$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0190)^2 \times 0.55$$

$$Vol = 10.8 \times 10^{-6} \quad m^3$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0175)^2 \times 0.55$$

$$Vol = 27.64 \times 10^{-6} \quad m^3$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 90 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0205)^2 \times 0.85$$

$$Vol = 2.67 \times 10^{-6} \quad m^3$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0190)^2 \times 0.85$$

$$Vol = 16.69 \times 10^{-6} \quad m^3$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

$$Vol = \pi \times (0.0215 - 0.0175)^2 \times 0.85$$

$$Vol = 42.72 \times 10^{-6} \quad m^3$$

จากหัวข้อ 2.2 ย่านพลังงานที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนอยู่ในช่วง $1.172 \text{ kW.h/ m}^3 - 1.62 \text{ kW.h/ m}^3$ เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาขานพลังงาน (W) ที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์ได้ดังนี้

ที่ความยาวแกงอิเล็กทรอนิกส์ 30 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 0.78 \times 10^{-6} = 0.914 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 0.78 \times 10^{-6} = 1.263 \text{ mW.h}$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 4.91 \times 10^{-6} = 5.754 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 4.91 \times 10^{-6} = 7.954 \text{ mW.h}$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 12.56 \times 10^{-6} = 14.720 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 12.56 \times 10^{-6} = 20.347 \text{ mW.h}$$

ที่ความยาวแกงอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 1.73 \times 10^{-6} = 2.027 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 1.73 \times 10^{-6} = 2.802 \text{ mW.h}$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 10.8 \times 10^{-6} = 12.657 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 10.8 \times 10^{-6} = 17.496 \text{ mW.h}$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 27.64 \times 10^{-6} = 32.394 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 27.64 \times 10^{-6} = 44.776 \text{ mW.h}$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 2.67 \times 10^{-6} = 3.129 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 2.67 \times 10^{-6} = 4.325 \text{ mW.h}$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 16.69 \times 10^{-6} = 19.560 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 16.69 \times 10^{-6} = 27.037 \text{ mW.h}$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 42.72 \times 10^{-6} = 50.067 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 42.72 \times 10^{-6} = 69.206 \text{ mW.h}$$

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าของปริมาตรและย่านพลังงานที่ความยาวของแท่งอิเล็กโทรดและช่องแกปที่ขนาดต่างๆ

ความยาวแท่ง อิเล็กโทรด (ซม.)	แกปอากาศ (ซม.)	ปริมาตร (m ³)	พลังงาน (mW.h)	
			min	max
30	0.1	0.76x10 ⁻⁶	0.914	1.263
	0.25	4.91x10 ⁻⁶	5.754	7.954
	0.4	12.56x10 ⁻⁶	14.720	20.347
60	0.1	1.73x10 ⁻⁶	2.027	2.802
	0.25	10.8x10 ⁻⁶	12.657	17.496
	0.4	27.64x10 ⁻⁶	32.394	44.776
90	0.1	2.67x10 ⁻⁶	3.129	4.325
	0.25	16.69x10 ⁻⁶	19.560	27.037
	0.4	42.72x10 ⁻⁶	50.061	69.206

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) ได้จากสมการพลังงานในสนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศ (3.2) ในกรณีที่สนามไฟฟ้าตามเวลานั้น สามารถวิเคราะห์ในสภาพสนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เนื่องจากในขณะที่ย่านของแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่า ๆ หนึ่ง ก่อนถึงค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซ

ได้ และไม่สามารถเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่และชนกับ โมเลกุลก๊าซในช่องว่าง อากาศให้แตกตัวได้ ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (W) ได้จึงเกิดขึ้นที่ค่า แรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง เพราะฉะนั้นสามารถอินทิเกรตสมการ (3.2) ได้ดังนี้

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

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

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

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

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 0.914 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 0.78}}$$

$$E_{\min} = 16,269 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 1.263 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 0.78}}$$

$$E_{\max} = 19,124 \text{ V/cm}$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 5.754 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 4.91}}$$

$$E_{\min} = 16,270 \text{ V/cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 7.954 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 4.91}}$$

$$E_{\max} = 19,129 \text{ V/cm}$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 14.720 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 12.56}}$$

$$E_{\min} = 16,270 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 20.437 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 12.56}}$$

$$E_{\max} = 19,171 \text{ V/cm}$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม.

แกปอากาศ 0.1 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 2.027 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 1.73}}$$

$$E_{\min} = 16,268 \text{ V/cm}$$

ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 2.802 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 1.73}}$$

$$E_{\max} = 19,127 \text{ V/cm}$$

แถบอากาศ 0.25 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 12.657 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 10.8}}$$

$$E_{\min} = 16,270 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 17.496 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 10.8}}$$

$$E_{\max} = 19,129 \text{ V/cm}$$

แถบอากาศ 0.4 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 32.394 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 27.64}}$$

$$E_{\min} = 16,270 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 44.776 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 27.67}}$$

$$E_{\max} = 19,129 \text{ V/cm}$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.

แถบอากาศ 0.1 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 3.129 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2.67}}$$

$$E_{\min} = 16,270 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 4.325 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2.67}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\max} = 19,128 \text{ V/cm}$$

แกปอากาศ 0.25 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 19.560 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 16.69}}$$

$$E_{\min} = 16,270 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 27.037 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 16.69}}$$

$$E_{\max} = 19,129 \text{ V/cm}$$

แกปอากาศ 0.4 ซม.

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 50.560 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 42.72}}$$

$$E_{\min} = 16,350 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 69.206 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 42.72}}$$

$$E_{\max} = 19,129 \text{ V/cm}$$

เมื่อได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ย่านพลังงานต่ำสุดและสูงสุดที่ทำให้เกิดก๊าซไอออนแล้วจึงคำนวณหาค่าแรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโทรดได้จากสมการ (2.13) โดยแทนค่าได้ดังนี้

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม.

$$V_{\min} = \frac{16,219 \times 1 \times 1.75 \times \left(8 \times \ln \frac{2.15}{1.75} + 1 \times \ln \frac{1.75}{1.55} \right)}{8 \times 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น $V_{\min} = 4.153 \text{ kV}$

$$V_{\max} = \frac{19,124 \times 1 \times 1.75 \times \left(8 \times \ln \frac{2.15}{1.75} + 1 \times \ln \frac{1.75}{1.55} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น $V_{\max} = 4.897 \text{ kV}$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม.

$$V_{\min} = \frac{16,268 \times 1 \times 1.75 \times \left(8 \times \ln \frac{2.15}{1.75} + 1 \times \ln \frac{1.75}{1.55} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น $V_{\min} = 4.166 \text{ kV}$

$$V_{\max} = \frac{19,129 \times 1 \times 1.75 \times \left(8 \times \ln \frac{2.15}{1.75} + 1 \times \ln \frac{1.75}{1.55} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น $V_{\max} = 4.898 \text{ kV}$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.

$$V_{\min} = \frac{16,270 \times 1 \times 1.75 \times \left(8 \times \ln \frac{2.15}{1.75} + 1 \times \ln \frac{1.75}{1.55} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น $V_{\min} = 4.167 \text{ kV}$

$$V_{\max} = \frac{19,129 \times 1 \times 1.75 \times \left(8 \times \ln \frac{2.15}{1.75} + 1 \times \ln \frac{1.75}{1.55} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น $V_{\max} = 4.90 \text{ kV}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้เลือกแรงดันที่ 5 kVp เนื่องจากเป็นจุดสูงสุด ซึ่งสามารถใช้งานได้โดยมีความ
ขีดหุ่นสูงในกรณีที่แรงดันมีการแกว่งและไม่คงที่

ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กโทรดจากสมการ (2.16) และ
(2.17) โดยแทนค่าได้ดังนี้

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 30 ซม.

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 25}{\ln \frac{1.75}{1.55}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_1 = 9.107 \times 10^{-8} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 25}{\ln \frac{2.15}{1.75}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_2 = 6.756 \times 10^{-9} \text{ F}$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 60 ซม.

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 55}{\ln \frac{1.75}{1.55}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_1 = 2.016 \times 10^{-7} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 55}{\ln \frac{2.15}{1.75}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_2 = 1.406 \times 10^{-8} \text{ F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 90 ซม.

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 85}{\ln \frac{1.75}{1.55}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_1 = 3.117 \times 10^{-7} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 85}{\ln \frac{2.15}{1.75}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_2 = 2.297 \times 10^{-8} \text{ F}$$

3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

ในงานวิจัยนี้ออกแบบกำลังงานของหม้อแปลงไว้ที่ 1.5 kW เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80 ซึ่งเป็นแกนแบบ EE ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในท้องตลาดและจ่ายกำลังได้สูงสุด 2 kW โดยโครงสร้างคือการนำแกนเฟอร์ไรท์รูปร่างเหมือนตัว E สองตัวมาประกบกัน ลักษณะของแกนแสดงในรูปที่ 3.3 มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดแกน $A_c = 4.0 \times 10^{-4}$, $B_{max} = 0.3 \text{ T}$, ความยาวทางเดินแม่เหล็กของแกน (l_c) 0.192 m ปริมาตรแกน $V_c = 69.8 \times 10^3 \text{ mm}^3$ และความยาวรอบด้านทั้ง (l_w) 4 ของแกน 0.08 m พื้นที่ช่องว่างของบ๊อบบิน 800 mm^2 แต่เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงานดังนั้นสิ่งที่พิจารณาคือกระแสโหลดและพื้นที่หน้าตัดการนำกระแสของขดลวดตัวนำ

กำหนดพิกัดของหม้อแปลงดังนี้ แรงดันทางด้านปฐมภูมิ $V_p = 150 \text{ V}$ แรงดันทางด้านทุติยภูมิ $V_s = 5 \text{ kV}$, ความถี่ใช้งาน 25 kHz และกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 3 A

คำนวณหาจำนวนรอบปฐมภูมิจากสมการ (2.23) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$N_p = \frac{150}{4 \times 25000 \times 0.3 \times 4.0 \times 10^{-4}}$$

เพราะฉะนั้น

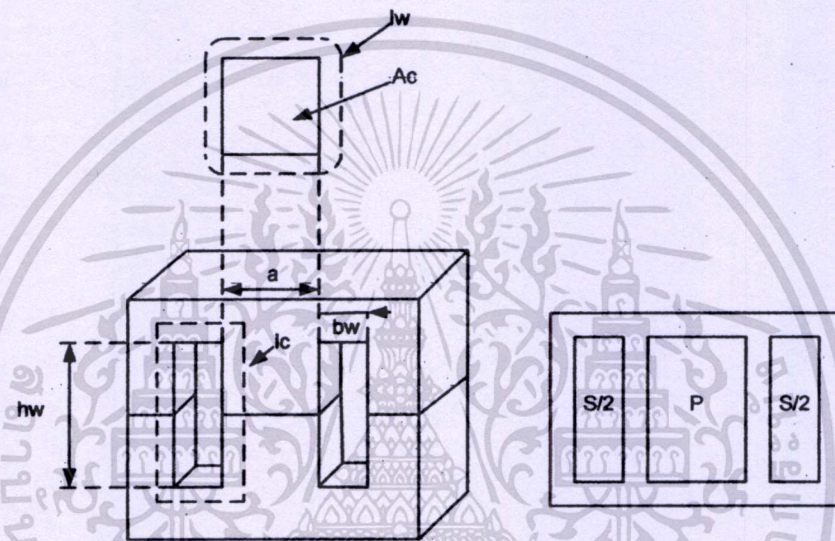
$$N_p = 12.5 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบขดลวดขงมิกำนวณจากสมการ (2.24) แทนค่าได้ดังนี้

$$N_s = 12.5 \times \frac{5000}{150}$$

เพราะฉะนั้น

$$N_s = 417 \text{ รอบ}$$



รูปที่ 3.5 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80

จากหัวข้อ 2.3 ในบทที่ 2 เนื่องจากความถี่ใช้งานมีค่าสูง ดังนั้นจึงเลือกค่ากระแสต่อพื้นที่หน้าตัดลวดไว้ที่ $4A/\text{mm}^2$ กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 3 A

$$\text{ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดคือ } \frac{3A}{4A} = 0.75 \text{ mm}^2$$

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ # AWG 18 (0.825mm^2)

คำนวณเบอร์ลวดทางด้านทุติยภูมิได้ดังนี้

จาก

$$I_s = I_p \times \frac{V_p}{V_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_s = 3 \times \frac{150}{5000}$$

เพราะฉะนั้น

$$I_s = 0.09$$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดคือ

$$\frac{0.09 A}{4 A} = 0.0225 \text{ mm}^2$$

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ # AWG 34 (0.023mm²)

3.4 การออกแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์สวิตซ์ 4 ตัวในวงจรกำลังฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้งานวิจัยนี้ คือ มอสเฟสเบอร์ IREP460 มีพิกัดทนแรงดันได้สูงสุดคือ 500 V และทนกระแสได้ 20 A เนื่องจากแรงดันคิซีถึงค้จากแหล่งจ่ายมีขนาด 150 V จึงต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์ทนแรงดันได้สูง มอสเฟสเบอร์นี้มีแอนตี้พาราเลลไดโอดเพื่อคืนพลังงานในช่วงเวลาฟรีวีวป้องกันการเสียหายให้กับมอสเฟส จึงไม่จำเป็นต้องต่อฟรีวีลิ่งไดโอดภายนอกเพิ่มเติม ที่ขาแคทโอดและขาซอสของมอสเฟสต่อตัวเก็บประจุพร้อมไว้เพื่อให้เกิดการชอร์ฟสวิตซ์ขณะ turn off ดังแสดงในรูปที่ 3.5

หลักการเกิดชอร์ฟสวิตซ์ขณะ turn off ของมอสเฟสคือการทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟสยังคงเป็นศูนย์ในขณะที่กระแสไหลค้ที่ไหลผ่านมอสเฟสลดลงเป็นศูนย์ โดยใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสจากมอสเฟสไหลผ่าน C ในขณะที่มอสเฟสกำลัง turn off ค่าความต้านทานภายในมอสเฟสเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะนี้เสมือนเปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อม C จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ถูกชาร์จประจุโดยกระแสไหลค้ที่เคยไหลผ่านมอสเฟสและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟสเริ่มลดลงเพราะมีทิศทางการไหลเปลี่ยนไปที่ C แรงดันที่ตกคร่อม C เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟส ดังนั้นผลคูณกระแสกับแรงดันที่มอสเฟสซึ่งเป็นกำลังสูญเสีย (P_{loss}) จึงลดลงแสดงในรูปที่ 3.5 สมการในคำนวณหาค่า C ใช้สมการ (3.4)

$$C_s = \frac{I_{load} \times t_{yf}}{2 \times V_{dc}} \quad (3.4)$$

เมื่อ C_s = ค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดซอร์ฟสวิทช์ (F)
 I_{load} = กระแสโหลดที่ไหลผ่านมอสเฟส (A)
 t_{yf} = ช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์ (sec)
 V_{dc} = แรงดันดีซี-ลิง

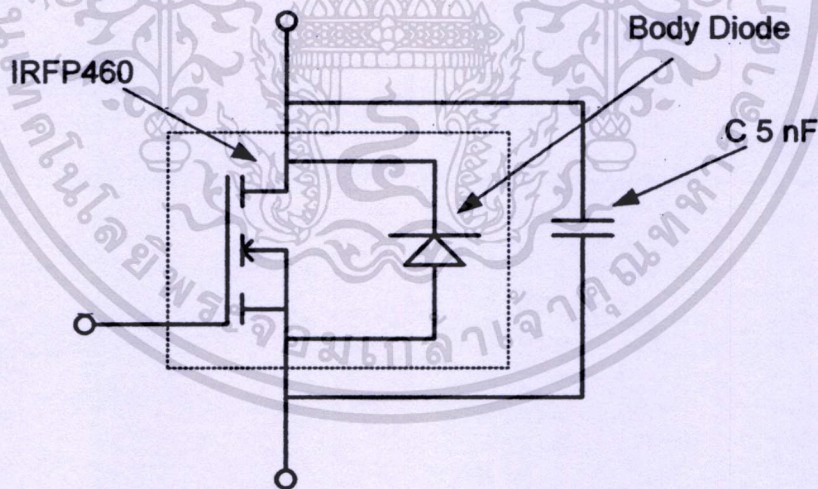
กำหนดช่วงเวลา (t_{yf}) เพื่อใช้ในการคำนวณค่า C_s โดยดูจากช่วงเวลาแคโทดไทม์ (t_{DT}) ของมอสเฟสที่ความถี่ใช้งานสูงสุดคือ 25 kHz คาบเวลาใน 1 ลูกคลื่นเท่ากับ 10 s กำหนดแคโทดไทม์เท่ากับ 5% ของลูกคลื่น เพราะฉะนั้น t_{yf} เท่ากับ คาบเวลา 1 ลูกคลื่นคูณกับช่วงเวลาแคโทดไทม์ ได้ 0.5 us กระแสโหลด (I_{load}) จากหัวข้อที่ผ่านมาเท่ากับ 3 A แรงดันดีซี-ลิงเท่ากับ 150 V แทนค่าในสมการได้

$$C_s = \frac{3 \times 0.5 \times 10^{-6}}{2 \times 150}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_s = 5 \text{ nF}$$

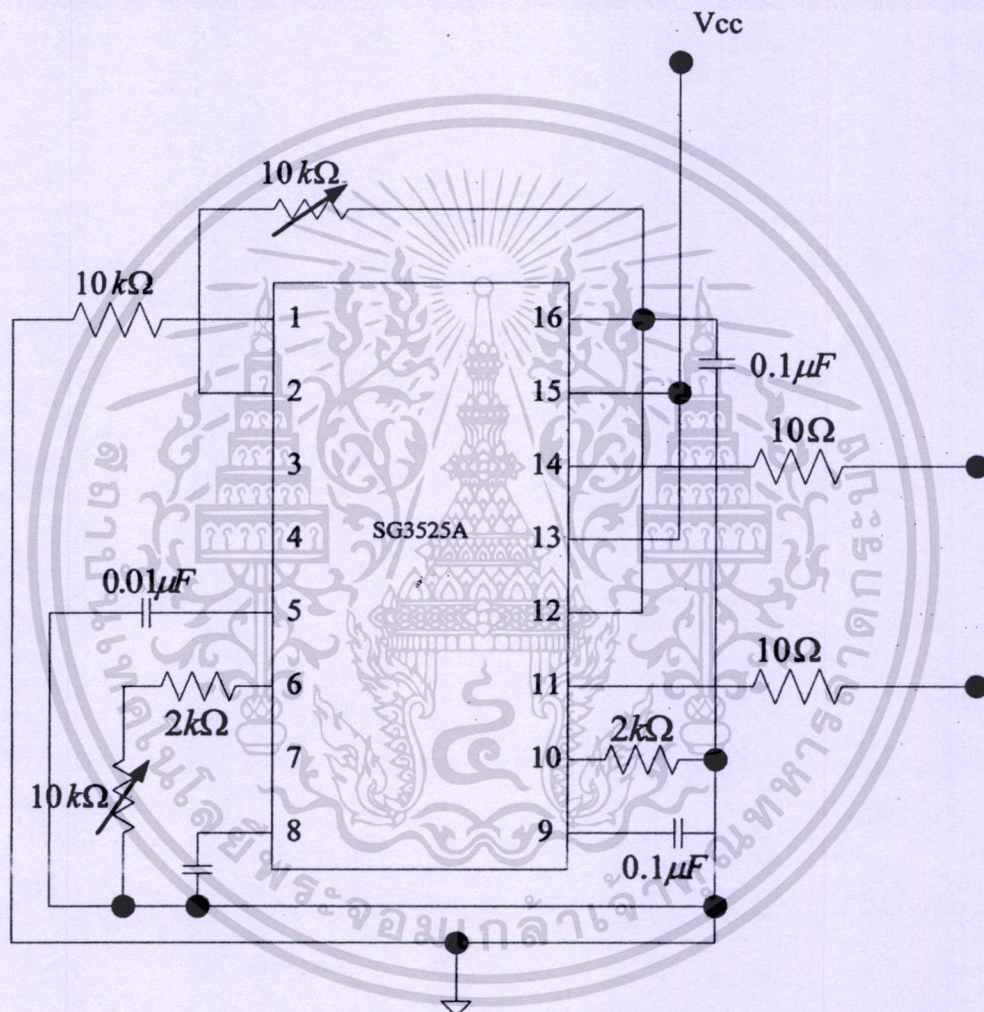
ดังนั้นเลือกใช้ C_s เท่ากับ 5 nF



รูปที่ 3.5 มอสเฟสเบอร์ IRFP460 ต่อพร้อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 5 nF

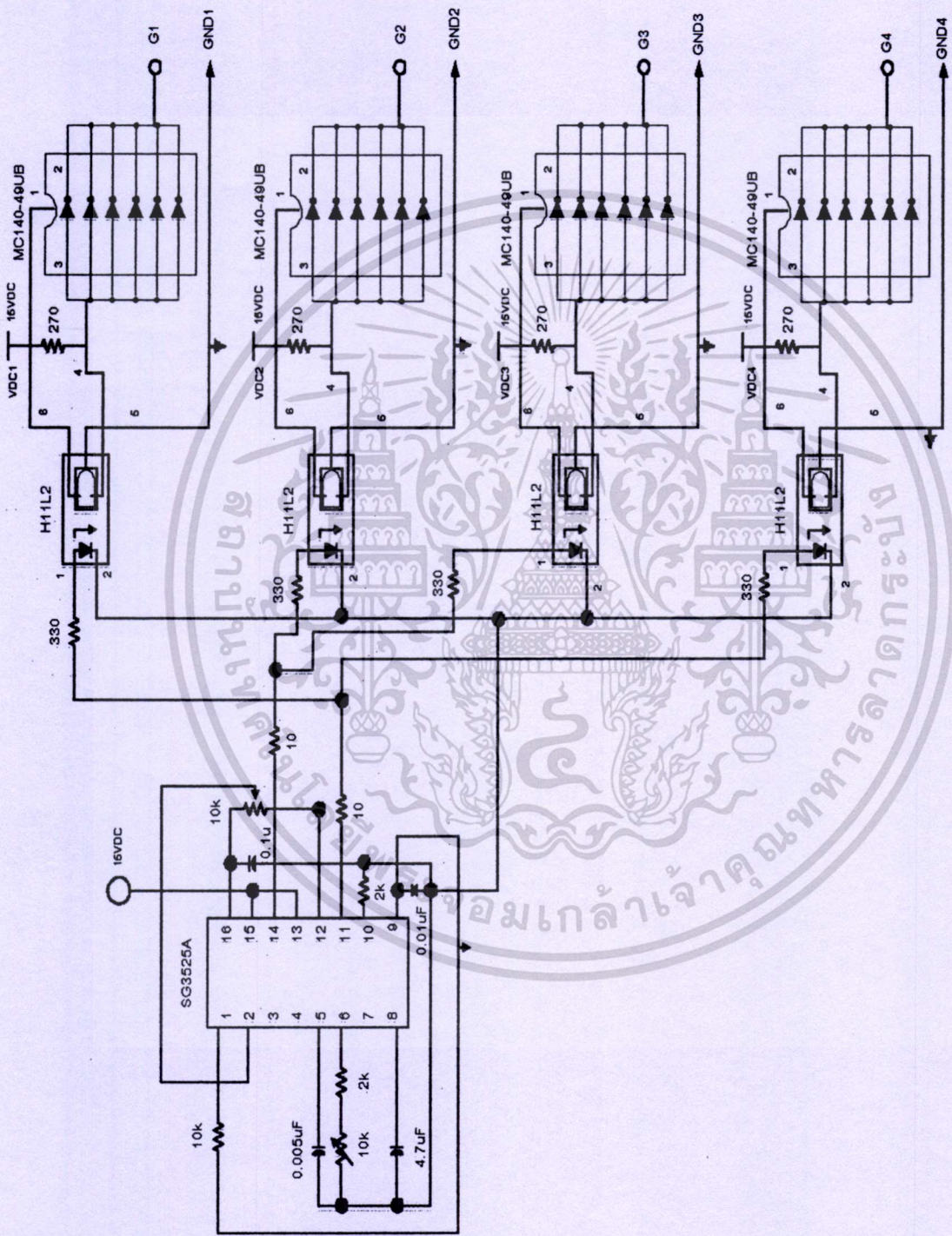
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุตัวเดียวต่อคร่อมมอสเฟตดีกว่าการต่อแบบ RCD Snubber คือ ไม่มีกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานและไดโอดสับเบอร์ ประหยัดอุปกรณ์โดยที่หลักการทำงานยังเหมือนกับ RCD Snubber



รูปที่ 3.6 วงจรสร้างสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรแยกกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

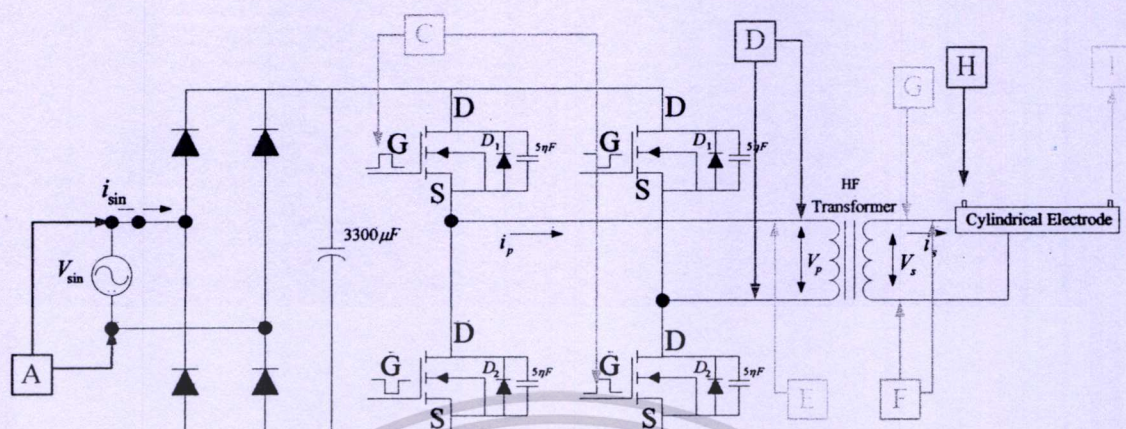
การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเป็นเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยการวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างและทำการเก็บผลทางเคมีโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ ผลอัตราการเกิดอัตราการเกิด ไอโซนพร้อมทั้งวัดแรงดันและกระแสและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินและเอาต์พุทของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่อง

4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนซึ่งวงจรแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะจ่ายแรงดันอินพุทเท่ากับ 110 V ความถี่ 25 kHz แรงดันด้านเอาต์พุท 5kVp คงที่ และทำการปรับอัตราการไหลของอากาศโดย Flow meter โดยปรับครั้งละ 5ลิตรต่อนาที โดยที่ความยาวแท่ง 30 ซม.ที่ แกปอากาศ 0.1 ซม.จะปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 20 ลิตรจนถึง 65 ลิตรต่อนาที ที่แกปอากาศ 0.25 ซม.จะปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 85 ลิตรจนถึง 130 ลิตรต่อนาที ที่แกปอากาศ 0.4 ซม.จะปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 145 ลิตรจนถึง 190 ลิตรต่อนาที ที่ความยาวแท่ง 60 ซม.ที่แกปอากาศ 0.1 ซม.จะปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 40 ลิตรจนถึง 85 ลิตรต่อนาที ที่แกปอากาศ 0.25 ซม.จะปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 135 ลิตรจนถึง 130 ลิตรต่อนาที ที่แกปอากาศ 0.4 ซม.จะปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 215 ลิตรจนถึง 260 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บผลของ กระแสและแรงดันทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์และเก็บผลของแรงดันและกระแสที่โหลดเพื่อดูปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแส เมื่อทำการปรับองค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้น ค่าแรงดันที่โหลดจะใช้ C-Divider เป็นตัววัดเนื่องจากแรงดันด้าน โหลดจะมีค่าสูงโดยเรโซจะอยู่ที่ 1:100 จากนั้นทำการจำลองการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 4.128



รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซนและตำแหน่งของการวัดค่าทางไฟฟ้า
ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดค่าที่ต้องการวัดตามรูปที่ 4.1

ตำแหน่ง	รายละเอียด
A	วัดค่าแรงดันอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะ ไม่มีโหลดและมีโหลด
B	วัดกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะ ไม่มีโหลดและมีโหลด
C	วัดสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้ขามกของมอสเฟส ขณะ ไม่มีโหลดและมีโหลด
D	วัดแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะ ไม่มีโหลดและมีโหลด
E	วัดกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะมีโหลด
F	วัดแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ขณะ ไม่มีโหลดและมีโหลด
G	วัดกระแสเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ขณะมีโหลด
H	วัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าแท่งอิเล็กโตรด
I	วัดอัตราการเกิดไอโซนจากการใช้สาร ไตรเตท

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อกำหนดและเงื่อนไขในการทดสอบ

ลำดับ	รายละเอียด
1	ปรับแรงดันด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ที่ 110 Vac 50 Hz
2	กำหนดความยาวแท่งอิเล็กโตรดที่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม.
3	กำหนดช่องแก้อากาศของแท่งอิเล็กโตรดที่ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.
4	ปรับอัตราการไหลของอากาศที่ละ 5 ลิตรต่อนาที
5	ทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จะใช้ความถี่ที่ 25 kHz
6	รักษาค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้แท่งอิเล็กโตรดให้คงที่ โดยการรักษาระดับแรงดันที่จ่ายให้แท่งอิเล็กโตรดให้คงที่ ที่ 5 kVp

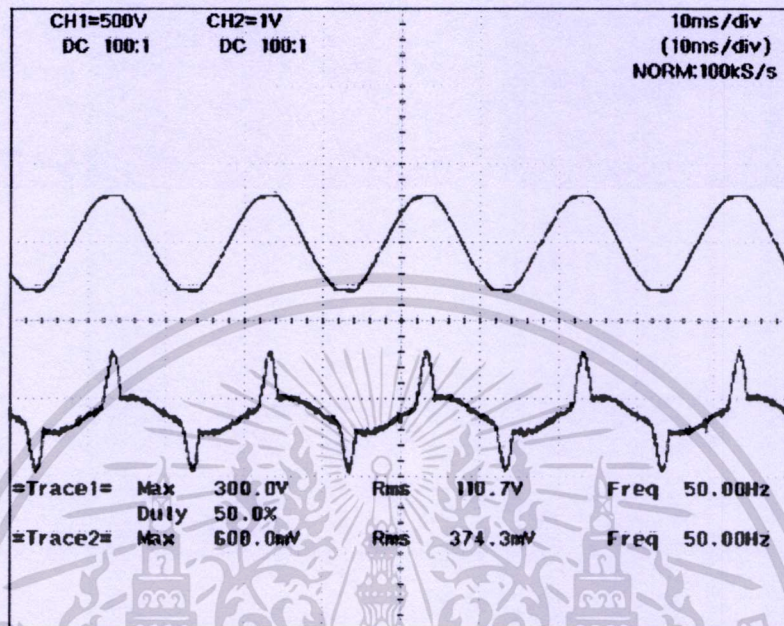
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดการเก็บค่าการทดลอง

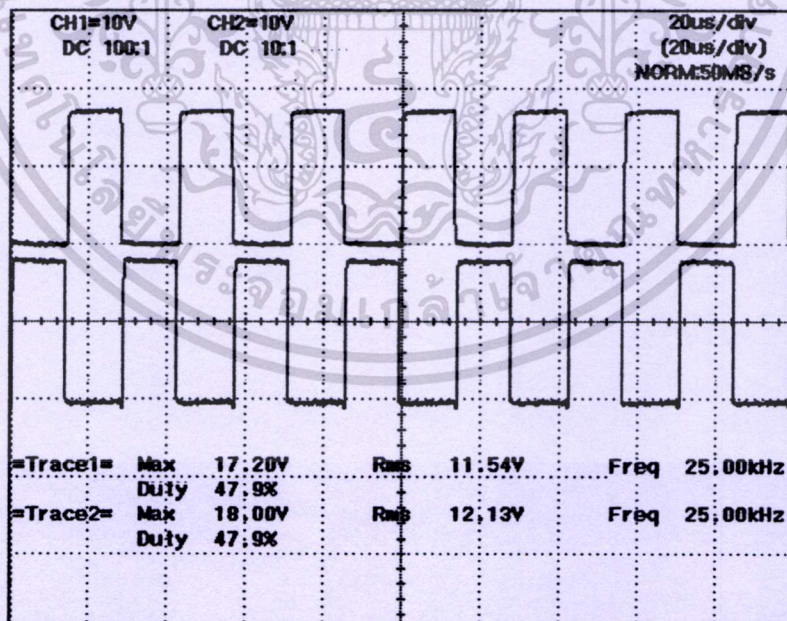
ความยาวแท่ง อิเล็กโทรด (ซม.)	ช่องแคบอากาศของ แท่งอิเล็กโทรด (ซม.)	รายละเอียด
30	0.1	-ปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 20 – 65 ลิตรต่ออนาที -วัดสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับขาทกของมอสเฟส ดังรูปที่ (4.6), (4.10), (4.14), (4.18), (4.22), (4.26), (4.30), (4.34), (4.38), (4.42)
	0.25	-วัดแรงดัน กระแสทางด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.7), (4.11), (4.15), (4.19), (4.23), (4.27), (4.31), (4.35), (4.39), (4.43)
	0.4	-วัดแรงดัน กระแสทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.8), (4.12), (4.16), (4.20), (4.24), (4.28), (4.32), (4.36), (4.40), (4.44)
60	0.1	-ปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 40 – 85 ลิตรต่ออนาที -วัดสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับขาทกของมอสเฟส ดังรูปที่ (4.46), (4.50), (4.54), (4.58), (4.62), (4.66), (4.70), (4.74), (4.78), (4.82)
	0.25	-วัดแรงดัน กระแสทางด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.47), (4.51), (4.55), (4.59), (4.63), (4.67), (4.71), (4.75), (4.79), (4.83)
	0.4	-วัดแรงดัน กระแสทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.48), (4.52), (4.56), (4.60), (4.64), (4.68), (4.72), (4.76), (4.80), (4.84)
90	0.1	-ปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 65 – 110 ลิตรต่ออนาที -วัดสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับขาทกของมอสเฟส ดังรูปที่ (4.86), (4.90), (4.94), (4.98), (4.102), (4.106), (4.110), (4.115), (4.119), (4.123)
	0.25	-วัดแรงดัน กระแสทางด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.87), (4.91), (4.95), (4.99), (4.103), (4.107), (4.112), (4.116), (4.120), (4.124)
	0.4	-วัดแรงดัน กระแสทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.88), (4.92), (4.96), (4.100), (4.104), (4.108), (4.113), (4.117), (4.121), (4.125)
		-วัดแรงดัน กระแสทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ (4.89), (4.93), (4.97), (4.101), (4.105), (4.109), (4.114), (4.118), (4.122), (4.126)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดสัญญาณทางไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

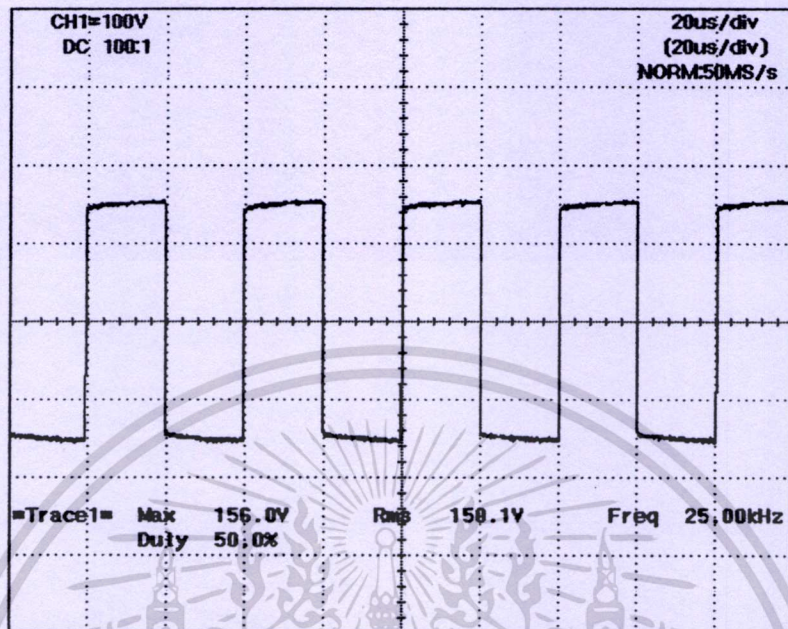


รูปที่ 4.2 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ 110 V 50 Hz ขณะไม่มีโหลด

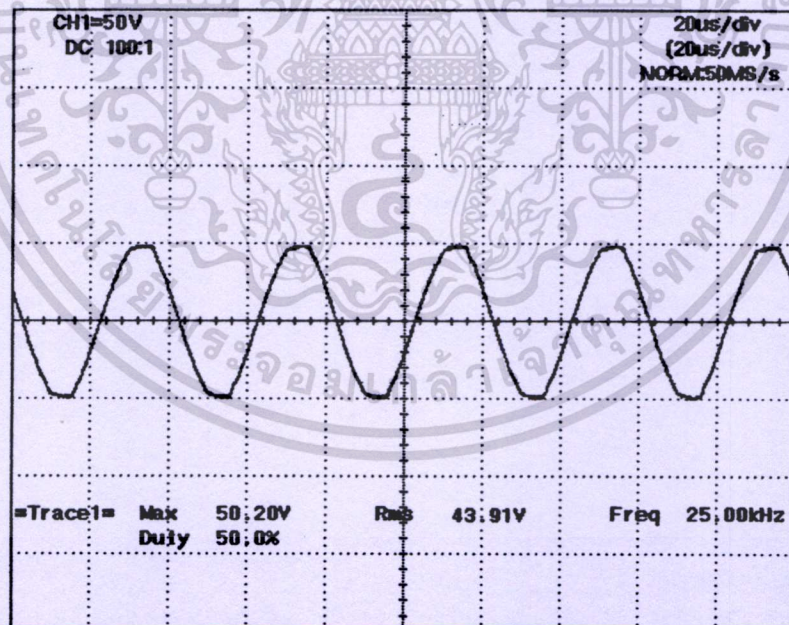


รูปที่ 4.3 สัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้จากเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 25 kHz ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 4.5 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความถี่ 25 kHz ขณะไม่มีโหลด

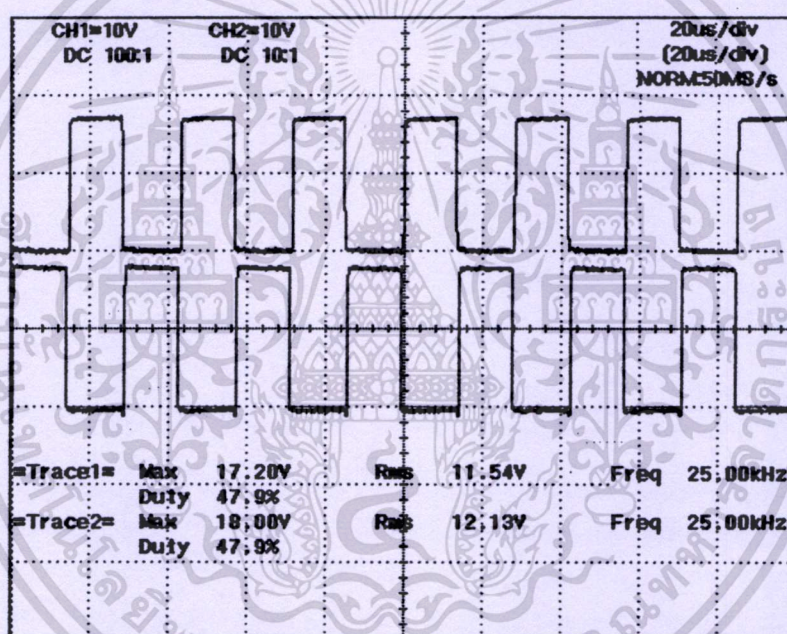
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 – 4.5 เป็นสัญญาณของคอนเวอร์เตอร์ทำงานขณะไม่มีโหลดทำให้กระแสทางด้านอินพุทคอนเวอร์เตอร์มีค่าน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนรูปที่ 4.4 เป็นสัญญาณเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์มีค่าแรงดันเท่ากับ 150 V เนื่องจากกำหนดให้แรงดันทางด้านอินพุทคอนเวอร์เตอร์เท่ากับ 110 V คงที่ ส่วนแรงดันด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงจะกำหนดให้มีค่าที่เท่ากับ 5 kVp แสดงตามรูปที่ 4.5 เพื่อกำหนดค่าของสนามไฟฟ้า (E) ให้มีค่าคงที่

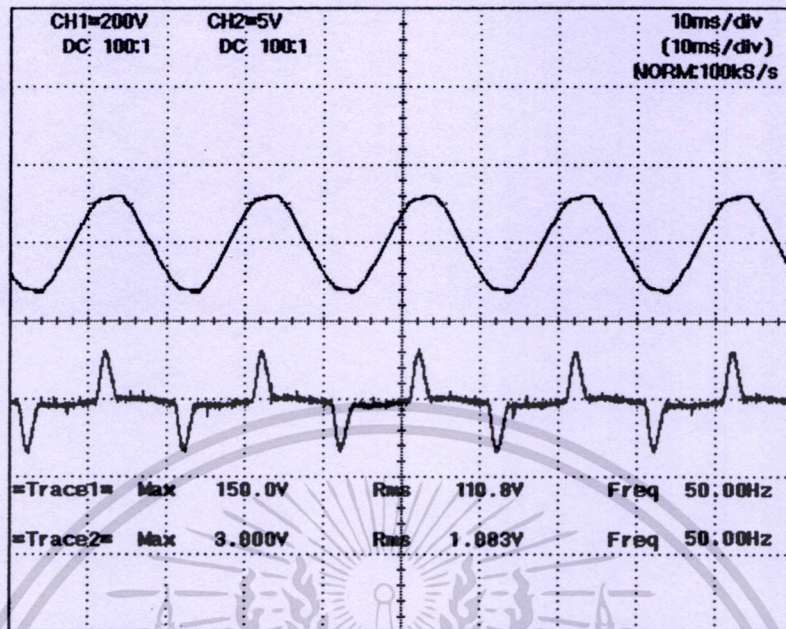
วัดสัญญาณทางไฟฟ้าขณะมีโหลด

ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 30 ซม.

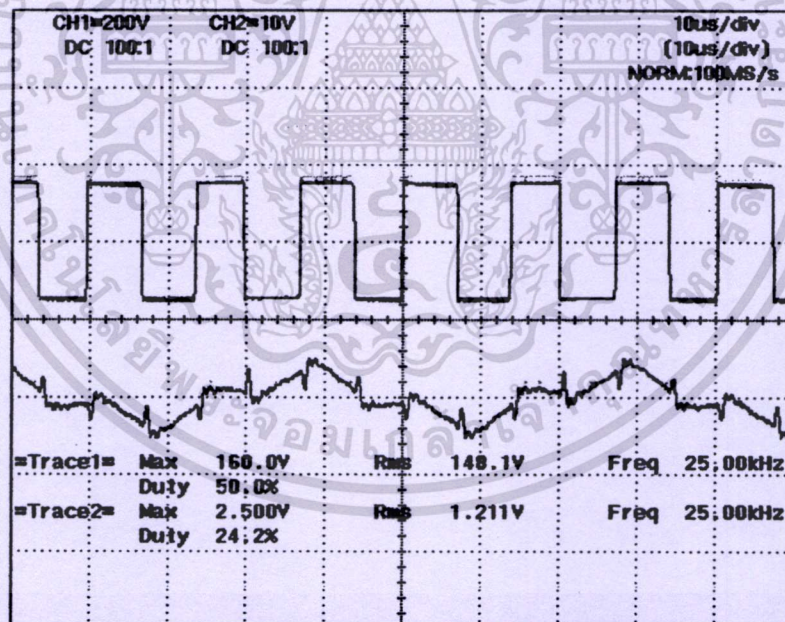
- ที่อัตราการไหลของอากาศ 20 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.6 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

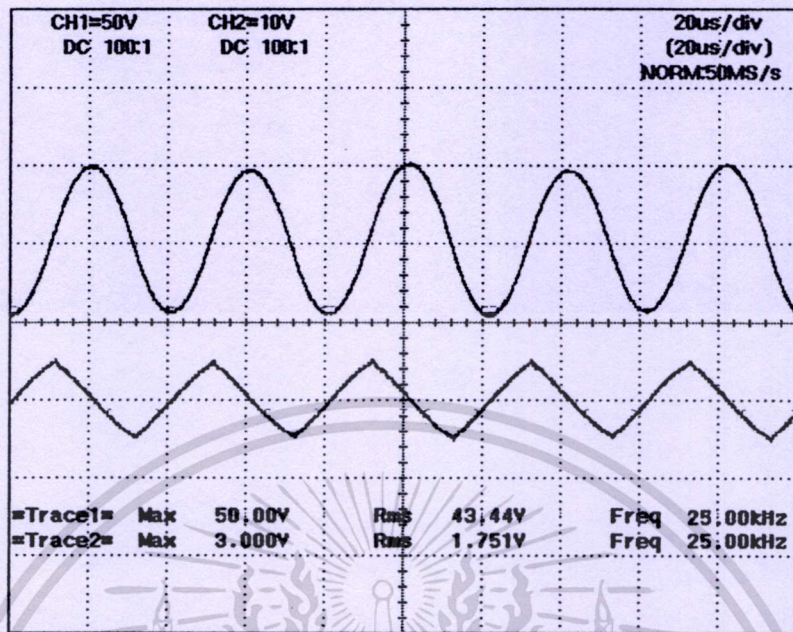


รูปที่ 4.7 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



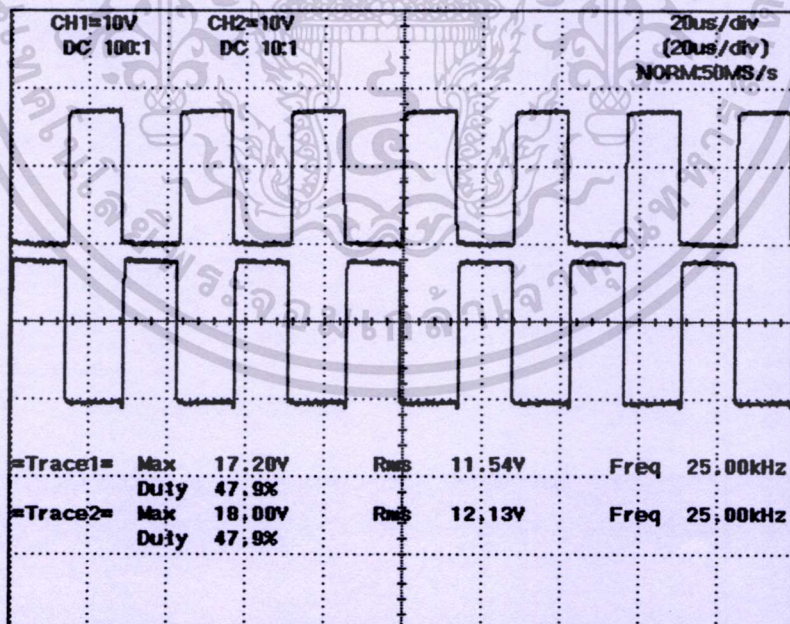
รูปที่ 4.8 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



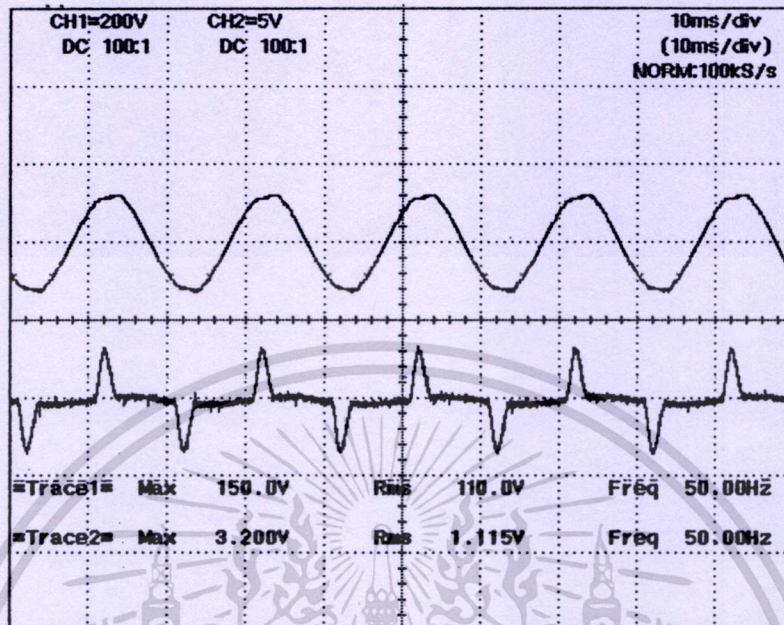
รูปที่ 4.9 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 25 ลิตรต่อนาที

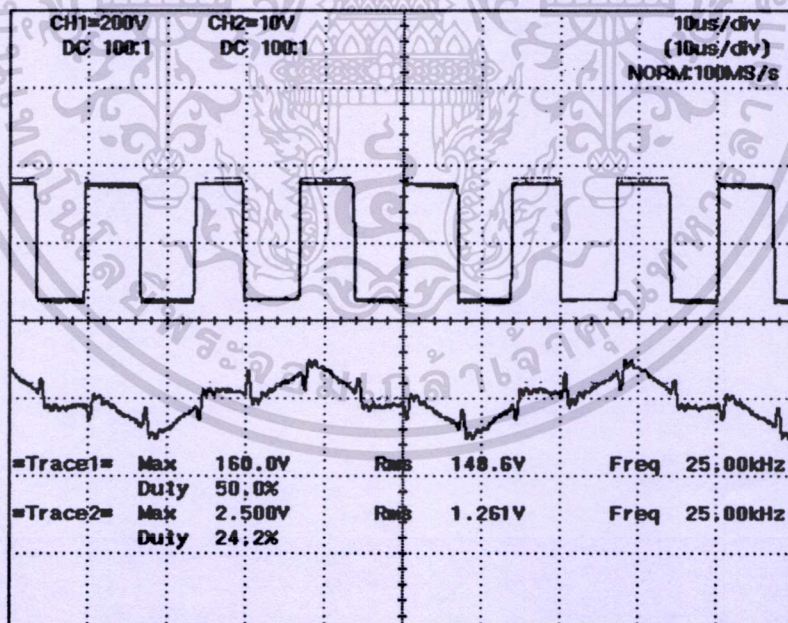


รูปที่ 4.10 สัญญาณพัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

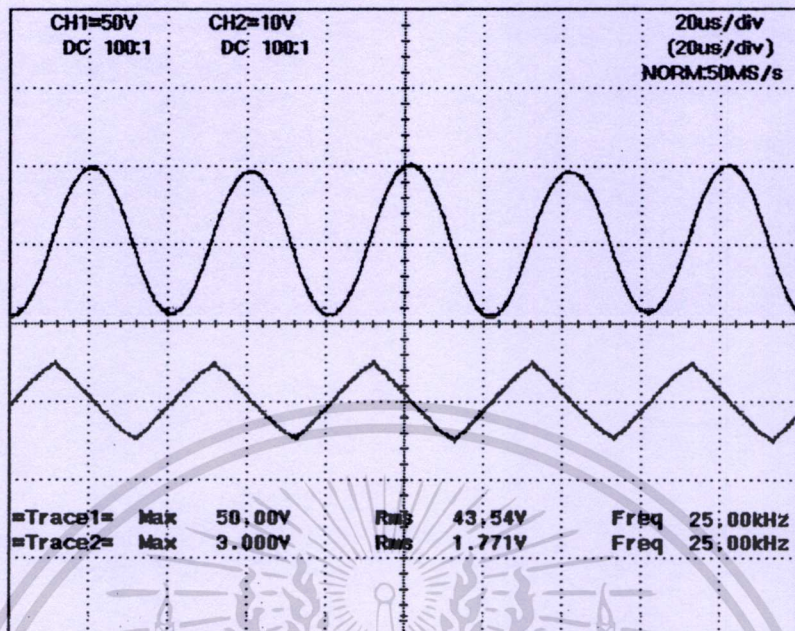


รูปที่ 4.11 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



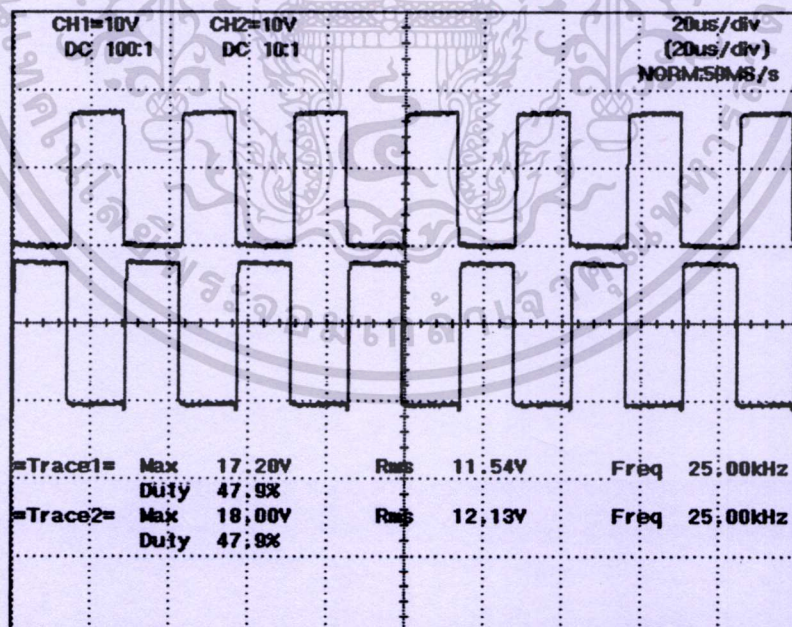
รูปที่ 4.12 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



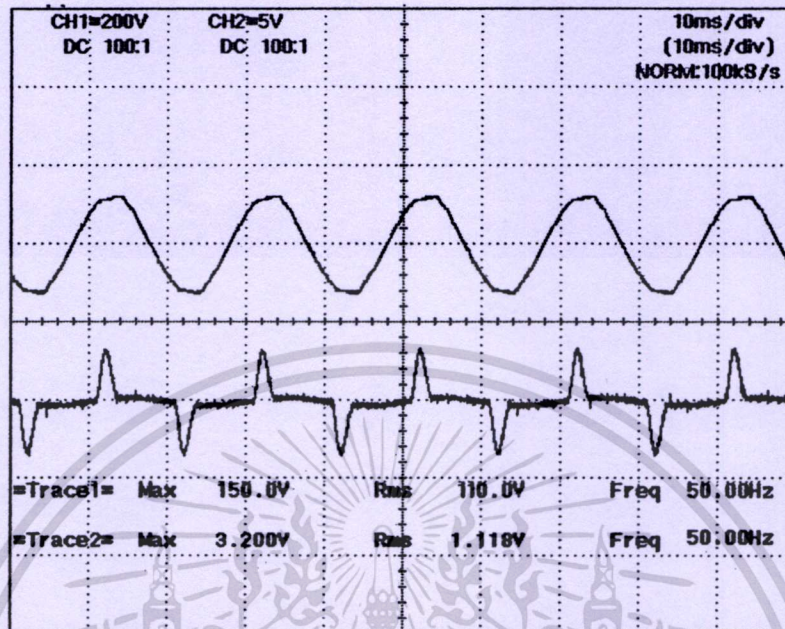
รูปที่ 4.13 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่พ่วง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 30 ลิตรต่อนาที

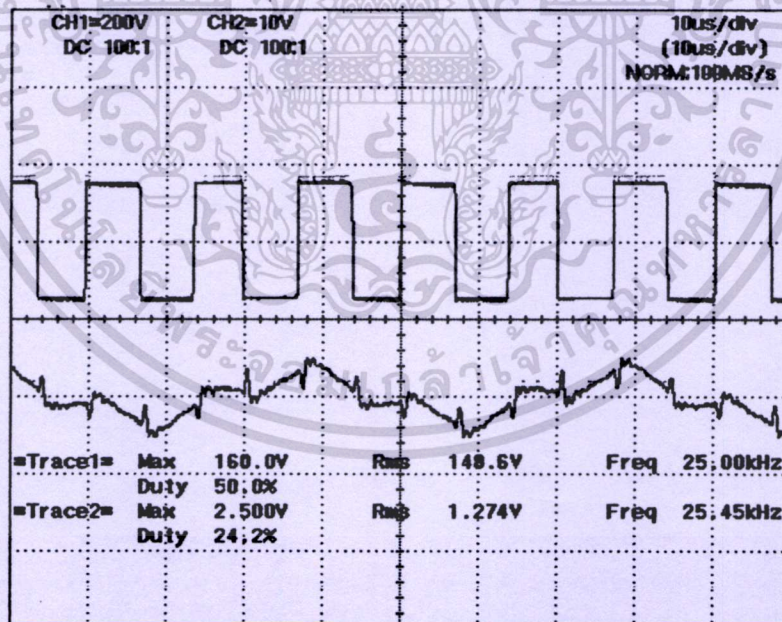


รูปที่ 4.14 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาแกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

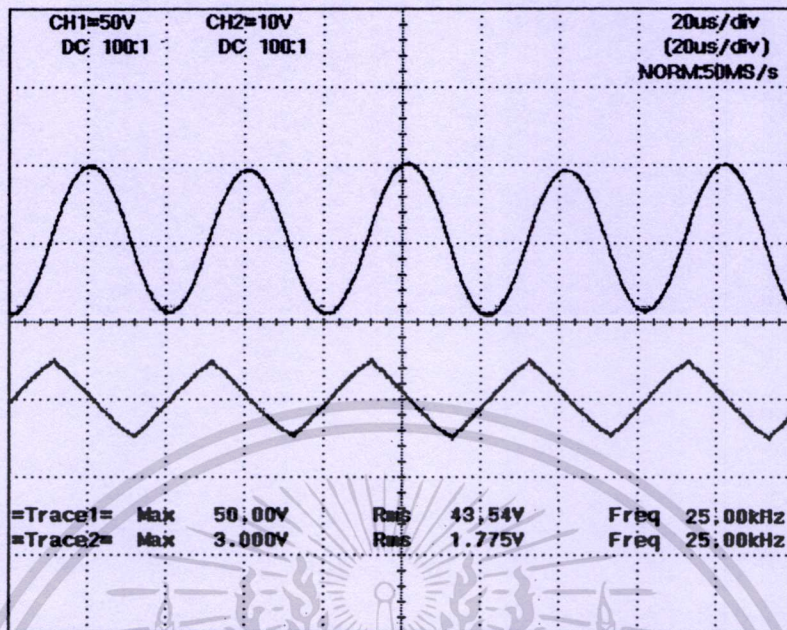


รูปที่ 4.15 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



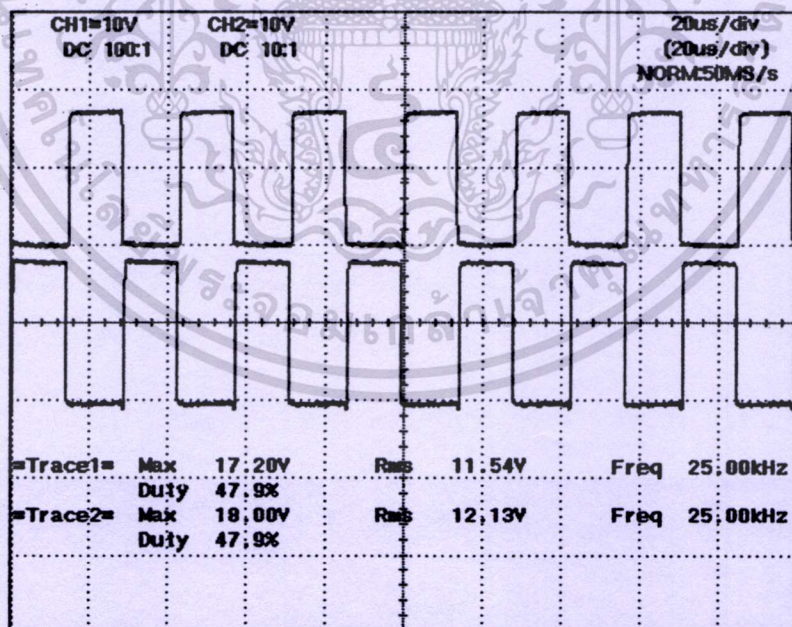
รูปที่ 4.16 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



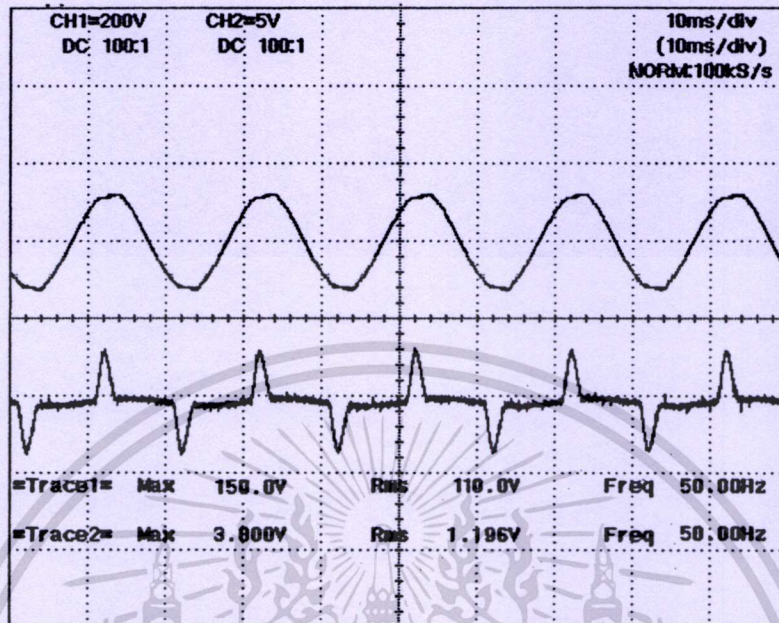
รูปที่ 4.17 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่โหลดเปลี่ยนแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 35 ลิตรต่อนาที

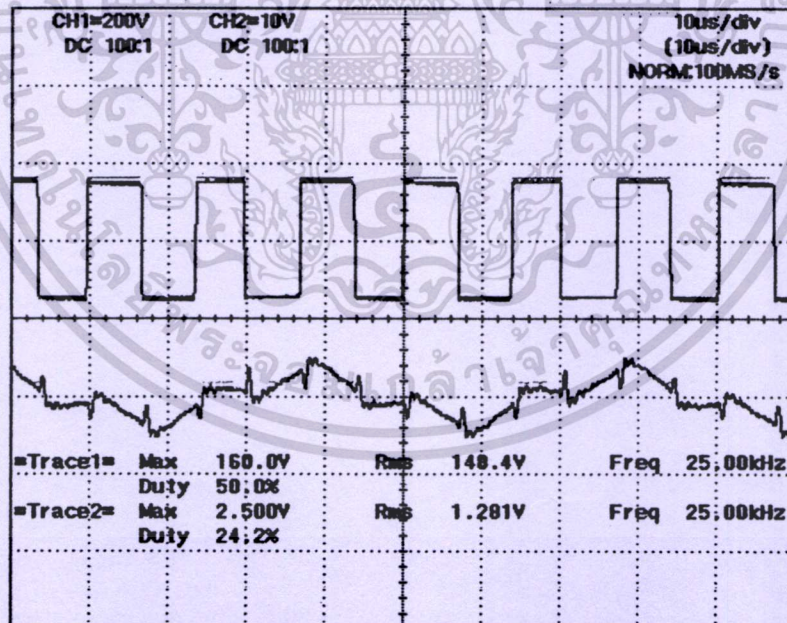


รูปที่ 4.18 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

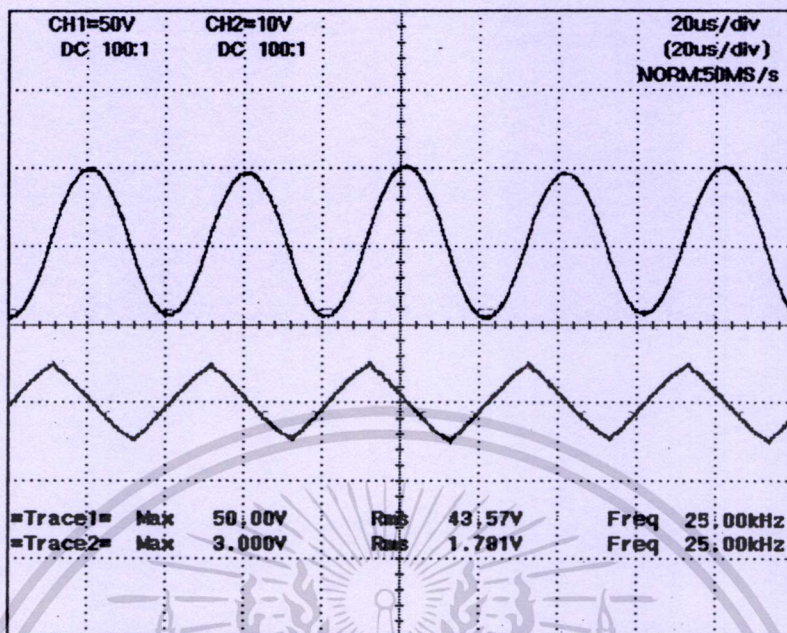


รูปที่ 4.19 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



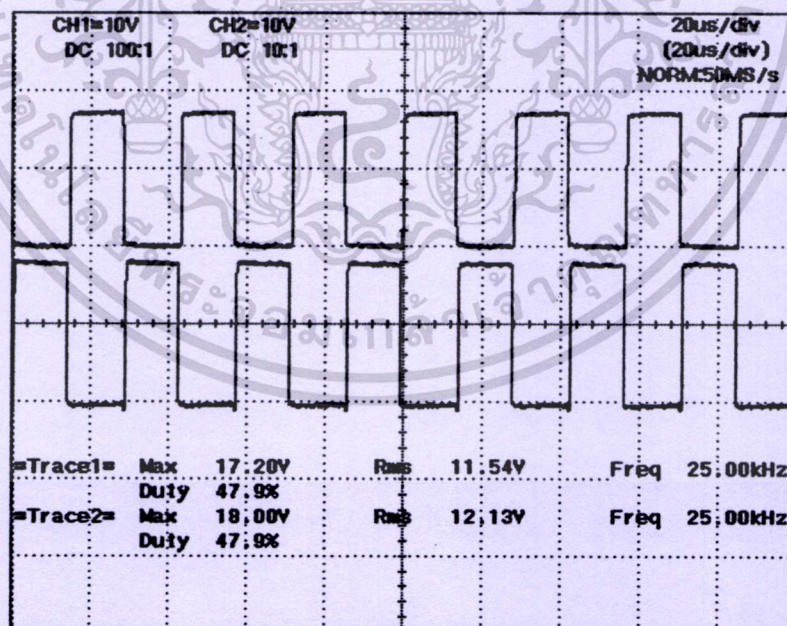
รูปที่ 4.20 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



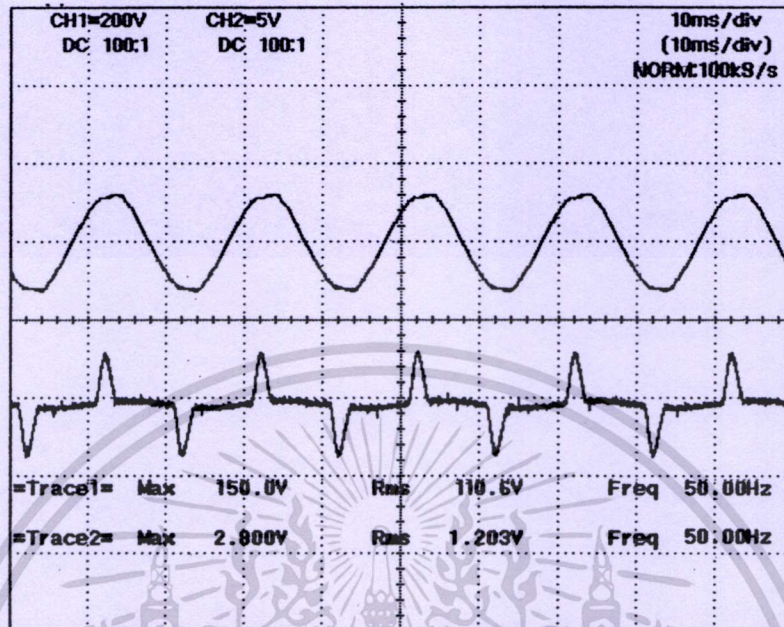
รูปที่ 4.21 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที

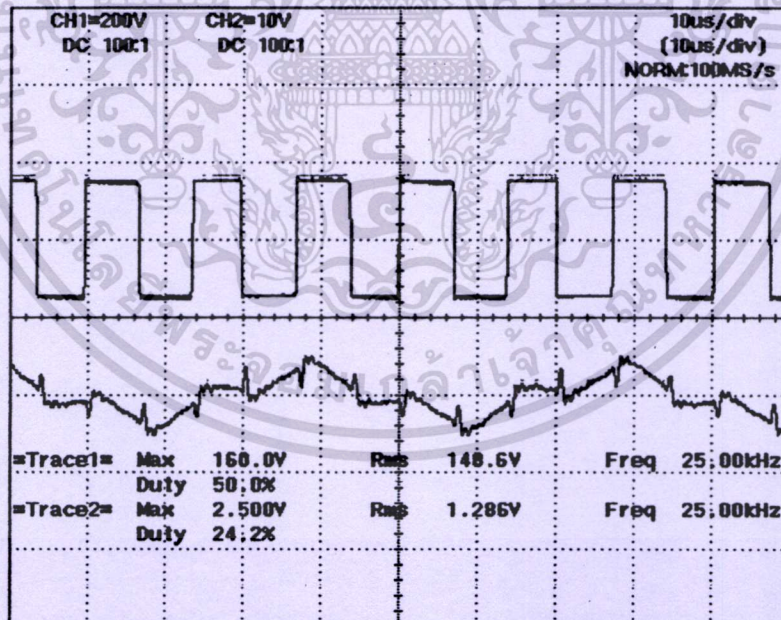


รูปที่ 4.22 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

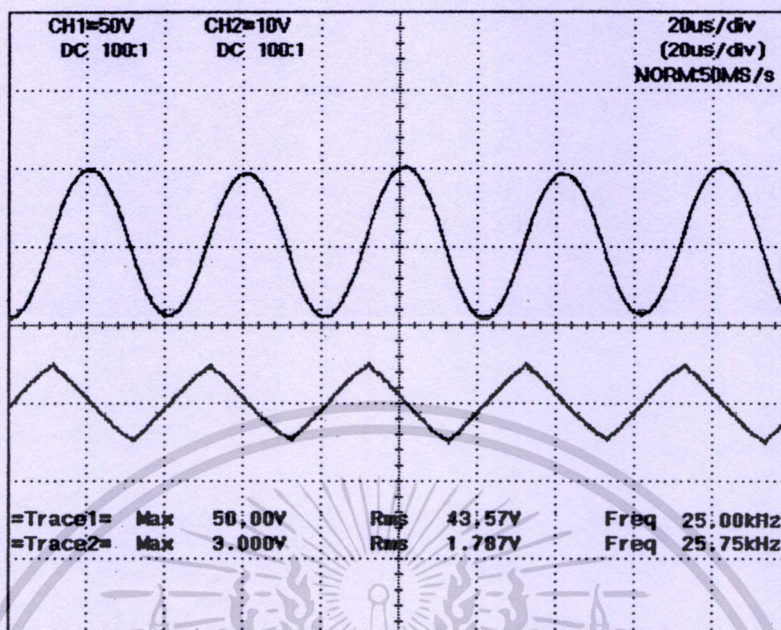


รูปที่ 4.23 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



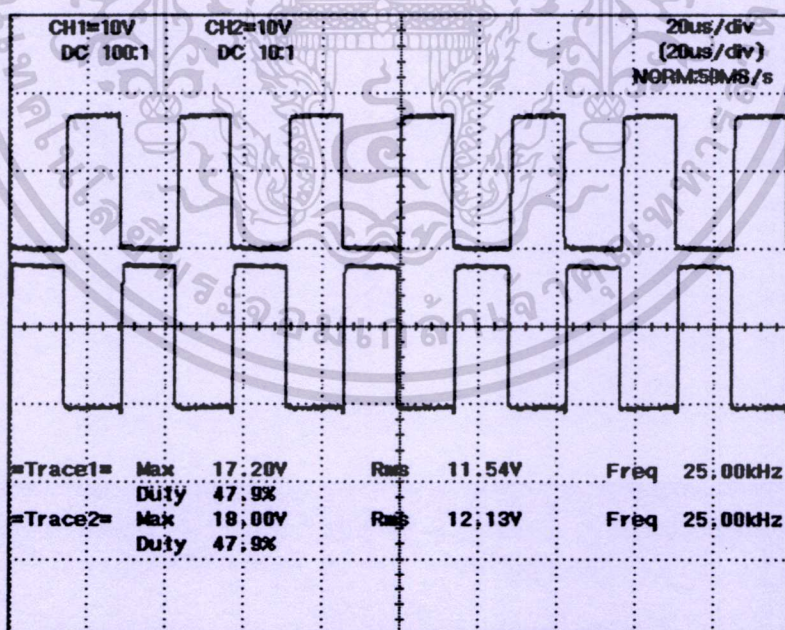
รูปที่ 4.24 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



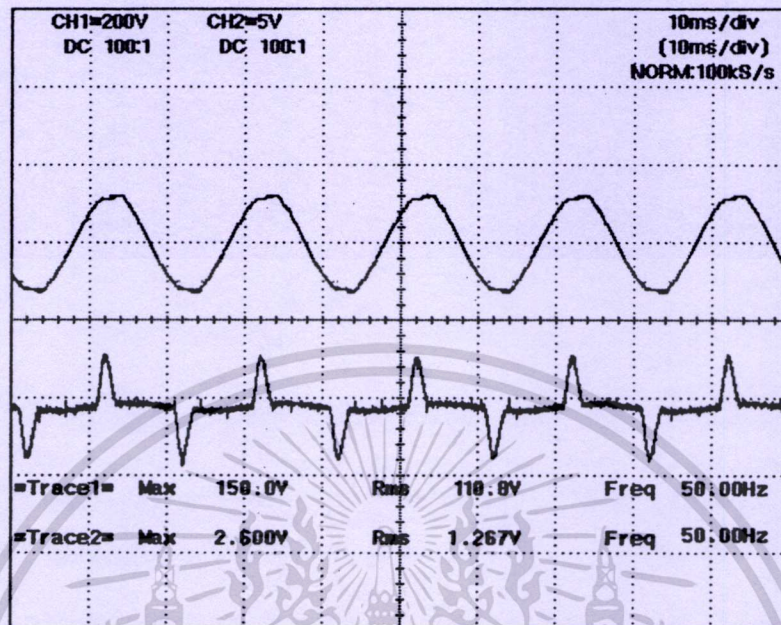
รูปที่ 4.25 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 45 ลิตรต่อนาที

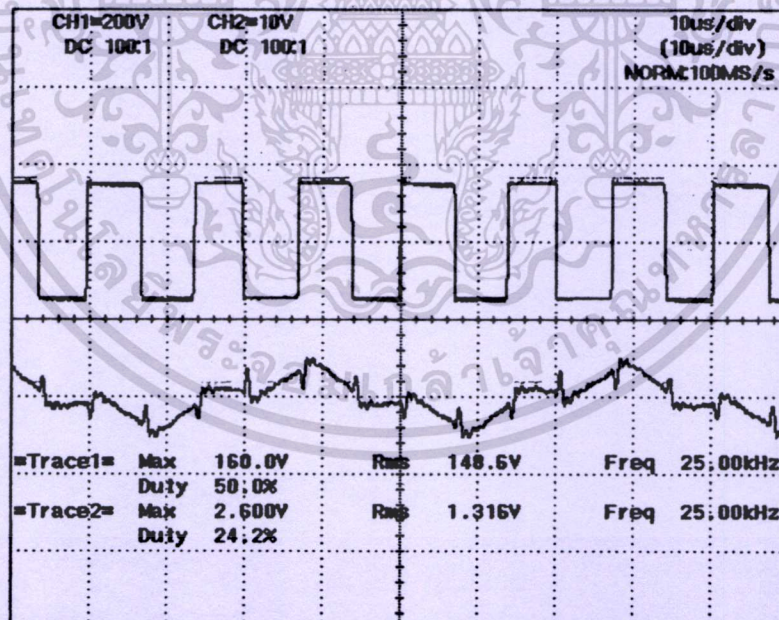


รูปที่ 4.26 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

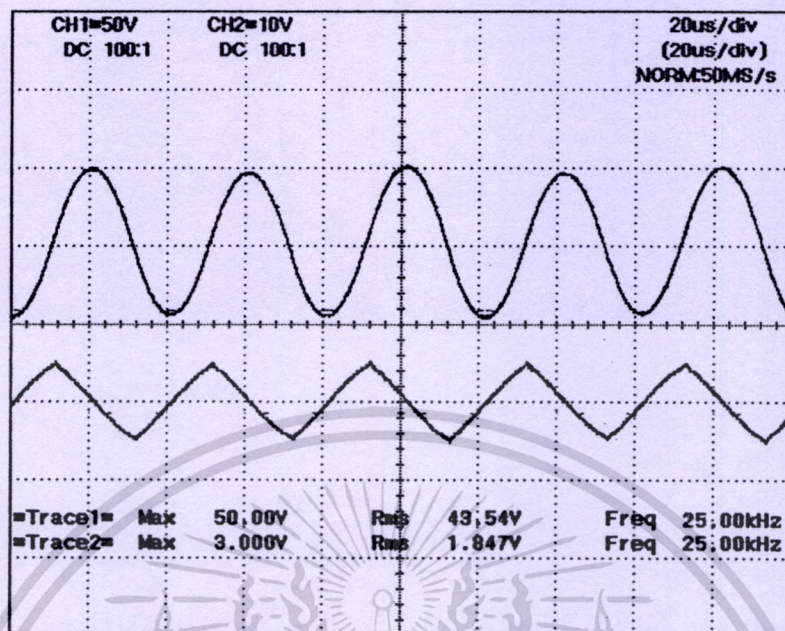


รูปที่ 4.27 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



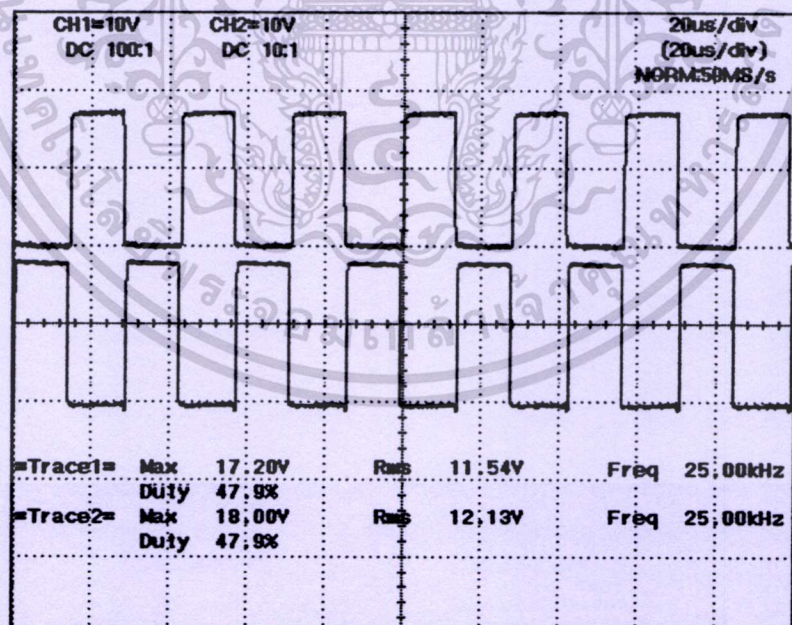
รูปที่ 4.28 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



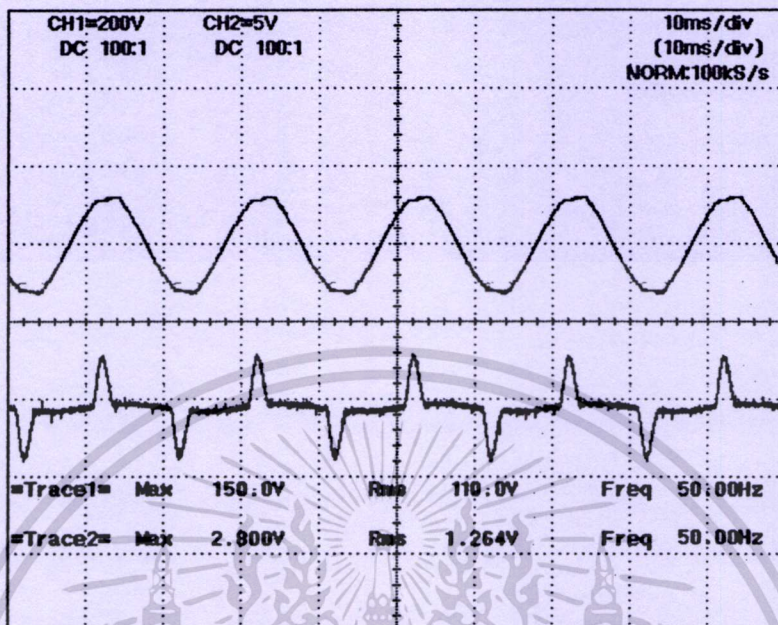
รูปที่ 4.29 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 ลิตรต่อนาที

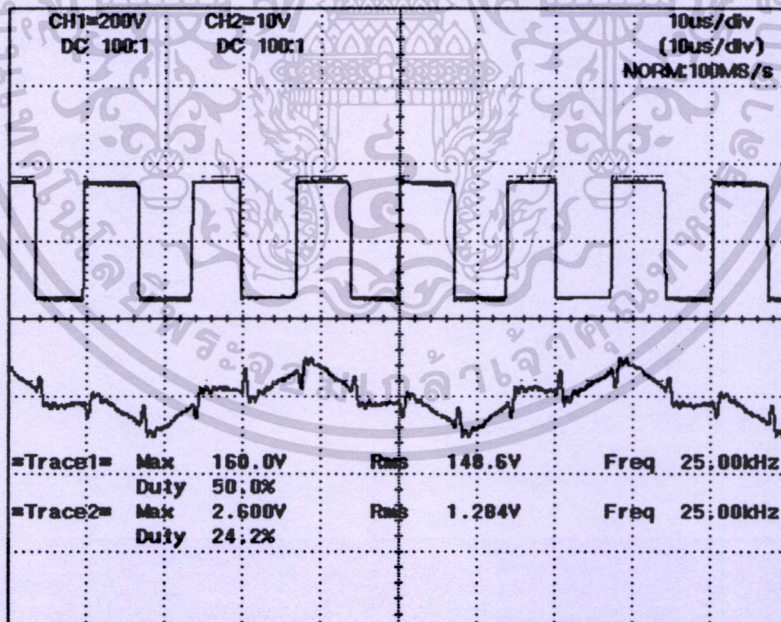


รูปที่ 4.30 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

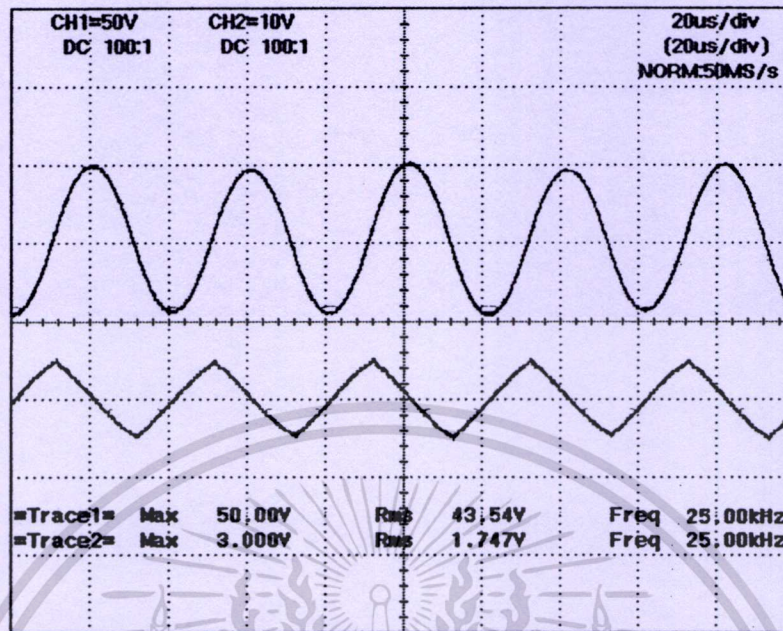


รูปที่ 4.31 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



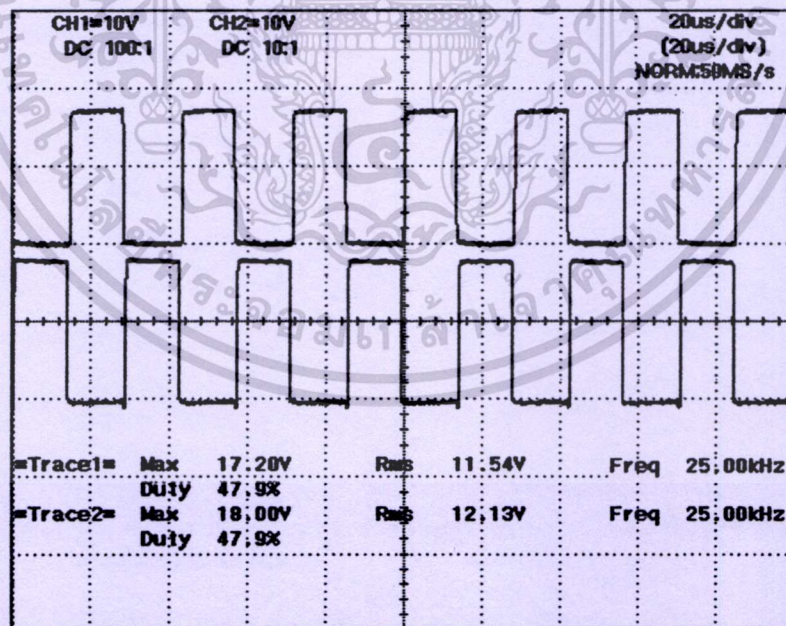
รูปที่ 4.32 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



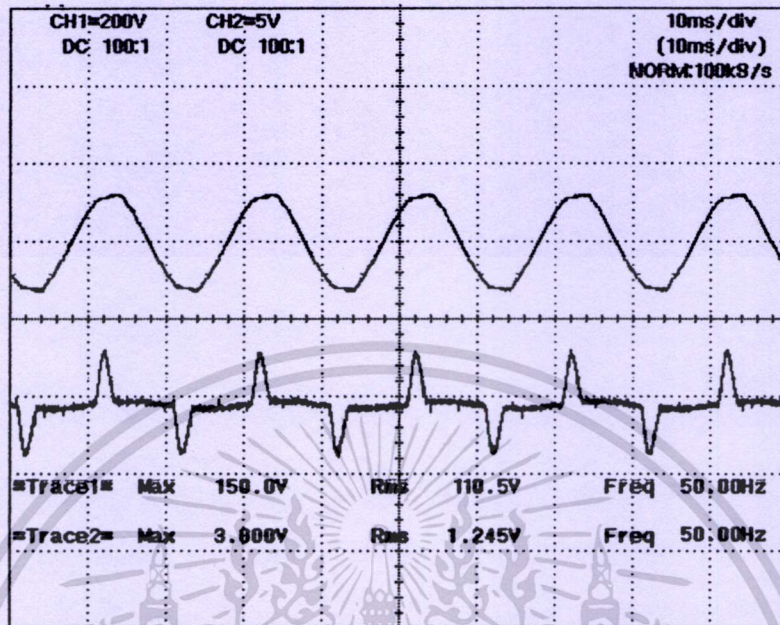
รูปที่ 4.33 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ปรับ

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 55 ลิตรต่อนาที

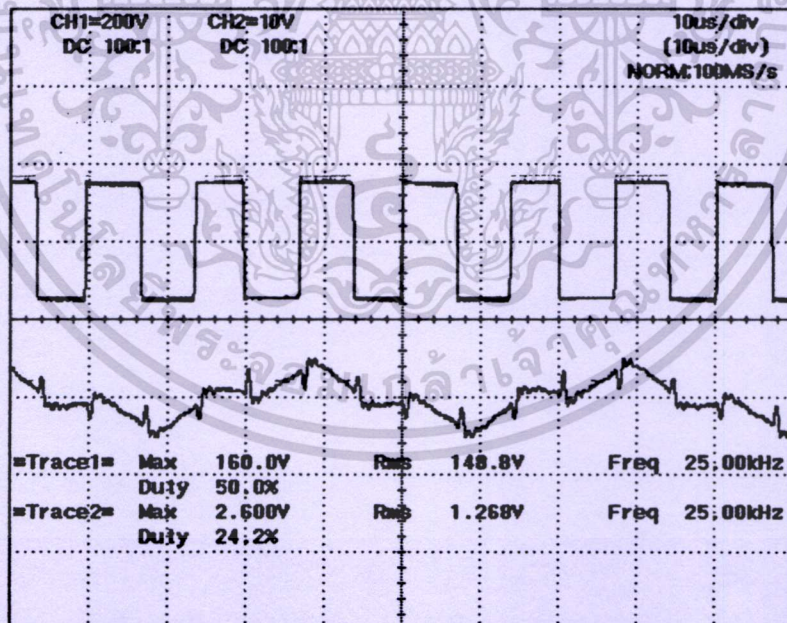


รูปที่ 4.34 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

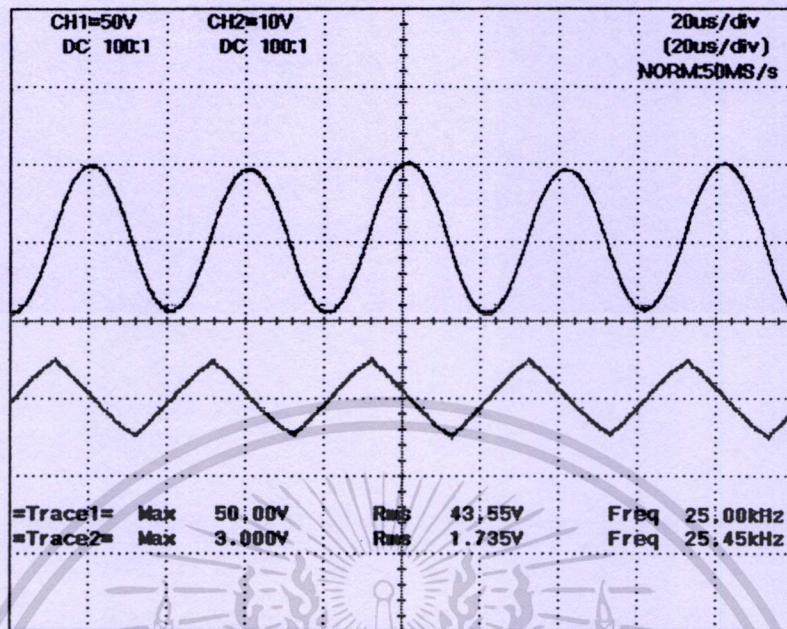


รูปที่ 4.35 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



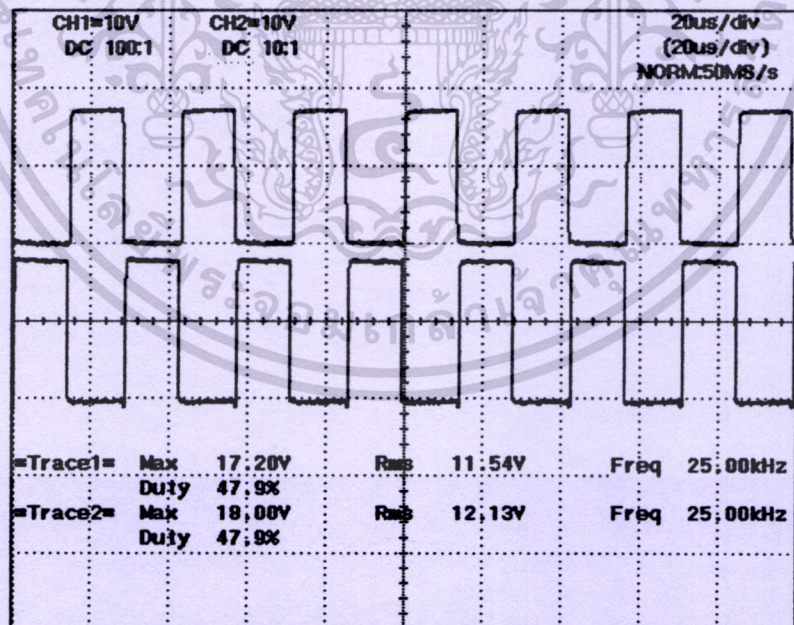
รูปที่ 4.36 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



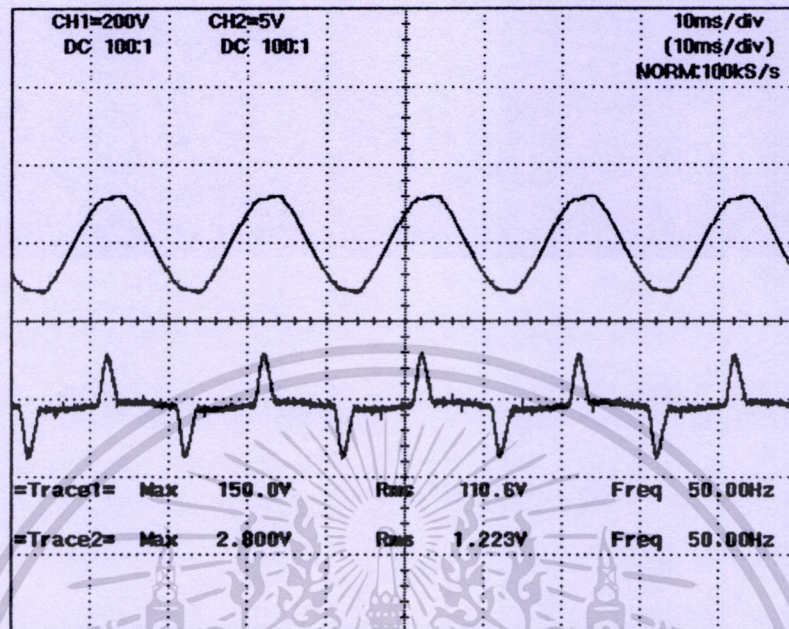
รูปที่ 4.37 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่โหลดเปลี่ยนแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 60 ลิตรต่อนาที

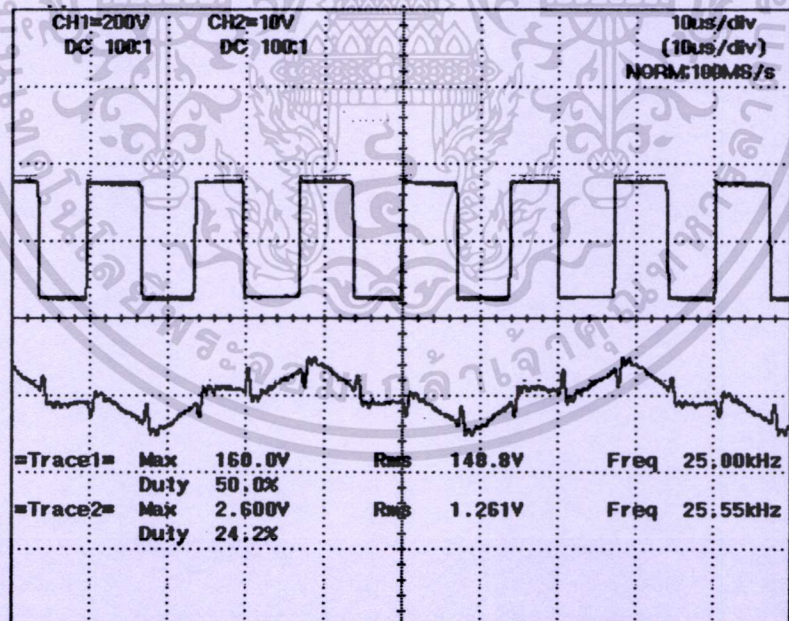


รูปที่ 4.38 สัญญาณพัลส์ ที่จ่ายให้จากเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

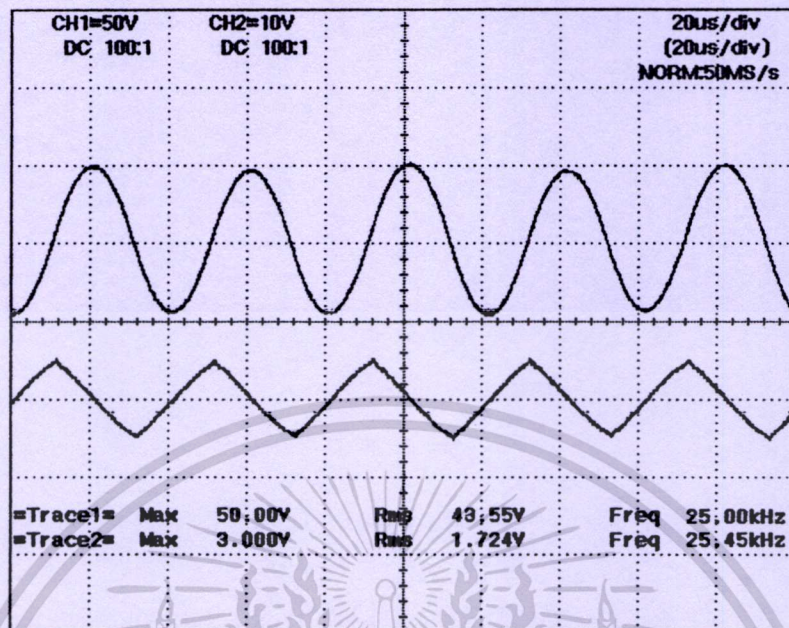


รูปที่ 4.39 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



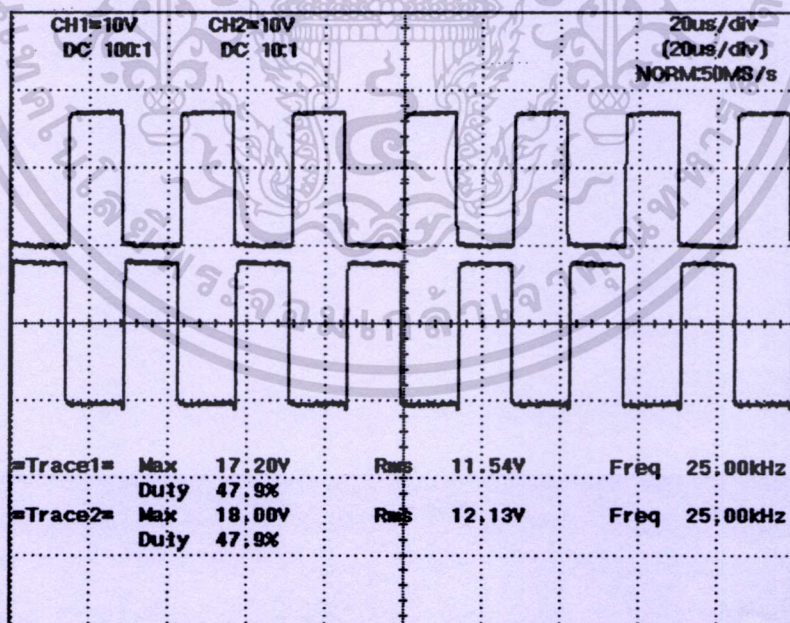
รูปที่ 4.40 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



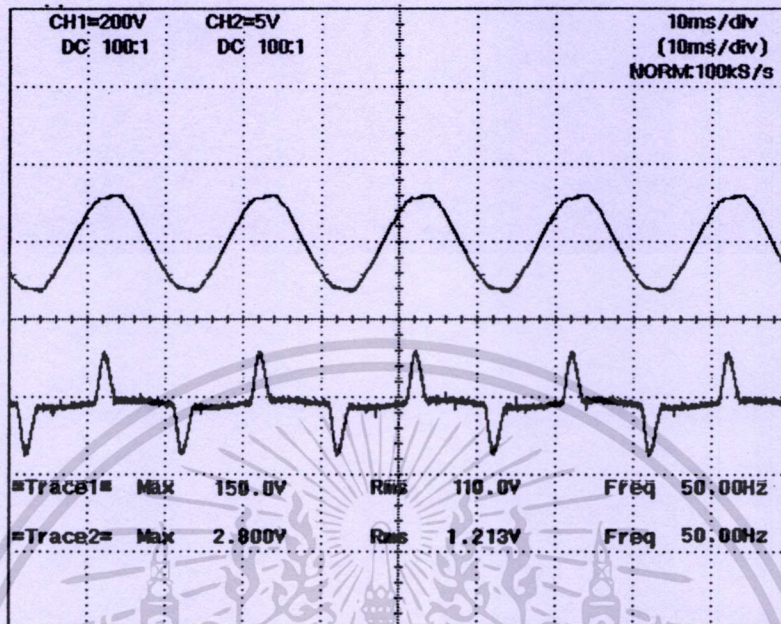
รูปที่ 4.41 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 65 ลิตรต่อนาที

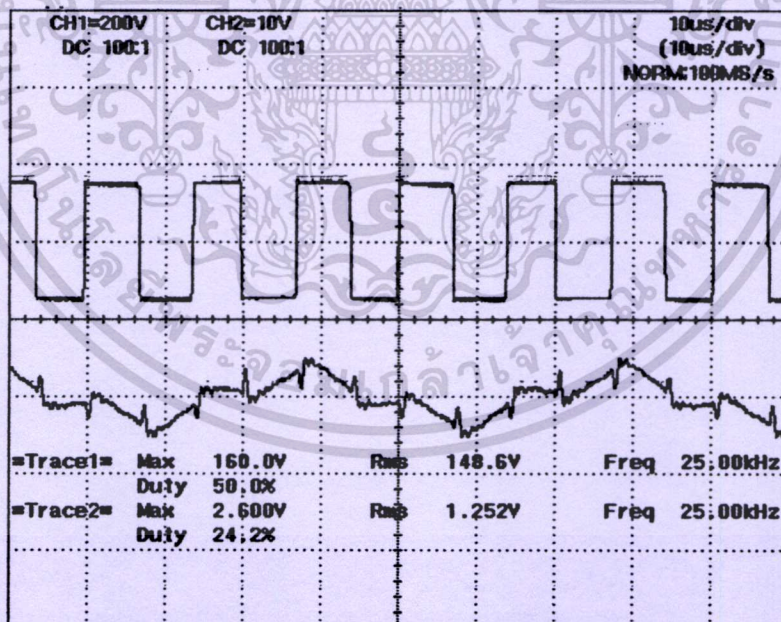


รูปที่ 4.42 สัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

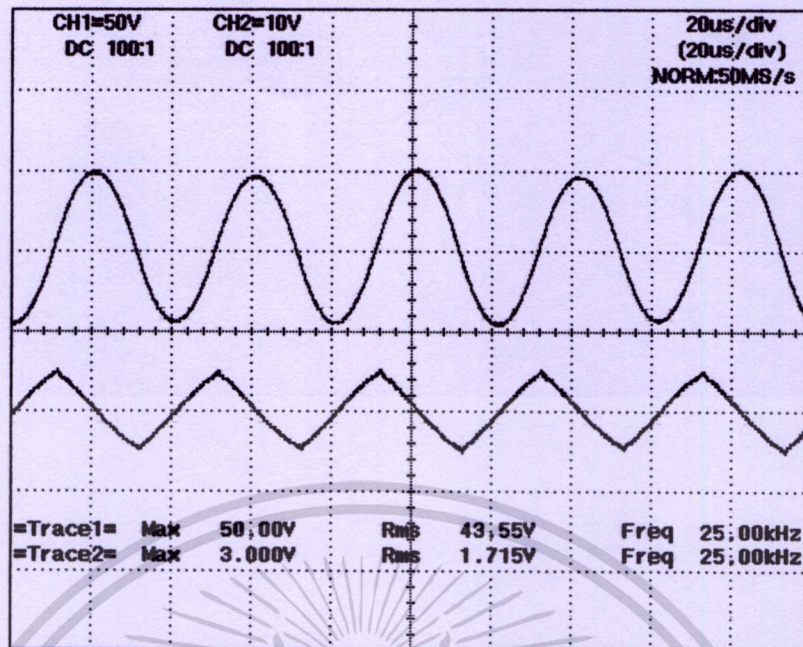


รูปที่ 4.43 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.44 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

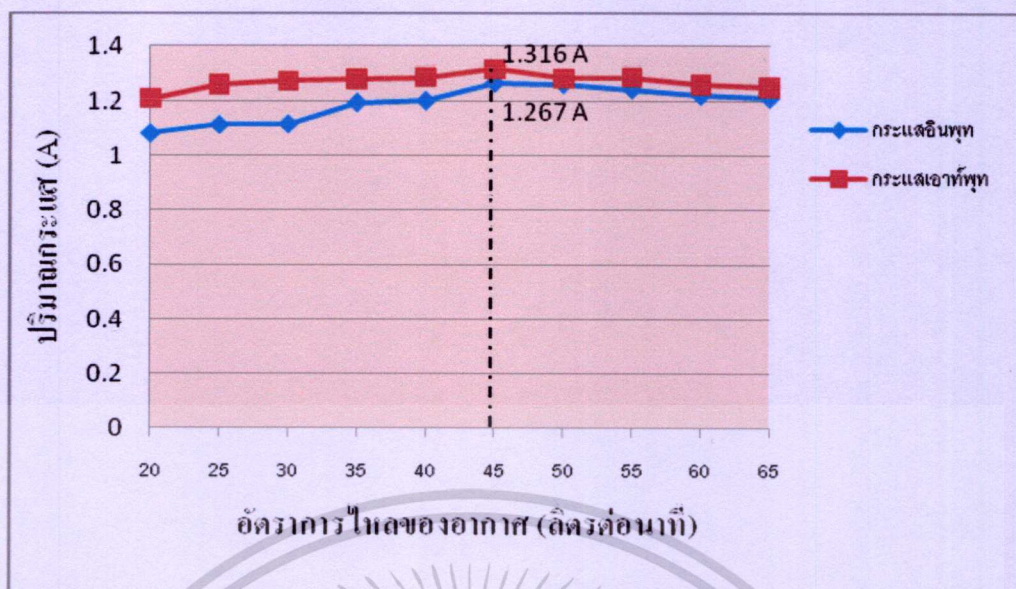


รูปที่ 4.45 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม.

ปริมาณลม (ลิตร/นาที)	แรงดัน อินพุต(V)	กระแส อินพุต(A)	แรงดัน เอาต์พุต (V)	กระแส เอาต์พุต (A)	แรงดัน เอาต์พุต หม้อแปลง (kVp)	กระแส เอาต์พุต หม้อแปลง (A)
20	110.2	1.083	148.1	1.211	4.96	1.750
25	109.8	1.115	150.6	1.261	5.05	1.771
30	110.1	1.118	150.1	1.274	5.01	1.775
35	109.7	1.196	149.4	1.281	4.98	1.781
40	110.1	1.203	149.6	1.286	4.91	1.787
45	110.0	1.267	150.3	1.316	5.02	1.847
50	109.5	1.264	148.6	1.284	4.91	1.741
55	110.5	1.245	149.8	1.286	4.98	1.735
60	109.4	1.223	149.1	1.261	4.96	1.724
65	110.1	1.213	149.6	1.252	4.98	1.715

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



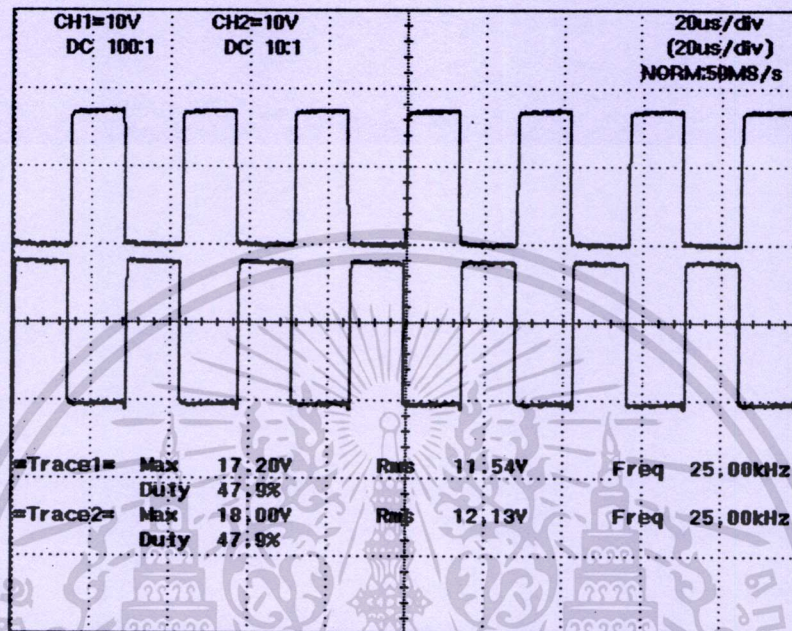
รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฉื่อยและแอโนดของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับอัตราการไหลของอากาศที่มีความยาวแท่ง 30 ซม.

จากการเก็บผลทางไฟฟ้าของแท่งอิเล็กโตรดที่มีความยาว 30 ซม. ตามรูปที่ 4.46 – 4.45 นำค่ามาลงตารางแสดงผลตามตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุตและแอโนดของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและกระแสทางด้านแอโนดของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่มีความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. พบว่าเมื่อกำหนดค่าแรงดันอินพุตให้คงที่ 110 V และกำหนดค่าแรงดันแอโนดของหม้อแปลงให้คงที่เท่ากับ 5 kVp จะทำให้ค่าของกระแสมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลจากตารางที่ 4.3 พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 45 ลิตรต่อนาทีจะได้ผลของกระแสสูงสุดทั้งด้านอินพุตและแอโนดของคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 ซึ่งเกิดจากอัตราการไหลของอากาศในช่วงนี้สามารถที่จะแตกตัวได้ดีที่สุดซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิด โอโซนผลิตได้สูงสุดด้วยตามตารางที่ 4.6 ซึ่งจะได้อัตราการเกิดอัตราการเกิดโอโซนที่ 23 g/hr แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นกระแสอินพุตและแอโนดของคอนเวอร์เตอร์มีค่าลดลงดังรูปที่ 4.43 และรูปที่ 4.44 ที่อัตราการไหลของอากาศ 65 ลิตรและอัตราการเกิดก๊าซโอโซนมีค่าลดลงตามตารางที่ 4.7 ซึ่งอัตราการเกิดโอโซนมีค่าเท่ากับ 19.8 g/hr เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศในช่วงนี้ไม่เหมาะกับแท่งอิเล็กโตรดเพราะอากาศไม่สามารถแตกตัวได้ทัน

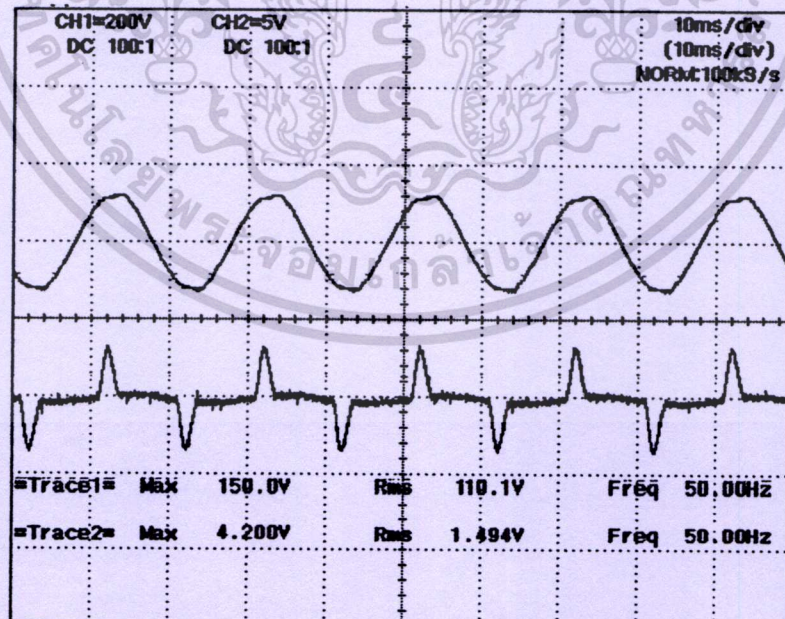
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม.

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ลิตรต่อนาที

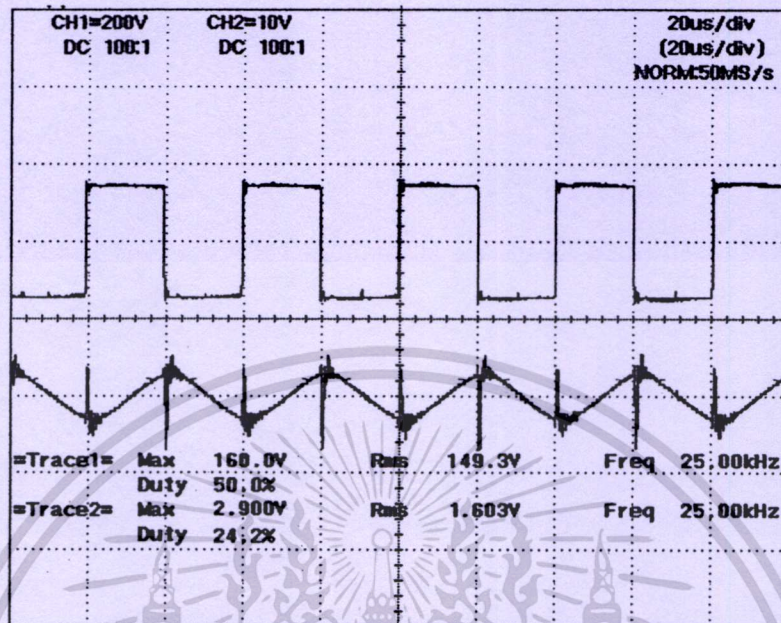


รูปที่ 4.47 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

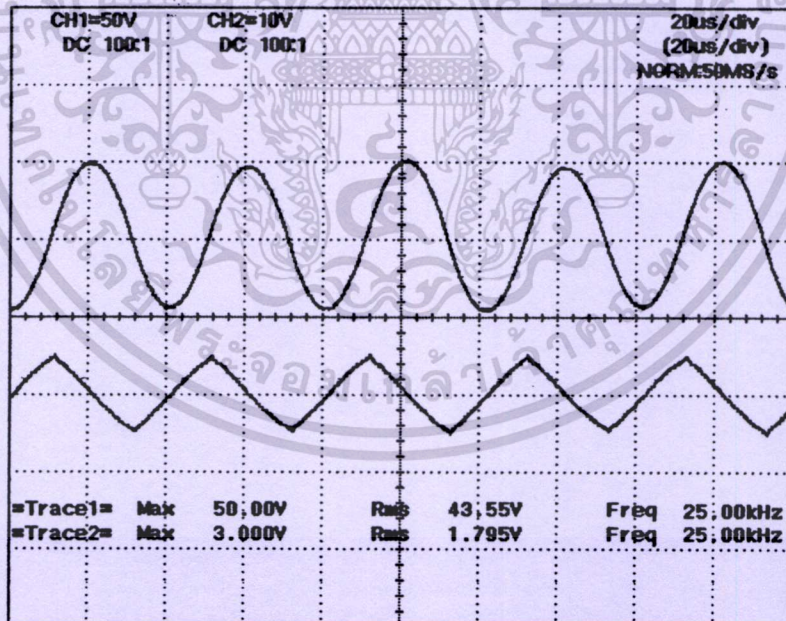


รูปที่ 4.48 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



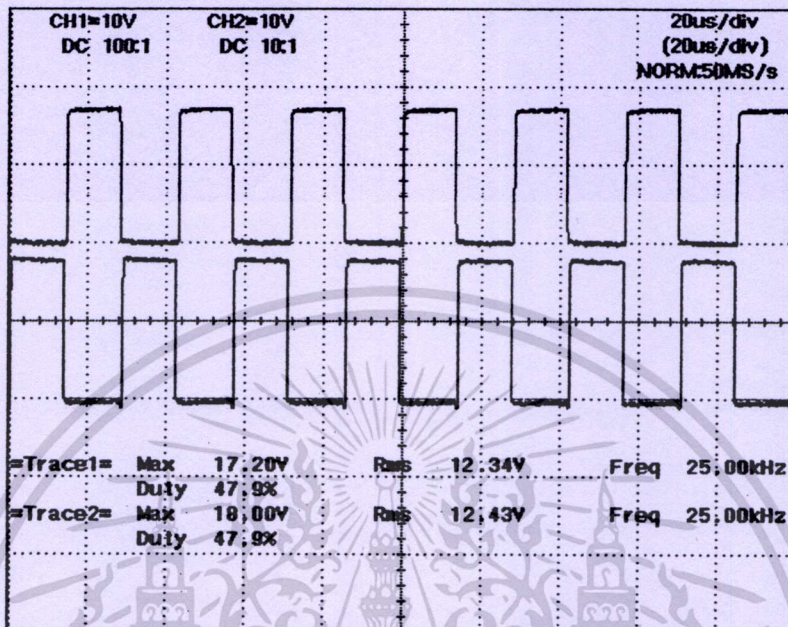
รูปที่ 4.49 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



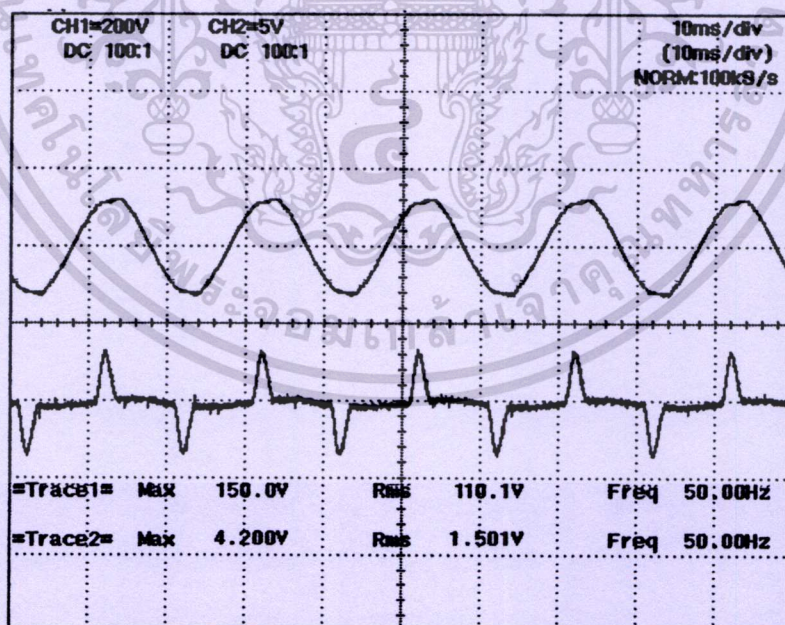
รูปที่ 4.50 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 45 ลิตรต่อนาที

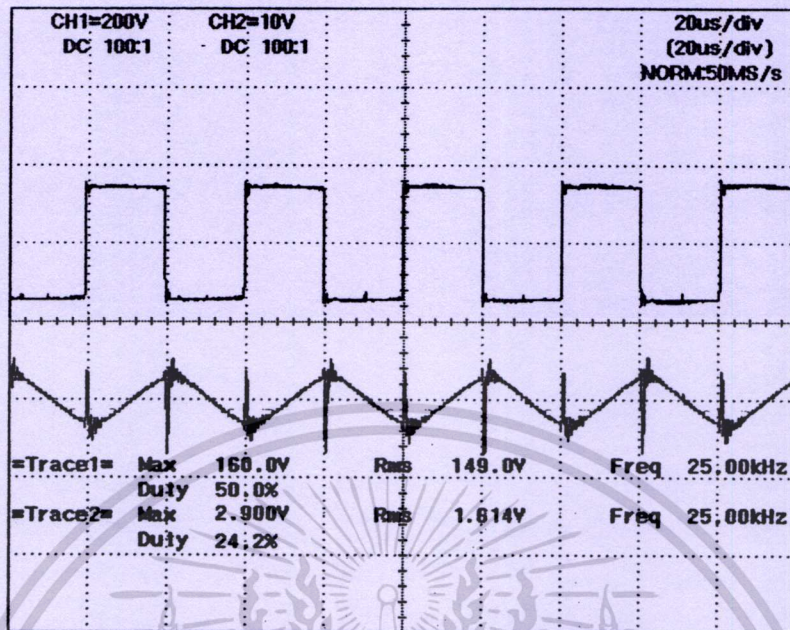


รูปที่ 4.51 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่พุ่มมือแปลง

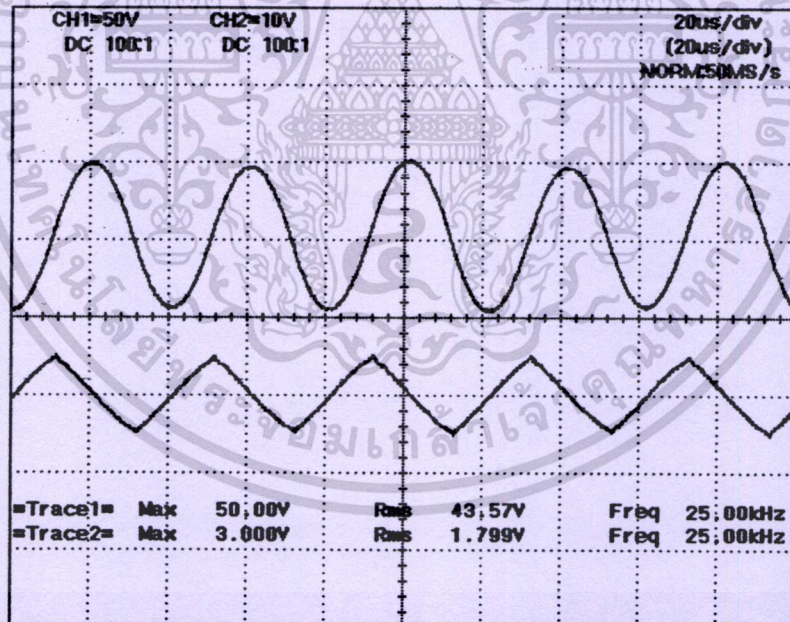


รูปที่ 4.52 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



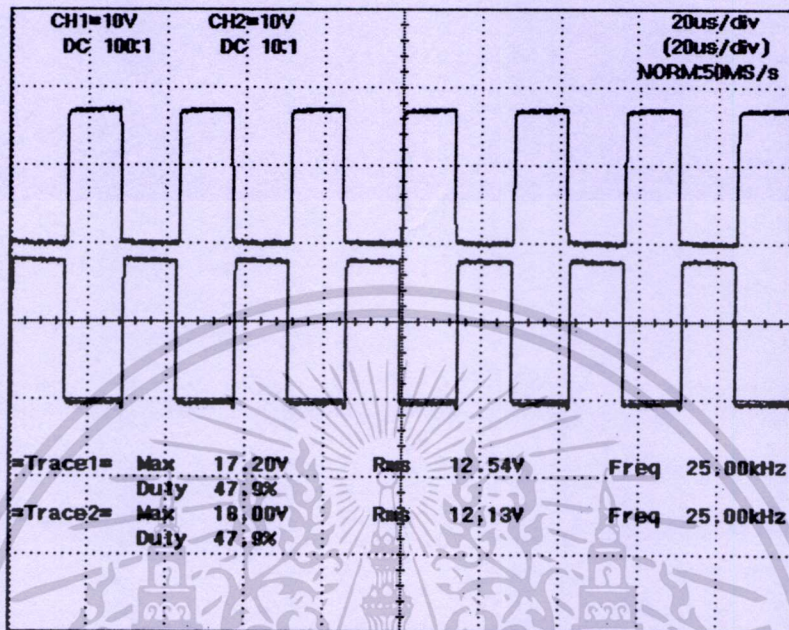
รูปที่ 4.53 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



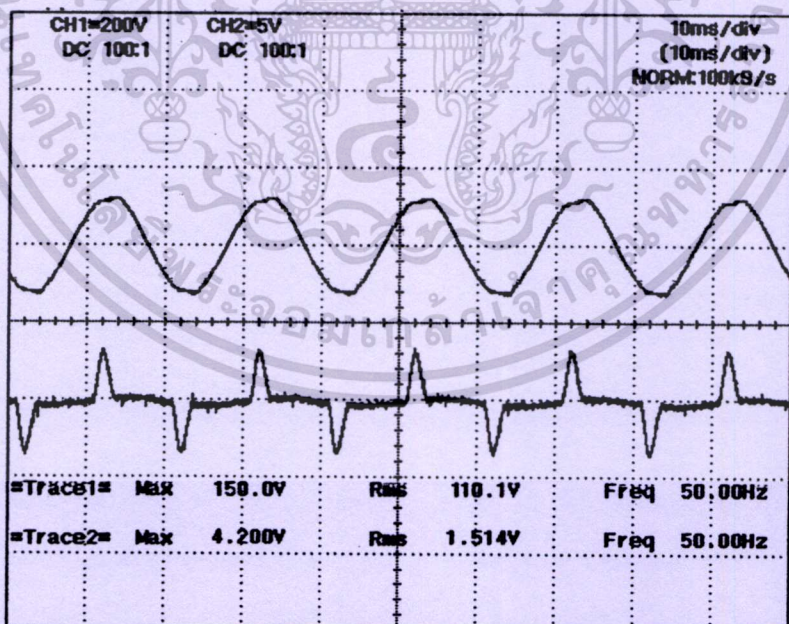
รูปที่ 4.54 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 50 ลิตรต่อนาที

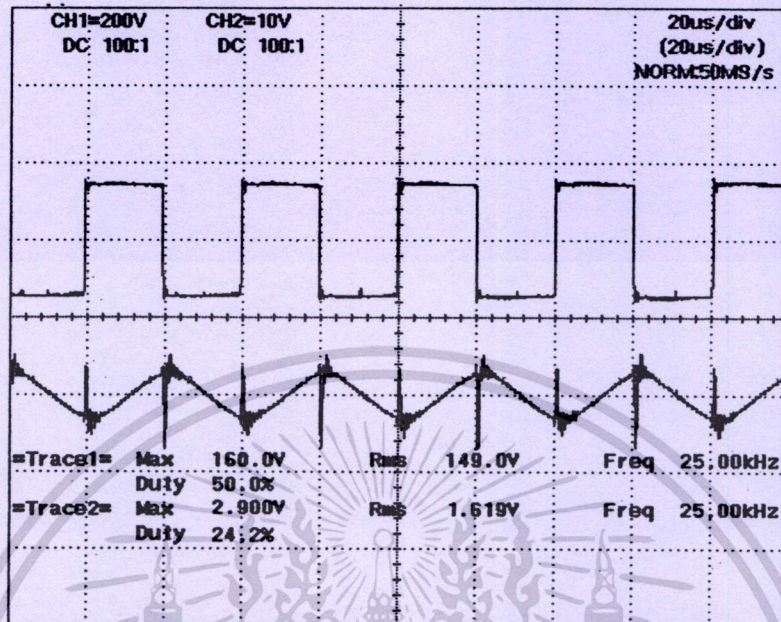


รูปที่ 4.55 สัญญาณพัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

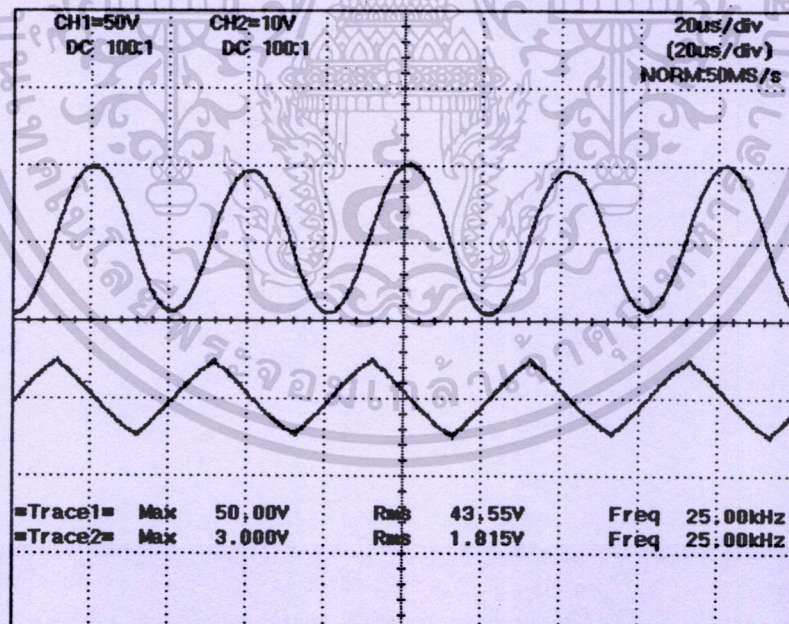


รูปที่ 4.56 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



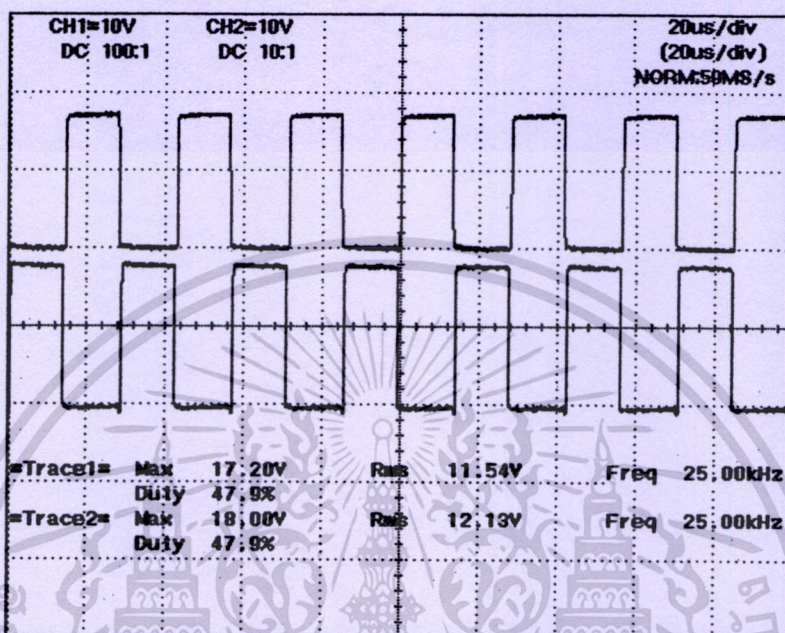
รูปที่ 4.57 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



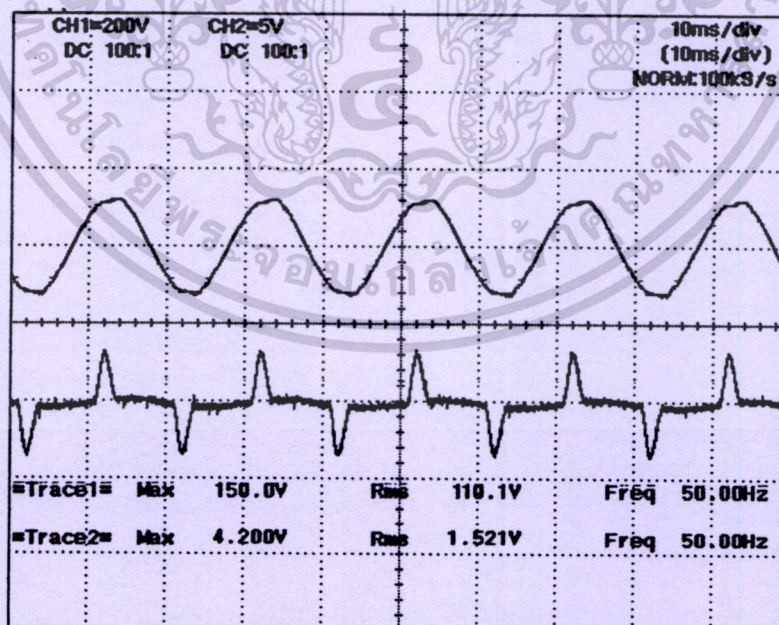
รูปที่ 4.58 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 55 ลิตรต่อนาที

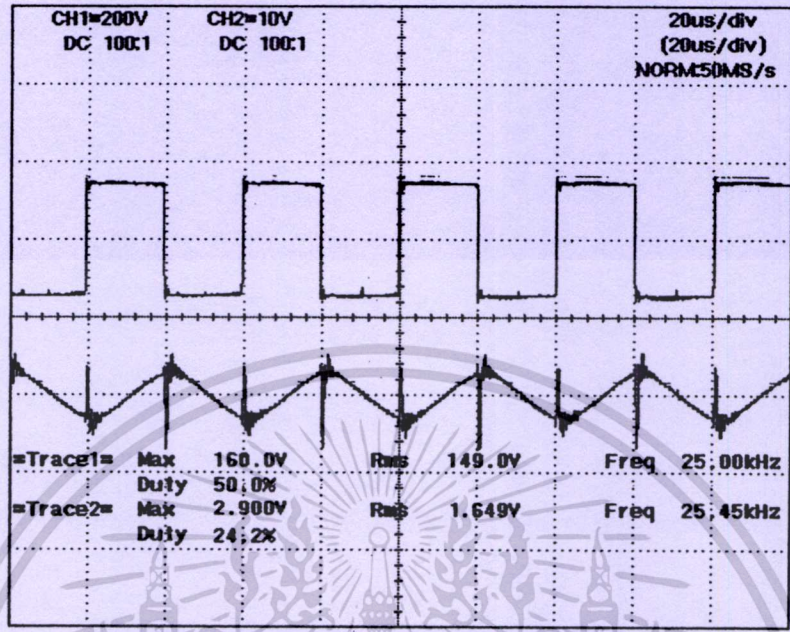


รูปที่ 4.59 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาคทของมอเตอร์เฟสความถี่ 25 kHz

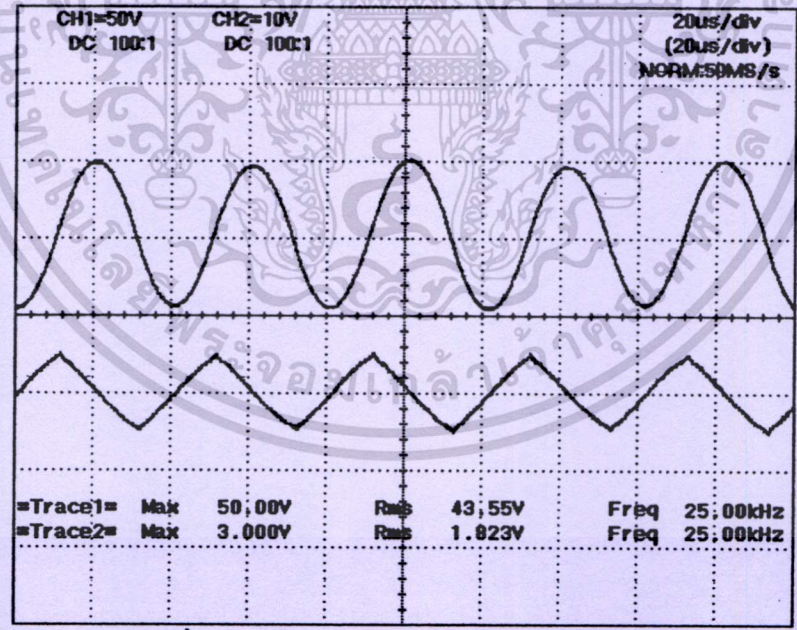


รูปที่ 4.60 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



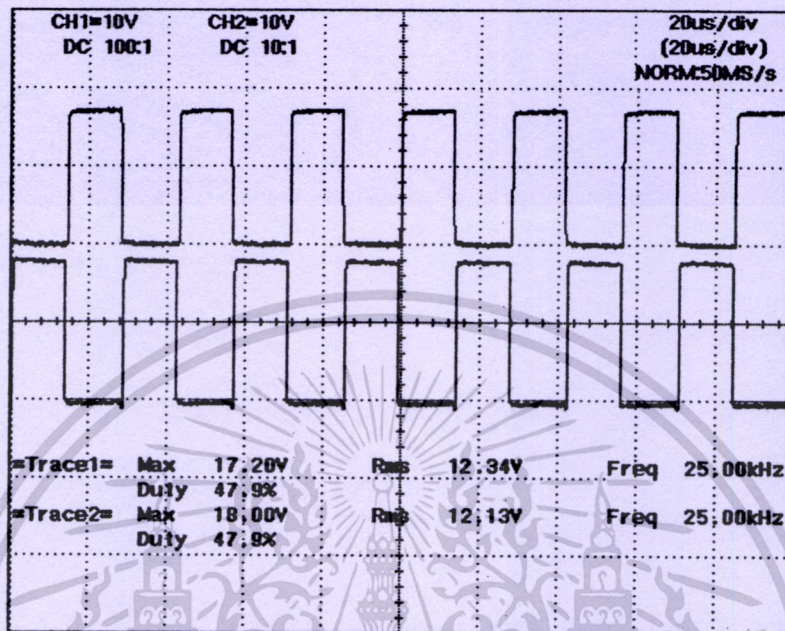
รูปที่ 4.61 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



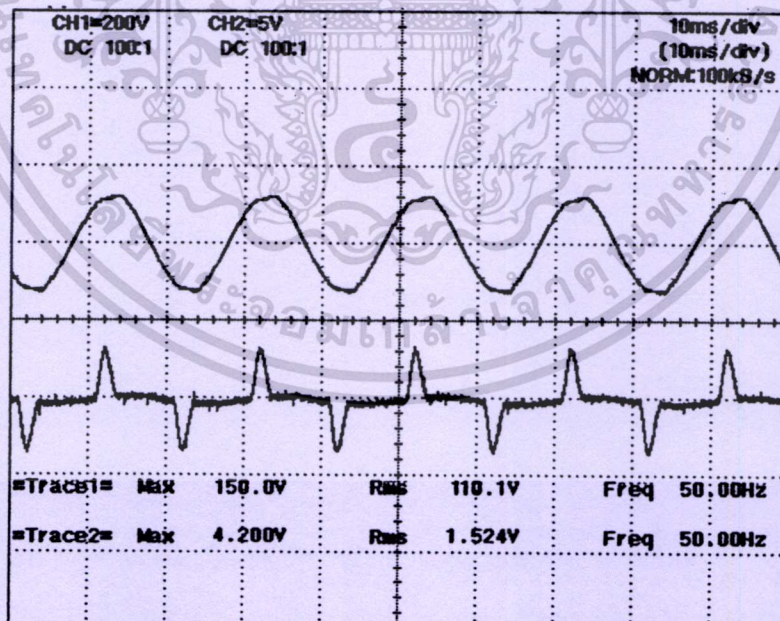
รูปที่ 4.62 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 60 ลิตรต่อนาที

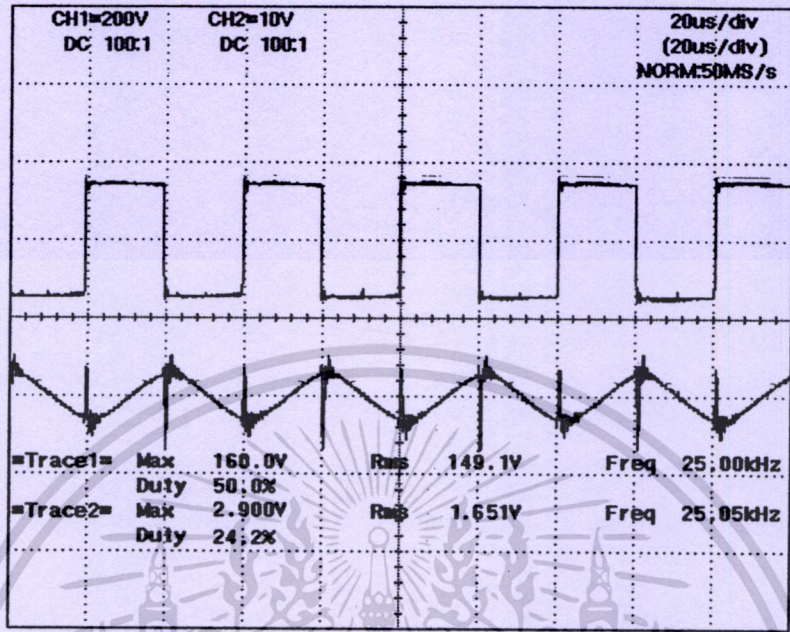


รูปที่ 4.63 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้จากเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

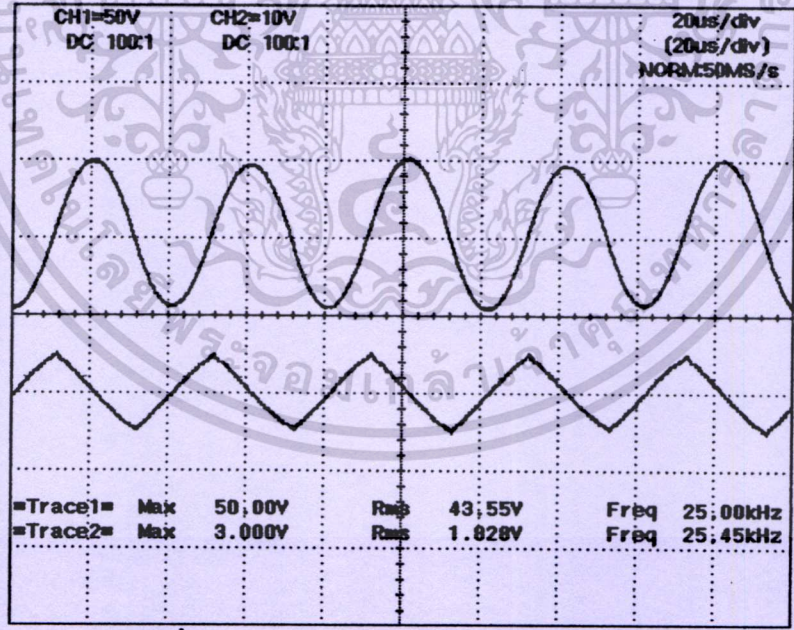


รูปที่ 4.64 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



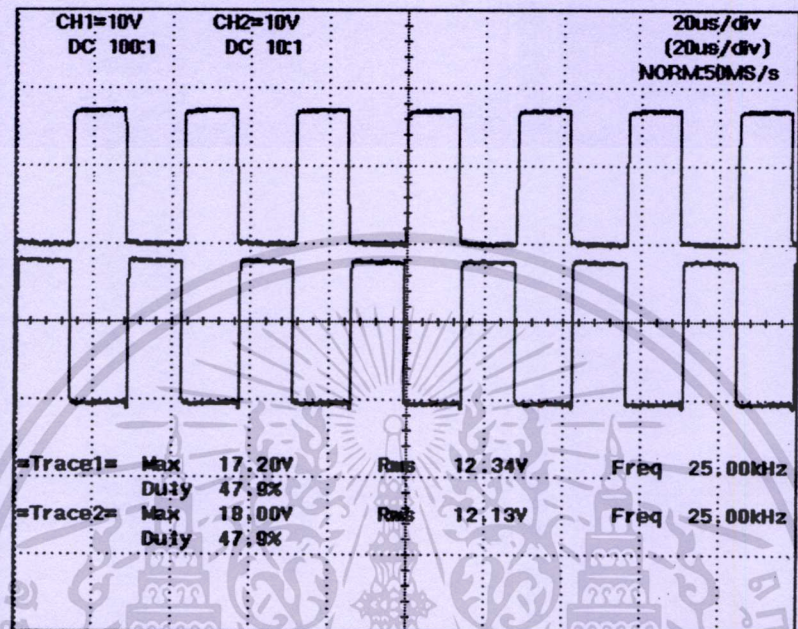
รูปที่ 4.65 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



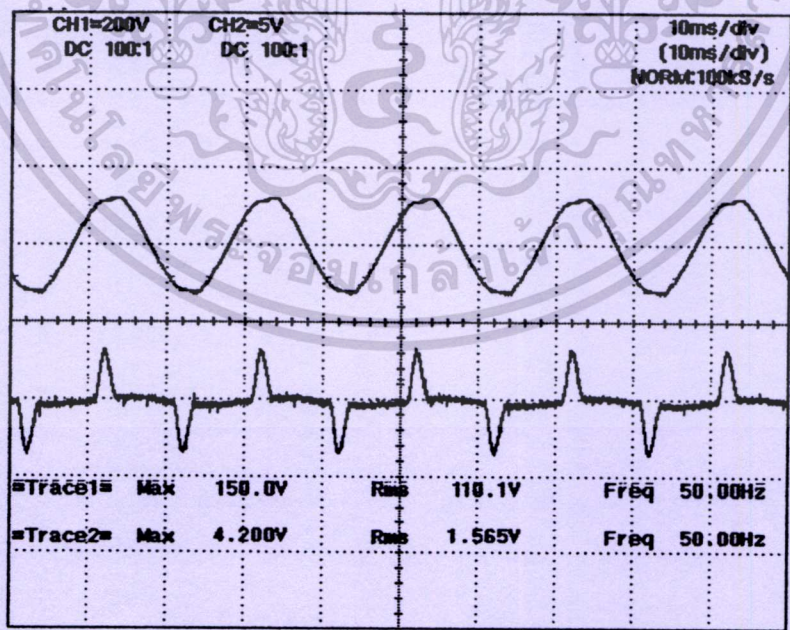
รูปที่ 4.66 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 65 ลิตรต่อนาที

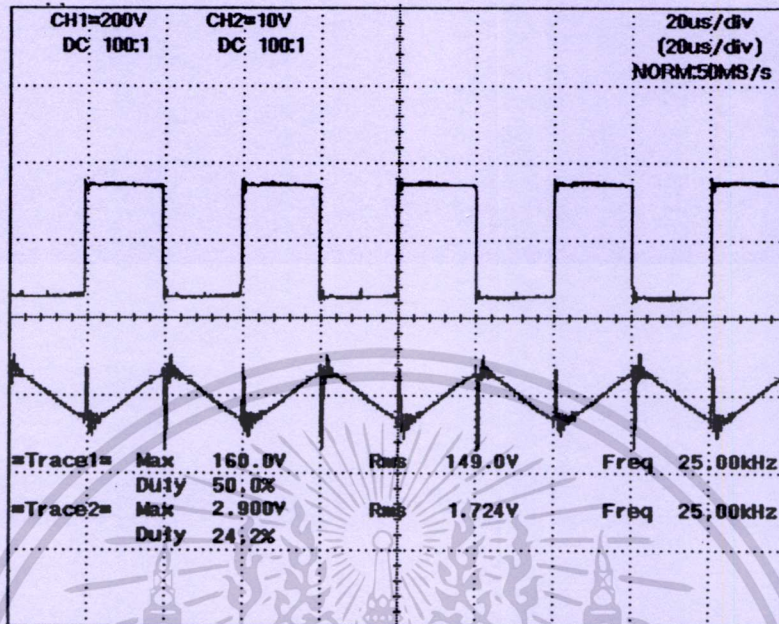


รูปที่ 4.67 สัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้แกขงมอเตอร์เฟสความถี่ 25 kHz

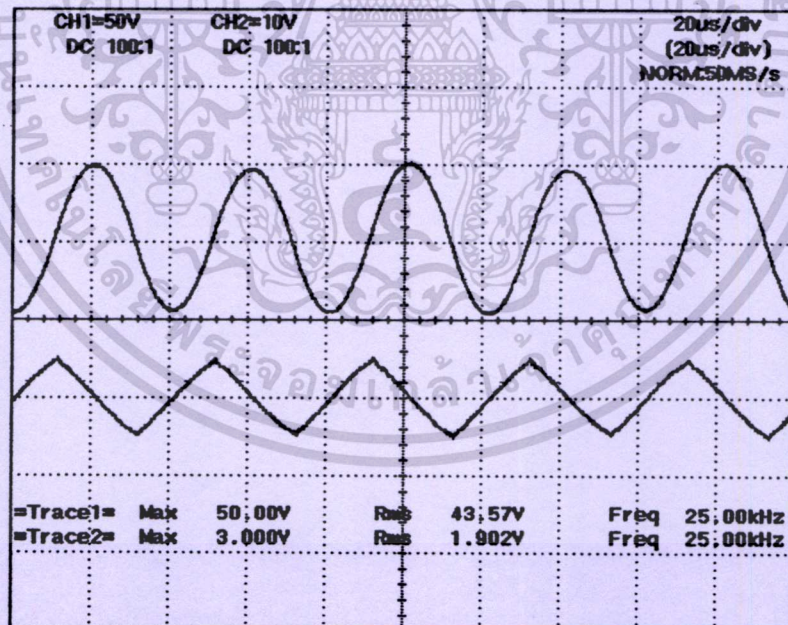


รูปที่ 4.68 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



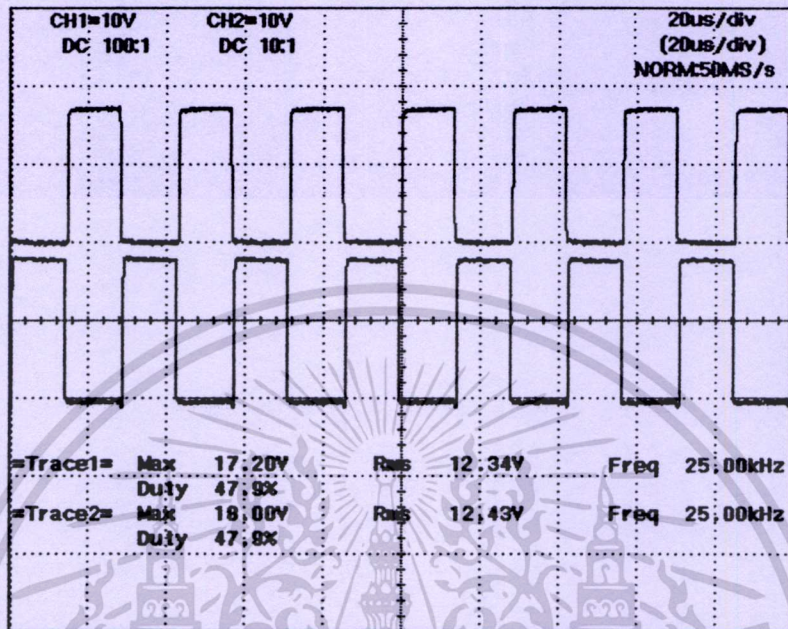
รูปที่ 4.69 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



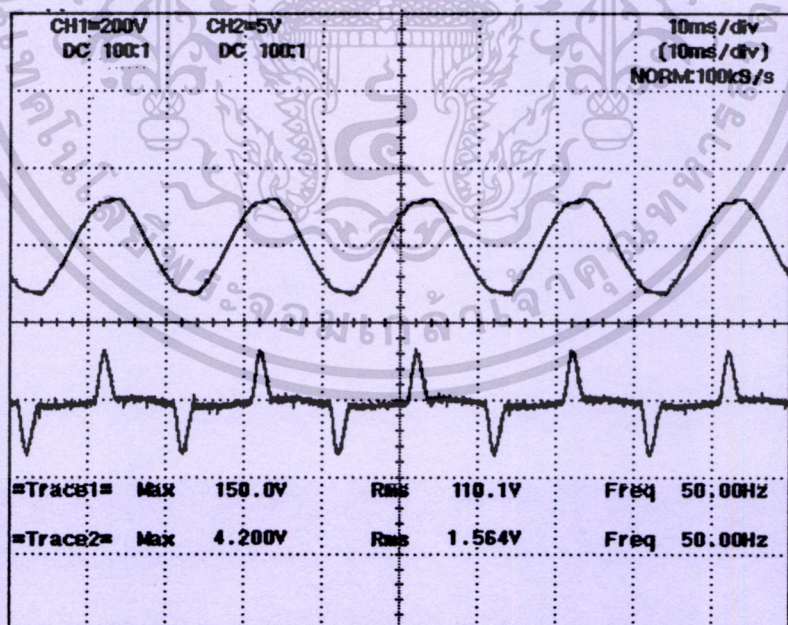
รูปที่ 4.70 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 70 ลิตรต่อนาที

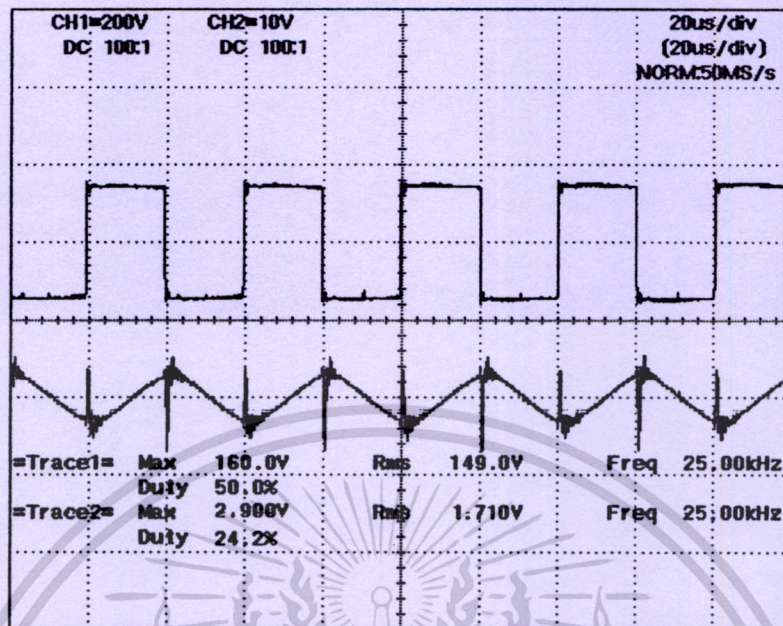


รูปที่ 4.71 สัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าความถี่ 25 kHz

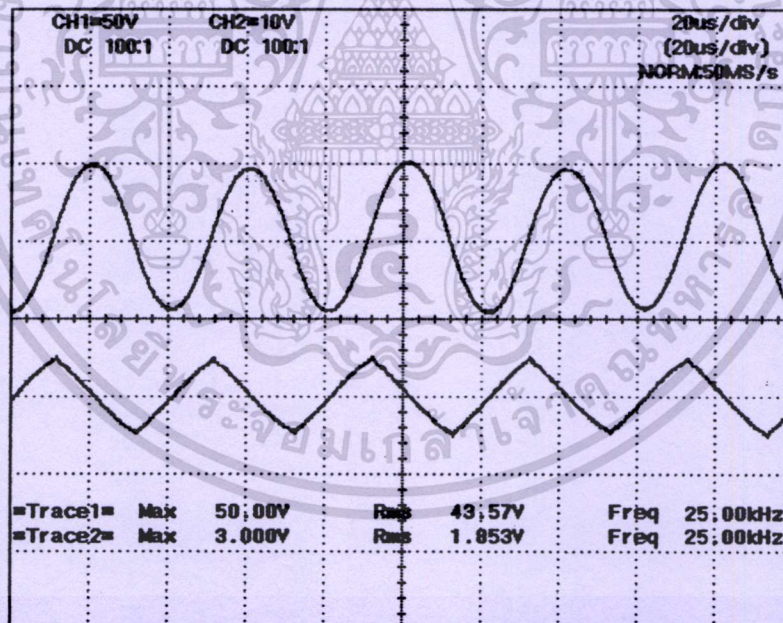


รูปที่ 4.72 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



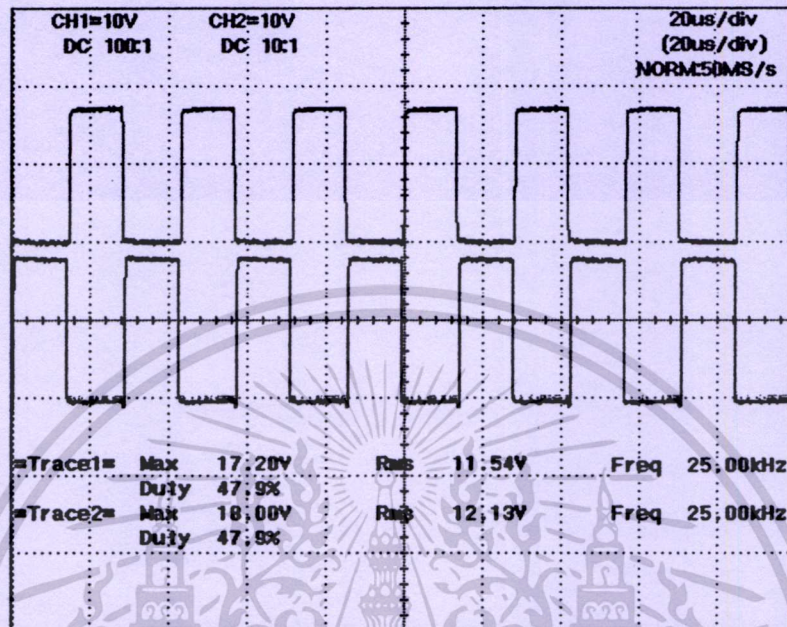
รูปที่ 4.73 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



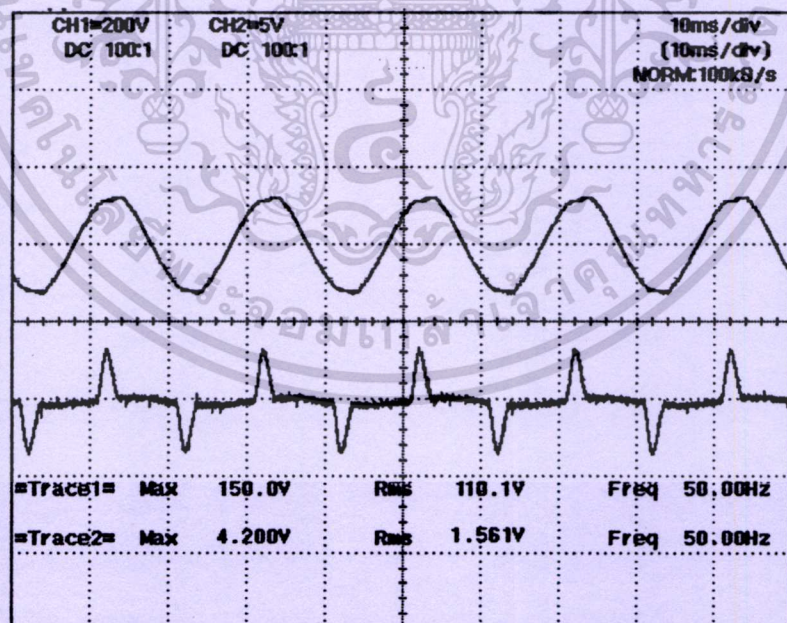
รูปที่ 4.74 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 75 ลิตรต่อนาที

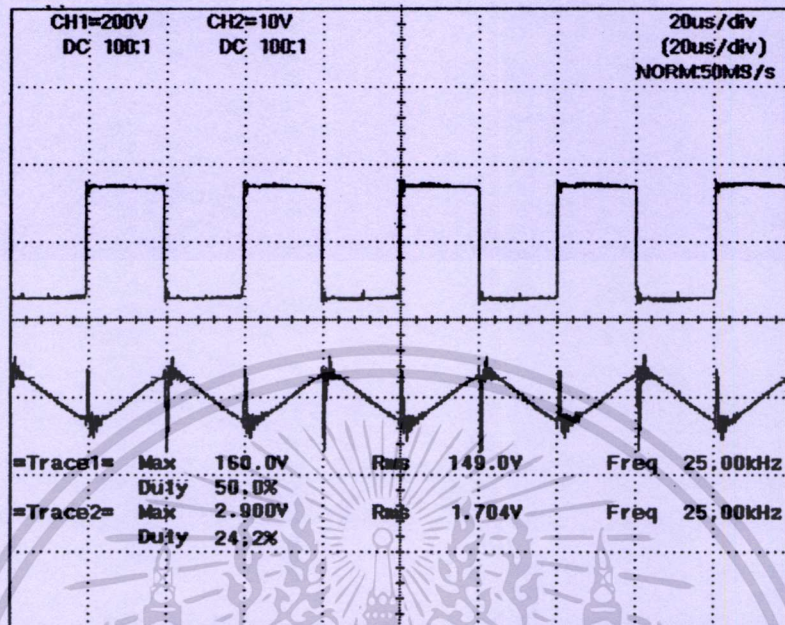


รูปที่ 4.75 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้จากเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

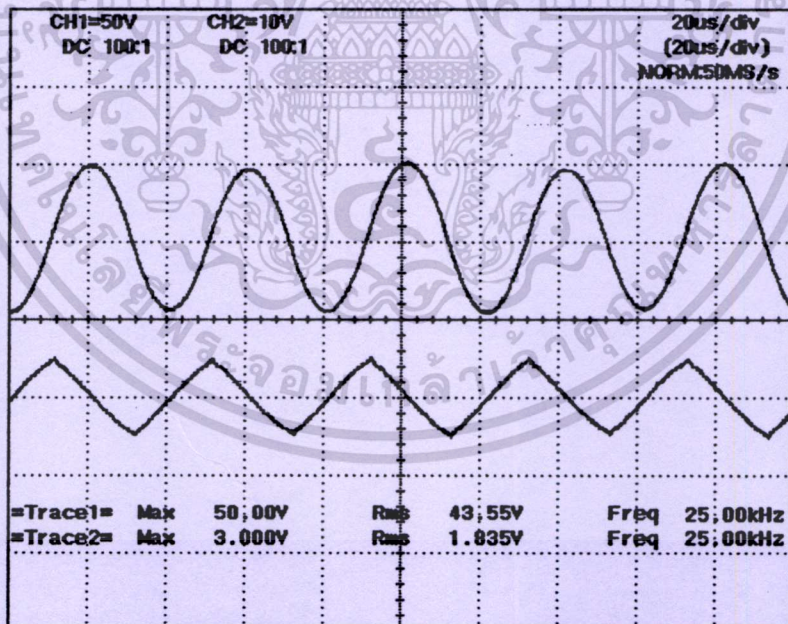


รูปที่ 4.76 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



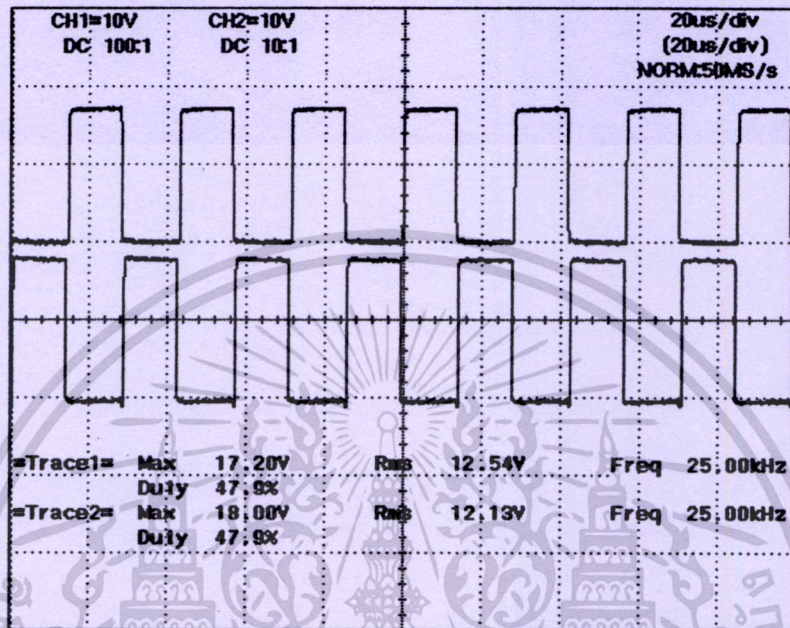
รูปที่ 4.77 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



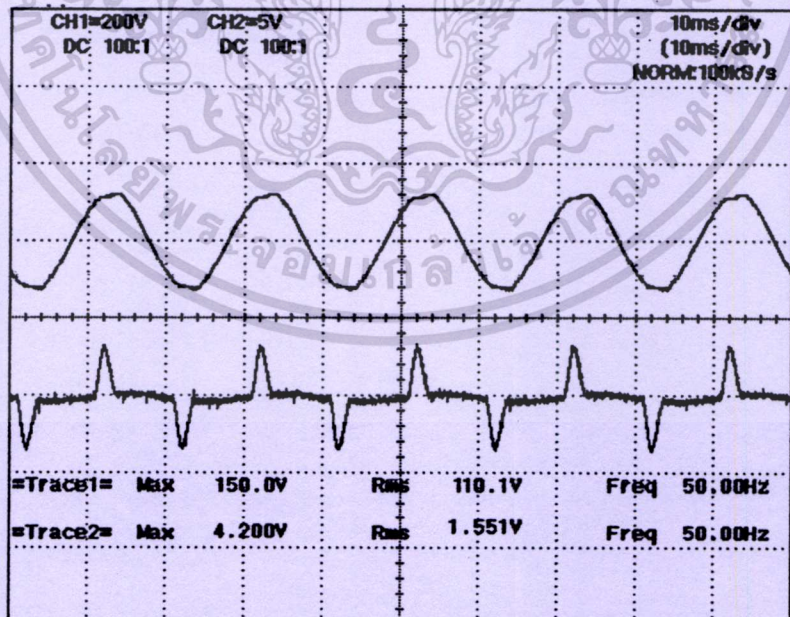
รูปที่ 4.78 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 80 ลิตรต่อนาที

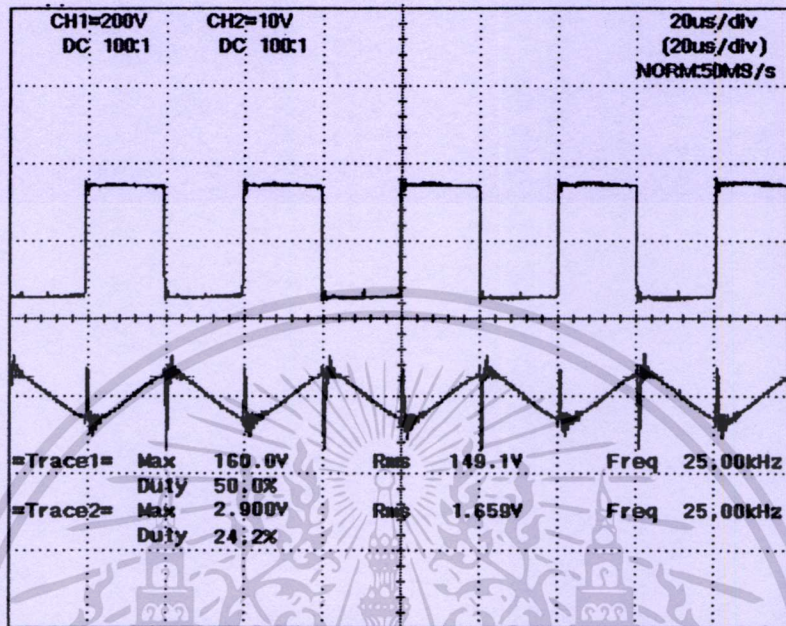


รูปที่ 4.79 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาทของมอเตอร์เฟสความถี่ 25 kHz

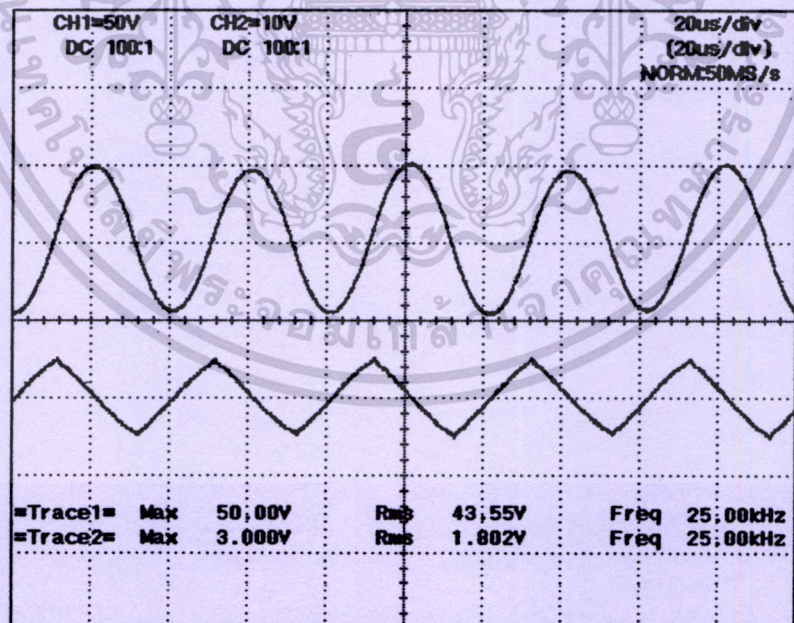


รูปที่ 4.80 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



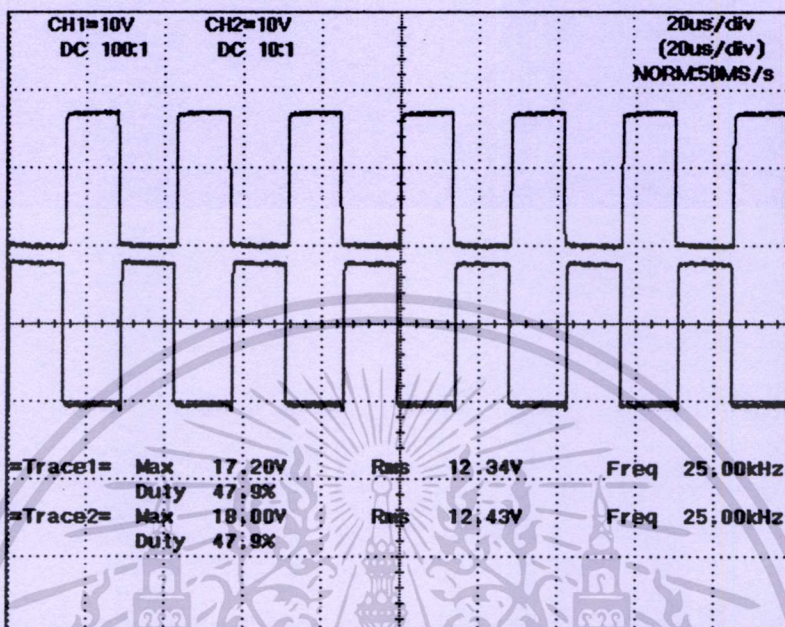
รูปที่ 4.81 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์



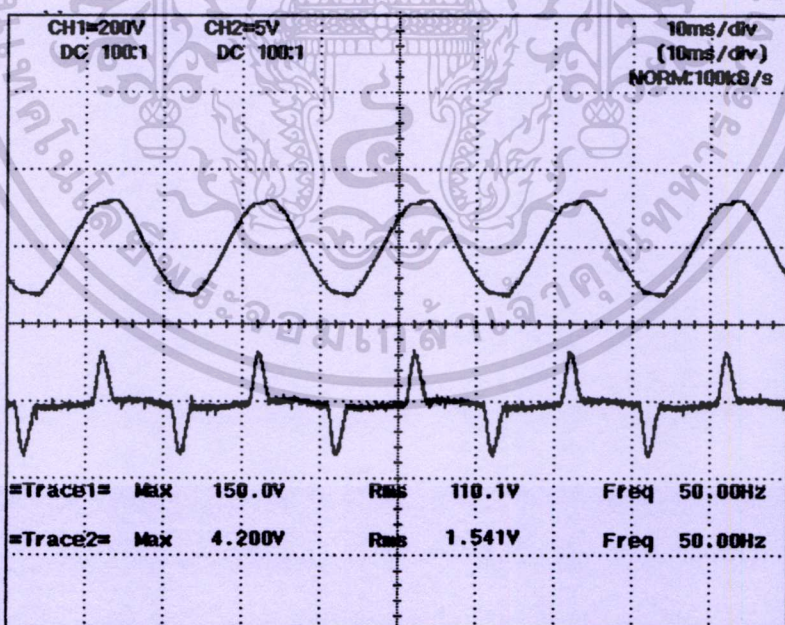
รูปที่ 4.82 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 85 ลิตรต่อนาที

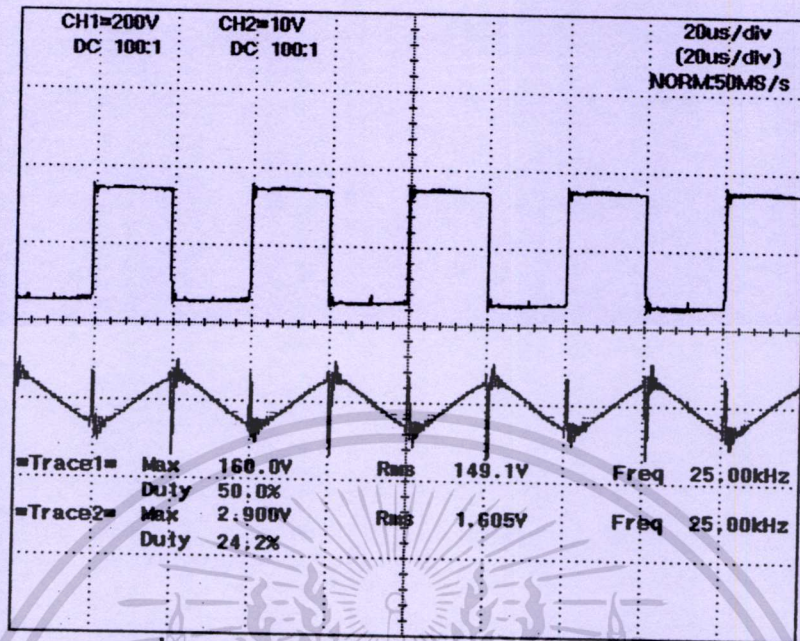


รูปที่ 4.83 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้จากของมอเตอร์เฟสความถี่ 25 kHz

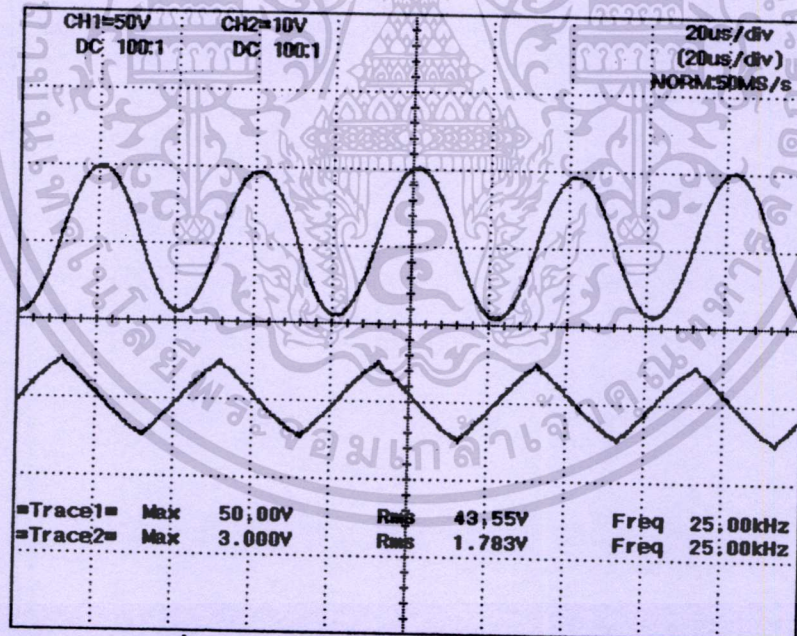


รูปที่ 4.84 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.85 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

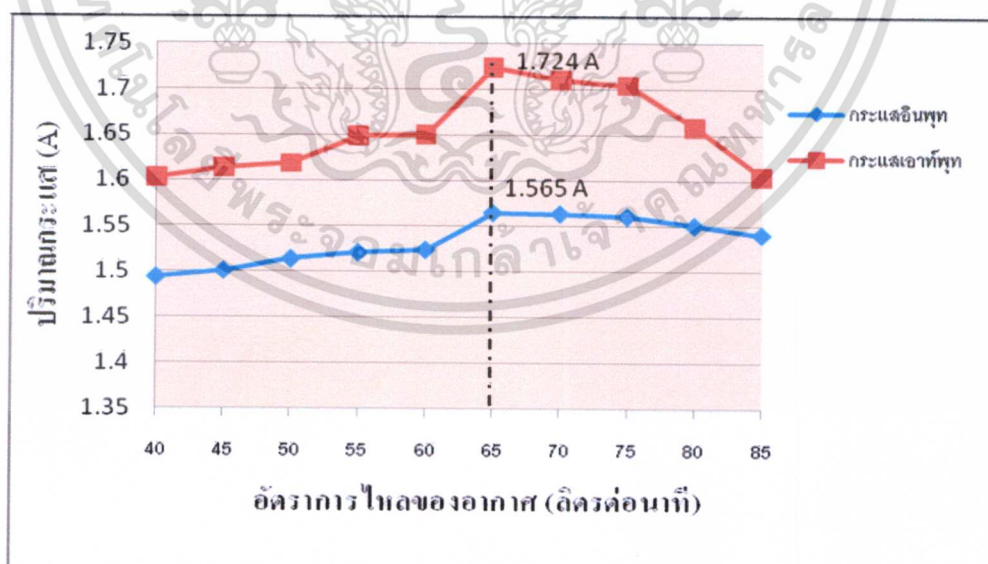


รูปที่ 4.86 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดัน และกระแสทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม.

ปริมาณลม (ลิตร/นาที)	แรงดัน อินพุท(V)	กระแส อินพุท(A)	แรงดัน เอาต์พุท (V)	กระแส เอาต์พุท (A)	แรงดัน หม้อแปลง (kVp)	กระแส เอาต์พุท หม้อแปลง (A)
40	110.2	1.494	150.3	1.603	5.04	1.795
45	109.8	1.501	149.0	1.614	4.92	1.779
50	110.1	1.514	149.6	1.619	4.96	1.815
55	109.7	1.521	149.5	1.649	4.92	1.823
60	110.1	1.524	150.1	1.651	5.03	1.828
65	110.0	1.565	150.6	1.724	5.01	1.902
70	110.5	1.564	149.0	1.710	4.95	1.853
75	110.5	1.561	149.9	1.704	5.03	1.835
80	110.4	1.551	150.1	1.659	5.02	1.802
85	110.1	1.541	149.7	1.605	4.98	1.783



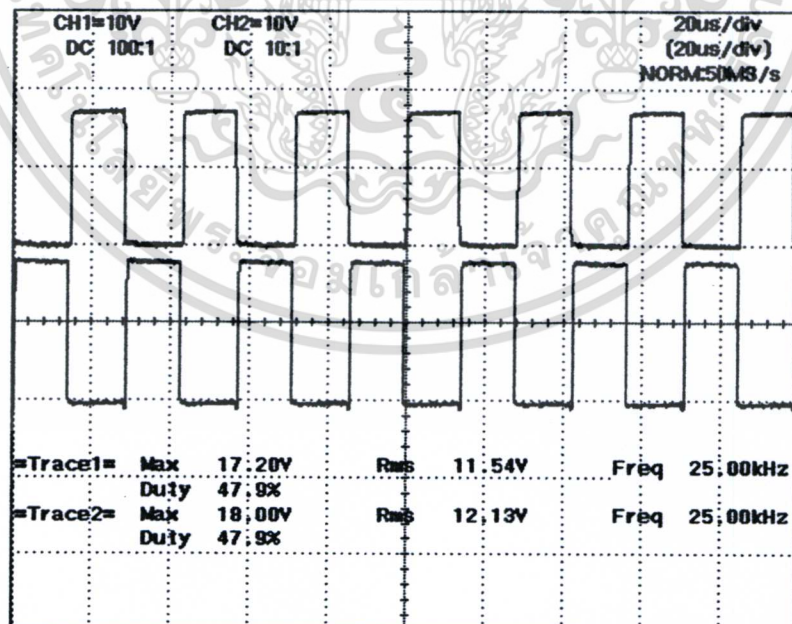
รูปที่ 4.87 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุทและเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

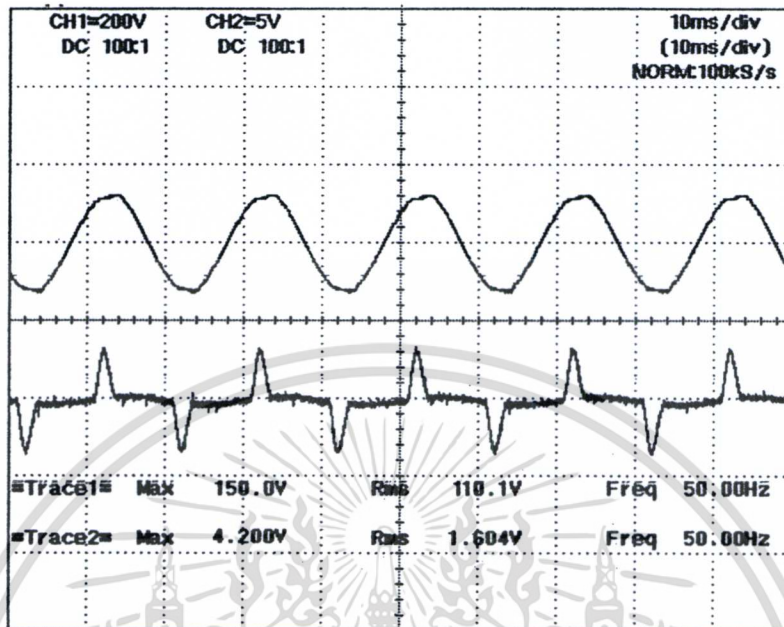
จากการเก็บผลทางไฟฟ้าของแท่งอิเล็กโตรดที่มีความยาว 60 ซม. ตามรูปที่ 4.47 – 4.86 นำค่ามาลงตารางแสดงผลตามตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูงที่มีความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. ดังที่กล่าวข้างต้น เมื่อกำหนดค่าแรงดันอินพุทให้คงที่ 110 V และกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลงให้คงที่เท่ากับ 5 kVp จะทำให้ค่าของกระแสมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลจากตารางที่ 4.4 พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 65 ลิตรต่อนาทีจะได้ผลของกระแสสูงสุดทั้งด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 4.68 และ รูปที่ 4.69 ซึ่งเกิดจากอัตราการไหลของอากาศในช่วงนี้เหมาะสม สามารถที่จะแตกตัวได้ดีที่สุดซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดไอโซนผลิตได้สูงสุดด้วยตามตารางที่ 4.7 ซึ่งจะได้อัตราการเกิดไอโซนที่ 41 g/hr แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นกระแสอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์มีค่าลดลงดังรูปที่ 4.84 และรูปที่ 4.85 ที่อัตราการไหลของอากาศ 85 ลิตรและอัตราการเกิดก๊าซไอโซนมีค่าลดลงตามตารางที่ 4.9 ซึ่งอัตราการเกิดไอโซนมีค่าเท่ากับ 37.8 g/hr เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศในช่วงนี้ไม่เหมาะสมกับแท่งอิเล็กโตรดเพราะอากาศไม่สามารถแตกตัวได้ทัน

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.

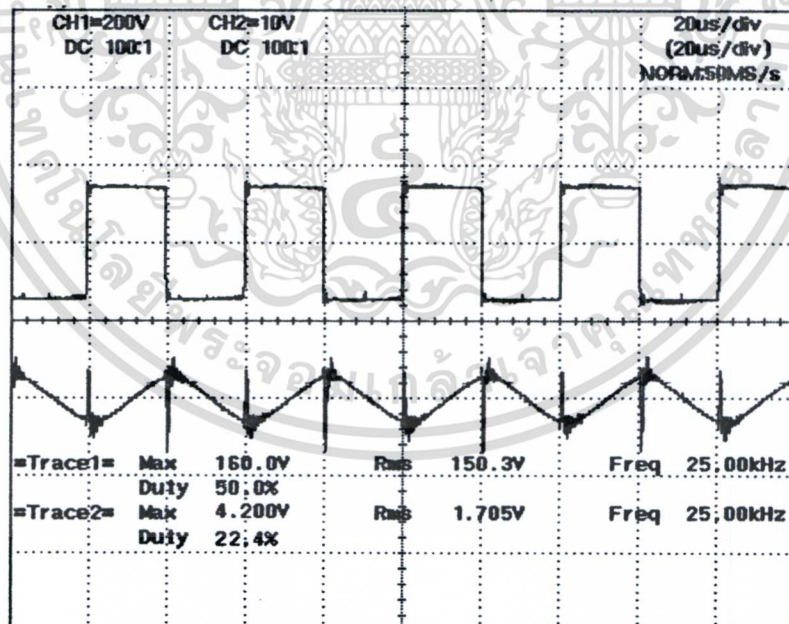
- ที่อัตราการไหลของอากาศ 65 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.88 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

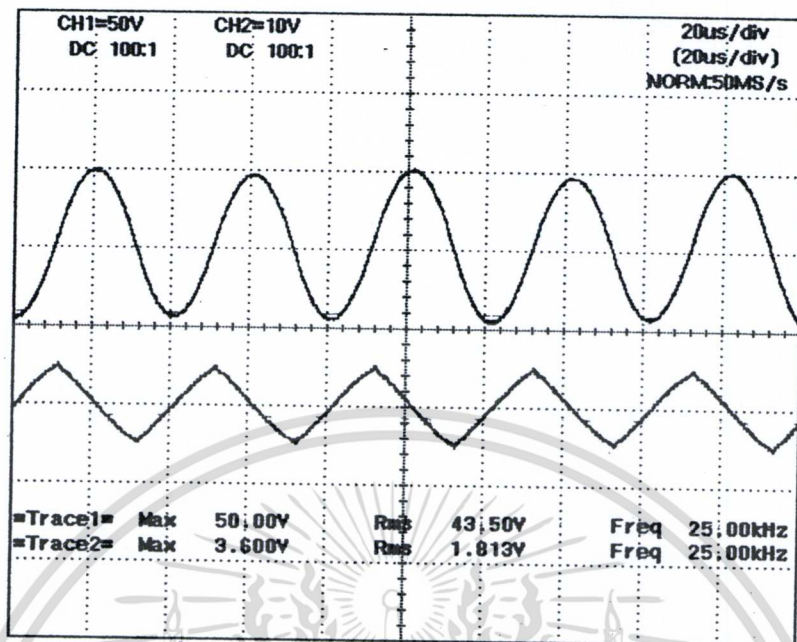


รูปที่ 4.89 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



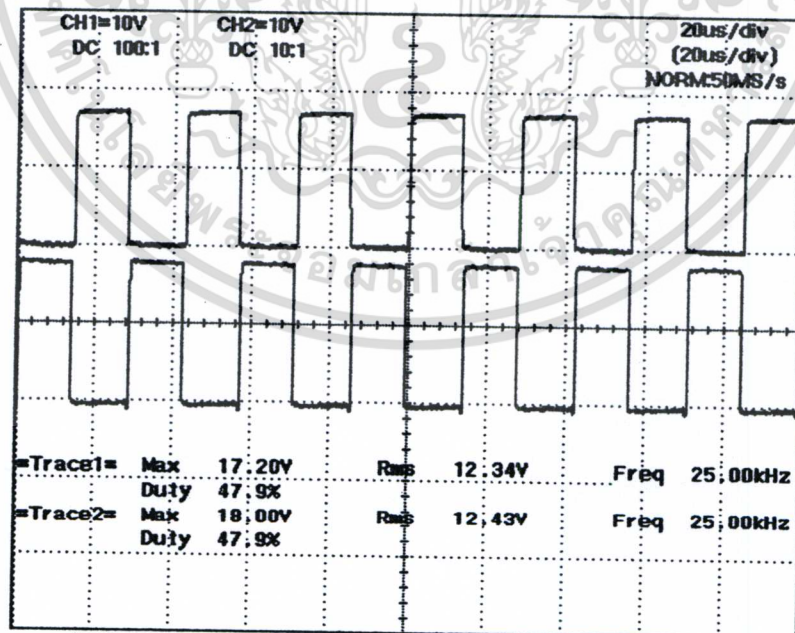
รูปที่ 4.90 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



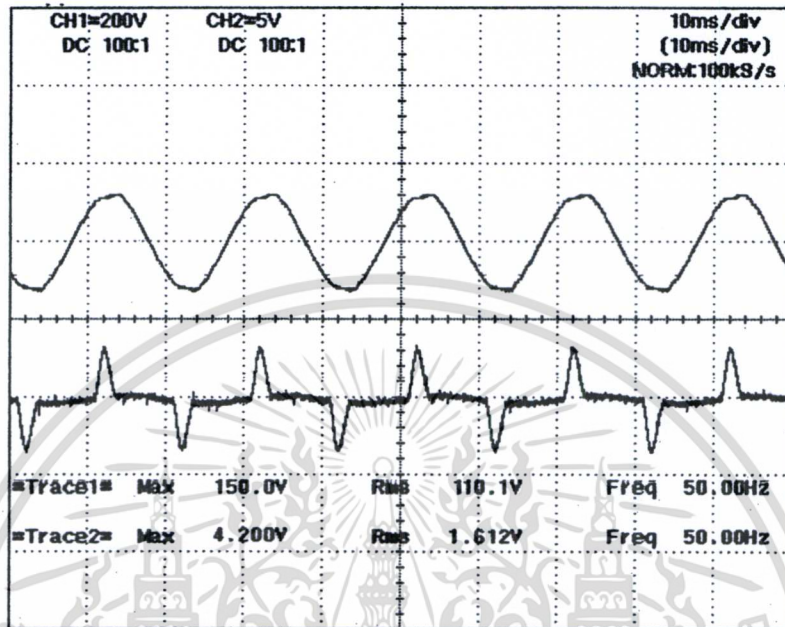
รูปที่ 4.91 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ที่อัตราการไหลของอากาศ 70 ลิตรต่อนาที

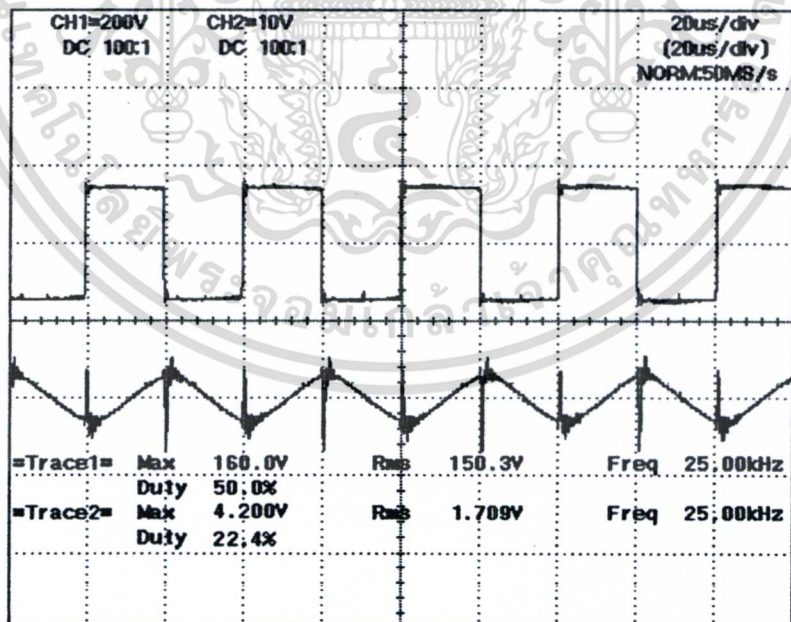


รูปที่ 4.92 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขั้วเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

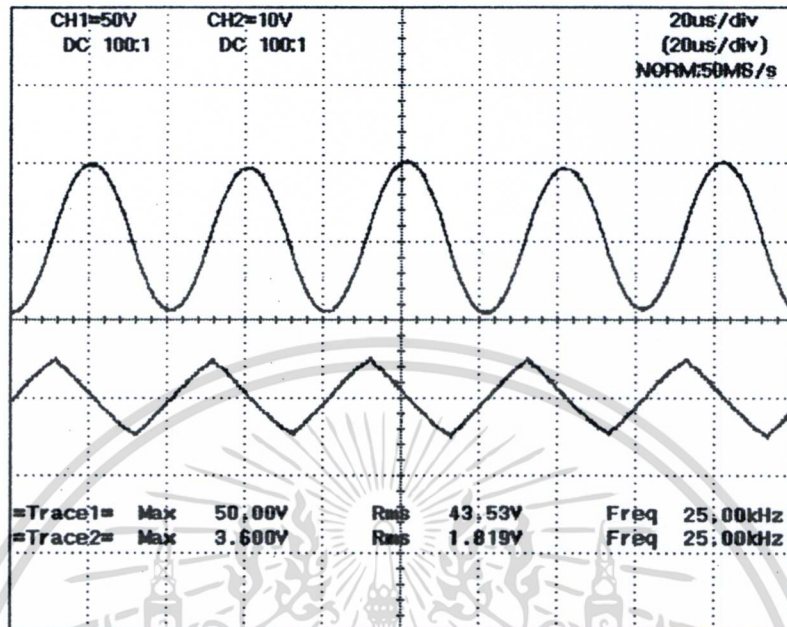


รูปที่ 4.93 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



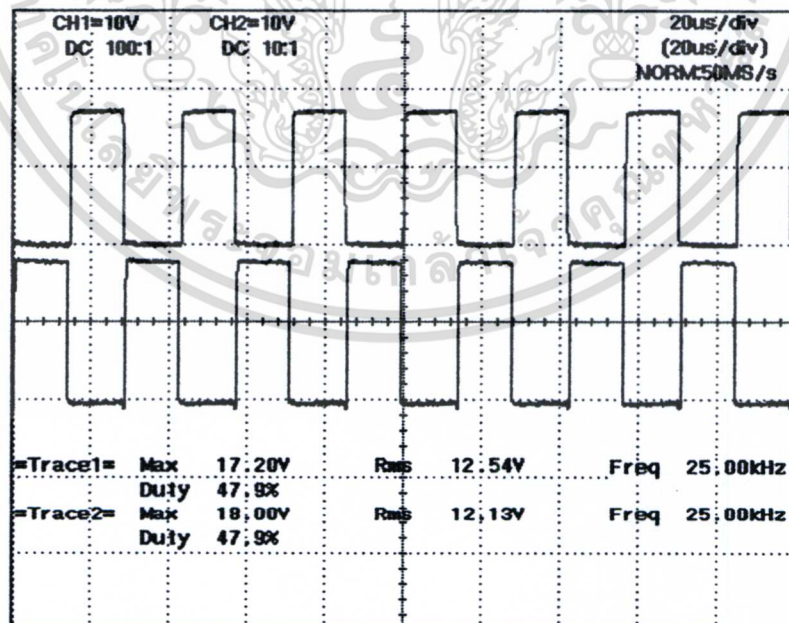
รูปที่ 4.94 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



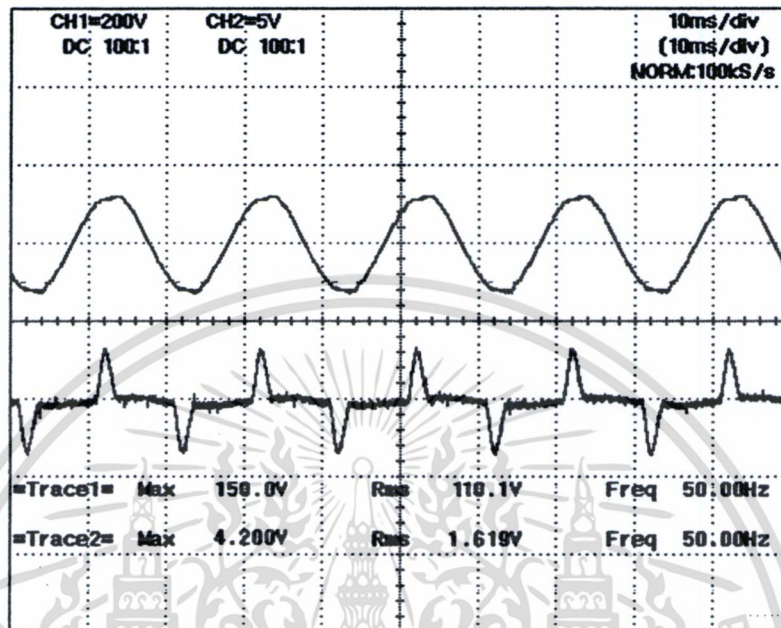
รูปที่ 4.95 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 75 ลิตรต่อนาที

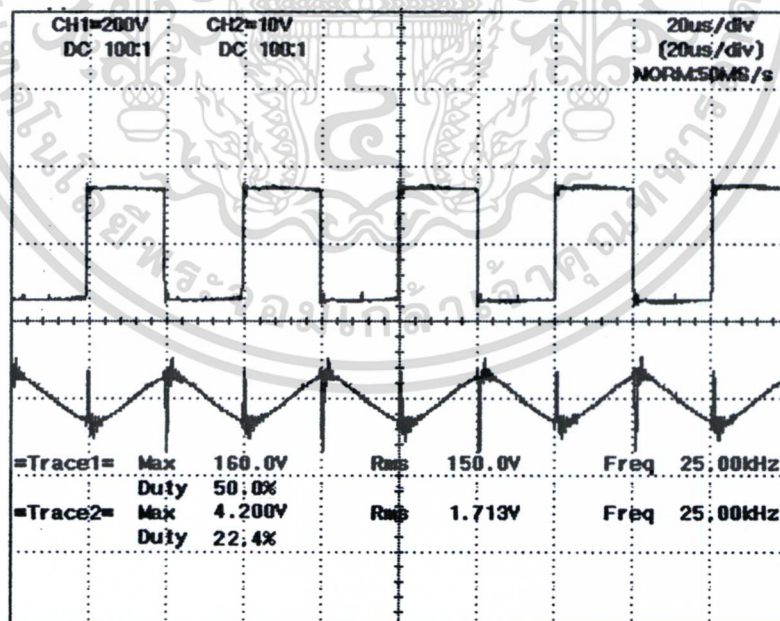


รูปที่ 4.96 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

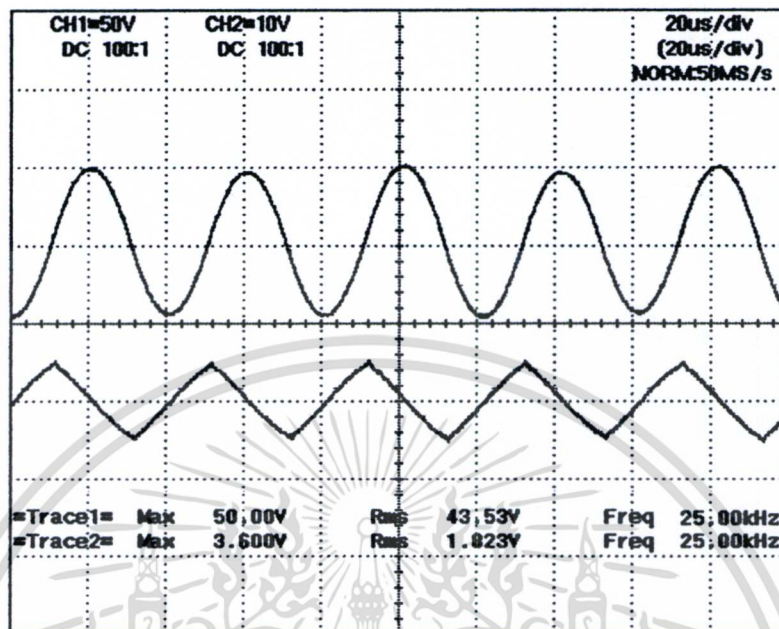


รูปที่ 4.97 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



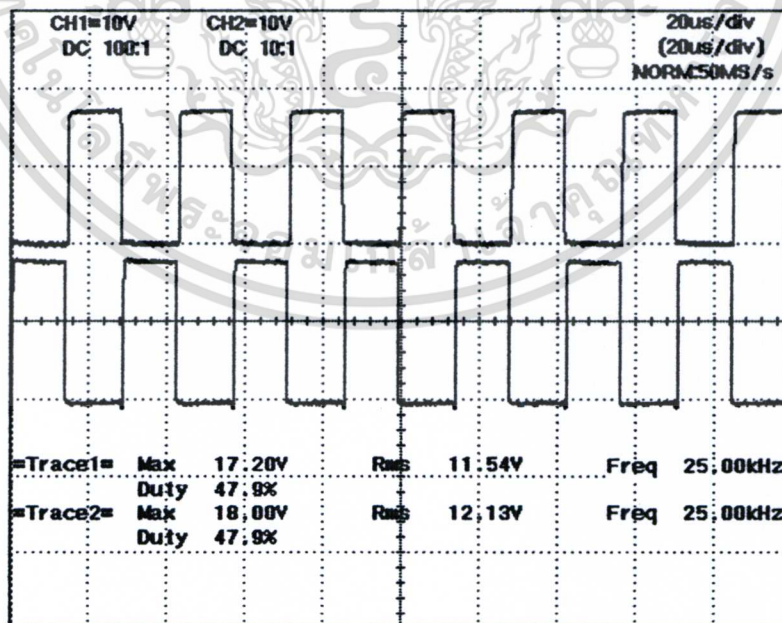
รูปที่ 4.98 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



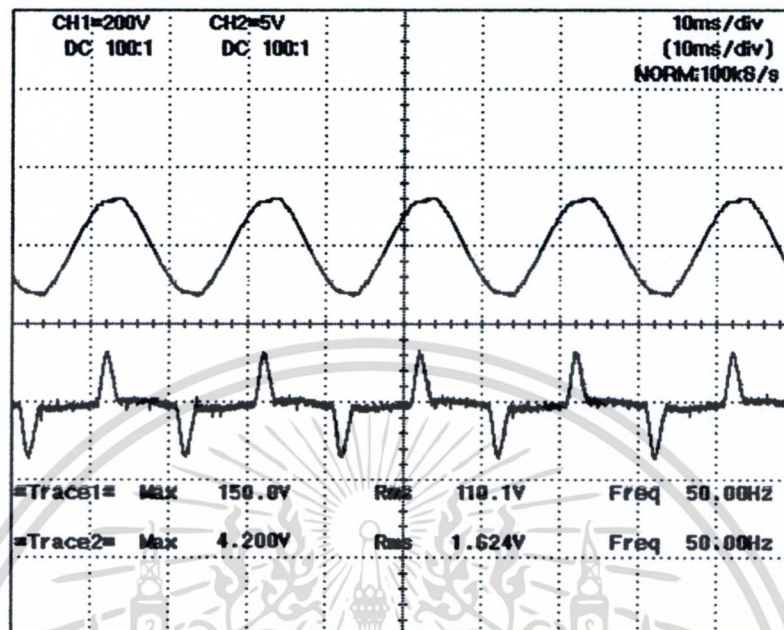
รูปที่ 4.99 แรงดันและกระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลง

ที่อัตราการไหลของอากาศ 80 ลิตรต่อนาที

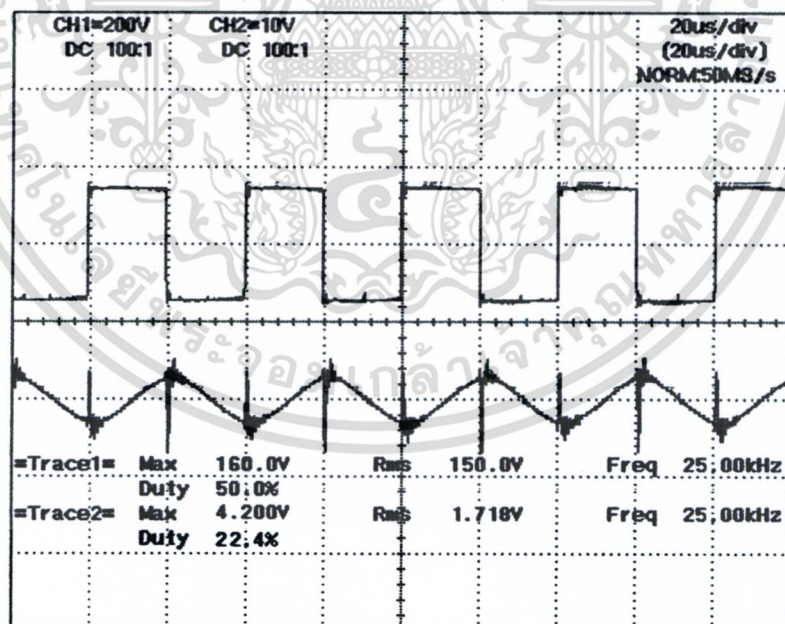


รูปที่ 4.100 สัญญาณพัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

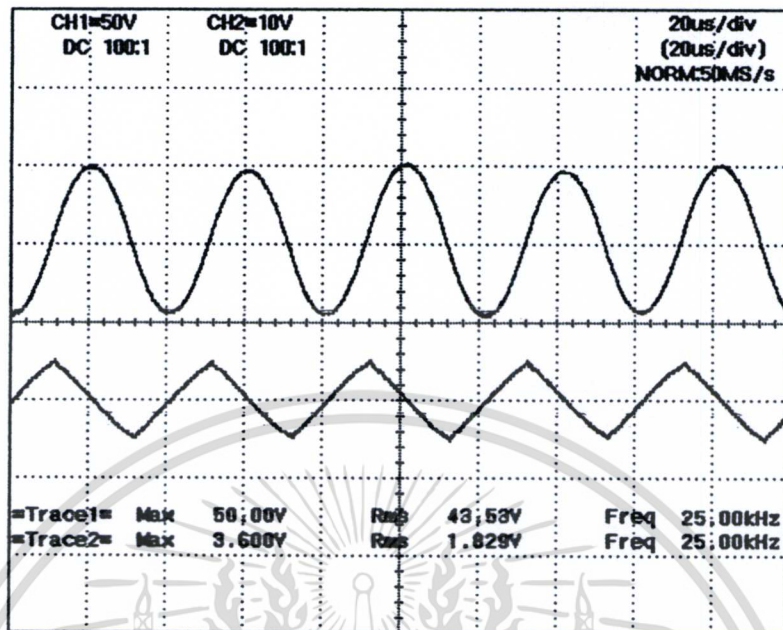


รูปที่ 4.101 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



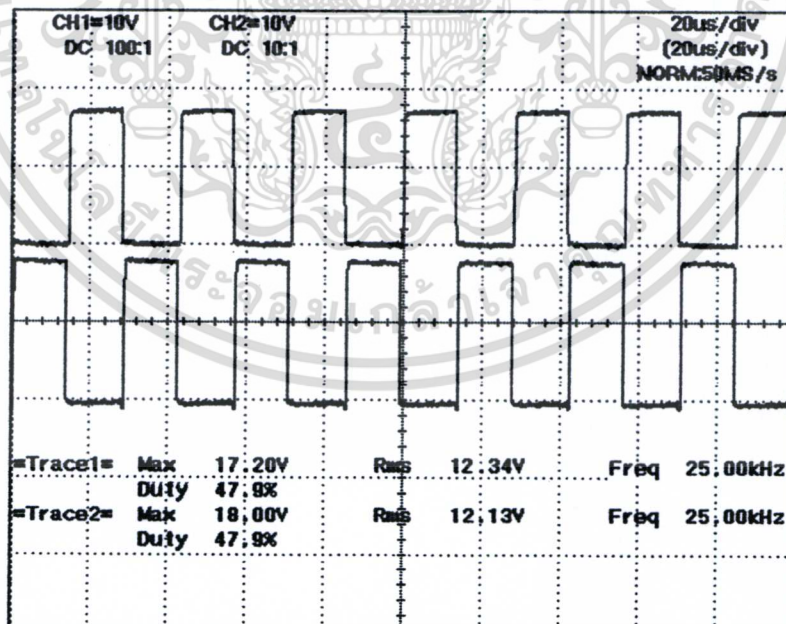
รูปที่ 4.102 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



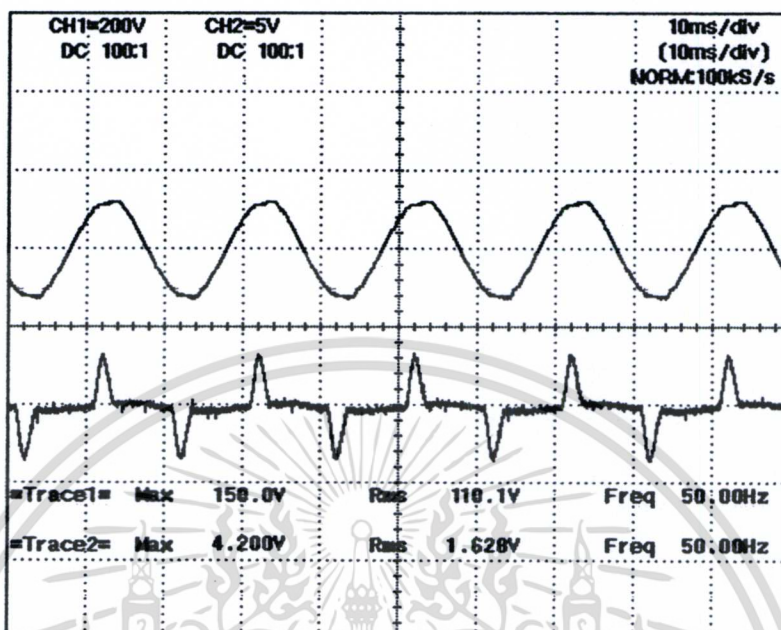
รูปที่ 4.101 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ที่อัตราการไหลของอากาศ 85 ลิตรต่อนาที

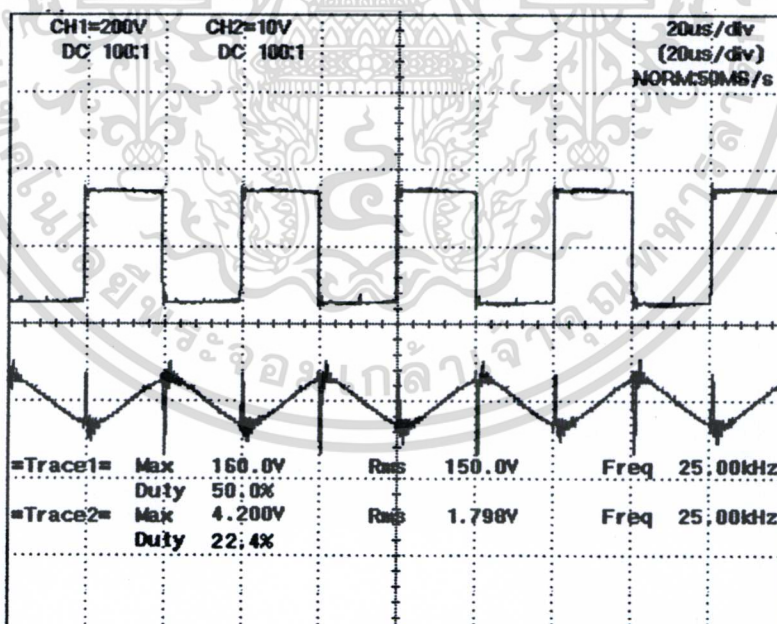


รูปที่ 4.103 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาคทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

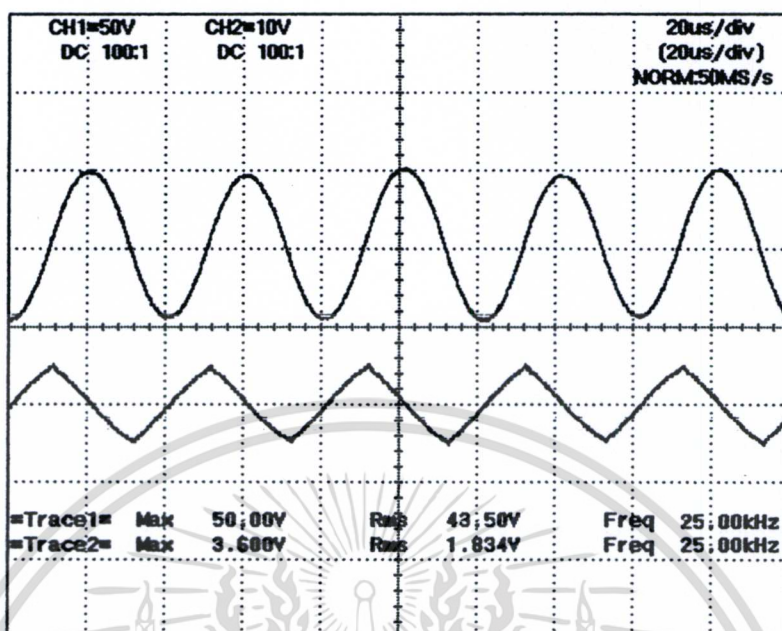


รูปที่ 4.104 แรงดันและกระแสอินพุทคอนเวอร์เตอร์



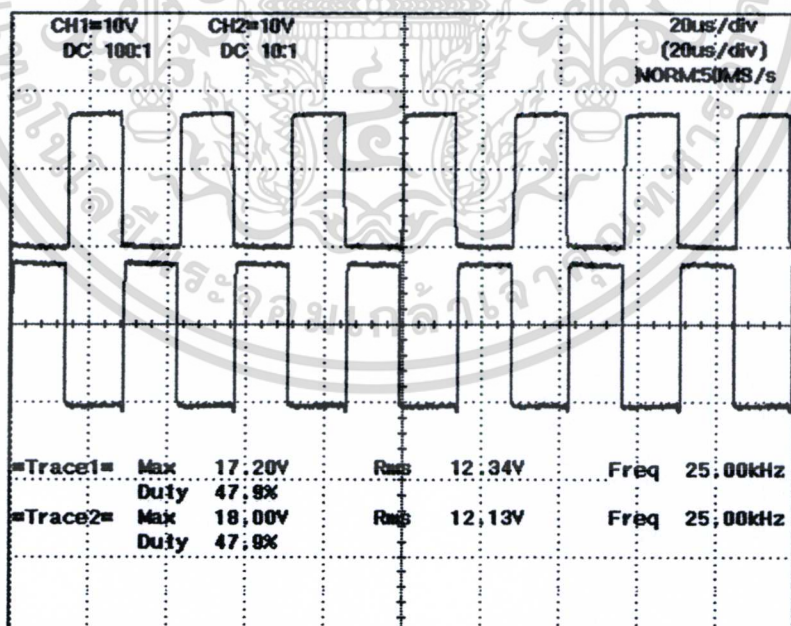
รูปที่ 4.105 แรงดันและกระแสเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



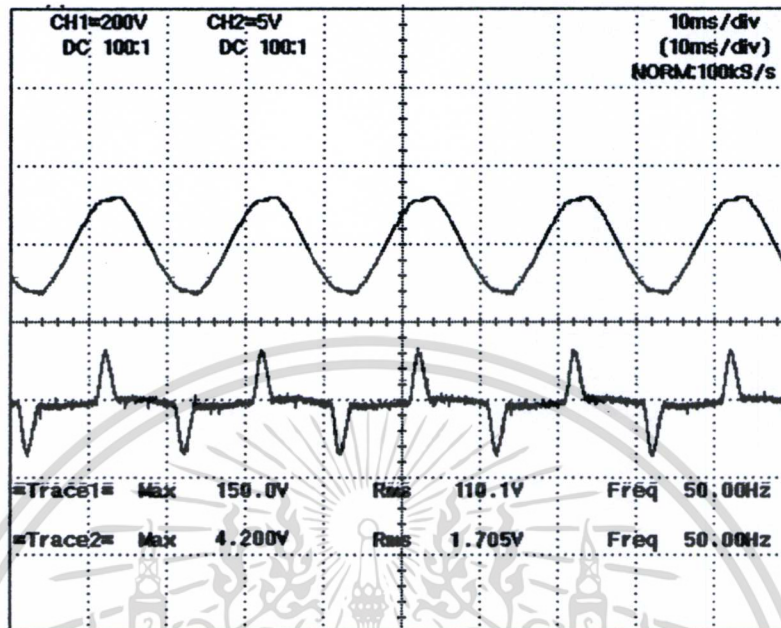
รูปที่ 4.106 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ที่อัตราการไหลของอากาศ 90 ลิตรต่อนาที

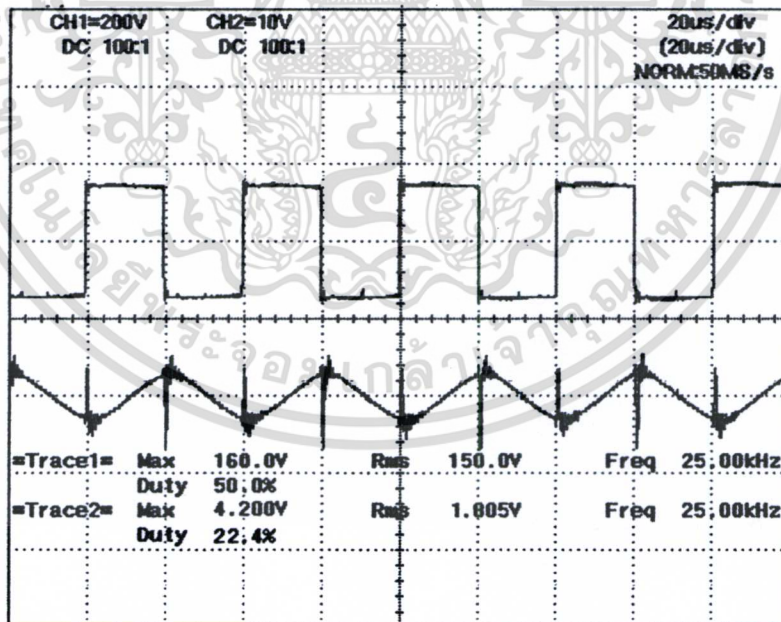


รูปที่ 4.107 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาคาทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

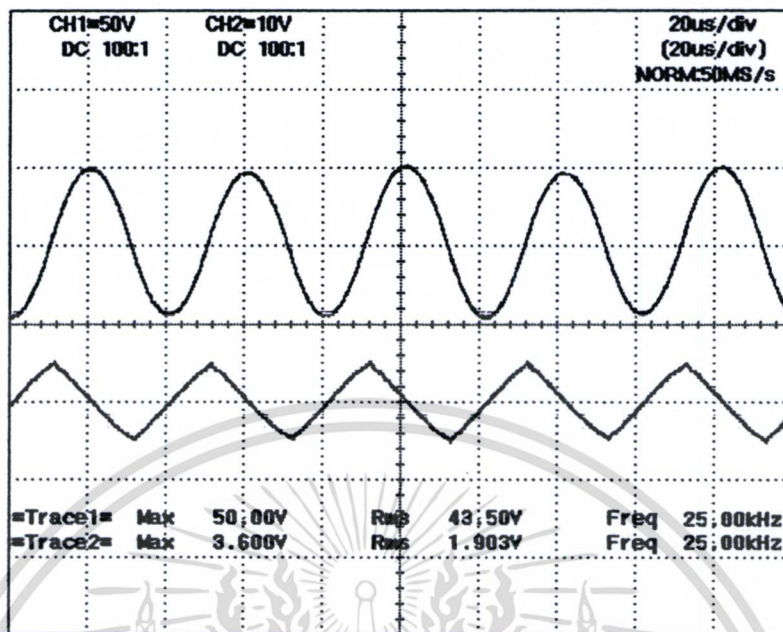


รูปที่ 4.108 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



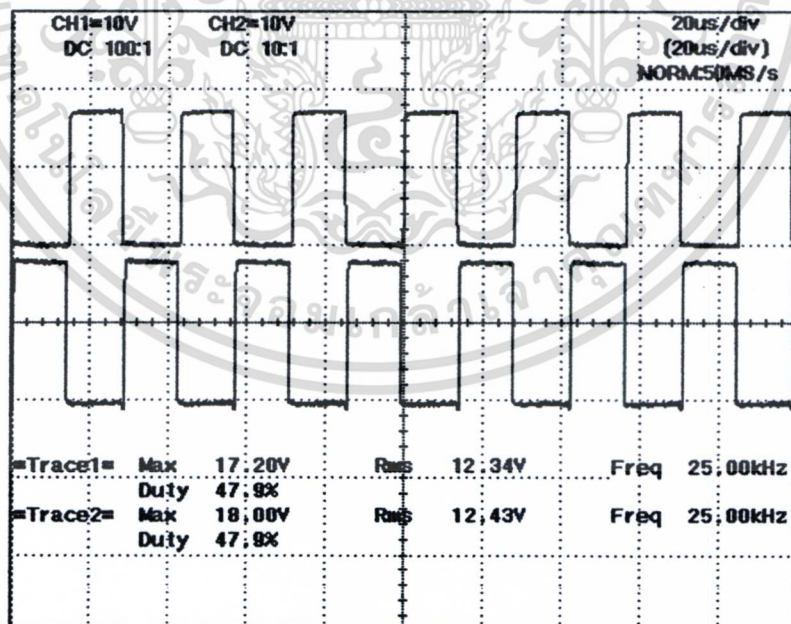
รูปที่ 4.109 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



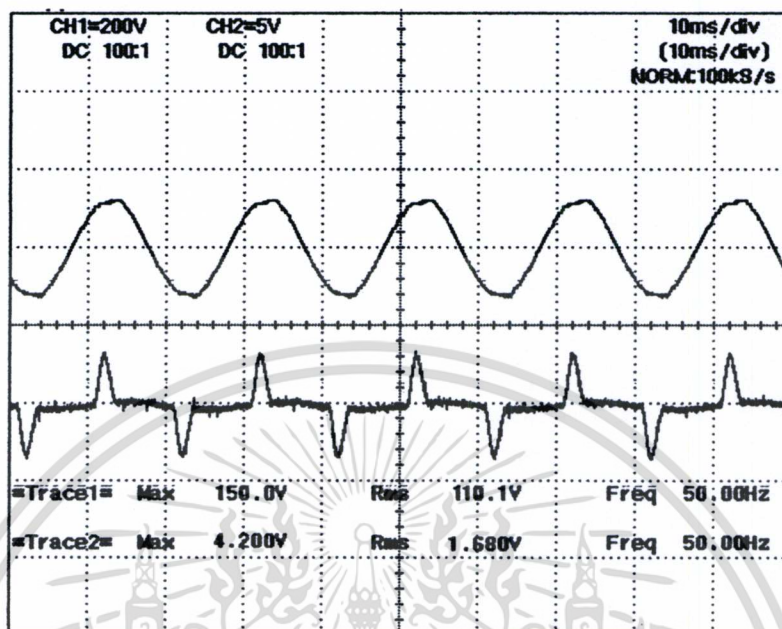
รูปที่ 4.110 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 95 ลิตรต่อนาที

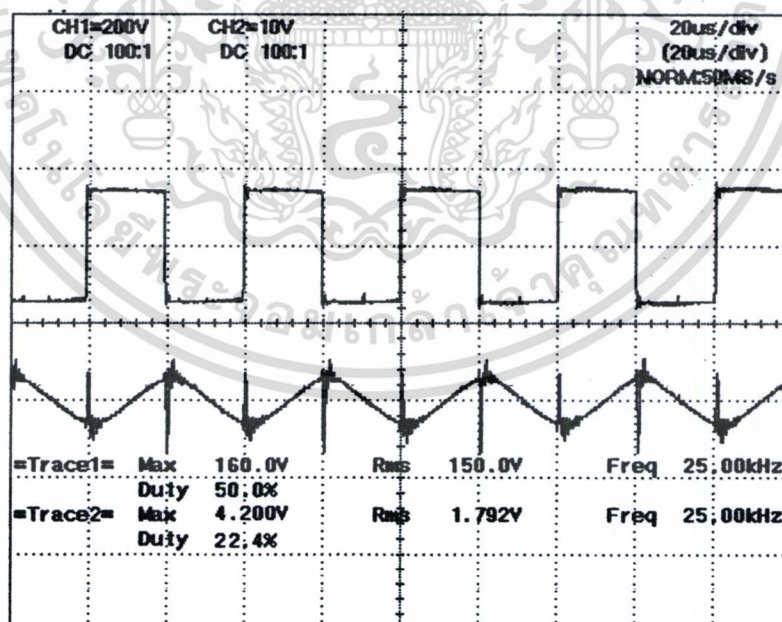


รูปที่ 4.111 สัญญาณพัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

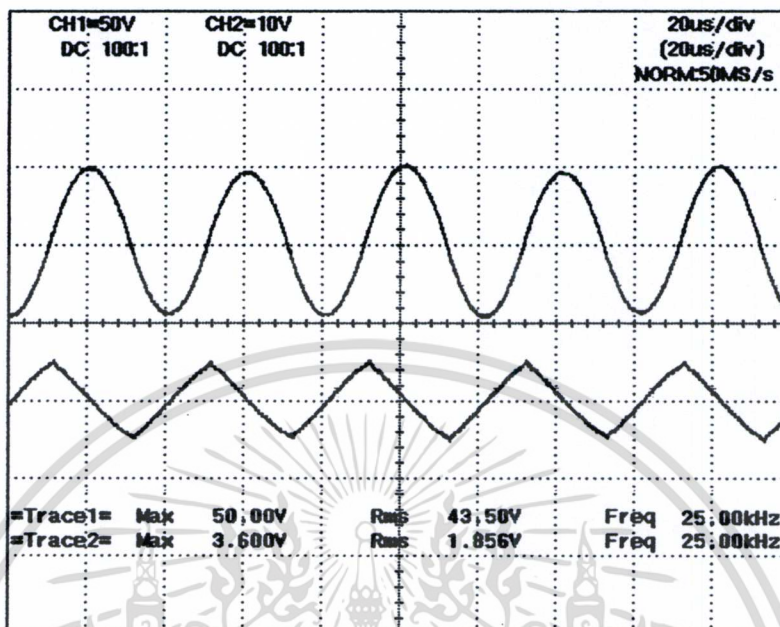


รูปที่ 4.112 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



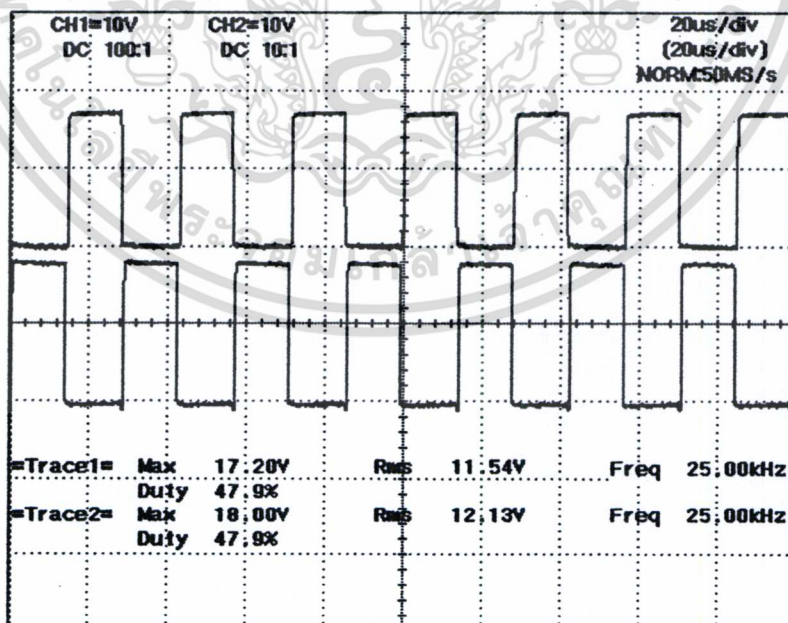
รูปที่ 4.113 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



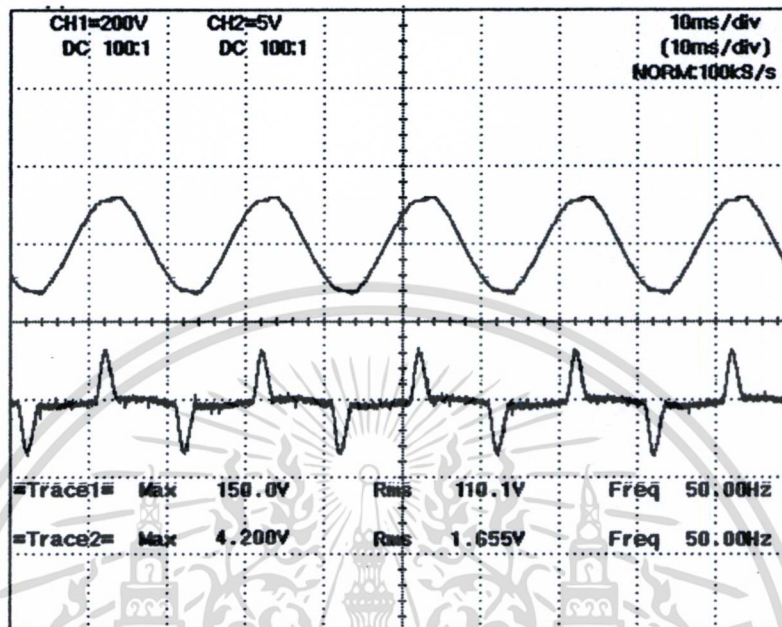
รูปที่ 4.114 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ที่อัตราการไหลของอากาศ 100 ลิตรต่อนาที

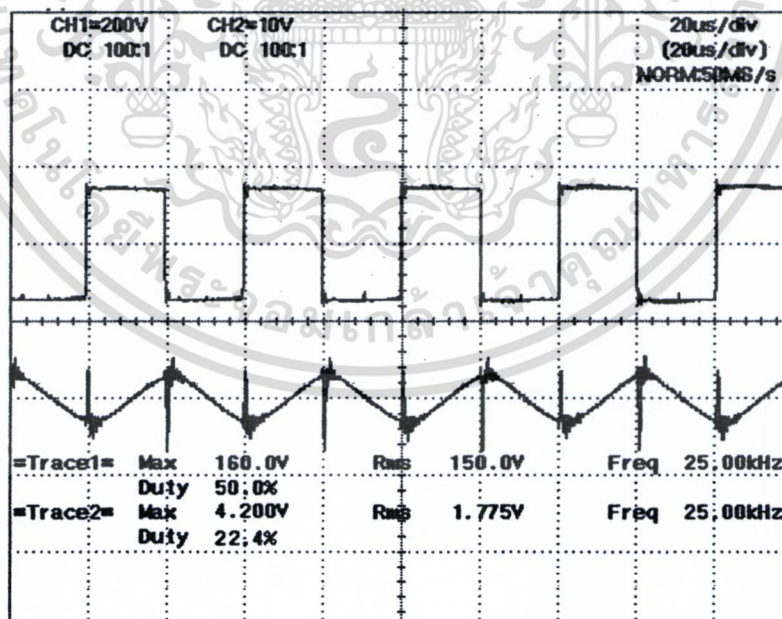


รูปที่ 4.115 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขานเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

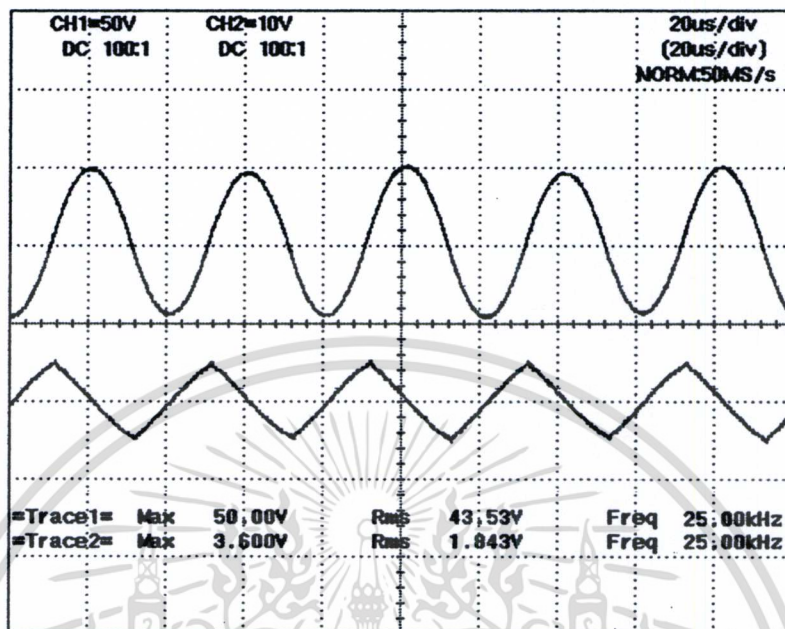


รูปที่ 4.116 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



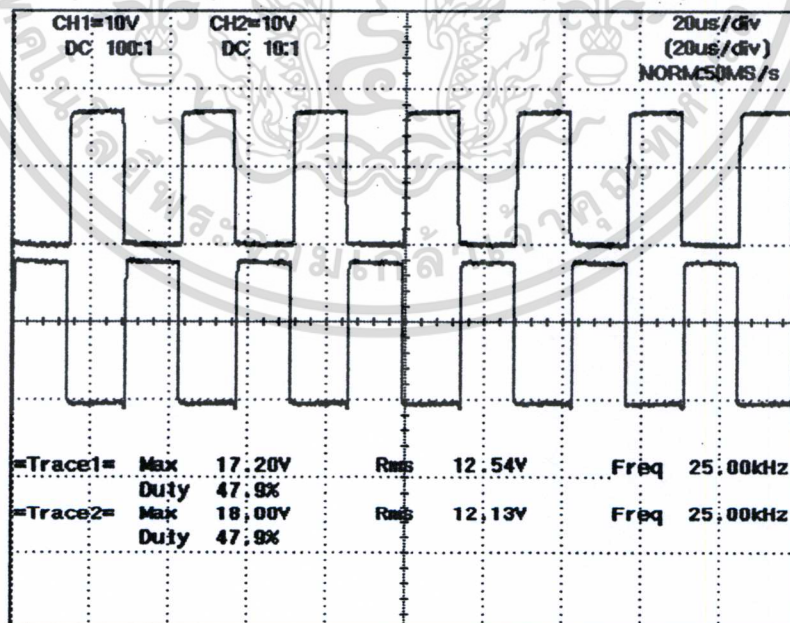
รูปที่ 4.117 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



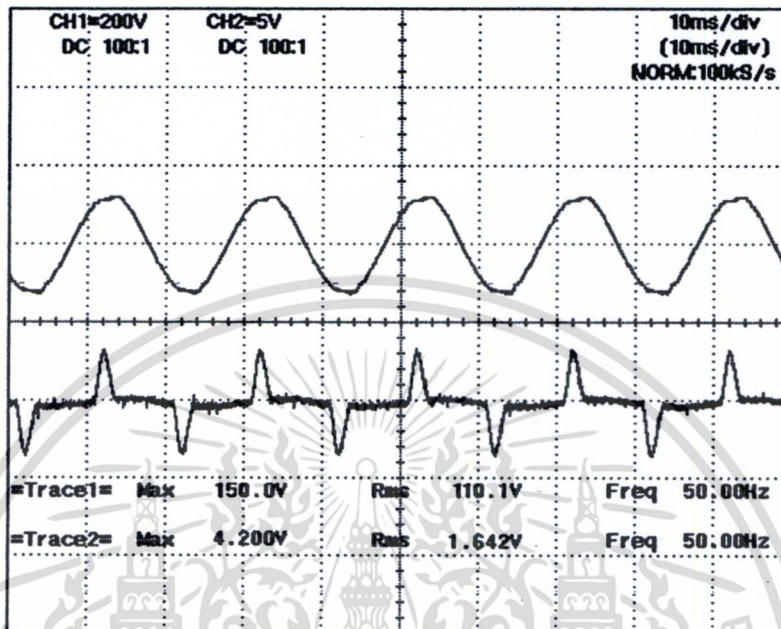
รูปที่ 4.118 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

- ที่อัตราการไหลของอากาศ 105 ลิตรต่อนาที

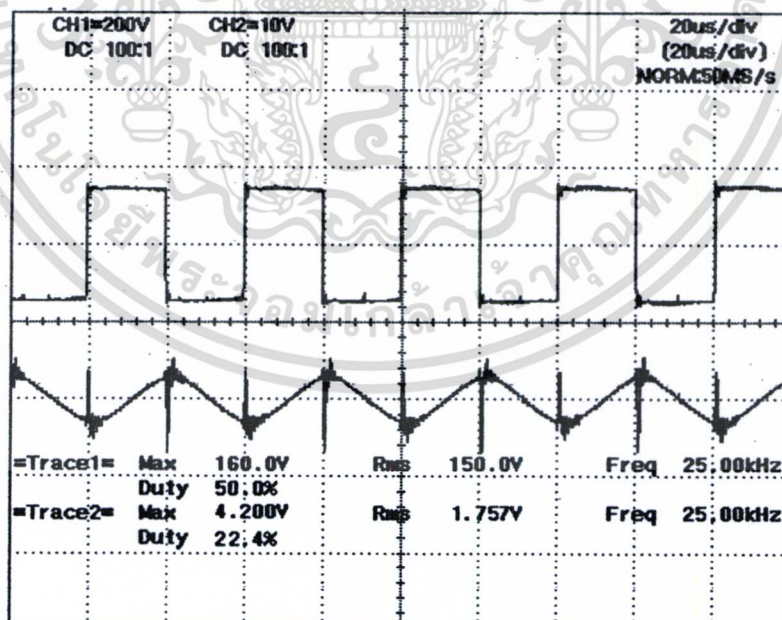


รูปที่ 4.119 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้แกขงหม้อแปลงความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

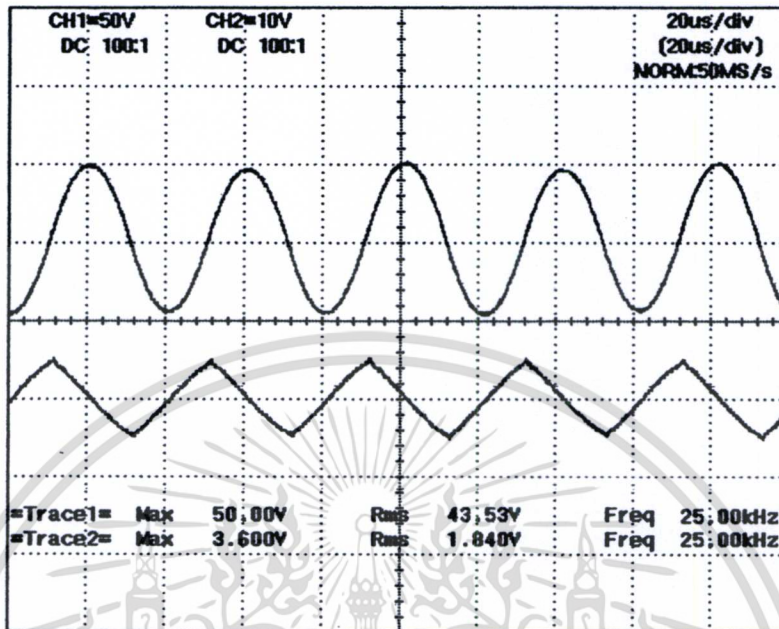


รูปที่ 4.120 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



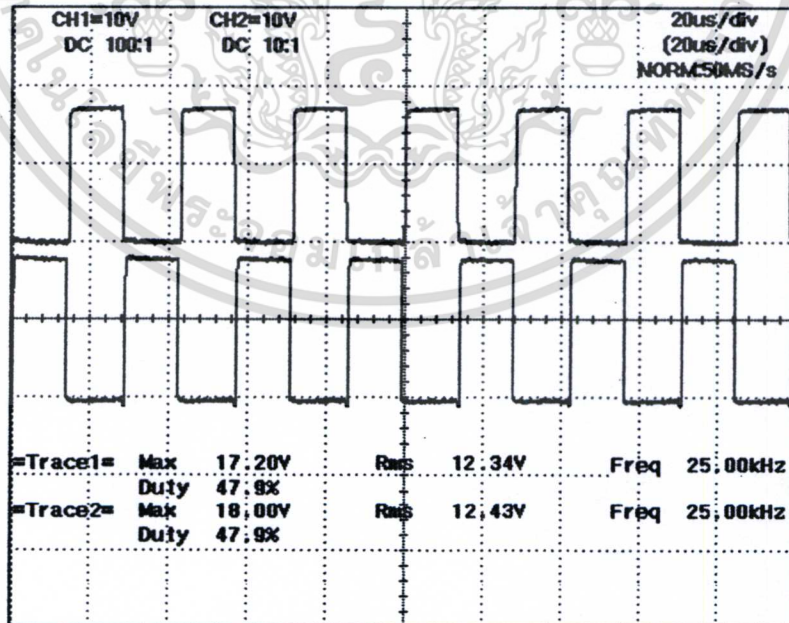
รูปที่ 4.121 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



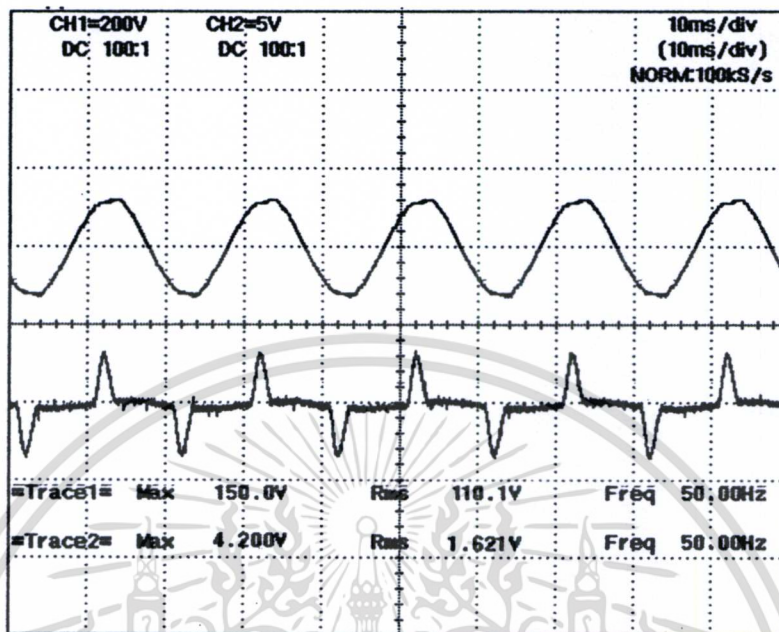
รูปที่ 4.122 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ที่อัตราการไหลของอากาศ 110 ลิตรต่อนาที

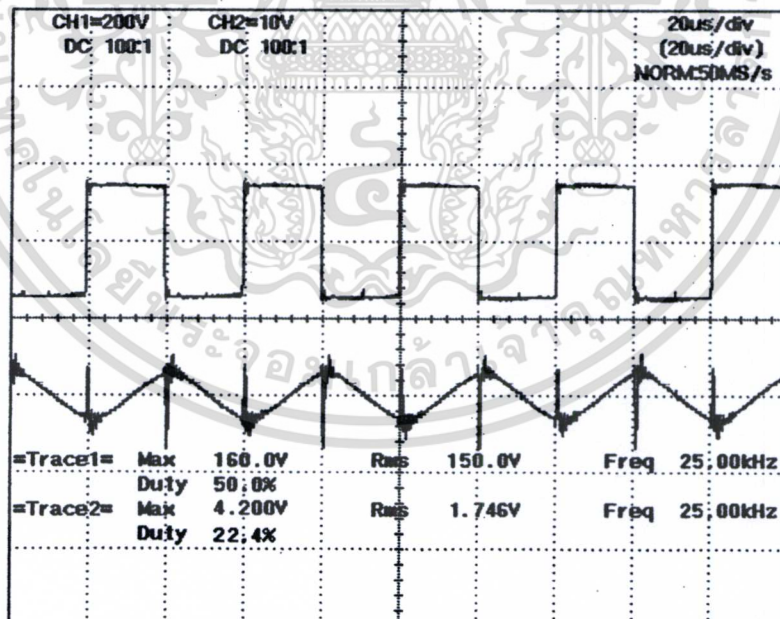


รูปที่ 4.123 สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสความถี่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

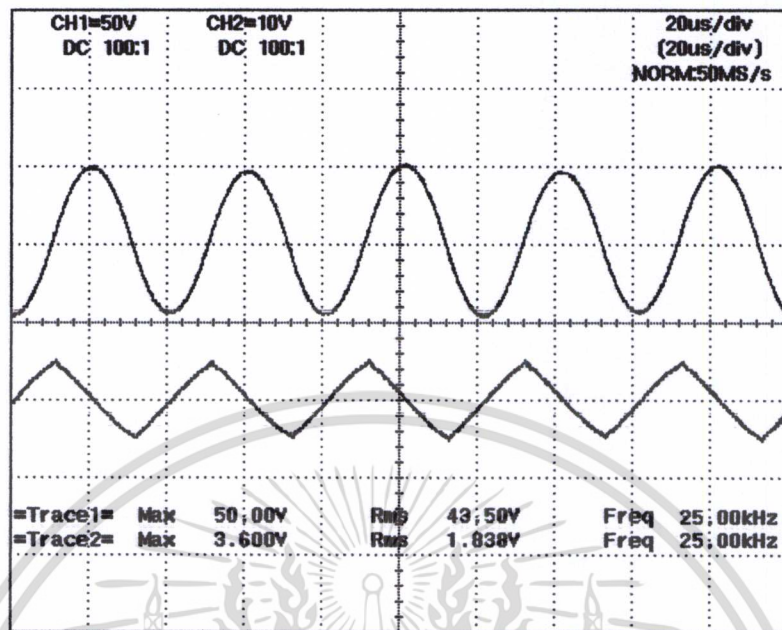


รูปที่ 4.124 แรงดันและกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.125 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

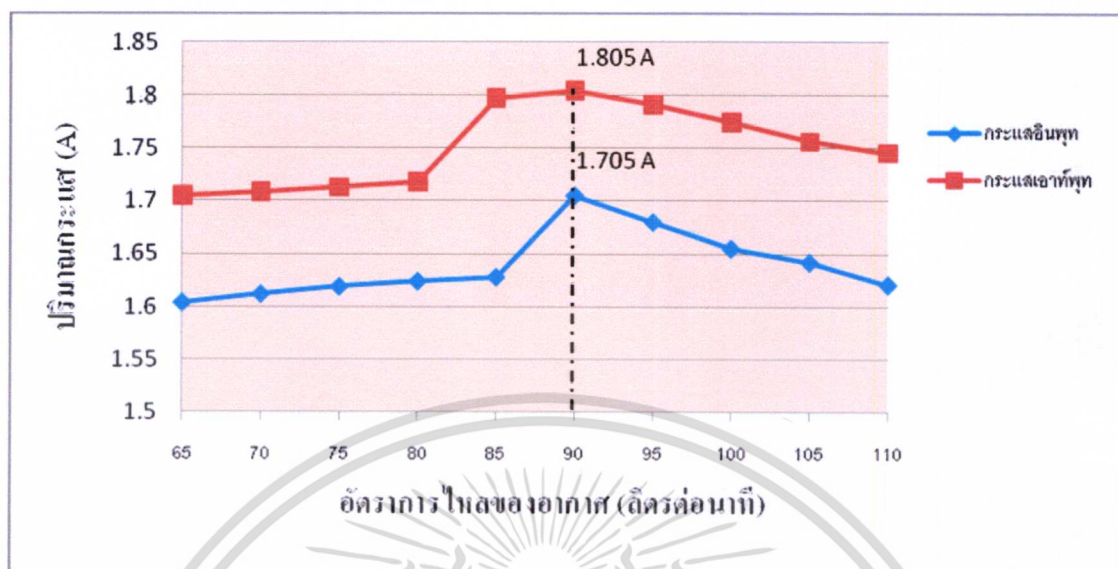


รูปที่ 4.126 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลง

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.

ปริมาณลม (ลิตร/นาที)	แรงดันอินพุต (V)	กระแสอินพุต (A)	แรงดันเอาต์พุต (V)	กระแสเอาต์พุต (A)	แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (kVp)	กระแสเอาต์พุตหม้อแปลง (A)
65	110.2	1.604	150.3	1.705	5.03	1.813
70	109.8	1.612	149.1	1.709	4.91	1.819
75	110.1	1.619	150.1	1.713	5.02	1.823
80	109.7	1.624	149.5	1.718	4.95	1.829
85	110.1	1.628	150.1	1.798	5.01	1.834
90	110.0	1.705	150.4	1.805	5.02	1.903
95	109.5	1.680	149.6	1.792	4.92	1.856
100	110.5	1.655	150.0	1.775	5.04	1.843
105	110.4	1.642	151.0	1.757	5.02	1.840
110	110.1	1.621	149.8	1.746	5.03	1.838

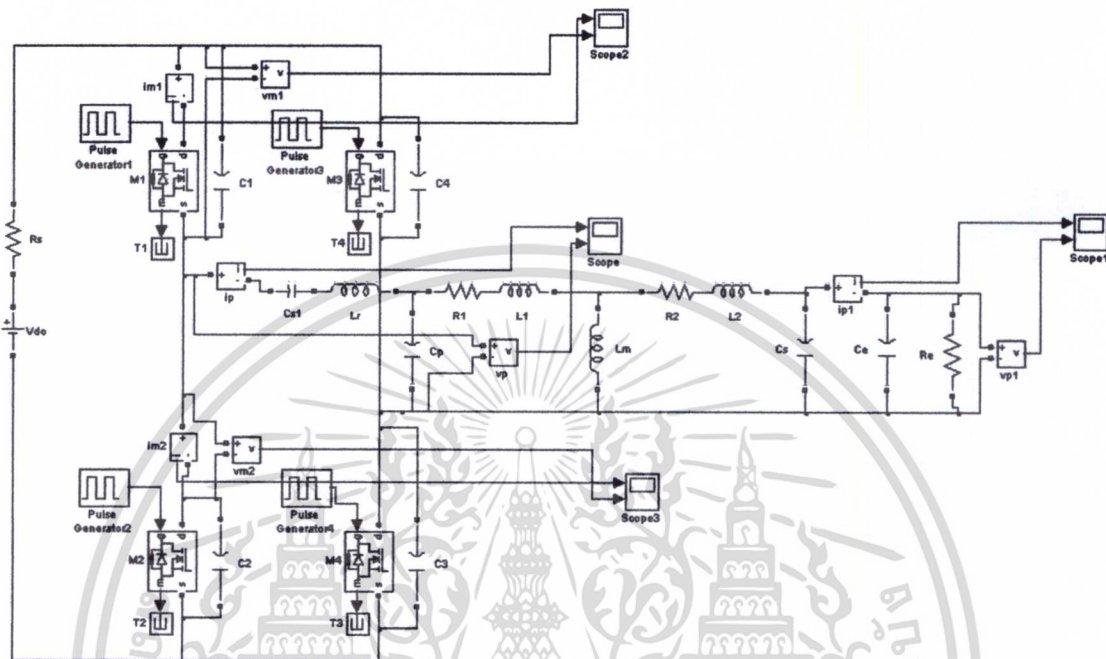
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.127 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุทและกระแสเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ

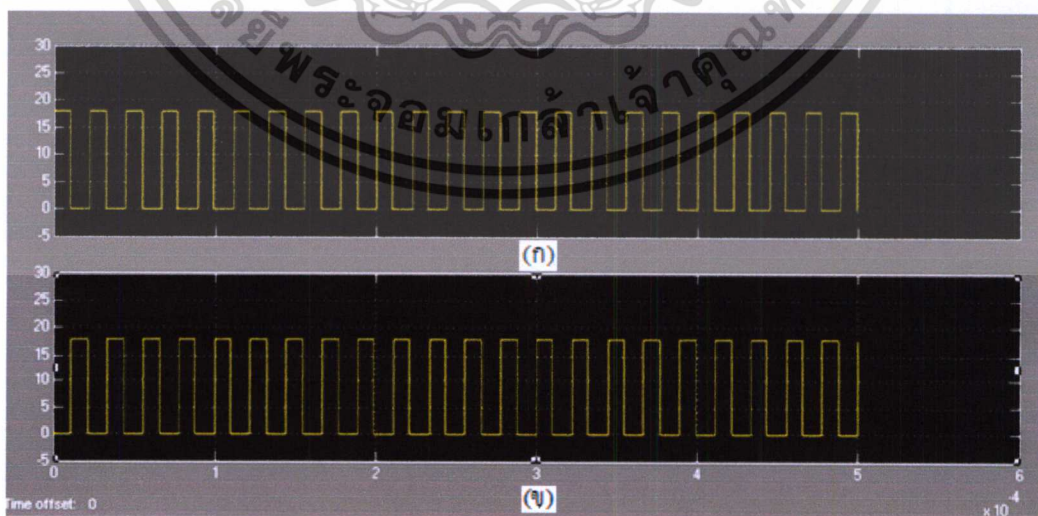
จากการเก็บผลทางไฟฟ้าของแท่งอิเล็กโทรดที่มีความยาว 90 ซม. ตามรูปที่ 4.88 – 4.126 นำค่ามาลงตารางแสดงผลตามตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณแรงดัน กระแสทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์รวมถึงแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม. พบว่าเมื่อกำหนดค่าแรงดันอินพุทให้คงที่ 110 V และกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลงให้คงที่เท่ากับ 5 kVp จะทำให้ค่าของกระแสมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลจากตารางที่ 4.5 พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศ 90 ลิตรต่อนาทีจะได้ผลของกระแสสูงสุดทั้งด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 4.112 และ รูปที่ 4.113 ซึ่งเกิดจากอัตราการไหลของอากาศในช่วงนี้เหมาะสมสามารถที่จะแตกตัวได้ดีที่สุดซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิด โอโซนผลิตได้สูงสุดด้วยตามตารางที่ 4.127 ซึ่งจะได้อัตราการเกิดโอโซนที่ 60 g/hr แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นกระแสอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์มีค่าลดลงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.125 ที่อัตราการไหลของอากาศ 110 ลิตรและอัตราการเกิดก๊าซโอโซนมีค่าลดลงตามตารางที่ 4.12 ซึ่งอัตราการเกิดโอโซนมีค่าเท่ากับ 57 g/hr เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศในช่วงนี้ไม่เหมาะสมกับแท่งอิเล็กโทรดเพราะอากาศไม่สามารถแตกตัวได้ทัน

4.3 การจำลองการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซไอออน



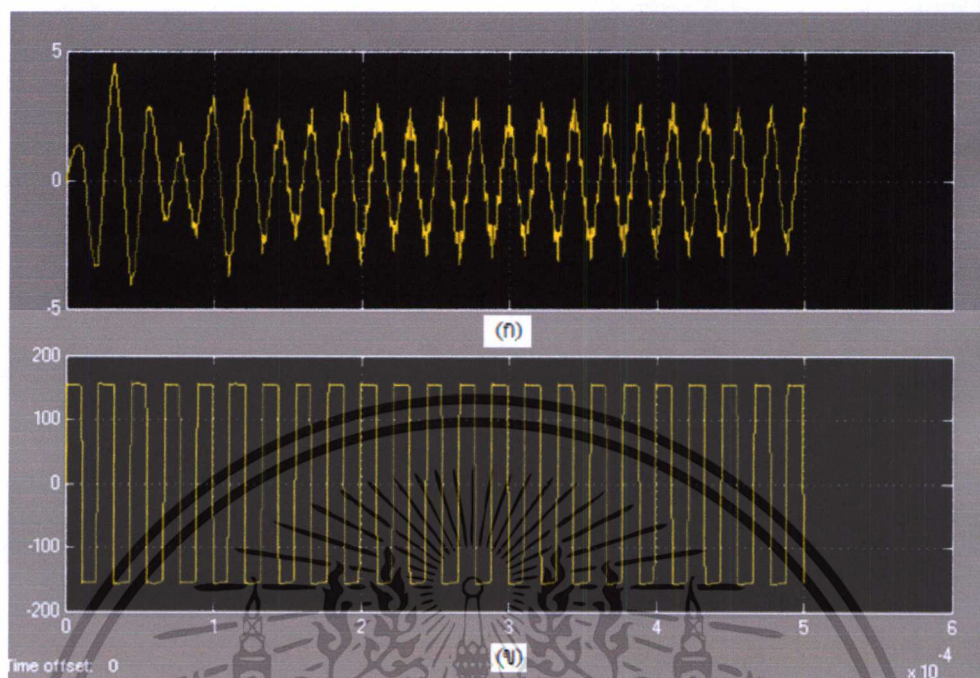
รูปที่ 4.128 วงจรจำลองการทำงานของฟลูตบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรมMATLAB, Simulink
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองวงจรฟลูตบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

$Cs1 = 10 \mu F$, $Lr = 0.45 mH$, $Cp = 1.52 nF$, $R1 = 0.1 \Omega$, $L1 = 0.067 mH$,
 $Lm = 26.55 mH$, $R2 = 0.095 \Omega$, $L2 = 0.0685 mH$, $Cs = 24.1 nF$, $Ce = 18.6 nF$,
 $Re = 2.23 k\Omega$

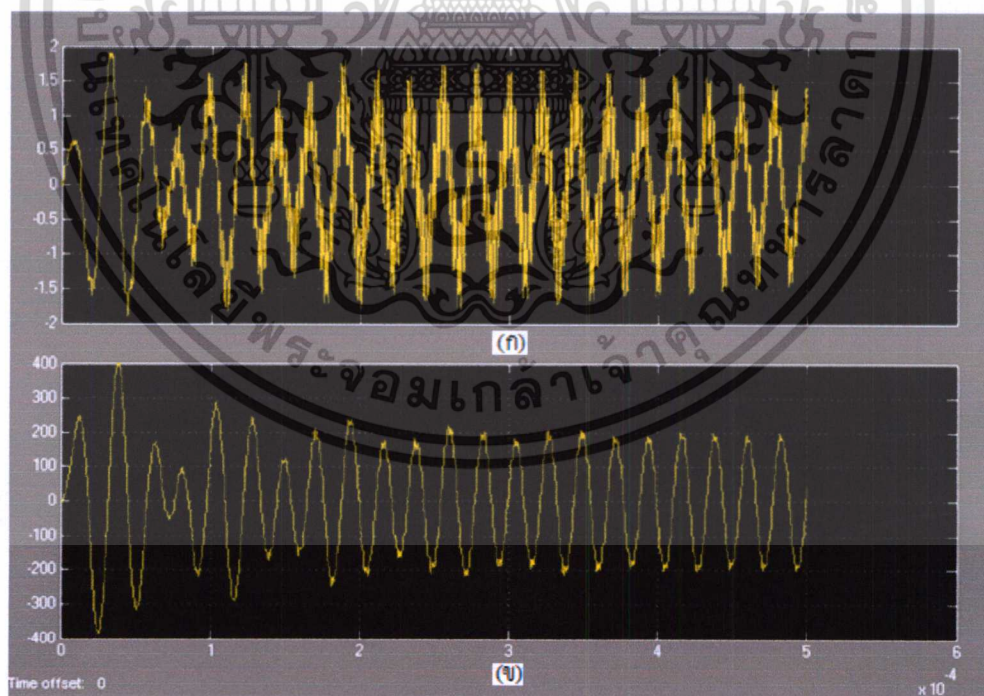


รูปที่ 4.129 (ก)และ(ข) สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาคของมอเตอร์เฟสจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.130 (ก) กระแสเอาต์พุตของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง
(ข) แรงดันเอาต์พุตของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง



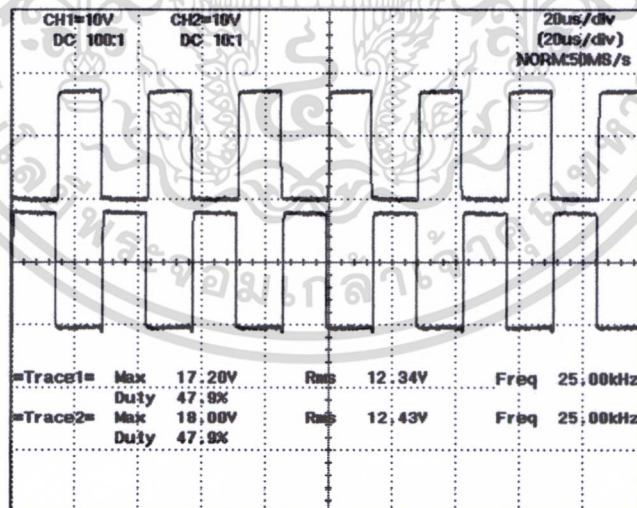
รูปที่ 4.131 (ก) กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงจากการจำลอง
(ข) แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.129 , รูปที่ 4.130 และรูปที่ 4.131 เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม Math LAB จำลองการทำงานของฟลูบรีดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยที่รูปที่ 4.129 (ก) และ(ข) สัญญาณพัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสทั้งสองภาค ซึ่งจากการวัดค่าทางไฟฟ้าพบว่าสัญญาณที่จ่ายให้กับขาเกตของมอสเฟสมีความใกล้เคียงกับดังแสดงในรูปที่ 4.132 (ก) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลอง (ข) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้า



(ก) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลอง

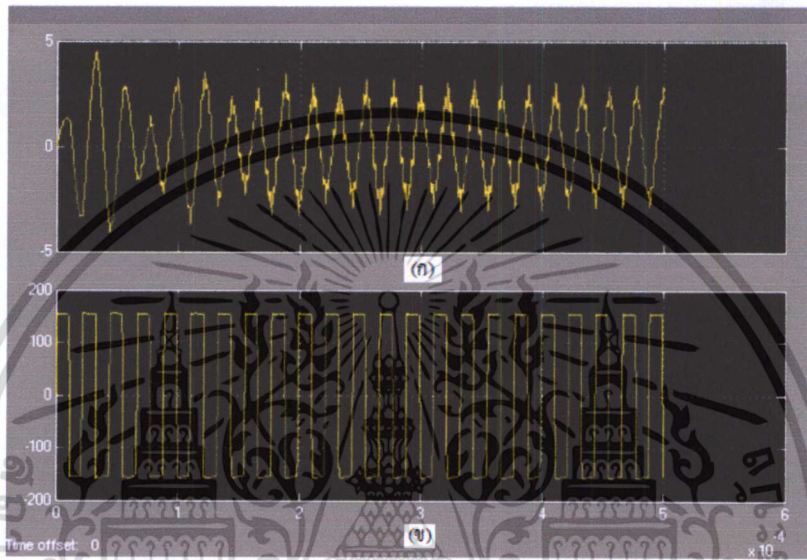


(ข) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า

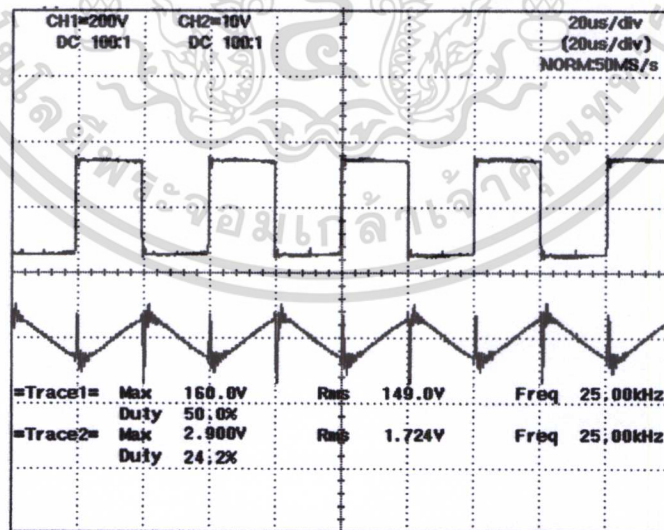
รูปที่ 4.132 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการวัดทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.130 (ก) และ (ข) เป็นสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งรูปคลื่นของสัญญาณก็จะมี ความใกล้เคียงกับการวัดค่าทางไฟฟ้า แต่สัญญาณของกระแสที่วัดจริงนั้นจะมีสไปล์เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของกระแสในช่วงของการ turn on และ turn off ของตัวสวิตซ์ซึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.133 (ก) สัญญาณจากการจำลอง และ (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง



(ก) รูปสัญญาณกระแสเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง
 (ข) รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง

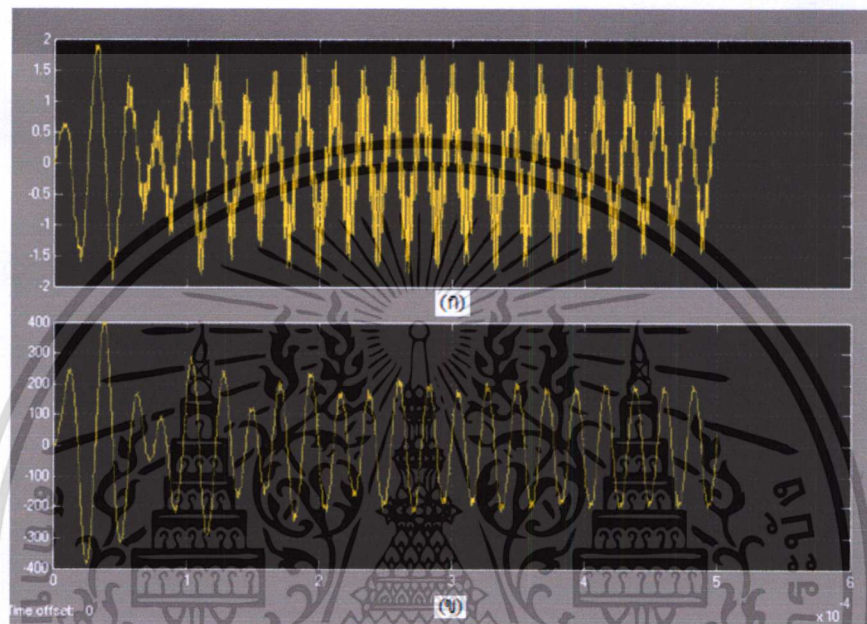


(ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.133 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการวัดทางไฟฟ้า

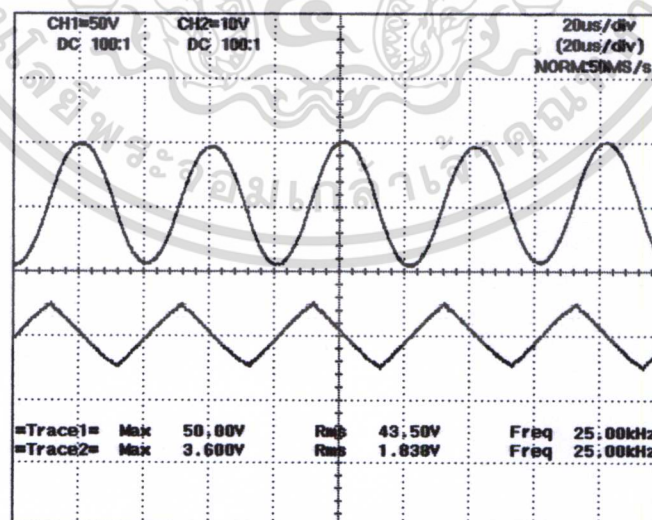
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.131 (ก) และ (ข) เป็นสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูงที่ได้จากการจำลองซึ่งด้านบนจะเป็นรูปสัญญาณกระแสส่วนด้านล่างจะเป็นรูปของแรงดัน โดยรูปคลื่นสัญญาณมีความใกล้เคียงกับการวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.134 (ก) สัญญาณจากการจำลอง และ (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า



(ก) รูปสัญญาณกระแสเอาต์พุทของหม้อแปลงจากการจำลอง

(ข) รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลงจากการจำลอง



(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.134 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการวัดทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเก็บผลก๊าซโอโซนโดยการทดลองทางเคมี

จากการทดสอบทางไฟฟ้าที่ผ่านมาแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อผลิตก๊าซโอโซนจะกำหนดให้มีค่าคงที่เพื่อทำให้ค่าสนามไฟฟ้า (E) มีค่าคงที่ โดยที่แรงดันอินพุตและความถี่คงที่ ดังนั้นการเก็บผลอัตราการเกิดก๊าซโอโซนจะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของอากาศจากนั้นนำมาคำนวณอัตราการใช้ของอากาศตามค่าเวลาของอากาศที่ไหลผ่านแกปอากาศปล่อยให้เครื่องผลิตก๊าซโอโซนทำงานผ่านไป 10 นาที จากนั้นจึงวัดผลการเกิดก๊าซโอโซน โดยวิธีการทางเคมีที่เรียกว่า การไทเทรต (Titrate) การวัดผลโอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลจำนวนหยดของสารเคมี $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ KI ที่ผ่านกระบวนการแพร่กระจายของก๊าซโอโซนจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1) เพื่อหาค่าอัตราการเกิดโอโซนที่เกิดขึ้น

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

เมื่อ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ คือ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
 mgO_3 คือ อัตราการเกิดก๊าซโอโซน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระดับอัตราการเกิดก๊าซโอโซนเมื่อนำจำนวนหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตในแต่ละอัตราการใช้ของอากาศโดยใช้สมการที่ 4.1 จากนั้นนำมาคูณด้วยเวลาเพื่อเทียบเป็นปริมาณต่อเวลา โดยในการทดสอบเครื่องทำงานเป็นเวลา 1 นาที ดังนั้นจึงคูณด้วย 60 จะได้เป็นปริมาณก๊าซต่อ 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบสี่ครั้งต่ออัตราการไหลของอากาศหนึ่งค่า โดยทำการปรับอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 5 ลิตรต่อนาที ถึง 50 ลิตรต่อนาที แล้วหาค่าเฉลี่ย

4.5 การคำนวณหาเวลาที่อากาศไหลผ่านแกปอากาศของแท่งอิเล็กโทรด

คำนวณหาปริมาตรของทรงกระบอกของแท่งสแตนเลสและปริมาตรของแก๊วจากสมการ (4.2)

$$\pi \times r^2 \times l = \text{Vol}m^3 \quad (4.2)$$

โดยที่ r^2 = รัศมีของทรงกระบอก (m)
 l = ความยาวของทรงกระบอก (m)
 Vol = ปริมาตรของทรงกระบอก (m^3)

จากนั้นนำปริมาตรของสแตนเลสมาลบกับปริมาตรของแก้วก็จะได้ปริมาตรของแก๊ปอากาศภายในของแท่งอิเล็กโตรด

การหาเวลาของก๊าซที่ไหลผ่านภายในแก๊ปอากาศของแท่งอิเล็กโตรดจะต้องทราบอัตราการไหลของอากาศที่เข้าแท่งอิเล็กโตรดแล้วทำให้ผลิตก๊าซไอโซนได้มากที่สุดจากนั้นนำอัตราการไหลของอากาศมาเปลี่ยนหน่วยจากลิตรต่อนาทีเป็นลูกบารี่เมตรต่อนาทีโดยการนำอัตราการไหลของอากาศ (ลิตร)หารด้วย 1,000 ก็จะลูกบารี่เมตรต่อนาทีจากนั้นก็นำไปหารกับปริมาตรของแก๊ปอากาศภายในของแท่งอิเล็กโตรดเป็น ดังสมการ (4.3)

$$t = \frac{Volm^3}{y} \quad (4.3)$$

โดยที่ t = เวลาของก๊าซที่ไหลผ่านภายในแก๊ปของแท่งอิเล็กโตรด (min)
 Vol = ปริมาตรของทรงกระบอก (m^3)
 y = อัตราการไหลของอากาศที่เข้าแท่งอิเล็กโตรด (m^3/min)

จากการคำนวณปริมาตรตามสมการที่ (4.3) จะได้ค่าปริมาตรของช่องแก๊ปอากาศของแท่งอิเล็กโตรดดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าปริมาตรช่องแก๊ปอากาศของแท่งอิเล็กโตรดที่แก๊ป

ความยาวแท่งอิเล็กโตรด (ซม.)	ช่องแก๊ปอากาศของแท่งอิเล็กโตรด (ซม.)	ปริมาตรที่ช่องแก๊ปอากาศ (m^3)
30	0.1	0.039×10^{-3}
	0.25	0.095×10^{-3}
	0.4	0.147×10^{-3}
60	0.1	0.079×10^{-3}
	0.25	0.191×10^{-3}
	0.4	0.294×10^{-3}
90	0.1	0.118×10^{-3}
	0.25	0.285×10^{-3}
	0.4	0.440×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน (gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
20	12	13	13	13	13	12.8	117
25	14	13	14	14	15	14	93
30	15	14	15	14	15	14.6	78
35	17	16	17	17	16	16.5	67
40	18	19	19	20	21	19.4	58
45	23	23	22	24	23	23	52
50	23	22	22	22	22	22.2	47
55	22	21	21	22	21	21.2	42
60	21	20	20	21	21	20.6	39
65	20	20	20	20	19	19.8	36

ตารางที่ 4.9 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกบอากาศ 0.25 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

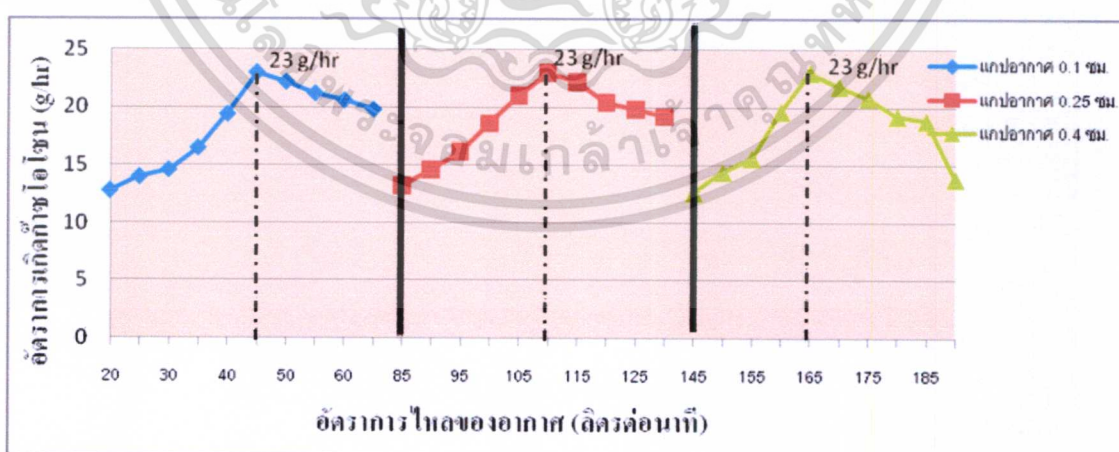
อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน (gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
85	13	12	14	14	13	13.2	65
90	14	14	15	15	15	14.6	63
95	16	16	15	17	17	16.2	60
100	18	18	19	19	19	18.6	57
105	20	20	22	22	21	21	54
110	22	24	23	23	23	23	52
115	23	22	22	23	21	22.2	49
120	21	20	20	20	21	20.4	46
125	20	20	19	19	21	19.8	45
130	20	19	19	19	19	19.2	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกบอากาศ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

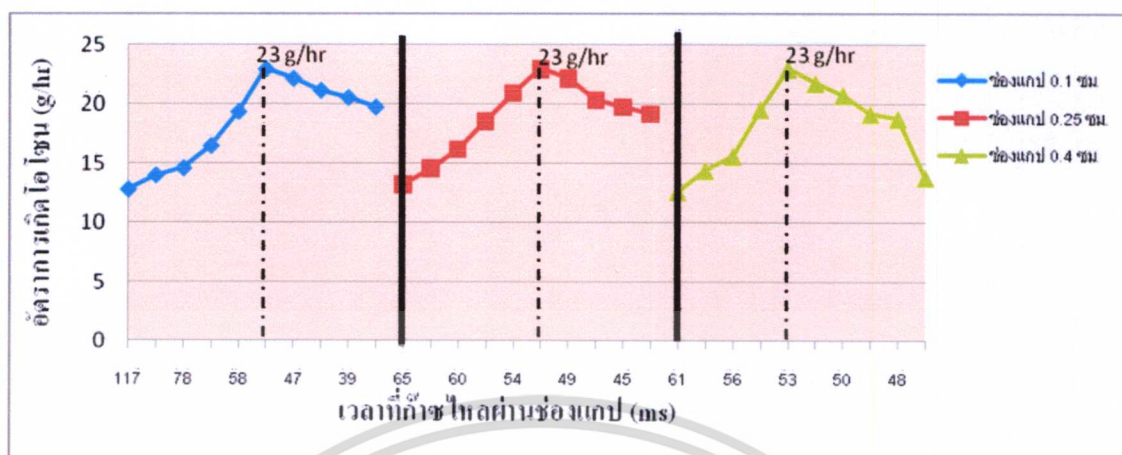
อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
145	12	13	13	12	13	12.6	61
150	14	14	15	15	16	14.4	59
155	15	16	16	16	15	15.6	56
160	17	20	19	21	21	19.6	55
165	23	22	22	21	21	21.8	54
170	23	23	23	23	23	23	52
175	21	21	22	20	20	20.8	50
180	20	19	19	20	18	19.2	49
185	19	19	20	18	18	18.8	48
190	18	17	17	18	17	13.8	46

จากตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.8 นำค่าอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแกบจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 4.135 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.136 แสดงอัตราการเกิดก๊าซ โอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบ

จากตารางที่ 4.7 , 4.8 , 4.9 แสดงถึงอัตราการเกิดก๊าซ โอโซน ที่ความยาวแท่ง 30 ซม. แกบอากาศที่ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. จะเห็นว่าที่ช่องแคบต่างกันอัตราการไหลของอากาศที่จะทำให้เกิดอัตราการเกิด โอโซน สูงสุดนั้นจะไม่เท่ากัน โดยที่ช่องแคบ 0.1 ซม. ได้อัตราการเกิด โอโซน สูงสุดที่ 23 g/hr ใช้อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 45 ลิตรต่อนาที แต่ที่ช่องแคบ 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. อัตราการเกิด โอโซน ที่ได้สูงสุดนั้นเท่ากันคือ 23 g/hr แต่อัตราการไหลของอากาศนั้นไม่เท่ากัน โดยที่ช่องแคบ 0.25 ซม. จะมีค่าเท่ากับ 110 ลิตรต่อนาที แต่ที่ช่องแคบ 0.4 ซม. จะใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 170 ลิตรต่อนาที แต่ถ้าพิจารณาที่ช่องแคบต่างกันเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบนั้นเท่ากันจะทำให้ได้อัตราการเกิด โอโซน สูงสุดมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน โดยที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. ที่ช่องแคบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ถ้าเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบเท่ากับ 52 ms จะทำให้ได้อัตราการเกิด โอโซน สูงสุดที่ 23g/hr

ตารางที่ 4.11 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแห่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
40	35	35	36	36	36	35.6	118
45	37	37	36	37	37	36.8	105
50	38	38	37	38	39	38	95
55	39	38	38	39	39	38.6	86
60	39	40	40	41	40	40	79
65	41	40	42	41	41	41	73
70	41	41	41	40	40	40.6	68
75	40	40	41	40	40	40.2	63
80	39	39	39	38	37	38.4	59
85	38	39	38	37	37	37.8	56

ตารางที่ 4.12 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแห่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม. แกบอากาศ 0.25 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

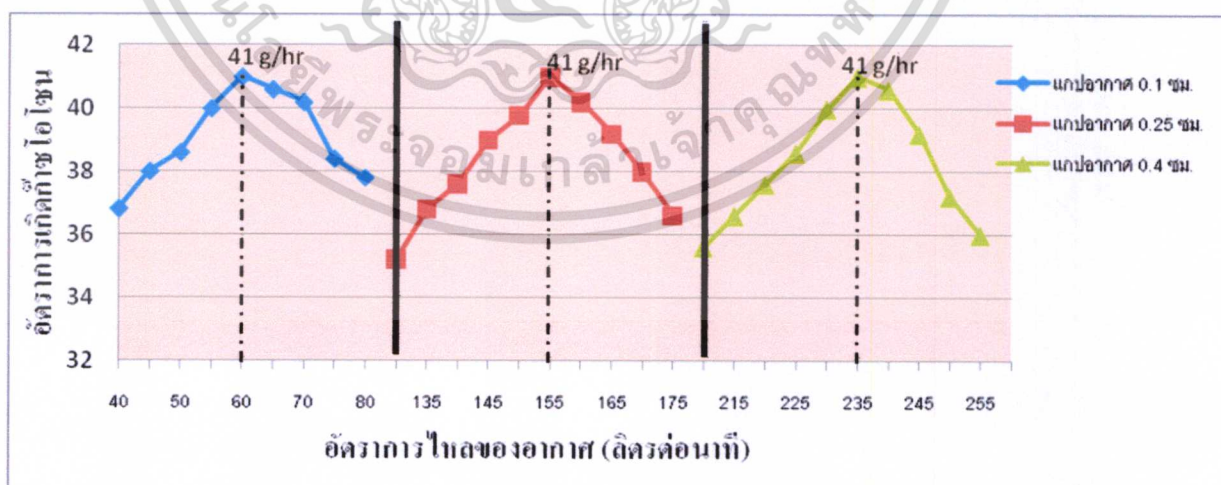
อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
135	36	36	35	35	34	35.2	84
140	36	37	37	37	37	36.8	82
145	37	38	38	37	38	37.6	79
150	39	39	38	39	40	39	76
155	40	40	39	40	40	39.8	74
160	40	41	41	42	41	41	73
165	41	40	40	40	40	40.2	69
170	40	39	39	40	38	39.2	67
175	39	38	38	38	37	38	65
180	37	37	36	37	36	36.6	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

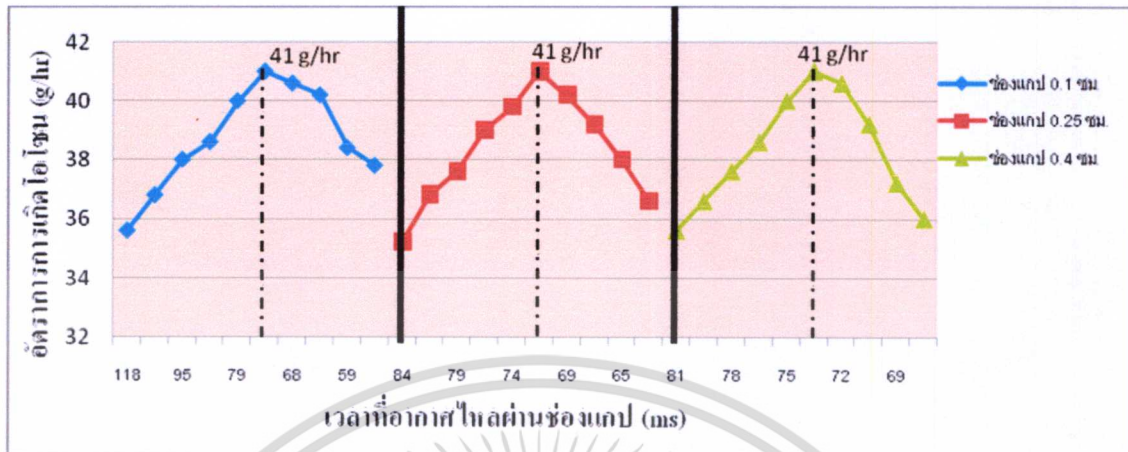
อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
215	36	35	35	36	36	35.6	81
220	37	37	37	36	36	36.6	80
225	38	38	37	38	37	37.6	78
230	38	39	39	39	38	38.6	77
235	39	39	40	41	41	40	75
240	41	41	41	42	40	41	73
245	42	41	40	40	40	40.6	72
250	39	40	40	38	39	39.2	70
255	38	38	37	37	36	37.2	69
260	37	36	36	35	36	36	67

จากตารางที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 นำค่าอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแกบจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 4.137 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.135 แสดงอัตราการเกิดก๊าซ โอ โชน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบ

จากตารางที่ 4.10, 4.11, 4.12 แสดงอัตราการเกิดก๊าซ โอ โชน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นว่าที่ช่องแคบต่างกันอัตราการไหลของอากาศที่จะทำให้ได้อัตราการเกิดโอ โชนสูงสุดนั้นจะไม่เท่ากัน โดยที่ความยาวแท่ง 60 ซม. ช่องแคบ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ได้อัตราการเกิดโอ โชนสูงสุดที่ 41 g/hr แต่ใช้อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 65 ลิตรต่อนาที 160 ลิตรต่อนาที และ 240 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาที่ช่องแคบต่างกันเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบนั้นเท่ากันจะทำให้ได้อัตราการเกิด โอ โชนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน โดยที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. ที่ช่องแคบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ถ้าเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบเท่ากับ 73 ms จะทำให้ได้อัตราการเกิด โอ โชนสูงสุดที่ 41g/hr

ตารางที่ 4.14 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม.

เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
65	55	55	54	54	53	54.2	109
70	56	55	56	57	57	56.4	101
75	57	57	58	58	56	57.2	94
80	58	58	59	59	58	58.4	88
85	59	59	58	59	59	58.8	83
90	60	60	61	59	60	60	79
95	60	61	61	59	58	59.8	74
100	59	59	60	59	58	59	71
105	58	58	59	59	57	58.2	67
110	57	58	57	56	57	57	64

ตารางที่ 4.15 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.25 ซม.

เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

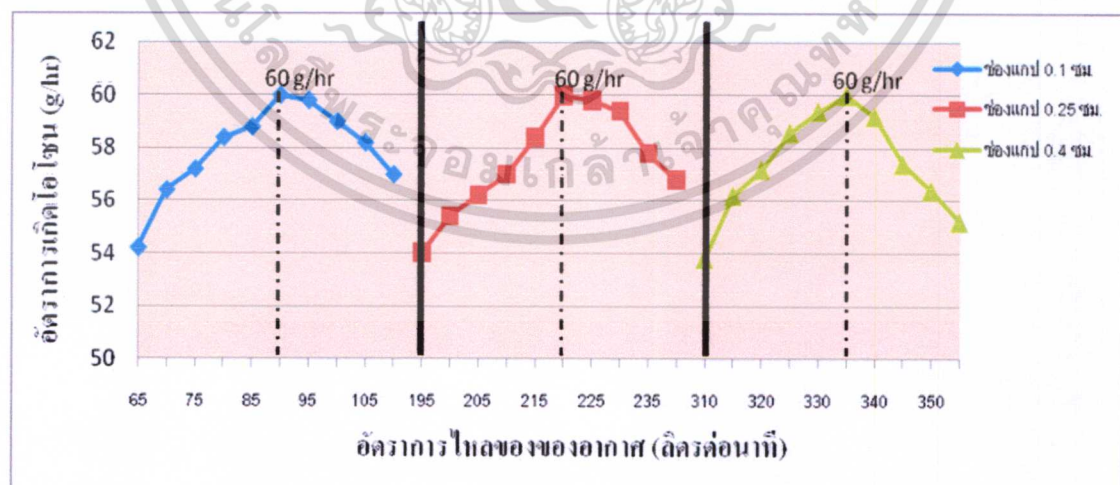
อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
195	53	54	54	55	54	54	86
200	55	55	56	55	56	55.4	85
205	56	56	57	57	55	56.2	83
210	57	57	56	57	58	57	81
215	58	58	59	58	59	58.4	80
220	59	60	60	61	60	60	79
225	61	61	60	59	58	59.8	76
230	60	60	59	59	59	59.4	75
235	59	58	58	57	57	57.8	73
240	58	57	57	57	55	56.8	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ

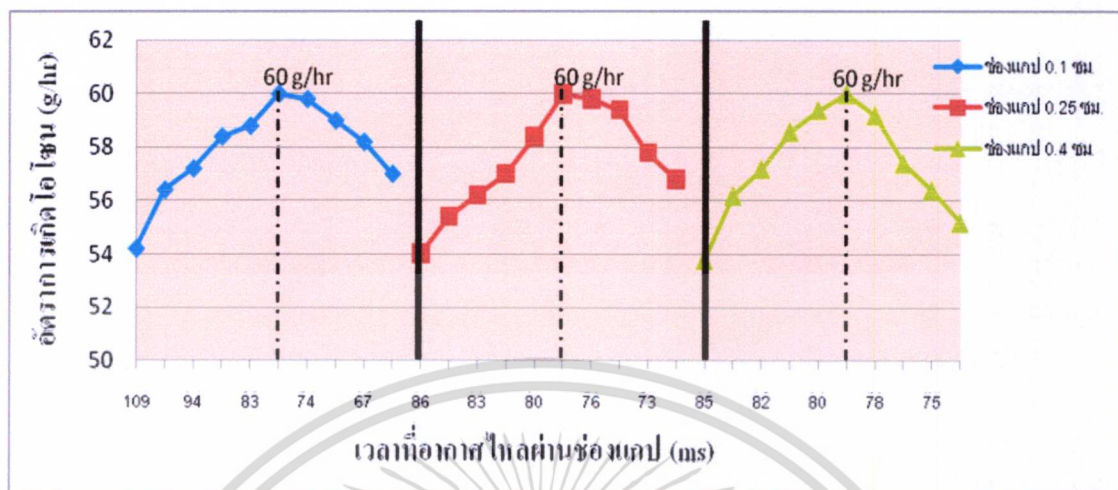
อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อัตราการเกิดก๊าซโอโซน(gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
310	54	54	53	53	55	53.8	85
315	55	56	57	56	57	56.2	84
320	57	57	56	58	58	57.2	82
325	58	59	58	59	59	58.6	81
330	59	60	60	59	59	59.4	80
335	60	60	60	61	59	60	79
340	60	60	59	59	58	59.2	78
345	58	58	57	56	57	57.4	76
350	56	57	57	56	55	56.4	75
355	56	55	55	54	56	55.2	74

จากตารางที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 นำค่าอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแกบจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 4.136 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. แกบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.137 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแสงอินฟราเรด 90 ซม. แยกอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบ

จากตารางที่ 4.12 , 4.13 , 4.14 แสดงอัตราการเกิดก๊าซโอโซน ที่ความยาวแสงอินฟราเรด 60 ซม. แยกอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศและเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบ ดังที่กล่าวสรุปไว้ข้างต้นจะเห็นว่าที่ช่องแคบต่างกันอัตราการไหลของอากาศที่จะทำให้ได้อัตราการเกิดโอโซนสูงสุดนั้นจะไม่เท่ากัน โดยที่ความยาวแสง 90 ซม. ช่องแคบ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ได้อัตราการเกิดโอโซนสูงสุดที่ 60 g/hr แต่ใช้อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 90 ลิตรต่อนาที 220 ลิตรต่อนาที และ 335 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาที่ช่องแคบต่างกันเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบนั้นเท่ากันจะทำให้ได้อัตราการเกิดโอโซนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน โดยที่ความยาวแสงอินฟราเรด 60 ซม. ที่ช่องแคบอากาศ 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ถ้าเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องแคบเท่ากับ 79 ms จะทำให้ได้อัตราการเกิดโอโซนสูงสุดที่ 60 g/hr

บทที่ 5

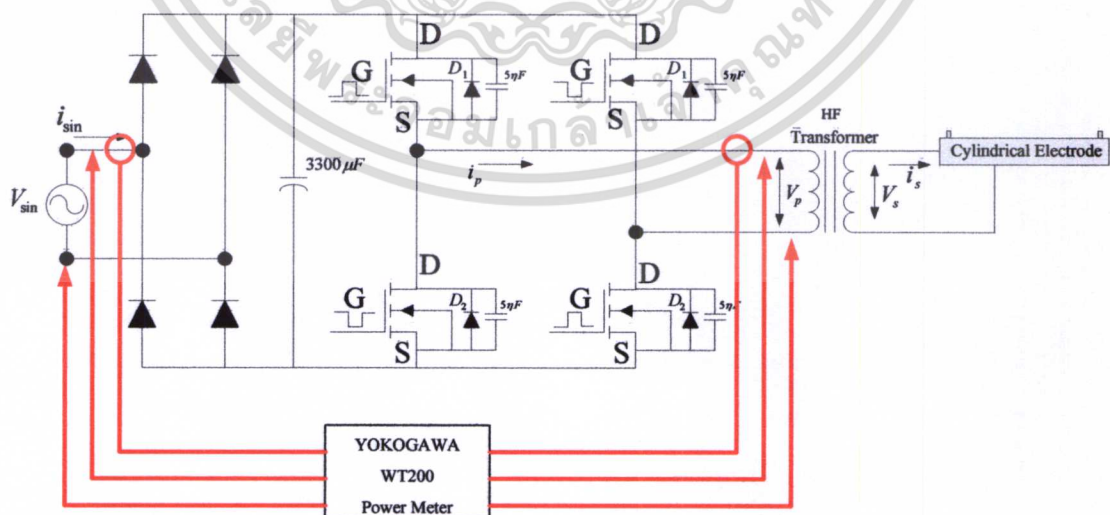
การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 สามารถนำค่าต่างๆมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศเพื่อหาค่าเวลาของก๊าซไหลที่ผ่านแก๊สของแท่งอิเล็กโตรด จากนั้นวิเคราะห์ผลอัตราการเกิดก๊าซไอโซนจากเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของแท่งอิเล็กโตรด มีผลต่อการเกิดอัตราการเกิดก๊าซไอโซนอย่างไร

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

นำผลการทดลองจากบทที่ 4 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์กับเวลาที่อากาศไหลผ่านแก๊สของแท่งอิเล็กโตรด ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่อากาศไหลผ่านแก๊สของแท่งอิเล็กโตรดกับการเกิดปริมาณ ไอโซน กำลังไฟฟ้าอินพุตคอนเวอร์เตอร์กับ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์กับเวลาที่อากาศไหลผ่านแก๊สของแท่งอิเล็กโตรดในแต่ละช่วง ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ โดยจะเปรียบเทียบระหว่างความยาวแท่งอิเล็กโตรดที่ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ตามลำดับ โดยทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ Power Meter Yokogawa รุ่น WT200 ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



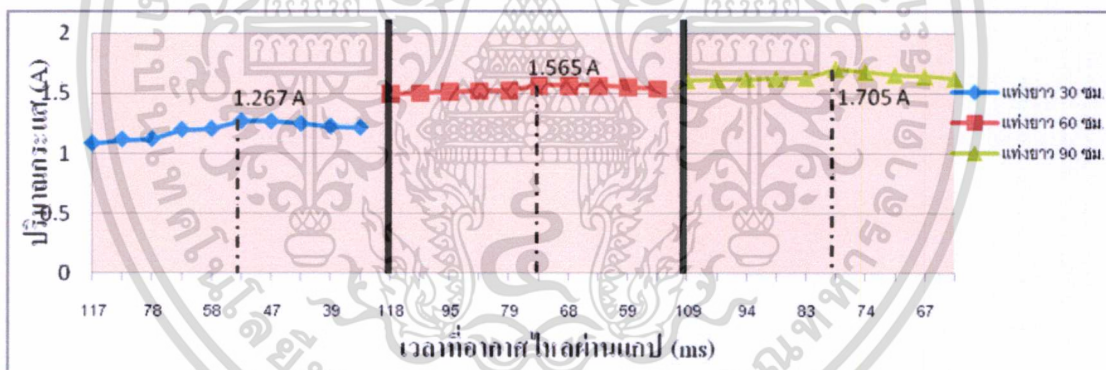
รูปที่ 5.1 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่องวัด

Power Meter YOKOGAWA รุ่น WT200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางดำนอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุทคอนเวอร์เตอร์กับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ปของแท่งอิเล็กโตรดยาว 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม.

จากรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุทคอนเวอร์เตอร์กับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ปของแท่งอิเล็กโตรดยาว 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. จะเห็นว่าที่ตำแหน่งของเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ปที่ทำให้ได้ปริมาณ โอโซน สูงสุดนั้นจะได้ค่าของกระแสไฟฟ้าดำนอินพุทมีค่าสูงสุดเช่นกัน โดยที่แท่งอิเล็กโตรดยาว 30 ซม. เวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ปเท่ากับ 52 ms ทำให้ได้ปริมาณ โอโซน สูงสุดเท่ากับ 23 g/hr กระแสดำนอินพุทคอนเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.267 A ที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 60 ซม. เวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ปเท่ากับ 73 ms ทำให้ได้ปริมาณ โอโซน สูงสุดเท่ากับ 40 g/hr กระแสดำนอินพุทคอนเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.565 A และที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. เวลาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซไหลผ่านแก๊สเท่ากับ 79 ms ทำให้ได้ปริมาณไอโซนสูงสุดเท่ากับ 23 g/hr กระแสด้านอินพุทคอนเวอร์เตอร์เท่ากับ 1.705 A ดังตารางที่ 5.1 จากผลข้างต้นที่กล่าวมานั้น เวลาที่ได้จากผลการทดลองเป็นช่วงเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สอากาศที่เหมาะสมที่สุดของแท่งอิเล็กโตรดชนิดนี้ ที่สนามไฟฟ้าสามารถกระตุ้นอากาศให้แตกตัวเป็นไอโซนได้สูงสุด

ตารางที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ส ปริมาณไอโซนเทียบกับกระแสด้านอินพุทคอนเวอร์เตอร์

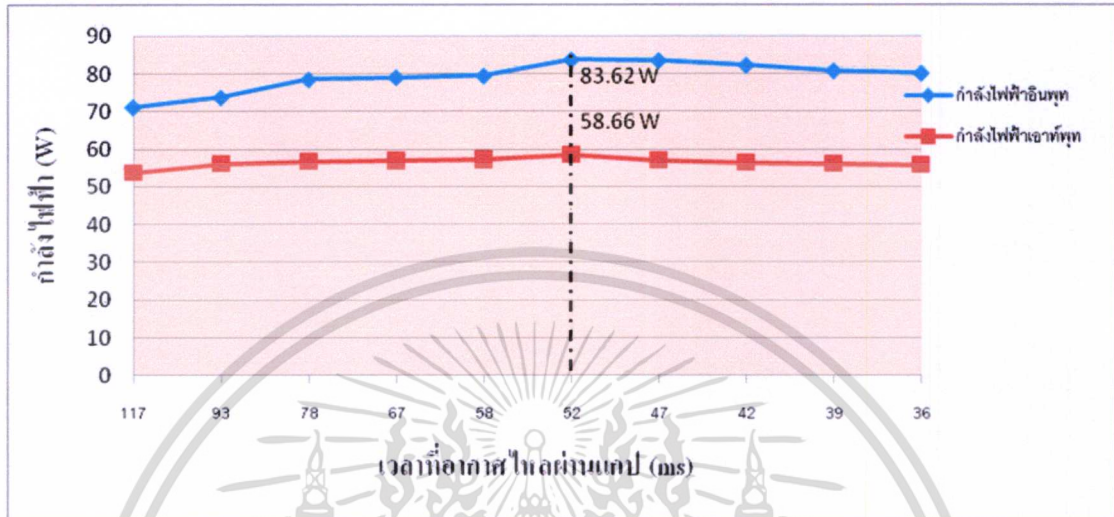
ความยาวแท่งอิเล็กโตรด (ซม.)	เวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊ส (ms)	อัตราการเกิดก๊าซไอโซน (g/hr)	กระแสด้านอินพุทคอนเวอร์เตอร์ (A)
30	52	23	1.267
60	73	40	1.565
90	79	61	1.705

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม.

เวลาที่อากาศไหลผ่านแก๊ส (ms)	อินพุทคอนเวอร์เตอร์			เอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์		
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
117	110.0	1.085	71	150.0	1.214	53.8
93	110.0	1.117	73.59	150.0	1.264	56.21
78	110.0	1.120	78.4	150.0	1.278	56.79
67	110.0	1.198	78.93	150.0	1.285	57.03
58	110.0	1.205	79.39	150.0	1.289	57.32
52	110.0	1.270	83.62	150.0	1.318	58.66
47	110.0	1.267	83.42	150.0	1.287	57.24
42	110.0	1.248	82.17	150.0	1.289	56.6
39	110.0	1.226	80.71	150.0	1.264	56.27
36	110.0	1.217	80.05	150.0	1.256	55.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. เขียนกราฟได้ดังนี้



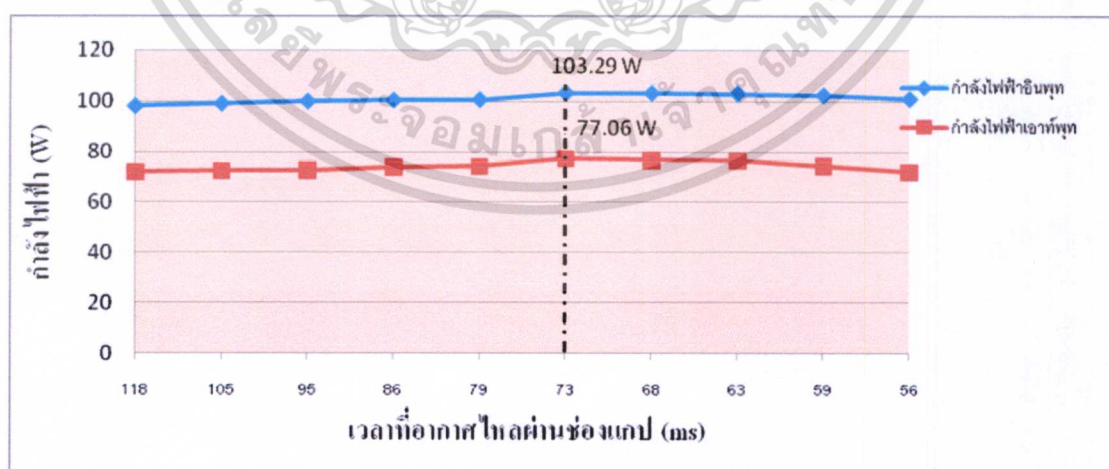
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม.

จากตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. จากตารางพบว่า ค่าเวลาที่ไหลผ่านแก๊สอากาศของแท่งอิเล็กโตรดที่ทำให้ได้ปริมาณโอโซนสูงสุด ดังตารางที่ 4.6 คือ 52 ms จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ มีค่าสูงสุดด้วย โดยกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 83.62 W และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 58.66 W ตามตารางที่ 5.2 ที่เป็นเช่นนี้เพราะ เป็นช่วงเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สอากาศที่เหมาะสมที่สุดของแท่งอิเล็กโตรดชุดนี้ ที่สนามไฟฟ้าสามารถกระตุ้นอากาศให้แตกตัวเป็นโอโซนได้สูงสุด

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม.

เวลาที่อากาศไหลผ่านแก๊ส (ms)	อินพุตคอนเวอร์เตอร์			เอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์		
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
118	110.0	1.496	98.06	150.0	1.606	71.79
105	110.0	1.504	99.06	150.0	1.617	72.14
95	110.0	1.517	99.92	150.0	1.621	72.36
86	110.0	1.523	100.38	150.0	1.652	73.71
79	110.0	1.527	100.58	150.0	1.654	73.79
73	110.0	1.568	103.29	150.0	1.727	77.06
68	110.0	1.566	103.22	150.0	1.713	76.43
63	110.0	1.564	103.02	150.0	1.706	76.16
59	110.0	1.555	102.36	150.0	1.662	74.15
56	110.0	1.546	100.91	150.0	1.608	71.74

จากตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม. เขียนกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแก๊สของความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 60 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

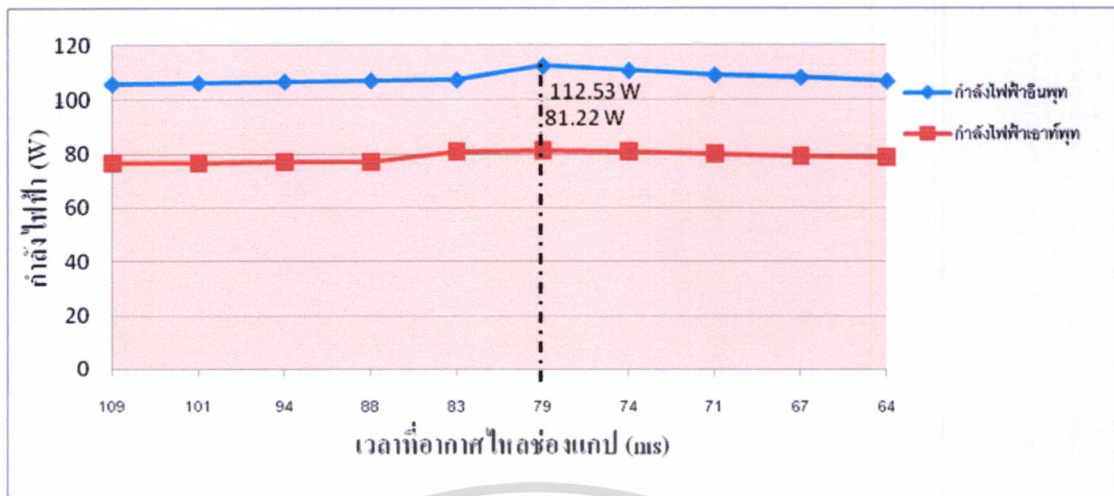
จากตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบของความยาวแท่งอิเล็กโทรด 60 ซม. จากตารางพบว่า ค่าเวลาที่ไหลผ่านแกบอากาศของแท่งอิเล็กโทรดที่ทำให้ได้ปริมาณโอโซนสูงสุด ดังตารางที่ 4.9 คือ 73 ms จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ มีค่าสูงสุดด้วย โดยกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 103.29 W และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 77.66 W ตามตารางที่ 5.3 ดังที่กล่าวข้างต้น เป็นช่วงเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบอากาศที่เหมาะสมที่สุดของแท่งอิเล็กโทรดชุดนี้ ที่สนามไฟฟ้าสามารถกระตุ้นอากาศให้แตกตัวเป็นโอโซนได้สูงสุด

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบของความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม.

เวลาที่อากาศไหลผ่านแกบ (ms)	อินพุตคอนเวอร์เตอร์			เอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์		
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
109	110.0	1.606	105.9	150.0	1.707	76.72
101	110.0	1.614	106.39	150.0	1.722	76.9
94	110.0	1.621	106.85	150.0	1.715	77.08
88	110.0	1.626	107.18	150.0	1.720	77.31
83	110.0	1.630	107.44	150.0	1.798	80.91
79	110.0	1.707	112.53	150.0	1.807	81.22
74	110.0	1.682	110.88	150.0	1.796	80.64
71	110.0	1.657	109.23	150.0	1.779	79.87
67	110.0	1.645	108.37	150.0	1.758	79.06
64	110.0	1.621	106.98	150.0	1.746	78.57

จากตารางที่ 5.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกบของความยาวแท่งอิเล็กโทรด 90 ซม. เขียนกราฟได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแคบของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม.

จากตารางที่ 5.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแคบของความยาวแท่งอิเล็กโตรด 90 ซม. จากตารางพบว่า ค่าเวลาที่ไหลผ่านแคบอากาศของแท่งอิเล็กโตรดที่ทำให้ได้ปริมาณไอโซนสูงสุด ดังตารางที่ 4.12 คือ 79 ms จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ มีค่าสูงสุดด้วยโดยกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับ 112.53 W และกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 81.22 W ตามตารางที่ 5.4 ดังที่กล่าวข้างต้น เป็นช่วงเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแคบอากาศที่เหมาะสมที่สุดของแท่งอิเล็กโตรดชุดนี้ ที่สนามไฟฟ้าสามารถกระตุ้นอากาศให้แตกตัวเป็นไอออนได้สูงสุด

ตารางที่ 5.5 แสดงประสิทธิภาพของคอนเวอเตอร์ที่ความยาวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม.

อัตราการใช้ของไหลของอากาศ (ลิตร ต่อ นาที)	ประสิทธิภาพที่ความยาวแท่ง 30 ซม. (%)	อัตราการใช้ของไหลของอากาศ (ลิตร ต่อ นาที)	ประสิทธิภาพที่ความยาวแท่ง 60 ซม. (%)	อัตราการใช้ของไหลของอากาศ (ลิตร ต่อ นาที)	ประสิทธิภาพที่ความยาวแท่ง 90 ซม. (%)
20	75.77	40	73.21	65	72.44
25	76.38	45	72.82	70	72.28
30	72.43	50	72.41	75	72.13
35	72.25	55	73.36	80	72.13
40	72.20	60	73.36	85	75.30
45	70.15	65	74.60	90	72.17
50	68.61	70	74.04	95	72.72
55	68.88	75	73.92	100	73.12
60	69.71	80	72.44	105	72.95
65	69.71	85	71.09	110	73.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี

จากการหาค่าเวลาของก๊าซที่ไหลผ่านแกปอากาศของแท่งอิเล็กโตรดที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณไอโซนสูงสุดในแต่ละความยาวของแท่งอิเล็กโตรดและแต่ละแกปอากาศของแท่งอิเล็กโตรดมีผลดังนี้

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงปริมาณไอโซนที่ความยาวและช่องแกปในช่วงต่างๆ

ความยาวแท่ง (ซม.)	ช่องแกป อากาศ (ซม.)	อัตราการไหลของ อากาศ	เวลาที่ไหลผ่านแกป (ms)	อัตราการเกิด ไอโซน (g/hr)
		(ลิตรต่อนาที)		
30	0.1	45	52	23
	0.25	110		
	0.4	165		
60	0.1	65	73	41
	0.25	160		
	0.4	240		
90	0.1	90	79	60
	0.25	220		
	0.4	335		

จากตารางที่ 5.6 แสดงค่าปริมาณการเกิดไอโซนที่ความยาวของแท่งอิเล็กโตรด พบว่าที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. ช่องแกปที่ต่างกันคือที่แกป 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. จะได้ปริมาณไอโซนสูงสุดเท่ากันที่ 23 g/hr ถ้าเวลาที่ก๊าซไหลผ่านช่องแกปอากาศมีค่าเท่ากันคือ 52 ms แต่ค่าอัตราการไหลของอากาศจะแตกต่างกัน เนื่องจากค่าเวลาที่ก๊าซไหลผ่านช่องแกปอากาศที่ความเร็วดังกล่าวเกิดการแตกตัวของก๊าซและจับตัวกันเป็นก๊าซไอโซนได้ดีที่สุดจึงทำให้ได้ค่าปริมาณไอโซนสูงสุดสำหรับแท่งอิเล็กโตรดชุดนี้ เช่นเดียวกับที่ความยาวแท่งอิเล็กโตรดที่ 60 ซม. และ 90 ซม. จะได้ปริมาณไอโซนสูงสุดที่ 41 g/hr และ 60 g/hr ที่เวลาของก๊าซไหลผ่านช่องแกปอากาศมีค่า 72 ms และ 79 ms ตามลำดับ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการปล่อยน้ำเสียหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำดื่ม มักใช้สารเคมีมีพิษในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ แต่จากปัญหาสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นพิษต่าง ๆ ส่วนมากเกิดจากการปล่อยมลพิษในอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากในหลายประเทศกำลังพัฒนายังไม่มีเทคโนโลยีขั้นสูงในการใช้งาน ดังนั้น จึงมีการตื่นตัวในการลดการใช้สารเคมีมีพิษและหาวิธีการอื่นหรือสารเคมีทดแทนมาใช้งาน

ก๊าซโอโซน (Ozone Gas) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงสามารถใช้งานบำบัดน้ำเสียหรือใช้ฆ่าเชื้อโรคในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริโภคโดยใช้แทนสารเคมีมีพิษ เช่น สารคลอรีนได้ แต่ข้อดีของก๊าซโอโซนคือ กระจายตัวได้ง่ายและรวดเร็วโดยไม่เหลือความเป็นพิษตกค้าง สามารถผลิตได้ง่ายเพียงแต่เข้าใจคุณสมบัติการเกิดของก๊าซอย่างเพียงพอ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้สนามไฟฟ้าเป็นตัวการวิธีการนั้นใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนให้ขดขลิตเล็ก โตรค เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าจากนั้นจึงปล่อยให้ อากาศไหลผ่านสนามไฟฟ้า ก๊าซออกซิเจน (O_2) จะแตกตัวออกเป็น โมเลกุลอิสระ (O_2) และรวมตัวกันใหม่กลายเป็นก๊าซโอโซนเกิดขึ้น (O_3)

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานผลิตก๊าซโอโซนขนาดใหญ่ จะใช้แหล่งจ่ายแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เพราะสามารถจ่ายกำลังได้สูงและการใช้งานความถี่สวิทซ์ที่สูง สามารถลดขนาดของเครื่องให้เล็กลงได้ เหตุผลอีกข้อคือ การเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น แต่แหล่งจ่ายกำลังแบบนี้ค่อนข้างควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ยากเพราะเมื่อมองภาระทางไฟฟ้าของโหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน ทำให้อุปกรณ์สวิทซ์ของคอนเวอร์เตอร์ถูกบังคับให้ยังคงทำงานต่อไปแม้จะถูกสั่งให้หยุดทำงาน จากการผลัดกันกระแสให้ไหลต่อเนื่องของอุปกรณ์สะสมพลังงาน ผลที่ตามมาก็คือแรงดันจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตและเกิดการเบรคดาวน์ได้ ส่งผลให้เกิดความร้อนและก๊าซโอโซนก็จะสลายตัวเร็วขึ้น ค่าประสิทธิผลของเครื่องก็จะมึค่าลดต่ำลง เหตุผลอีกข้อคือที่ทำให้ค่าประสิทธิผลของเครื่องต่ำคือ อัตราการไหลของอากาศที่ไม่เหมาะสมกับขดขลิตเล็ก โตรคจึงทำให้การผลิตก๊าซโอโซนได้ไม่สูงสุด ทำให้ต้นทุนในการสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีราคาที่สูง

6.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอถึงการหาค่าของเวลาที่อากาศไหลผ่านช่องอากาศของแท่งอิเล็กโตรดที่เหมาะสมที่ทำให้เครื่องผลิตก๊าซไอโซนสามารถผลิตก๊าซไอโซนได้สูงสุดเนื่องจากอากาศที่ไหลเข้าและเวลาที่อากาศอยู่ภายในแท่งนั้นสามารถที่จะแตกตัวได้ดีที่สุดที่ทำให้ได้ปริมาณไอโซนสูงสุดเพื่อช่วยในการออกแบบอัตราการไหลของอากาศให้เหมาะกับชุดอิเล็กโตรด ซึ่งสามารถช่วยในการลดต้นทุนของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนได้อีกวิธีหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้หาเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซนได้สูงสุดสำหรับชุดแท่งอิเล็กโตรดคังตารางที่ 5.6 ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงชุดอิเล็กโตรดทั้งหมด 3 ชุด คือที่ความยาวของแท่งอิเล็กโตรด 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. โดยช่องแก้อากาศของแท่งอิเล็กโตรดประกอบด้วย 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่ความยาวแท่ง 30 ซม. ช่องแก้อากาศที่ 0.1 ซม. นั้นสามารถผลิตปริมาณไอโซนได้สูงสุด 23 g/hr ที่อัตราการไหลของอากาศ 45 ลิตรต่อนาที ที่ความยาวแท่ง 60 ซม. สามารถผลิตปริมาณไอโซนได้สูงสุด 41 g/hr ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 65 ลิตรต่อนาที และที่ความยาวแท่ง 90 ซม. สามารถผลิตปริมาณไอโซนได้ 90 g/hr ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณ ไอโซนสูงสุดของแต่ละความยาวแท่งอิเล็กโตรดที่แกบ 0.1 ซม. เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ

ความยาวแท่งอิเล็กโตรด (ซม.)	อัตราการเกิดไอโซน (g/hr)	อัตราการไหลของก๊าซ (ลิตรต่อนาที)
30	23	45
60	41	65
90	60	90

จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 พบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนช่องแก้อากาศของแท่งอิเล็กโตรดทำให้ปริมาณไอโซนสูงสุดที่ได้นั้นมีปริมาณใกล้เคียงหรือเท่าเทียมแต่อัตราการไหลของก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ต้องเสียเวลาในการทดสอบอัตราการไหลของอากาศใหม่ วิทยานิพนธ์นี้จึงคำนึงถึงเวลาที่ก๊าซไหลผ่านช่องแกบของแท่งอิเล็กโตรด เริ่มจากนำอัตราการไหลของอากาศที่สามารถผลิตปริมาณไอโซนได้สูงสุดมาคำนวณหาเวลาที่ก๊าซไหลผ่านช่องแกบ ที่แกบ 0.1 ซม. ได้ผลดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงอัตราการไหลของอากาศเทียบกับเวลาที่ก๊าซไหลผ่านแกปอากาศที่ทำให้เกิดปริมาณไอโซนสูงสุดที่แห้งยาว 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ช่องแกป 0.1 ซม.

ความยาวแห้ง อิเล็กโตรด (ซม.)	อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	เวลาที่ก๊าซไหลผ่าน แกปอากาศ (ms)	อัตราการเกิดไอโซน สูงสุด (g/hr)
30	45	52	23
60	65	73	41
90	90	79	60

จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 ทำการปรับช่องแกปอากาศของแห้งอิเล็กโตรดจาก 0.1 ซม. เป็น 0.25 ซม. และ 0.4 ซม. ตามลำดับ แล้วทำการหาค่าเวลาของก๊าซที่ไหลผ่านแกปอากาศของแห้งอิเล็กโตรดที่ทำให้ได้ปริมาณไอโซนสูงสุดในแต่ละชุดทดสอบ ได้ผลตามตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าเวลาของก๊าซที่ไหลผ่านแกป อัตราการไหลของอากาศ ที่ความยาวแห้ง 30 ซม. 60 ซม. และ 90 ซม. ที่ช่องแกป 0.1 ซม. 0.25 ซม. และ 0.4 ซม.

ความยาวแห้ง (ซม.)	ช่องแกป อากาศ (ซม.)	อัตราการไหลของอากาศ	เวลาที่ไหล ผ่านแกป (ms)	อัตราการเกิด ไอโซน (g/hr)
		(ลิตรต่อนาที)		
30	0.1	45	52	23
	0.25	110		
	0.4	165		
60	0.1	65	73	41
	0.25	160		
	0.4	240		
90	0.1	90	79	60
	0.25	220		
	0.4	335		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 6.3 เห็นว่าที่ความยาวแท่งเดียวกันแต่ช่องแกปอากาศของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ต่างกันจะได้ปริมาณไอโซนสูงสุดเท่ากัน ที่เวลาของก๊าซไหลผ่านช่องแกปอากาศมีค่าเท่ากันแต่อัตราการไหลของอากาศมีการเปลี่ยนแปลง

จากวิทยานิพนธ์เรื่องนี้สามารถออกแบบอัตราการไหลของอากาศให้เหมาะสมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ โดยการคำนึงถึงค่าเวลาที่ก๊าซไหลผ่านช่องแกปของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างเหมาะสมและยังสามารถช่วยลดต้นทุนและขนาดของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ใช้ในการปรับระดับอัตราการเกิดก๊าซไอโซน ช่วยให้เครื่องผลิตก๊าซไอโซนประสิทธิภาพสูง
2. การลดต้นทุนของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน
3. แต่ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพไม่สูง ซึ่งถ้ามีการพัฒนาชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้มีประสิทธิภาพให้ดีขึ้น จะช่วยในการพัฒนาให้เครื่องผลิตก๊าซไอโซนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย
4. นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นที่น่าสนใจซึ่งสามารถใช้ปรับระดับปริมาณก๊าซได้
 - 4.1 การคำนึงถึงอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลต่อการเกิดไอโซน
 - 4.2 ระดับของความดันอากาศภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลต่อการแตกตัว
5. การป้องกันสัญญาณรบกวน

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Potivejkul, V. Kinnares, P. Rattanavichien, Design of Ozone Generator using Solar Energy," IEEE APCCAS,24-27 Nov 1998,pp. 217-220
- [2] E.Kuffel, M.Abdulah. **High-Voltage Engineering**. Oxford : Pergamon Press. 1977.
- [3] J.Marcos Alonso, Jesus Cardesin, Emilio Lopez Corominas, Manuel Rico-Secedes and Jorge Garcia, "Low-Power High-Voltage High-Frequency Power Supply for Ozone Generation," IEEE Transection on Industry Application, March/April 2004, Vol.40, No,2,pp.414-421
- [4] Bruno Langlias, et. al. **Ozone in Water Treatment**. 2nd Ed. Lewis Publishers. 1991.
- [5] Mario Ponce, Jorge Aguilar, Jaime Fernandez, Erwin Beutelspacher, Jose M. Calderon, Claudia Cortes, "Linear and non linear model for ozone generators considering electrodes losses," IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004,pp.810-814
- [6] Kudryavtsev Oleg, Moisseev Sergey, Mutsuo Nakaoka, "Frequency characteristics analysis and switching power supply designing for dielectric barrier discharge type load," IEEE Power Electronics Congress, 2002,pp.222-227
- [7] P.Rattanavichien, S.Potivejkul and W.Khan-ngern. "PV System Sizing for Ozone Generator." IPEC'99 Proceeding of the International Power Engineering Conference, Singapore. May 24-26, 1999, pp. 319-324.
- [8] เขมรัฐ วงศ์ทิมารัตน์ และคณะ. "เครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์." ปรินญาณีพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [9] อนุรักษ มั่นสุข "เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์,"วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [10] ตำรวจ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [11] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, เอกสารประกอบการเรียนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] N.Mohan, T.M. Undeland, and W.P.Robbins, Power Electronics. Converters, Applications, and Design, 2 edition, New York: John Wiley & Sons, INC.,1995
- [13] พรพิมล รัตนวิเชียร. “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์,” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [14] สราวุธ กำนันไทย “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์”วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551
- [15] Hankin Atlas Ozone Systems Limited. “Material Safety Information.” [Online]. Available : <http://www.hankinozone.com/MSDS.html>.
- [16] Northern Indiana Power Company. “Independent Study : Ozone Disinfection of a Residential Swimming Pool.” [Online]. Available : <http://www.airnet.net/prozone/study.htm>.
- [17] Colex corporation. “Introducing Ozone.” [Online]. Available : <http://www.colex.com/ozone.html>.
- [18] Environmental Protection Association. “EPA Safety Guidelines.” [Online]. Available : <http://o3water.com/Articles/EPA%20Guidelines.htm>. 1998.
- [19] Ozone Services. Yanco Industry Ltd. “Ozone in Air.” [Online]. Available : <http://o3zone.com/ozoneser/articles/017.htm>. 1999.
- [20] John Towles and H. Banks Edwards P.E. “The Use of Ozone in The Purification of Swimming Pool Water.” [Online]. Available : <http://www.ozonated.com>.
- [21] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์ “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 8, 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

1. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

1.1 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI)

- ละลายสารโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.5 กรัม (g) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิตร (mL)

เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้

1.2 สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

- ละลายสารกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ให้มีความเข้มข้น 1N H_2SO_4

1.3 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$)

- ละลาย ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) จำนวน 25 กรัม (g) ในน้ำ 1 ลิตร (L) ให้มีความเข้มข้น 0.1

N $Na_2S_2O_3$

1.4 น้ำแป้ง (1% Starch)

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

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณไอโชนโดยวิธีทางเคมี

2.1 ดูดซึมก๊าซไอโชน (Absorption) จากเครื่องผลิตไอโชนลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ละลาย (KI) กับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิตร (mL) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม

2.2 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 มาปรับค่า pH โดยการนำสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีค่าความเข้มข้น 1N H_2SO_4 ปริมาณ 3 มิลลิตร (mL) และเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิตร (mL) (เป็นอินดิเคเตอร์) เติกลงไปในสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองหรือสีส้ม จะกลายเป็นสีน้ำเงิน

2.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.2 มาทำการไตเตรดโดยใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 N $Na_2S_2O_3$ เป็นตัวไตเตรด ทำการไตเตรดจนสีน้ำเงินจากหายไปจากนั้นทำการบันทึกค่าของ 0.1 N $Na_2S_2O_3$ เพื่อใช้ในการคำนวณต่อ

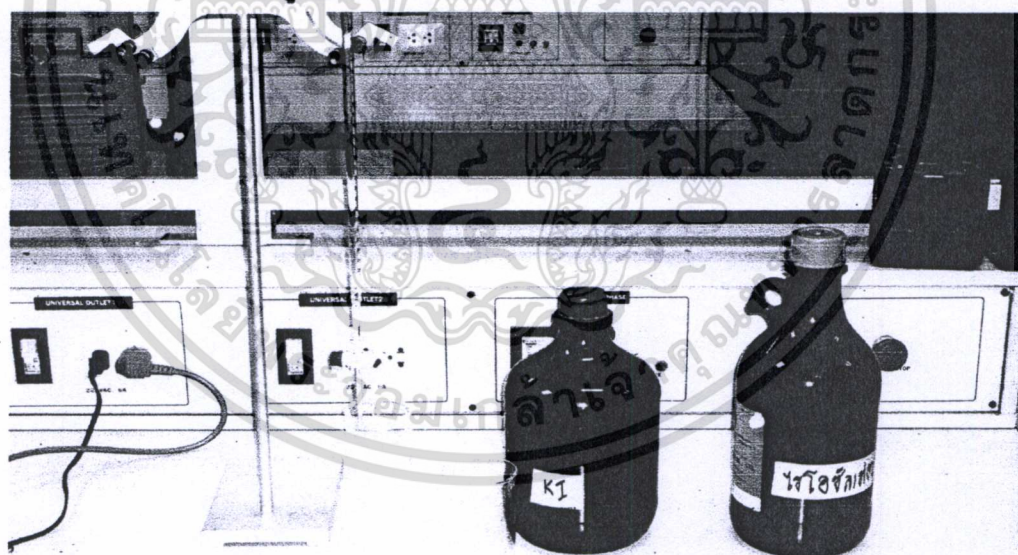
. การคำนวณหาปริมาณไอโชน

จากความสัมพันธ์ $0.1 \text{ N } Na_2S_2O_3 \text{ 1mL} = 2.4 \text{ mg } O_3$

ตัวอย่าง การคำนวณเช่นกรณีที่ใช้ $0.1 \text{ N } Na_2S_2O_3$ ในการไตเตรด 1.7 mL และดูดซึมไอโชนลงน้ำ 1 นาที คือปริมาณก๊าซไอโชนที่ผลิตได้ประมาณ $1.7 \times 2.4 \times 60 = 122.4 \text{ mgO} / \text{hr}$



รูปที่ ก.1 การทดลองและเก็บผลการทดลอง



รูปที่ ก.2 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

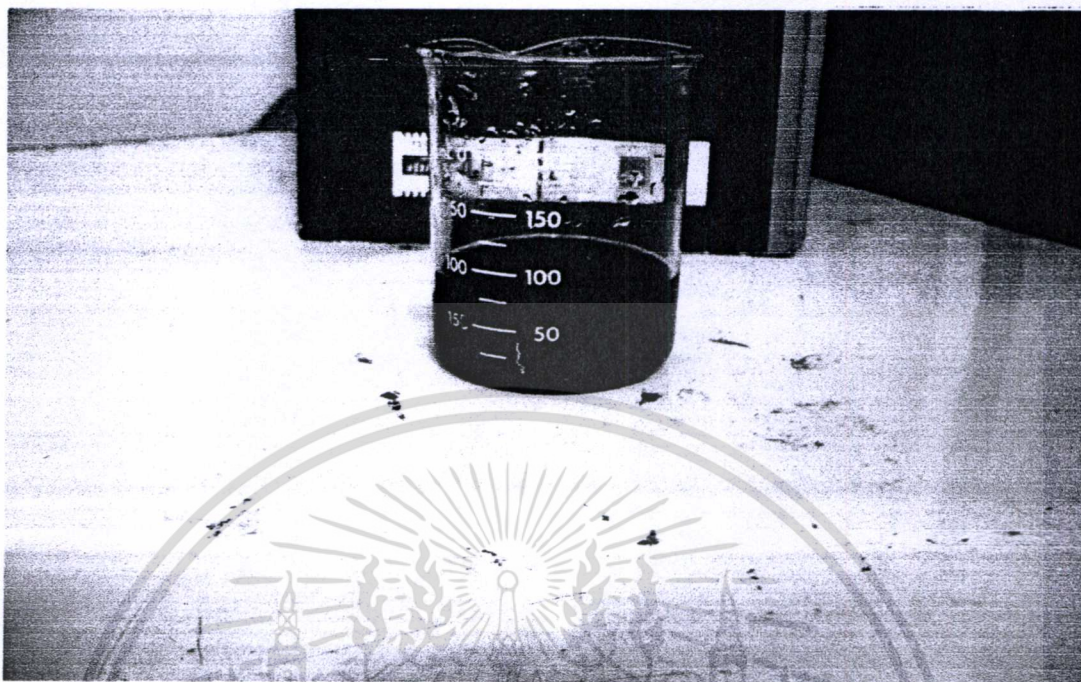


รูปที่ ก.3 สารละลาย KI ก่อนทำปฏิกิริยากับ ไอโซน

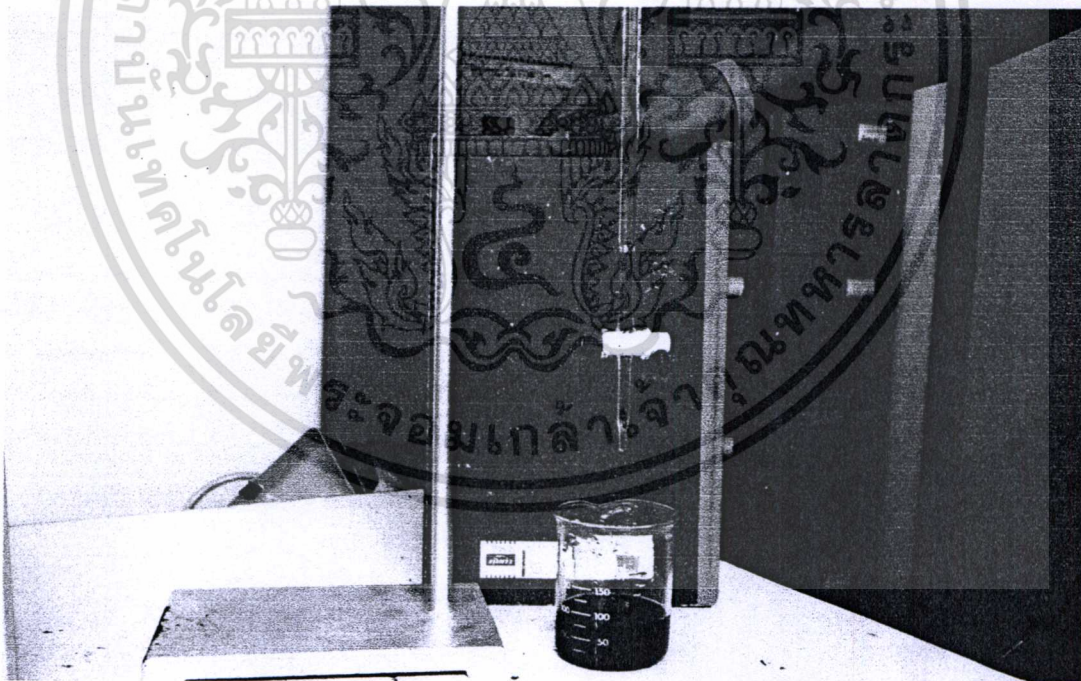


รูปที่ ก.4 สารละลาย KI หลังทำปฏิกิริยากับ ไอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

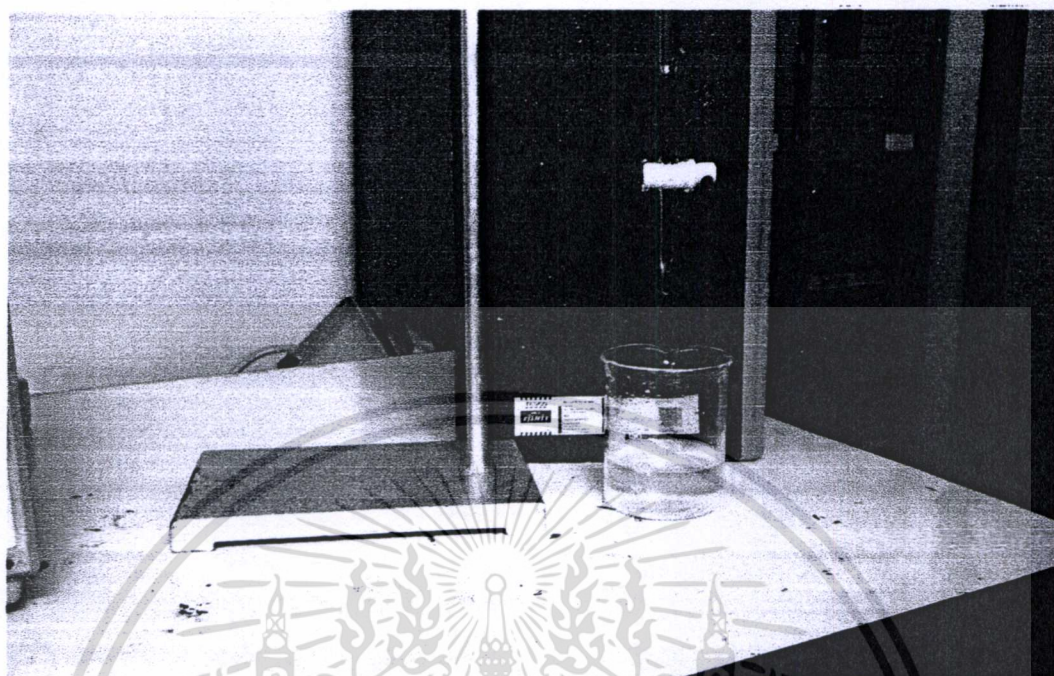


รูปที่ ก.5 สารละลาย KI หลังทำปฏิกิริยากับ ไอโชนและผสมกับน้ำแข็ง



รูปที่ ก.6 ขั้นตอนการหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 หลังทำการ ไตรเตรคกับ โซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) แล้ว

ผลการทดสอบปริมาณก๊าซไอโซน

ทำการทดสอบปริมาณ ไอโซน โดยกำหนด จ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 110 V ปรับความยาวแท่ง อิเล็กโตรดและแกปอากาศของแท่งอิเล็กโตรด โดยทำการเก็บผลการทดลอง 5 ครั้งต่อการทดลองแล้ว นำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง โดยผลได้แสดงในตารางด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซโอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
20	12	13	13	13	13	12.8	117
25	14	13	14	14	15	14	93
30	15	14	15	14	15	14.6	78
35	17	16	17	17	16	16.5	67
40	18	19	19	20	21	19.4	58
45	23	23	22	24	23	23	52
50	23	22	22	22	22	22.2	47
55	22	21	21	22	21	21.2	42
60	21	20	20	21	21	20.6	39
65	20	20	20	20	19	19.8	36

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซโอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
85	13	12	14	14	13	13.2	65
90	14	14	15	15	15	14.6	63
95	16	16	15	17	17	16.2	60
100	18	18	19	19	19	18.6	57
105	20	20	22	22	21	21	54
110	22	24	23	23	23	23	52
115	23	22	22	23	21	22.2	49
120	21	20	20	20	21	20.4	46
125	20	20	19	19	21	19.8	45
130	20	19	19	19	19	19.2	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO ₂ /hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
145	12	13	13	12	13	12.6	61
150	14	14	15	15	16	14.4	59
155	15	16	16	16	15	15.6	56
160	17	20	19	21	21	19.6	55
165	23	23	23	23	23	23	53
170	23	22	22	21	21	21.8	52
175	21	21	22	20	20	20.8	50
180	20	19	19	20	18	19.2	49
185	19	19	20	18	18	18.8	48
190	18	17	17	18	17	13.8	46

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO ₂ /hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
40	35	35	36	36	36	35.6	118
45	37	37	36	37	37	36.8	105
50	38	38	37	38	39	38	95
55	39	38	38	39	39	38.6	86
60	39	40	40	41	40	40	79
65	41	40	42	41	41	41	73
70	41	41	41	40	40	40.6	68
75	40	40	41	40	40	40.2	63
80	39	39	39	38	37	38.4	59
85	38	39	38	37	37	37.8	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
135	36	36	35	35	34	35.2	84
140	36	37	37	37	37	36.8	82
145	37	38	38	37	38	37.6	79
150	39	39	38	39	40	39	76
155	40	40	39	40	40	39.8	74
160	40	41	41	42	41	41	73
165	41	40	40	40	40	40.2	69
170	40	39	39	40	38	39.2	67
175	39	38	38	38	37	38	65
180	37	37	36	37	36	36.6	64

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO ₃ /hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
215	36	35	35	36	36	35.6	81
220	37	37	37	36	36	36.6	80
225	38	38	37	38	37	37.6	78
230	38	39	39	39	38	38.6	77
235	39	39	40	41	41	40	75
240	41	41	41	42	40	41	73
245	42	41	40	40	40	40.6	72
250	39	40	40	38	39	39.2	70
255	38	38	37	37	36	37.2	69
260	37	36	36	35	36	36	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
65	55	55	54	54	53	54.2	109
70	56	55	56	57	57	56.4	101
75	57	57	58	58	56	57.2	94
80	58	58	59	59	58	58.4	88
85	59	59	58	59	59	58.8	83
90	60	60	61	59	60	60	79
95	60	61	61	59	58	59.8	74
100	59	59	60	59	58	59	71
105	58	58	59	59	57	58.2	67
110	57	58	57	56	57	57	64

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO_3/hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
195	53	54	54	55	54	54	86
200	55	55	56	55	56	55.4	85
205	56	56	57	57	55	56.2	83
210	57	57	56	57	58	57	81
215	58	58	59	58	59	58.4	80
220	59	60	60	61	60	60	79
225	61	61	60	59	58	59.8	76
230	60	60	59	59	59	59.4	75
235	59	58	58	57	57	57.8	73
240	58	57	57	57	55	56.8	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของ อากาศ (ลิตรต่อนาที)	ปริมาณก๊าซไอโซน(gO ₂ /hr)						เวลาที่อากาศไหล ผ่านแกปอากาศ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	
310	54	54	53	53	55	53.8	85
315	55	56	57	56	57	56.2	84
320	57	57	56	58	58	57.2	82
325	58	59	58	59	59	58.6	81
330	59	60	60	59	59	59.4	80
335	60	60	60	61	59	60	79
340	60	60	59	59	58	59.2	78
345	58	58	57	56	57	57.4	76
350	56	57	57	56	55	56.4	75
355	56	55	55	54	56	55.2	74

ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

(รุณธร สังประพน)

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี

10 ตุลาคม 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The study of ozone generation using electric field with variation of air flow rate and electrode tube length

J.Dararash , S. Sathalalai, N. Saengtarong, P.Kerdonfag and W.Khan-ngern

Faculty of Engineering and EMC Laboratory,
Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Bangkok,10520, Thailand.
Phone/Fax:+662 737-3000 Ext.3322
E-mail: Norasing_Psc@yahoo.com, kkveerac@kmitl.ac.th

Abstract

This research uses the mathematical model to calculate the satisfied level of air flow rate for generating Ozone gas. Mathematical model is used to figure out the relationship between electrode dimension and air flow rate. However, this paper describes the Ozone generating using corona discharge with overlay multiple cylinder single-core electrodes. The considered factors are the length of electrodes and air flow rate as variable factors while the remaining factors are constant. As a result of using mathematical model to figure out the relationship between air flow rate and the length of electrode, this relationship is shown in fifth order polynomial equation.

Introduction

Due to the fact that the demand of using ozone gas is now increasing, the variable components and factors of generating ozone gas will dramatically reflect to efficiency of ozone generators. The one important factor proposed in this research work is air flow rate used to control the efficiency of ozone generator. If the level of air flow rate is satisfied, the generating gas is increased. On the other hands, if the air flow rate level is not suitable, the generating gas is decreased. Therefore, the aim of this research is the application of mathematical model to find out the relationship between satisfied level of air flow rate and the length of electrode in order to design the efficiency ozone generators.

2.Theory

2.1 Stored Energy in Electric Field

The calculation of stored energy in electric field for the ionization[1] of gas in electrode is shows in equation (1)

$$w = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dv \quad (1)$$

Where $W = \text{Energy (J)}$

$E = \text{Electric Strength (V/m)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$v = \text{Gas per volume in electrode gap (m}^3\text{)}$
 $\epsilon_0 = \text{Dielectric constant} = 8.845 \times 10^{-12}$
 F/m

2.2 Electric Stress of overlay multiple cylinder single core electrodes

The maximum value of electric stress is calculated at the internal surface of cylinders. The electric flux is on the radius and the surface of cylinders. The calculation of electric filed at 1 meter overlay multiple cylinder single core electrodes with the radius r shows in equation (2).

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

Where E_{\max} is Electric Stress (kV/cm)
 V is supplied voltage (V)
 r_1 is internal radius of electrode (m)
 r_2 is external radius of electrode (m)

3. Design

3.1 Ozone Generator

The implemented ozone generator by means of corona discharge is illustrated in fig.1

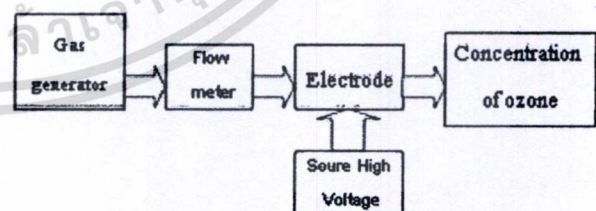


Fig. 1Block diagram of ozone generator process

The high frequency AC high voltage supply
The high frequency AC high voltage supply used in this experimental has the specification of 500VA 7kV 7kHz as shown in fig.2

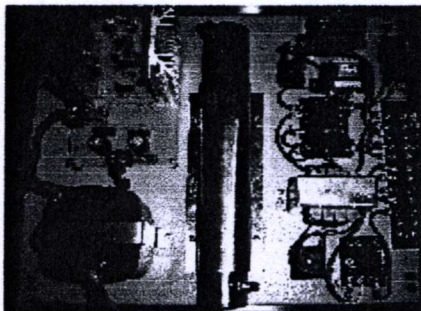


fig.2 The high frequency AC high voltage supply

The electrode used to generate high intensity electric field for generating ozone is an overlay multiple cylinder single-core electrodes. The internal cylinder made of stainless steel of 41mm in radius and internal stainless steel cylinder of 1mm in radius 3.as shown in fig.3

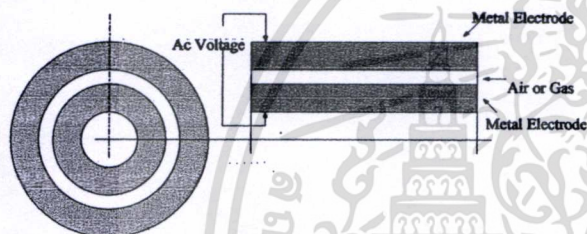


Fig 3 the structure of overlay multiple cylinder single core electrodes

4. The experimental results

In this article, we consider the proportional of air flow rate and the length of electrode. The experiment is started with setting up 3 different lengths of electrodes which are 30 cm, 60 cm and 90 cm. For the air flow rate, its value changes in the range of 5 – 100 L/min with each time increment of 5 L/min air flow rate while the remaining factors are constant for measuring the ozone gas.

In the case of 30 cm cylinder electrode, the maximum generated ozone rate is 23 g/hr at 45 L/min air flow rate. From this result and applying polynomial function, the relationship between air flow rate and the length of electrode in fifth order polynomial is illustrated in fig.5

The equation is:

$$y = 3 \times 10^{-8} X^5 + 1 \times 10^{-5} X^4 + 0.001 X^3 + 0.0334 X^2$$

$$+ 0.3049 X - 0.6809$$

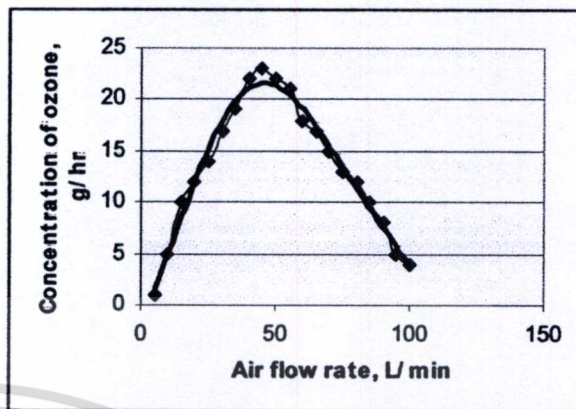


Fig.5 The relationship between ozone level and air flow rate at electrode 30 cm long.

In the case of 60 cm cylinder electrode, the maximum generated ozone rate is 41 g/hr at 65 L/min air flow rate. From this result and applying polynomial function, it is shown the relationship between air flow rate and the length of electrode in order five of polynomial equation as show in fig. 6

The equation is:

$$y = 1 \times 10^{-7} X^5 - 3 \times 10^{-5} X^4 + 0.0029 X^3 - 0.1106 X^2 + 2.329 X - 5.9135$$

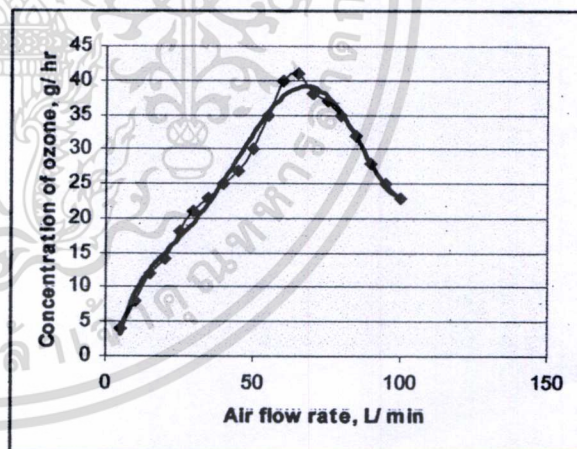


Fig.6 The relationship between ozone level and air flow rate at electrode 60 cm long.

In the case of 90 cm cylinder electrode, the maximum generated ozone rate is 60 g/hr at 80 L/min air flow rate. From this result and applying polynomial function, it is shown the relationship between air flow rate and the length of electrode in power 5 polynomial equation as show in fig. 7

The equation is:

$$y = 6 \times 10^{-8} X^5 - 2 \times 10^{-5} X^4 + 0.0015 X^3 - 0.0573 X^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+1.4692X + 2.478$$

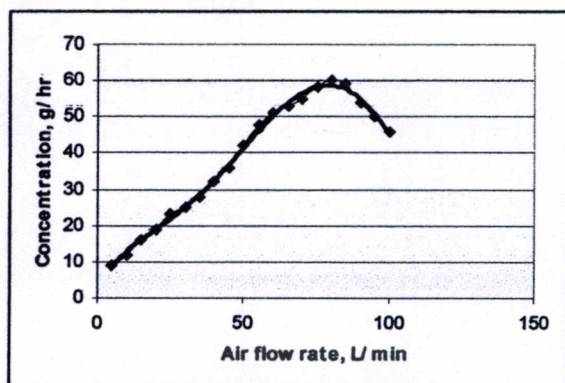


Fig.7 The relationship between ozone level and air flow rate at electrode 30 cm long.

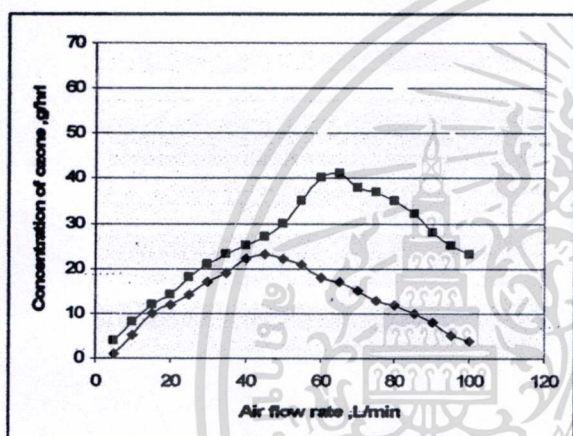


Figure 8 Graph shows relationship between ozone level and air flow rate.

From figure 8, the have been found maximum generated ozone gas is 23 g/hr with air flow rate 45 L/min at electrode 30 cm long and maximum generated ozone gas is 41 g/hr with air flow rate 65 L/min at electrode 60 cm long. Notice that electrode 60 cm long generator more ozone gas than the other because the longer electrode has bigger area which results to the higher percentage of ionization of gas as shown in fig.8. Similarly, the maximum generated ozone gas is 60 g/hr with air flow rate 80 L/min at electrode 90 cm long. It is higher than electrode 30 cm and 60 cm long because the electrode 90 cm long has greater area as result of increasing the ionization time which is shown in fig. 8

5. Conclusion

We have been found that beneath the 45 L/min of air flow rate will have ionization linear change. The ozone will be approximately 1.6 to 1.8 times with two times increasing of electrode length.

Moreover, the maximum value in electrode increased approximately 2 times when electrode length increases as the number of two times. We conclude that the ozone level has direct proportion with electrode length but the maximum value in each electrode length will give the different air flow rate. They show that the longer electrode length will result to the increasing ionization time of ozone gas in the gap. The ozone level is increased when air flow rate increase as a proportional to the electrode length. Therefore, designed ozone generator has to consider the suitable gas flow rate and length of electrode for the highest efficiency.

6. Reference

- [1] E.Kuff and M.Abddulah, High-Voltage Engineering Pergamon Press, Oxford, 1977
- [2] L.L. Alston, High Voltage Technology, Oxford University Press, London, 1968
- [3] Paul E. Tippens, "Physics", Fifth Edition
- [4] W.J.M. Samaranayake, *R. Hackam and H. Akiyama
"Ozonesynthesis in oxygen using a pulse discharge" IEEE, pp449-452, 2001
- [5] W.J.M. Samaranayake, Y. Miyahana, T. Namihara, S. Katsuki, T. Sakugawa, H. Haceam, H. Akiyama
"Pulsed steamer discharge characteristics of ozone production in dry air", IEEE vol 7 April 2000
- [6] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins, "Power Electronic: Converter, Application and Design" John Wiley & Sons, 3rd edition, 2003
- [7] W. Khan-ngern, "The Analysis and Evaluation of Pulse width Modulation Techniques for Inverters", thesis for Doctor of Philosophy of London Imperial College, 1997
- [8] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronic: Converters, Application and Design" John Wiley & Sons, 2nd edition, 1995



Jatupong Dararash received the B.Eng. degree in electrical engineering from Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand. His research interests include Power Electronics and high voltage engineering. He is also working towards M.Eng. degree at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.



Sanae Sathalalai received the B.Eng. degree in electrical engineering from Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand. His research interests include Power Electronics and high voltage engineering. He is also working towards M.Eng. degree at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok, Thailand.



Norasing Saengtarong received the B.Eng. degree in electrical engineering from Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand. His research interests include Power Electronics and high voltage engineering. He is also working towards M.Eng. degree at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Bangkok, Thailand.



Pongtep Kerdonfag received the B.Eng. degree from Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand and the M.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His research interests include high voltage and power system engineering. Currently, he is a lecturer at Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala Institute of Technology Samcuk Campus. suphanburi ,Thailand.



Dr. W. Khan-ngern, born in 1960 in Ubonratethani, Thailand. He received the degree of B.Eng. and M.Eng. from KMITL in 1982 and 1988 respectively. He joined the Royal Thai Army for 7 years before Become a member of Electrical Department of KMITL. He then continued his degree at Imperial Collage, University of London and obtained Ph.D. and DIC in 1997 in the area of power electronics. He has been promoted to be an Assistant President for academic affairs of KMITL in 1998. He also a technical committee no 890: in EMC for Ministry of Industry and a technical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BNC

RECEIVED KMITL



KMITL

2005

International Conference on Electromagnetic Compatibility Phuket, Thailand



Proceeding



July 27-29, 2005 Kata Beach Resort, Phuket, Thailand



IEEE THAILAND CHAPTER



THAILAND CHAPTER



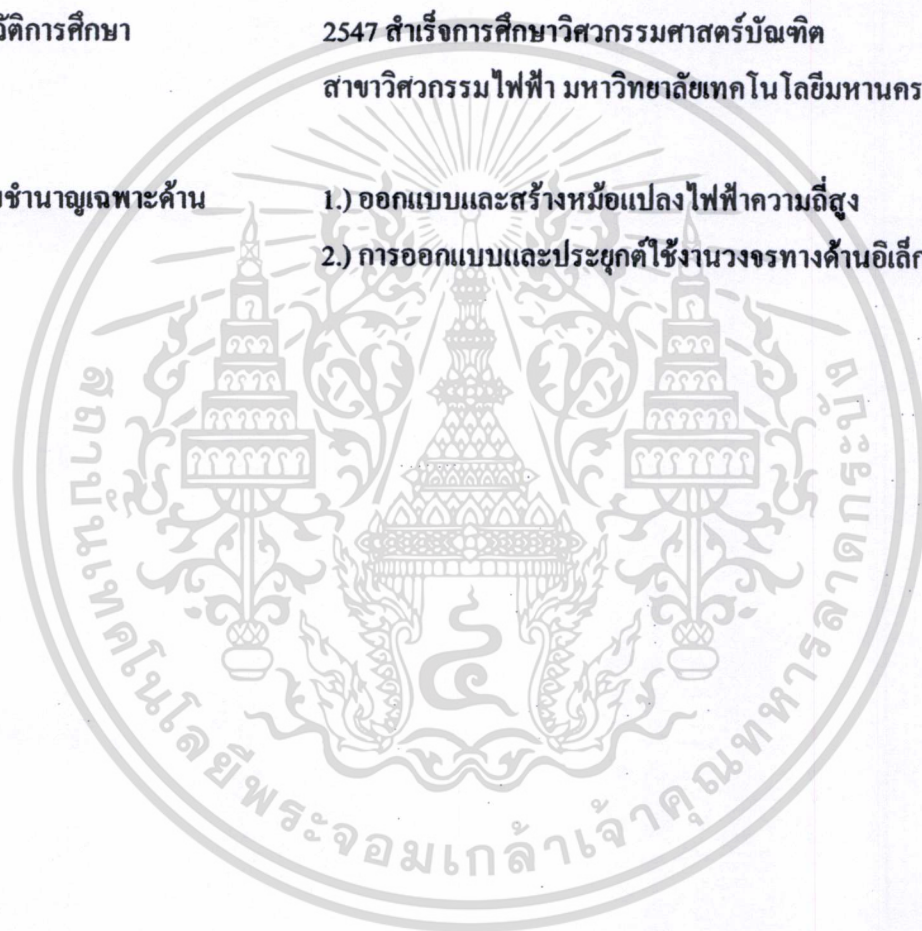
สนับสนุนโดย
ศูนย์เทคโนโลยีพระปกเกล้า
เพื่อสังคม
สำหรับการใช้
งานวิจัยที่มีให้ดัดแปลง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจตุพงษ์ คารารัตน์
 วัน เดือน ปีเกิด 28 กรกฎาคม 2524 ที่จังหวัดปทุมธานี
 ที่อยู่ 214/2 หมู่ 6 ต.บางพูน อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

ประวัติการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาวិชาการวิทยาศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง
 2.) การออกแบบและประยุกต์ใช้งานวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้