

การศึกษามาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในแท่งอิเล็กโทรด
สำหรับการออกแบบสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

THE STUDY OF APPROPRIATE TEMPERATURE EFFECT
IN ELECTRODE RODS FOR OZONE GENERATING DESIGN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-020-037

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในแท่งอิเล็กโทรด
สำหรับการออกแบบสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

THE STUDY OF APPROPRIATE TEMPERATURE EFFECT
IN ELECTRODE RODS FOR OZONE GENERATING DESIGN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-EN-M-020-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY OF APPROPRIATE TEMPERATURE EFFECT
IN ELECTRODE RODS FOR OZONE GENERATING DESIGN**



**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**

2010

KMITL-2010-EN-M-020-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในแท่งอิเล็กโทรดสำหรับการออกแบบสร้างเครื่องผลิต
ก๊าซโอโซน

Thesis Title The Study of Appropriate Temperature Effect in Electrode Rods for Ozone Generating
Design

นักศึกษา นายเสน่ห์ สาทลาลัย

รหัสประจำตัว 48060212

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-020-037

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ	
ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ	
ดร.ภพ จันท์เจริญสุข	
ดร.จักรพงษ์ จารุมิศรี	
รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 เวลา 09.30-11.30 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 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์กลับ
วันที่ 12 เดือน..... พ.ศ. 2553
ลงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในแท่งอิเล็กโตรดสำหรับการ ออกแบบสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน
นักศึกษา	นายเสน่ห์ สาทลาลัย
รหัสนักศึกษา	48060212
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลของอุณหภูมิที่เกิดภายในแท่งอิเล็กโตรดต่อปริมาณการผลิตก๊าซโอโซนแบบโคโรนาดีสชาร์จ โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์สร้างความถี่ 25 kHz หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเพิ่มแรงดันจาก 310 V เป็น 10 kVp แท่งอิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวมจำนวน 2 ชั้น ระยะช่องแคบอากาศ 0.2 cm ป้อนก๊าซตั้งต้นเป็นออกซิเจน 99.9% ควบคุมอัตราการไหลที่ 10 ลิตรต่อนาที โดยพิจารณาอุณหภูมิตั้งแต่ 15 °C ถึงอุณหภูมิ 60 °C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซโอโซนสูงสุด เมื่อควบคุมองค์ประกอบอื่นๆ ทางด้านไฟฟ้าและสิ่งแวดล้อมให้คงที่ พบว่าผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซนอย่างชัดเจน ซึ่งอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดที่ 25 °C ได้อัตราการผลิตก๊าซโอโซนสูงสุดที่ 49.5 g/hr ช่วงอุณหภูมิ 20-30 °C เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปออกแบบสร้างชุดผลิตก๊าซโอโซน นำหลักการทางคณิตศาสตร์หาความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดกับปริมาณการผลิตก๊าซโอโซน สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการ โพลีโนเมียล ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์หาแนวโน้มอัตราการผลิตก๊าซโอโซนต่อผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรดในช่วงของการทดลองได้ วิธีการนี้สามารถนำไปแสดงผลการผลิตก๊าซโอโซนแบบเวลาจริงซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานในอุตสาหกรรม

Thesis Title	THE STUDY OF APPROPRIATE TEMPERATURE EFFECT IN ELECTRODE RODS FOR OZONE GENERATING DESIGN
Student	Mr. Sanae Sathalalai
Student ID	48060212
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This thesis presents the results of the temperature effect within electrode rods for a quantity production of ozone gas in corona discharge model. The full bridge convertor is operated at 25 kHz where transformer high voltage – high frequency is step up from 310 V to 10 kVp. The electrode rods is a cylindrical cores overlap joint insulations 2 layers air gap 0.2 cm to control the oxygen gas 99.9% at flow rate 10 l/min. The temperature study is focused from 15 ° C to 60 ° C to find the maximum ozone generation. The power level and the operating environment is controlled. It is found that temperature can affect the ozone generation. The temperature 25 ° C inside the electrode rods has the highest rate of ozone gas at 49.5 g / hr. The temperature range between 20 ° C and 30 ° C is the most suitable for the ozone generating design. The relationship of temperature occurs in electrode rods and generating efficiency of ozone can be calculated in mathematic polynomial equation. This equation can predict the effective result of ozone generating amount due to the temperature occurring in producing process of ozone generators in manufacturing. This technique can also show the ozone generation as realtime which can be very important in industry application.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความช่วยเหลือ ในการวัดปริมาณโอโซนตลอดจนสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวัด

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย EMC และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือสถานที่ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยนี้และขอขอบคุณพี่น้องห้องปฏิบัติการทุกคน

ขอขอบคุณบริษัท พี.เอส.ซี เทคคิงแอนด์คัลเลอร์สลิปเมนท์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยนี้และขอขอบคุณพี่น้องภายในบริษัททุกคน

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณคุณแม่ที่ๆเพื่อนๆน้องๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันได้เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สมันท์ สาทลาสัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ก๊าซโอโซน.....	6
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	7
2.2.2 ความเป็นพิษ.....	7
2.2.3 ตัวออกซิไดซ์ (Oxidize).....	9
2.2.4 ระบบบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment process).....	10
2.2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน.....	10
2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซโอโซนกับผลของอนุมูล.....	11
2.3 กระบวนการแตกตัวของก๊าซและการสร้างโอโซน.....	12
2.3.1 สนามไฟฟ้า (Electric field).....	14
2.3.2 ลักษณะสนามไฟฟ้าอย่างง่าย.....	15
2.3.2.1 ทรงกลมเดี่ยวในอากาศ.....	15

สารบัญ(ต่อ)

2.3.2.2	ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	16
2.3.2.3	มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension).....	17
2.3.3	ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกคาวน์.....	17
2.3.3.1	รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration).....	17
2.3.4	วิธีการสร้างก๊าซไอโซน.....	18
2.3.5	ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของ โมเลกุลก๊าซ.....	19
2.3.6	อิเล็กตรอนทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	20
2.3.7	อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	20
2.4	หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	22
2.4.1	แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core).....	24
2.4.2	บอบบิน (Bobbin).....	25
2.4.3	ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enameled Copper Wire).....	26
2.4.4	เทปฉนวน (Insulation Tape).....	26
2.5	การออกแบบหม้อแปลงสวิตริงให้มีความปลอดภัย.....	26
2.5.1	การเลือกวัสดุเพื่อความปลอดภัยจากการเกิดไฟไหม้.....	26
2.5.2	การออกแบบเพื่อความปลอดภัยจากการถูกไฟฟ้าดูด.....	27
2.6	หลักการทางาน โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังความถี่สูงและการควบคุม.....	29
2.6.1	ภาควงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันทางด้านอินพุต (Rectifier).....	29
2.6.2	ภาคอินเวอร์เตอร์(Inverter).....	31
2.6.3	ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีดับบลิวเอ็มฟูลบริจค์คอนเวอร์เตอร์เมื่อนำมา เปรียบเทียบเป็นสวิตซ์.....	32
2.7	ไอจีบีที (IGBT) และมอสเฟต.....	34
2.7.1	สภาวะหยุดนำกระแส.....	36
2.8	เพาเวอร์มอสเฟต.....	37
บทที่ 3	การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	40
3.1	บทนำ.....	40
3.2	อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	40

สารบัญ(ต่อ)

3.3 การออกแบบชุดสวิตซ์ซึ่งฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	46
3.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	51
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 การเก็บผลอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโตรด.....	56
4.3 การเก็บผลก๊าซ โอ โซน โดยการทดลองทางเคมี.....	57
4.4 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	58
4.4.1 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	60
4.5 ผลการทดลองในการวัดอุณหภูมิจำนวน 5 จุด.....	65
4.6 ผลการทดลองการวัดปริมาณ โอ โซน.....	69
4.7 ผลการทดลองทางไฟฟ้าส่วนคอนเวอร์เตอร์.....	73
4.8 ผลการทดลองทางไฟฟ้าด้านแรงดันสูง.....	87
4.9 การจำลองการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	101
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	106
5.1 บทนำ.....	106
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	107
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้าส่วนด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์.....	107
5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้าส่วนด้านเข้าและด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูง.....	113
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากการเก็บผลอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้น ภายในแท่งอิเล็กโตรดต่อ อัตราการผลิตก๊าซ โอ โซน.....	118
5.6 การเก็บผลอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโตรดเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตก๊าซ โอ โซน.....	121
5.7 การวิเคราะห์อัตราการผลิตก๊าซ โอ โซนเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดภายใน แท่งอิเล็กโตรด เพื่อหาความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน.....	126
5.8 การวิเคราะห์ทำนายผลของการผลิต โอ โซนในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย.....	130
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	131
6.1 บทนำ.....	131
6.2 สรุปผลงานวิจัย.....	132

สารบัญ(ต่อ)

6.3 ข้อเสนอแนะ.....	134
6.4 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	134
6.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	135
เอกสารอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก.	140
ภาคผนวก ข.	171
ประวัติผู้เขียน.....	181



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติองค์ประกอบที่ใช้ในการวิจัย.....	4
2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซน.....	7
2.2 ระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น.....	8
2.3 คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ (99%) ที่เป็นอันตรายของสารประกอบคลอรีนเทียบกับ โอโซน ที่ pH 6-7.....	9
2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ โอโซนกับคลอรีน.....	10
2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ โอโซนกับคลอรีน.....	11
2.5 การจัดกลุ่มของเทศบาลตามอัตราท่นอุณหภูมิ.....	27
4.1 แสดงรายละเอียดการควบคุมอุณหภูมิโดยกระบวนการต่างๆ.....	55
4.2 แสดงรายละเอียดค่าที่ต้องการวัดตามรูปที่ 4.5.....	59
4.3 แสดงข้อกำหนดและเงื่อนไขในการทดสอบ.....	59
4.4 แสดงรายละเอียดเครื่องมือวัดส่วนที่สำคัญ.....	59
4.5 แสดงผลการเก็บค่าอุณหภูมิ 5 จุด อุณหภูมิเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วง 15-36 °C.....	65
4.6 แสดงผลการเก็บค่าอุณหภูมิ 5 จุด อุณหภูมิเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วง 37-60 °C.....	66
4.7 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิต โอโซน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	69
4.8 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิต โอโซน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	70
4.9 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิต โอโซน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	71
4.10 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออก ของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 15-36°C.....	73
4.11 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออก ของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 37-58°C.....	74
4.12 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออก ของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 59-60°C.....	75
4.13 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออก ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงช่วง 15-36°C.....	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

4.14 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงช่วง 37-58°C.....	88
4.15 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงช่วง 59-60°C.....	89
5.1 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์.....	110
5.2 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์.....	111
5.3 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูง.....	115
5.4 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูง.....	116
5.5 แสดงรายละเอียดการควบคุมอุณหภูมิโคบกระบวนการต่างๆ.....	118
5.6 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	119
5.7 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	120
5.8 แสดงผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซโอโซนต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	122
5.9 แสดงผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซโอโซนต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด.....	123
5.10 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิตโอโซน ที่ช่วง 15 - 25 °C.....	127
5.11 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิตโอโซน ที่ช่วง 50 - 60 °C.....	129

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	4
2.1 การสร้างไอโซนและการทำงานของไอโซนในการออกซิไดซ์(Oxidation)สารปนเปื้อน.....	9
2.2 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน.....	12
2.3 แสดงกลไกการผลิตไอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry.....	13
2.4 คุณสมบัติสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโตรดต่างกัน.....	15
2.5 รูปทรงของอิเล็กโตรด.....	15
2.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V_b และ E_n ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่.....	17
2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ.....	19
2.8 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	21
2.9 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	21
2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง.....	22
2.11 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด.....	22
2.12 ลักษณะของแกนแบบ EI, EE, ETD.....	25
2.13 ลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์ซิส.....	25
2.14 ลักษณะของบอบบิ้นแบบ EI Bobbin.....	26
2.15 ลักษณะการพันขดลวดบนบอบบิ้นในลักษณะแยกฝั่งขดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ขั้วพัก.....	28
2.16 บล็อกโครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังความถี่และภาคควบคุม.....	29
2.17 ภาควงจรอินเวอร์เตอร์ที่รับแรงดันเอาต์พุตDCจากภาคเรกติไฟเออร์.....	31
2.18 วงจรพีคดับลิวเอ็มบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	33
2.19 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	34
2.20 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไอจีบีที.....	35
2.21 กราฟแสดงลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ ไอจีบีที.....	36
2.22 สัญลักษณ์ของมอสเฟต.....	37
2.23 ตัวอย่างแผ่นระบายความร้อนและค่า $R_{\theta cs}$	39
3.1 โครงสร้างการออกแบบและวิจัยเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรรตกรกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น.....	42
3.3 มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ต่อคร่อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 5 nF.....	49
3.4 วงจรสร้างสัญญาณ PWM.....	49
3.5 วงจรสร้างสัญญาณ PWM.....	50
3.6 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80.....	52
4.1 แสดงตำแหน่งจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรรตกร.....	56
4.2 ภาพรวมตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรรตกรและการวัดปริมาณ โอโซน.....	56
4.3 ภาพรวมการเตรียมสารเคมีสำหรับกระบวนการไตรครดปริมาณ โอโซน.....	57
4.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมองค์ประกอบตัวแปรต่างๆ.....	58
4.5 ภาพรวมวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดก๊าซ โอโซนและตำแหน่งของการวัดค่าทางไฟฟ้า.....	58
4.6 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ขณะไม่มีโหลด.....	60
4.7 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง J และกระแสที่ตำแหน่ง K ตามรูปที่ 4.5 ขณะไม่มีโหลด.....	61
4.8 การวัดสัญญาณ PWM ที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 4.5 ในการขับเคลื่อน ขณะไม่มีโหลด.....	61
4.9 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D ตามรูปที่ 4.5 ขณะไม่มีโหลด.....	62
4.10 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด.....	62
4.11 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด.....	63
4.12 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F ขณะไม่มีโหลด.....	63
4.13 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด.....	64
4.14 แสดงการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรรตกรจำนวน 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย.....	67
4.15 แสดงการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรรตกรจำนวน 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย.....	67
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรรตกรกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวัดอุณหภูมิ 5 จุด.....	68
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรรตกรกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวัดอุณหภูมิ 5 จุด.....	68
4.18 แสดงการวัดปริมาณ โอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ย ภายในแท่งอิเล็กโทรรตกร.....	71
4.19 แสดงการวัดปริมาณ โอโซนเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโทรรตกร.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

4.20 แสดงการวัดปริมาณ โอโซนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวัดที่ 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที.....	72
4.21 แสดงผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่อุณหภูมิเฉลี่ย.....	75
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ทรานซิสเตอร์กับประสิทธิภาพ ของคอนเวอร์เตอร์เฉลี่ย.....	76
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตก๊าซ โอโซนกับประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์.....	76
4.24 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C	77
4.25 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C	77
4.26 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C....	78
4.27 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C	78
4.28 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C ...	79
4.29 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C	79
4.30 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	80
4.31 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	80
4.32 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C.....	81
4.33 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C.....	81
4.34 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	82
4.35 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	82
4.36 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C.....	83
4.37 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C.....	83
4.38 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	84
4.39 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	84
4.40 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C.....	85
4.41 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C.....	85
4.42 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	86
4.43 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

4.44 แสดงผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์.....	89
4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์กับประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไอโซน.....	90
4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตก๊าซไอโซนกับประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไอโซน.....	90
4.47 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C ...	91
4.48 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C ...	91
4.49 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C ...	92
4.50 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C ...	92
4.51 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C ...	93
4.52 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C ...	93
4.53 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C ...	94
4.54 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C ...	94
4.55 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C ...	95
4.56 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C ...	95
4.57 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C ...	96
4.58 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C ...	96
4.59 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C ...	97
4.60 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C ...	97
4.61 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C ...	98
4.62 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C ...	98
4.63 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C	99
4.64 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C	99
4.65 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C ..	100
4.66 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C ..	100
4.67 วงจรจำลองการทำงานของฟลูบรีดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB, Simulink	101

สารบัญรูป (ต่อ)

4.68 (ก) และ (ข) สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกทของมอสเฟสจากการจำลอง.....	101
รูปที่ 4.69 (ก) กระแสเอาต์พุทของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง.....	102
(ข) แรงดันเอาต์พุทของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง.....	102
รูปที่ 4.70 (ก) กระแสเอาต์พุทที่เปลี่ยนแปลงจากการจำลอง.....	102
(ข) แรงดันเอาต์พุทที่เปลี่ยนแปลงจากการจำลอง.....	102
4.71 การวัดสัญญาณ PWM ที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 4.5 ในการขับเคลื่อน ขณะไม่มีโหลด.....	103
4.72 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด.....	104
4.73 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C..	105
5.1 แสดงลักษณะกระบวนการทดลองและจุดสำคัญในขั้นตอนการทดลอง.....	106
5.2 แสดงตำแหน่งการวัดกำลัง ไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุท โดยใช้เครื่องวัด.....	107
5.3 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์.....	108
5.4 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์.....	109
5.5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์.....	112
5.6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ย กับกำลัง ไฟฟ้าด้านเข้าและกำลัง ไฟฟ้าด้านออก หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	113
5.7 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ย กับประสิทธิภาพของกำลัง ไฟฟ้าด้านเข้าและ กำลัง ไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	114
5.8 แสดงความสัมพันธ์อัตราการผลิตปริมาณ โอ โชน กับประสิทธิภาพของกำลัง ไฟฟ้าด้านเข้าและ กำลัง ไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	117
5.9 ภาพรวมวิธีการวัดและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 จุด.....	119
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 จุดกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวัดอุณหภูมิ 5 จุด.....	121
5.11 แสดงการวัดปริมาณ โอ โชนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ย ภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์.....	124
5.12 แสดงการวัดปริมาณ โอ โชนเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์.....	124
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิต โอ โชนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆกับค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานในการวัดที่ 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที.....	125

สารบัญรูป (ต่อ)

5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 15 - 25 °C.....	126
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 25 - 35 °C.....	127
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 35 - 45 °C.....	128
5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 45 - 55 °C.....	128
5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 50 - 60 °C.....	129
5.19 กราฟแสดงปริมาณโอโซนค่าจริง และปริมาณโอโซนโดยสมการโพลิโนเมียล.....	130
6.1 แสดงการวัดปริมาณ โอโซนเฉลี่ย ต่อผลของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโตรด.....	132
6.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ย กับประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้า ด้านออกหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	133



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษหรือตลอดจนปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่งของโลก จึงได้รับความสนใจและพยายามแก้ไขจากหลายๆหน่วยงาน มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆเพื่อนำมาทดแทนและแก้ปัญหา เทคโนโลยีอย่างหนึ่งที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องคือระบบไอโซนและเกิดการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม [7] เพื่อนำมาทดแทนเคมีและแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่ส่งผลเสียต่อระบบสิ่งแวดล้อมในอนาคต ยกตัวอย่างเช่น ลดการใช้เคมีในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับระบบระบายความร้อน คุณลักษณะและสีในระบบน้ำเสีย กลิ่นเหม็นในอากาศ ฆ่าเชื้อในห้องปลอดเชื้อ ฆ่าเชื้อโรคเครื่องมือแพทย์ ใช้แทนเคมีในสระว่ายน้ำและสปา เป็นต้น ซึ่งการผลิตไอโซนมีด้วยกันหลากหลายวิธี [1], [3], [13-14] เพื่อเป้าหมายในประยุกต์การผลิตก๊าซไอโซนโดยวิธีการต่างๆให้ได้ปริมาณไอโซนสูงตลอดจนเป้าหมายเพื่อการลดพลังงานและใช้พลังงานอื่นทดแทน แต่ปัญหาอีกด้านหนึ่งเกี่ยวกับการใช้งานระบบไอโซนคือ ทำอย่างไรจึงจะใช้ระบบไอโซนได้ผลและมีประสิทธิภาพตามต้องการต่อเมื่อตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งผลที่ทำให้ระบบไอโซนประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน คือ ปัญหาทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น แต่ในขณะที่เดียวกันก๊าซไอโซนมีข้อเสียถ้าใช้ในปริมาณที่เข้มข้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองกับเยื่อผิวหนัง การผลิตก๊าซไอโซนจะอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้า (Electric Field) กระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพื่อให้เกิดก๊าซไอโซนขึ้น งานวิจัยทางด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซไอโซนจะใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโตรดมาผลิตก๊าซไอโซน โดยความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชุดอิเล็กโตรดหรือชนิดของแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูง และแรงดันกระแสสลับแรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูง การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นโพลทางไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทำได้ยากด้วยรูปแบบเป็นวงจรมอนิเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการแปลงวงจรมอนิเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงทำให้สามารถเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอิเล็กโตรดได้ดียิ่งขึ้น [5] ในการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นโพลทางไฟฟ้าสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาคำนวณได้ วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขช่วยลดเวลาในการจำลองการทำงานลงได้ [6] เครื่องผลิตก๊าซไอโซนที่มีการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ที่หลากหลาย ต้องสามารถที่จะปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซได้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน การนำวิธีการสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบกำหนดจำนวนลูกคลื่นที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโตรดเพื่อปรับเปลี่ยนพลังงานที่ใช้ผลิตก๊าซถูกนำมาใช้และมีการควบคุมปริมาณก๊าซได้ การใช้วิธีการขับเคลื่อนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift PWM Control Technique) ของคู่อุปกรณ์สวิตช์สามารถแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีคบัลลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์นั้นไม่มีวงรอบการคืนพลังงานที่สะสมอยู่ในโหลด แรงจากการผลัดกันประจุไฟฟ้าจะบังคับให้อิเล็กตรอนยังคงไหลต่อเนื่องผ่านรอยต่อ (Junction) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำอุปกรณ์สวิตช์เป็นผลให้อุปกรณ์สวิตช์ไม่สามารถหยุดนำกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทน ในขณะที่วิธีการขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟสมีวงรอบการคืนพลังงานแต่ละครั้งคาบเวลาอยู่จึงสามารถตัดการส่งผ่านพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ ในขณะที่เดียวกันสามารถที่จะนำข้อดีของวิธีการควบคุมสัญญาณของรีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอเพราะสามารถลดกำลังสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ได้โดยการกำหนดความถี่สวิตช์ซึ่งให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานที่แรงดันและกระแสเป็นศูนย์ ผลคูณของกำลังงานสูญเสียจึงเท่ากับศูนย์ [9]

เครื่องผลิตก๊าซ โอโซน (Ozone Generator) ขนาดใหญ่ส่วนมากใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีคบัลลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์ (PWM Converter) สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) โดยมีช่องว่างอากาศเป็นฉนวนคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสามารถมองเป็นโหลดตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าได้ คอนเวอร์เตอร์แบบนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมความถี่ทางด้านเอาต์พุตได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมระดับปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนได้เช่นกัน แต่ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ทำได้ยากและมีกำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเพิ่มขึ้น อีกทั้งประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซโอโซนนั้นยังไม่สูงสุด

ปัจจัยที่ทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนมีการเปลี่ยนแปลงหลักๆ มี 2 ปัจจัย [13] คือ ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น ความชื้นของก๊าซออกซิเจนความชื้นของก๊าซออกซิเจน อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน อุณหภูมิที่เกิดภายในแท่งอิเล็กโทรด ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งก็คือ ปัจจัยทางไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้า ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ประเภทของก๊าซที่นำมาผลิต โอโซน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมทางด้านผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดต่อผลการผลิตก๊าซโอโซน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการควบคุมตัวแปรด้านต่างๆคงที่และเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบวงจรสวิตช์ซึ่งความถี่สูงแรงดันสูงแบบพีคบัลลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สร้างความถี่สูงและสนามไฟฟ้า ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวนสองชั้น และวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เกิดภายในแท่งอิเล็กโทรด ขณะที่ทำการผลิตก๊าซโอโซนเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ จากงานวิจัยนี้จะทำให้ได้ประโยชน์ในการตรวจสอบแนวโน้มการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน ในขณะที่เครื่องผลิตก๊าซโอโซนทำงานอยู่ได้ และยังสามารถช่วยควบคุม

ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนให้เหมาะกับการใช้งานเพื่อลดต้นทุนและเครื่องผลิตก๊าซโอโซนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน แบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) แรงดันสูงความถี่สูง ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น เพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ต่อปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตโอโซน และส่งผลให้สะดวกต่อการตรวจสอบปริมาณโอโซนในขณะที่เครื่องยังทำงานอยู่ สามารถช่วยควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนให้เหมาะกับการใช้งานตลอดจนเพื่อลดต้นทุนในการออกแบบผลิตเครื่องโอโซนได้อย่างคุ้มค่าและได้ประสิทธิภาพตามต้องการ

1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา เอกสาร บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้างก๊าซโอโซนและแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบที่ดับบลิวเอ็มแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter)

1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

1.3.3 ทดสอบวงจรในส่วนต่างๆและนำมาทดลองเพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย

1.3.4 สร้างชุดแท่งอิเล็กทรอนิกส์และเก็บอากาศที่ตามที้ออกแบบ

1.3.5 สร้างชุดอุปกรณ์ที่นำมาทำการควบคุมอุณหภูมิ

1.3.6 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า

1.3.7 เก็บผลอุณหภูมิและปริมาณโอโซนที่สอดคล้องกับการเก็บผลทางไฟฟ้า

1.3.8 วิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นทางด้านอุณหภูมิ ปริมาณโอโซน และทางไฟฟ้า

1.3.9 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.9 เขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 สร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบที่ดับบลิวเอ็มแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สำหรับขับหม้อแปลง 25 kHz

1.4.2 สร้างชุดหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงพิกัด 600 VA 25 kHz

1.4.3 สร้างชุดแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยาว 60 ซม. และเก็บอากาศที่ 0.2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ เปรียบเทียบกับอัตราการผลิตก๊าซไอโซนที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

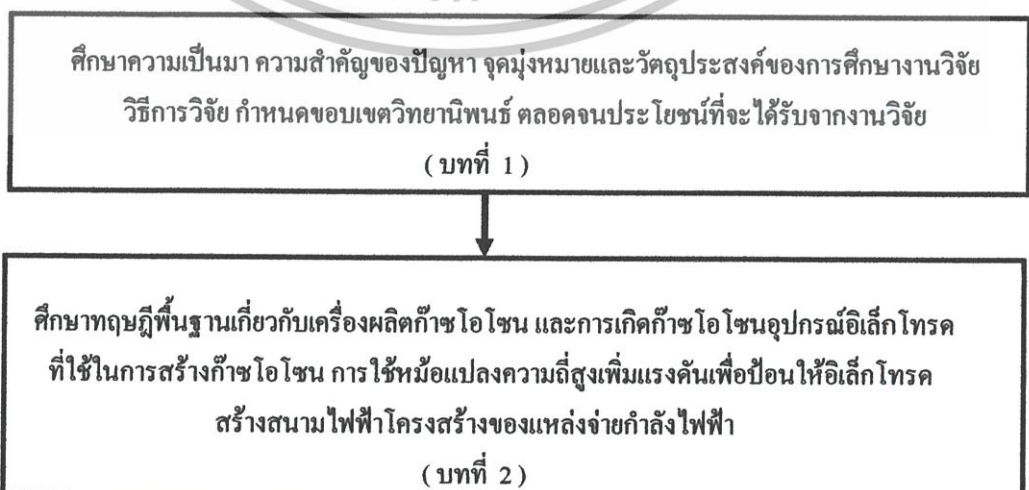
1.4.5 วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิ ปริมาณไอโซน เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าในการผลิตไอโซน

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติองค์ประกอบที่ใช้ในการวิจัย

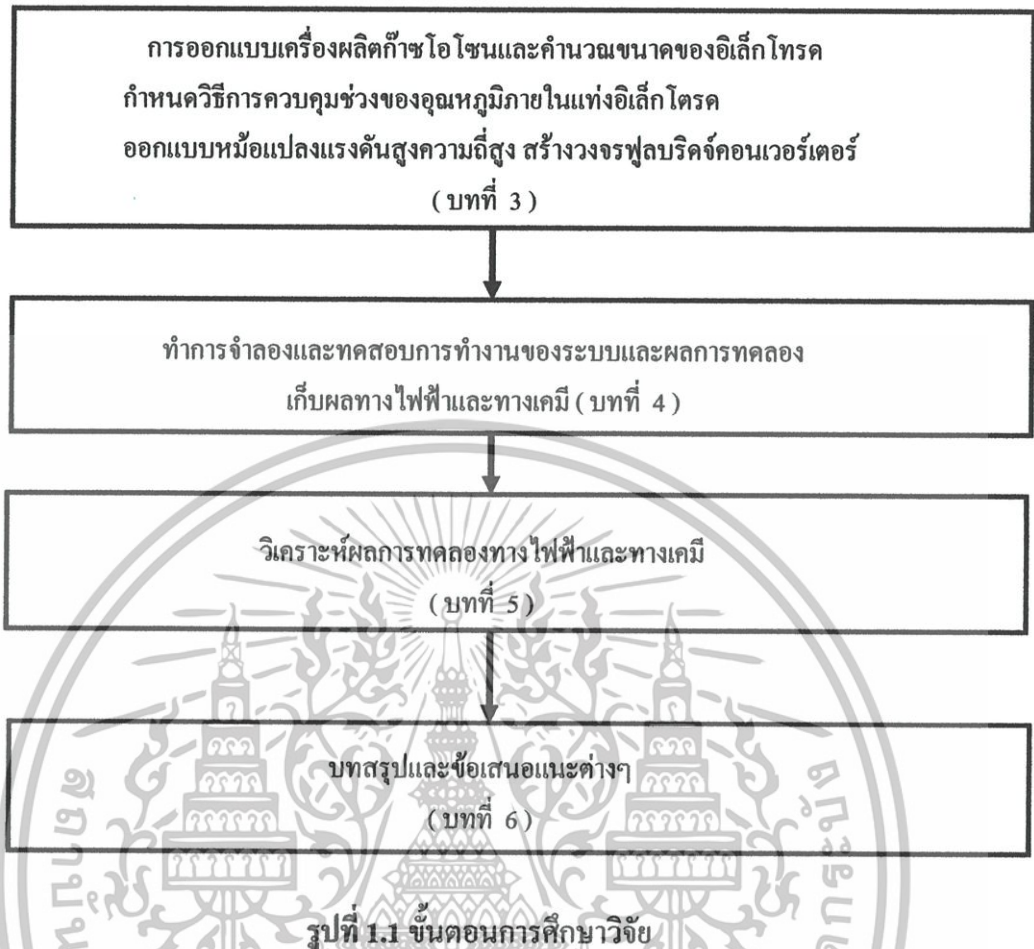
รายการ		ข้อกำหนด
พิกัดแรงดันด้านเข้า	ใช้ Variable	220 Vac 50 Hz
พิกัดคอนเวอร์เตอร์	ความถี่ในการสวิตช์	25 kHz
	กำลังไฟฟ้าสูงสุด	600 VA
พิกัดหม้อแปลง	พิกัด	600 VA
	แรงดันด้านออก	10 kV
	ความถี่	25 kHz
แท่งอิเล็กทรอนิกส์	ความยาว	60 ซม.
	ช่องว่างอากาศ	0.2 ซม.
ก๊าซออกซิเจนป้อนเข้าเพื่อผลิตก๊าซไอโซน	ความบริสุทธิ์	99.9 %
	อัตราการไหล	10 ลิตรต่อนาที
	ความดันก๊าซด้านเข้า	1 บาร์
	ความชื้นสัมพัทธ์	20 %

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างวงจรพูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซไอโซนรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.6.1 สามารถนำวงจรพีดีบีบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มาเป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

1.6.2 สามารถทราบถึงช่วงอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม สำหรับการผลิตไอโซนเพื่อนำไปออกแบบเลือกใช้เกี่ยวกับอุปกรณ์ในการควบคุมอุณหภูมิ ที่ทำให้สามารถช่วยควบคุมประสิทธิภาพของการผลิตไอโซนตลอดอายุการใช้งานได้

1.6.4 ได้แนวทางในการตรวจสอบการผลิตไอโซนในขณะที่เครื่องไอโซนทำงานอยู่ได้

1.6.5 สามารถออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซนให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและสามารถรองรับกับงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6.5 สร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซนได้ประหยัดค่าใช้จ่าย และคุ้มค่ามากที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

2.1 บทนำ

โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้นทางการค้าและอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของโอโซนที่สามารถแก้ปัญหาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านมลภาวะ แวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประโยชน์ของโอโซนที่รู้จักกันแล้วโอโซนยังมีโทษรุนแรงด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรู้ความเข้าใจและการนำไปใช้งาน การออกแบบเครื่องผลิตโอโซนจำเป็นต้องรู้ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกตัวของก๊าซในสนามไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสามารถออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างปรากฏการณ์การแตกตัวของอากาศภายในแก๊ปอากาศที่ออกแบบได้ ดังนั้นจึงต้องมีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบพื้นฐานของระบบรวมทั้งการทำงาน และการออกแบบซึ่งจะนำเสนอในบทนี้เช่นกัน โดยทั่วไปเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบ คือ การใช้งานในบริเวณที่มีผู้คนอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซไม่ให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณก๊าซโอโซนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

2.2 ก๊าซโอโซน [25]

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

สารต่างๆ ในการทำปฏิกิริยาของโอโซนแบ่งเป็นหมวดหมู่ดังนี้

1. สารอินทรีย์ เช่น ไอออน โลหะหนักพวก 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 โอโซนยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดว่าเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อและปลอดเชื้อที่สมบูรณ์แบบ จาก [17] แต่โดยคุณสมบัติตัวมันแล้ว 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 ค่านีแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และ อุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรม และที่สาธารณะ
0.3	เริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เกิดการปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย ติดเรื้อรังทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอกและทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4-5.6	การทดสอบกับต้นถั่วพบว่าใน 70 วินาที ใบถั่วเกิดการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้ายแล้ว

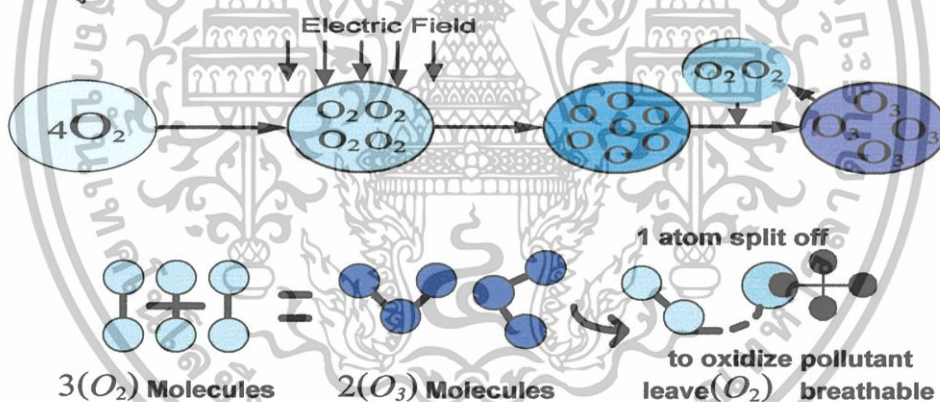
สารเคมีหลายชนิดมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคโดยเฉพาะสารประกอบคลอรีน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ โอโซนแล้วจะเห็นข้อแตกต่างทางความสามารถที่ชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 2.3

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
E.Coli	0.034-0.05	95-180	0.4-0.75	0.02
Polio I	1.1-2.5	770-3740	0.2-6.7	0.1-0.2
Rotavirus	0.01-0.05	3810-6480	0.2-2.1	0.006-0.06
Phage ϕ 2	0.08-0.18	-	-	-
G. Lambia cysts	47-150	-	-	0.5-0.6
G. Muris cysts	30-630	1400	7.2-18.5	1.8-2.0

2.2.3 ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) [4], [22-23]

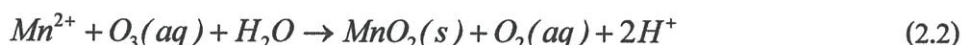
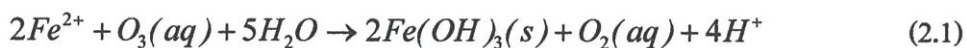
หน้าที่หลักที่สำคัญและเป็นลักษณะเด่นของ โอโซนคือทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตัวอย่างเช่น



รูปที่ 2.1 การสร้าง โอโซนและการทำงานของ โอโซน ในการออกซิไดซ์ (Oxidation) สารปนเปื้อน

- เหล็กและแมงกานีส

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือการทำให้ไอออนของเหล็กและแมงกานีสกลายเป็นของแข็งและตกตะกอน ดังแสดงในสมการที่ 2.1-2.2



ปริมาณ โอโซนที่ใช้คือ 0.43 mgO₃/mgFe และ 0.88 mgO₃/mgMn แต่ถ้าเป็นสารเคมีชนิดอื่น ๆ เช่น คลอรีน (ClO₂) ต้องใช้ 1.20 mg/mgFe และ 2.45 mg/mgMn เป็นต้น

- 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 หรือเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกวนน้ำแล้วตกตะกอน เป็นต้น โอโซนช่วยให้ค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในระบบบำบัดลดลงได้ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยใน [16], [20] เป็นต้น

2.2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

ตัวอย่างระบบบำบัดที่มีปัญหาจากสารเคมีที่ใช้ในปัจจุบันที่ชัดเจนคือ ทรายน้ำ เนื่องจาก การสัมผัสโดยตรงของน้ำกับร่างกายของผู้ใช้บริการทำให้ความรุนแรงของการทำปฏิกิริยาของคลอรีนส่งผลต่อร่างกายของผู้ใช้โดยตรง โอโซนมีการทำปฏิกิริยาที่รุนแรงกว่าคลอรีน แต่มีช่วงเวลาดำเนินการทำปฏิกิริยาเนื่องจากโอโซนสามารถสลายตัวง่าย ดังนั้น ในต่างประเทศจึงมีการนำโอโซนมาใช้งานในสระว่ายน้ำอย่างกว้างขวางเนื่องจากไม่มีโทษต่อผู้ใช้และยังมีประโยชน์ต่อการรักษาโรคผิวหนังบางชนิดอีกด้วย แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ภายใต้การตรวจสอบและดูแลอย่างดี เนื่องจากในสระว่ายน้ำต้องไม่มีโอโซนหลงเหลืออยู่แล้วจาก [16], [20] นอกจากนี้อันตรายที่พบจากการใช้งานคลอรีนในระบบที่น้ำสัมผัสโดยตรงกับเนื้อเยื่ออ่อนบางของมนุษย์โดยเฉพาะสาร โครเดน (Chlodane) ซึ่งเป็นสารจำพวก THM: Trihalomethane ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของโอโซนเมื่อเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับคลอรีน

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

Chlorine	Ozone
1. ราคาคลอรีนสูง	1. ระดับความเป็นพิษอยู่ที่ 1 mg/l (ระบุโดย EPA สหรัฐอเมริกา) มีกลิ่นฉุน เริ่มสังเกตได้ที่ระดับ 0.01 mg/l ที่ระดับสูงกว่านี้มีการระคายเคืองสูงมาก
2. คลอรีนมีค่าความรุนแรงในการทำปฏิกิริยา (Oxidation potential) 1.36 V	2. โอโซนต้องทำการผลิต ณ ตำแหน่งที่ใช้งาน ไม่สามารถเก็บได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chlorine	Ozone
3. คลอรีนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้	3. โอโซนมีวงชีวิตสั้นหลังทำปฏิกิริยาสลายตัวเป็นออกซิเจน
4. คลอรีนมีกลิ่นรุนแรงตกค้างหลังการบำบัด	4. ราคาโอโซนต่ำลงเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีและการใช้พลังงานน้อยลงในการผลิตในปัจจุบัน
5. คลอรีนทำงานกับตะไคร่น้ำได้ผลดีมากกำจัดตะไคร่น้ำได้ดี	5. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาสูงสุด เนื่องจากค่า Oxidation potential 2.07 V
6. คลอรีนทำงานได้ดีต้องควบคุม pH ให้อยู่ในย่าน 7.0-7.4	6. โอโซนที่ค่าความเข้มข้นเดียวกับคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่าคลอรีน 600-3000 เท่า
	7. โอโซนไม่มีกลิ่นตกค้าง แต่สามารถกำจัดกลิ่นของยูรีน, ควิน, อาหาร และ สีได้
	8. โอโซนพบปัญหาการเติบโตของตะไคร่น้ำ ต้องใช้คลอรีนช่วย โดยการทำให้ Shock treatment
	9. โอโซนไม่ต้องมีการควบคุม pH

2.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซโอโซนกับผลของอุณหภูมิ [26-28]

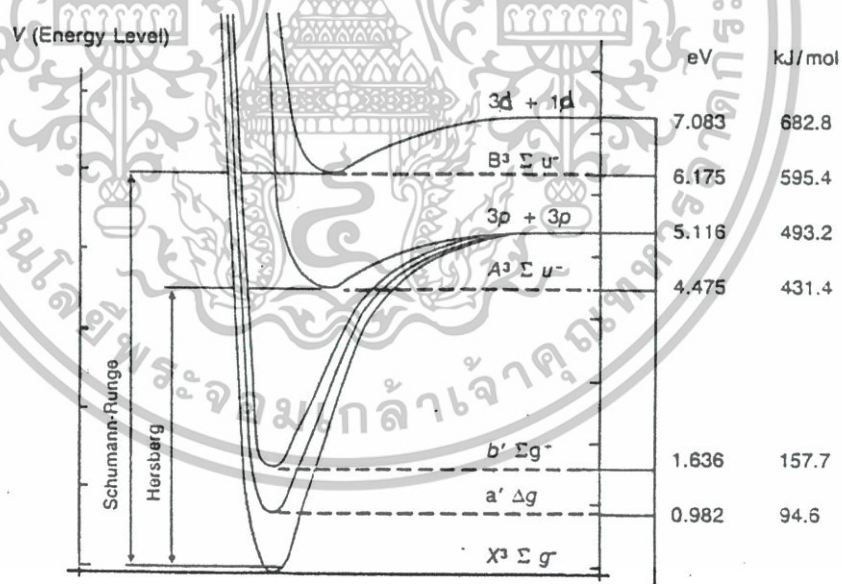
จากตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่กระทำต่อก๊าซโอโซน ในสภาวะที่เป็นก๊าซและผสมกับน้ำ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการสลายตัวของก๊าซโอโซนเกิดได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

Gaseous		Dissolved in Water (pH 7)	
Temp (C)	half-life *	Temp (C)	half-life
-50	3-months	15	30-minutes
-35	18-days	20	20-minutes
-25	8-days	25	15-minutes
20	3-days	30	12-minutes
120	1.5-hours	35	8-minutes
250	1.5- seconds		

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) นำไปสู่การเบรคดาวน์ในฉนวนที่พิจารณา ทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งทะลุผ่านฉนวน สิ่งที่เกิดตามมาคือความร้อนเนื่องจากกระแสที่ไหลจากการเบรคดาวน์ที่เกิดขึ้น ทำให้โอโซนซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำเกิดการสลายตัว ดังนั้นในการผลิตโอโซนจึงไม่ควรเกิดการเบรคดาวน์ขึ้น นั่นคือพลังงานที่อิเล็กตรอนรับจากสนามไฟฟ้าควรมีค่าน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (w_i) แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมออกซิเจนออกจากกัน



Source: Masschelein (1977).

รูปที่ 2.2 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน

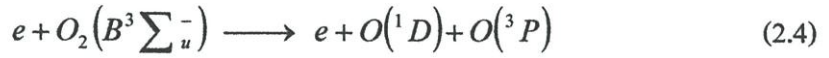
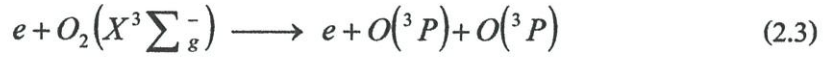
เมื่อพิจารณาจากระดับพลังงานของออกซิเจนในรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับซึ่งออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็นโอโซนได้มี 2 ระดับด้วยกันคือ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

a) การแตกโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่ออื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานในงานวิจัยที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงเทียบกับระดับพลังงานของออกซิเจนแล้วแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4



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

b) การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็น โอโซน (Ozone Generation)



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



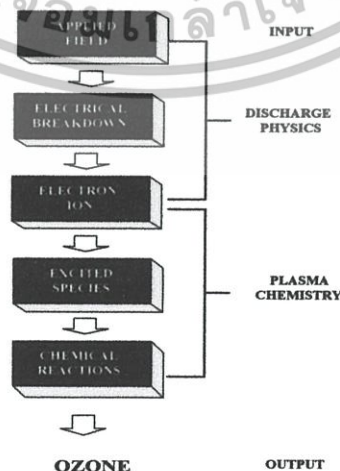
หรือ



หรือ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 สนามไฟฟ้า (Electric field) [10-11]

สนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามแฟกเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างอิเล็กโทรดลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า η^* คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$\eta^* = \frac{E_{\max}}{E_{av}} \quad (2.9)$$

เมื่อ E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด
 E_{av} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นในแกประหว่างอิเล็กโทรด

1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

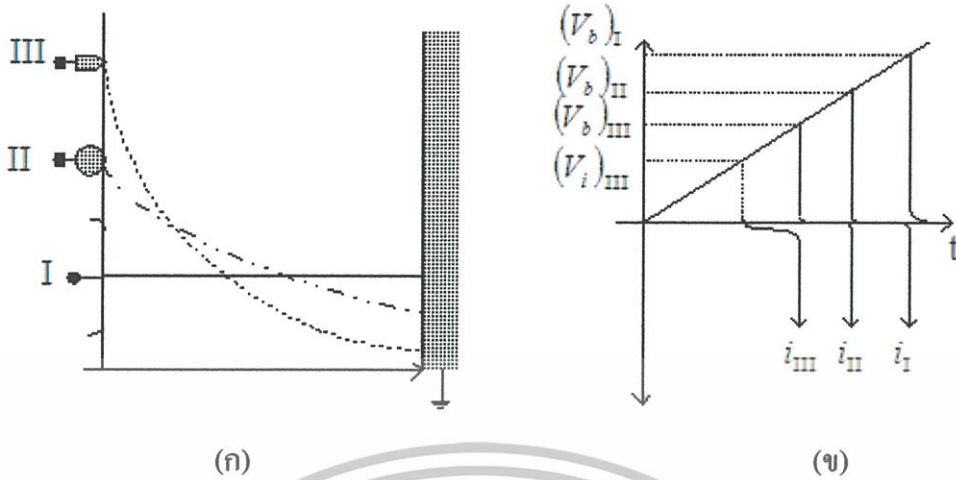
คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $\eta^* = 1$ นั่นคือกรณีที่ป้อนแรงดันให้ชุดอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบนี้ ถ้าค่า E_{\max} ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับค่าความลงทนของฉนวนต่อสนามไฟฟ้า (E_b) จะเกิดเบรกควาน์ทันที เนื่องจากสนามไฟฟ้าเฉลี่ย (E_{av}) ทุกจุดเท่ากัน

2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field)

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

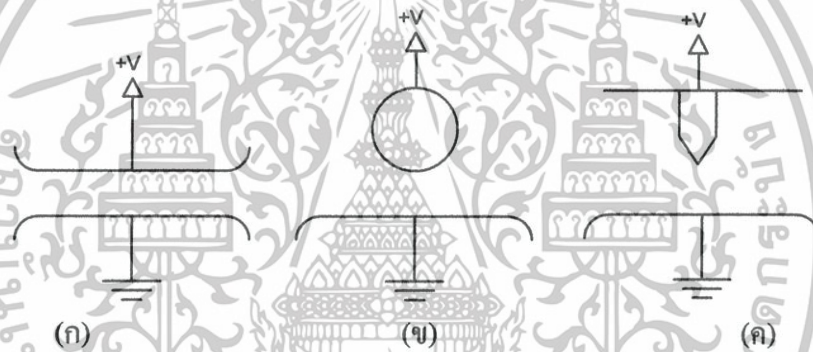
3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $\eta^* \leq 20\%$ คุณสมบัติที่โดดเด่นของสนามไฟฟ้าแบบนี้คือมีผลของประจุค้างเกิดขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ จะเกิดกระแสไหลก่อนเกิดเบรกควาน์นานมาก เรียกว่ากระแสโคโรนา (Corona current) ดังแสดงในกราฟ i_{III} ในรูปที่ 2.4 (ข) และความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจากอิเล็กโทรดออกไปจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ค) ใน [1] อิเล็กโทรดที่ III เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติแตกตัวของอากาศแล้วแต่สนามไฟฟ้าบริเวณอื่นยังต่ำมาก จึงไม่เกิดการเบรกควาน์ผ่านตลอดช่องว่างอากาศ แต่ค่าแรงดันที่อากาศเริ่มแตกตัวคือ V_i (Ignition voltage) ในสนามไฟฟ้าชนิดนี้การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกควาน์ทำได้ยากเนื่องจากผลของประจุค้างทำให้สนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามลักษณะทางเรขาคณิต



รูปที่ 2.4 คุณสมบัติสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโทดต่างกัน

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



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

2.3.2 ลักษณะสนามไฟฟ้าอย่างง่าย

รูปร่างอิเล็กโทดที่เกี่ยวเนื่องกับการผลิตไอโซนมีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง เช่น ทรงกลมขนาดเล็กมาก (ปลายแหลม) และรูปทรงกระบอกแกนร่วม ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสมการทางเรขาคณิตได้

2.3.2.1 ทรงกลมเดี่ยวในอากาศ

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

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

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกลม

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

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

2.3.2.2 ทรงกระบอกซ้อนกัน

เส้นลัดขั้วสนามไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า โดยอาศัยสมการที่ 4 ของ Maxwell $Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$ สำหรับทรงกระบอกแกนร่วมยาว 1 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

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

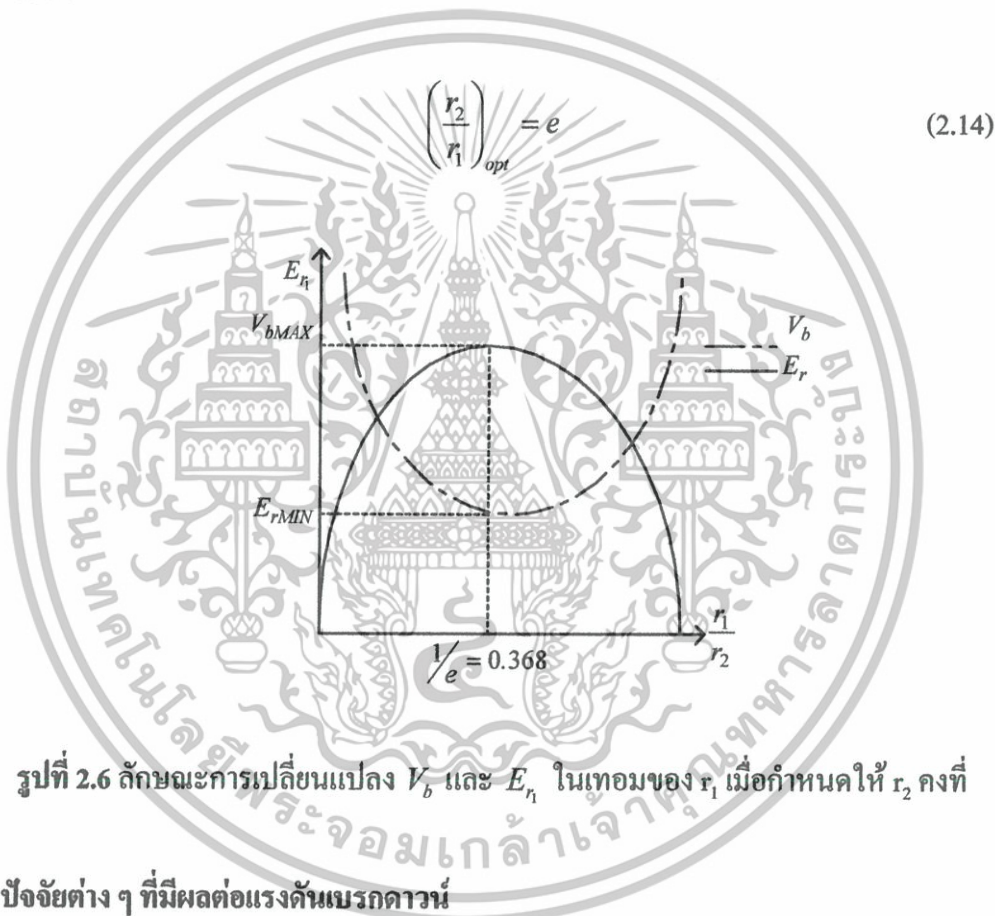
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกระบอกวงใน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มิติที่พอเหมาะ คือ ลักษณะการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดทนต่อแรงดันได้สูงที่สุด ตัวอย่างเช่นในกรณีกำหนดครีมีอเล็กโตรดนอก r_2 ถ้าให้อิเล็กโตรดในรัศมี r_1 ใกล้เคียงกับ r_2 มาก ๆ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดนอกและในคือ $d = r_2 - r_1$ มีค่าน้อยเกิดเบรกดาวน์ง่าย แต่การลดรัศมี r_1 ลงเพื่อเพิ่มค่า d จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำเพิ่มสูงขึ้นมาก จนถึงค่าวิกฤติและเกิดโคโรนาได้ง่าย การหาค่าจุดที่พอเหมาะของ r_1 ที่อยู่ระหว่าง $0 - r_2$ ที่ทำให้ระบบทนแรงดันได้สูงสุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อนดังกล่าวใน [1] กรณีอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมคือ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V_b และ E_r ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่

2.3.3 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์

2.3.3.1 รูปลักษณะอิเล็กโตรด (Electrode configuration)

รูปร่างอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้า กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับความเครียดเฉลี่ยจะต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรกดาวน์เป็นค่าเดียวกัน คือเมื่อ อะวาลานซ์วิกฤตได้ตามเงื่อนไขเบรกดาวน์ทันที ไม่มีโคโรนาเกิดก่อนเบรกดาวน์ แต่กรณีที่สนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง ระยะแกปกว้างมากเมื่อเทียบกับรัศมีอิเล็กโตรด ค่าแรงดันเริ่มต้น (V_i) จะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์อย่างชัดเจน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_m) เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ d คือระยะช่องว่างอากาศ และ η^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า

2.3.4 วิธีการสร้างก๊าซไอโซน

ก๊าซไอโซนคือก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้น จะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน (O_2) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ O_2 และ O_3 ดังรูปที่ 2.7 โดยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการ ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ กระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอน โมเลกุลของก๊าซนั้นจึงมีค่าประจุเป็นบวกและอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซโดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์และต้องมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกทั่ว ๆ ไปเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิต ไอโซน พลังงานหลักที่ทำให้ ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นส่งถ่ายมาจากการชนอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลก๊าซออกซิเจน

กระบวนการ ไอออไนเซชัน โดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่า ๆ หนึ่ง ไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง ถ้าพลังงานที่ถ่ายทอดไม่มากพอถึงพลังงานให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือ ไอออไนเซชัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้ โมเลกุลของก๊าซ ที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่า พลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีมวลได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานศักย์สู่มอเลกุลของก๊าซที่ถูกชนนั่นเอง กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนด อิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการ ไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

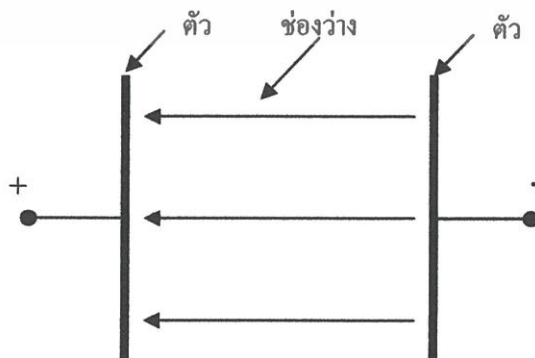
1. การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction) ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

2. การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับ โมเลกุลก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็น โอโซน (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 ถ้าระยะทางนั้นมีความยาวมากขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนยังมีพลังงานในการชนมากพอให้กับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่ถูกชนหลุดออกมานั้นจึงหมายความว่า แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการกลับขั้วศักย์สนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเดิมก่อนหน้านี้จะถูกวางตัวใหม่ในทิศทางตรงข้าม และเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกใหม่ อีกด้านหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วในการกลับขั้วในช่วงเวลาหนึ่งจึงเสมือนเป็นการเพิ่มระยะทางที่อิเล็กตรอนต้องเคลื่อนที่ออกไป โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะได้แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกันดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงเป็นการเพิ่มแรงดันภายนอกที่มากกระทำ



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ในกระบวนการสร้างก๊าซไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ พลังงานที่กระทำต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่าง โมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีที่จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียรจำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

2.3.7 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

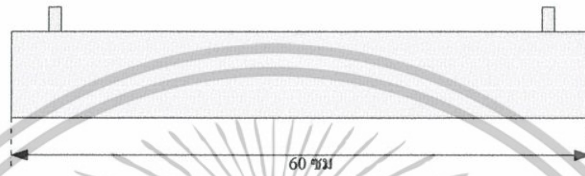
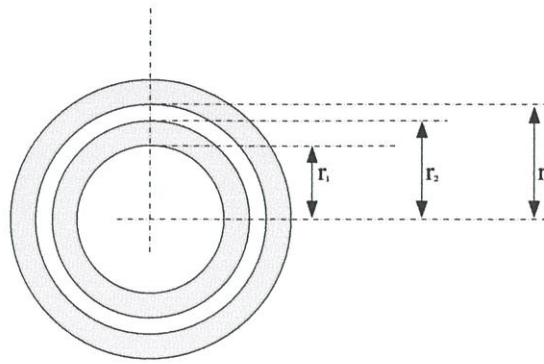
รูปทรงของอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังรูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่น่าวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ) ไม่เท่ากันซ้อนกัน จึงกลายเป็นการนำสาร ไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่อกันอยู่คือ C_1 และ C_2 โดยแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถหาได้จากสมการ (2.16) และ (2.17)

[10]

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_0\ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.16)$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2\epsilon_0\ell}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.17)$$

เมื่อ	C_1	=	ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น	(F)
	C_2	=	ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น	(F)
	ϵ_1	=	ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น	(F/m)
	ϵ_2	=	ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น	(F/m)
	ϵ_0	=	ค่าเปอร์มิตติวิตีของฟรีสเปซ	
	ℓ	=	ความยาวของชุดอิเล็กโทรดหน่วยเป็น	(m)
	r_1	=	รัศมีด้านในของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น	(m)
	r_2	=	รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น	(m)
	r_3	=	รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น	(m)



รูปที่ 2.8 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้น



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้น

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ในจำนวนแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.18) [11]

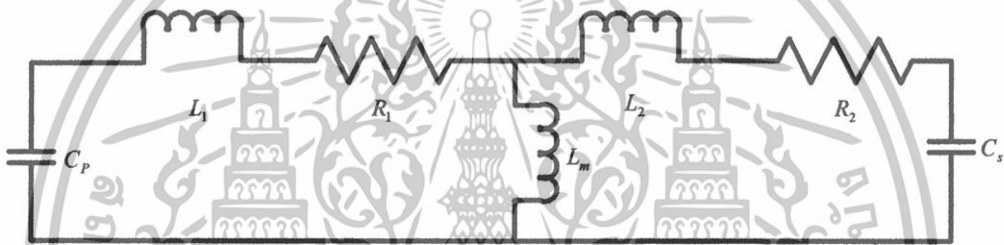
$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_{r_1} \times \epsilon_{r_2} \times V}{\epsilon_x \times r_x \times \left(\epsilon_{r_1} \times \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_{r_2} \times \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \tag{2.18}$$

- เมื่อ E_{r_x} = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ (kV/cm)
- V = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโตรด (kV)
- r_x = รัศมีที่จุดใด ๆ (cm)
- ϵ_x = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่จำนวนชั้นใด ๆ (F/m)

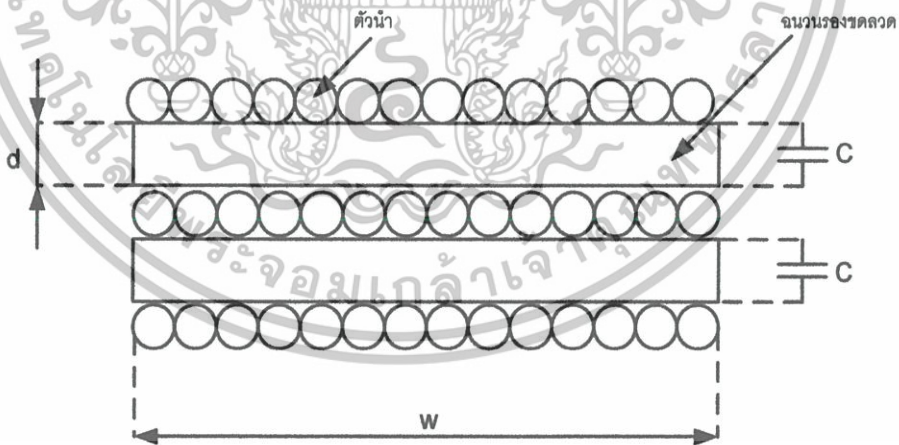
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

การส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่อิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 150 V และมีความถี่สวิตช์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แกนของหม้อแปลงที่ใช้ในงานความถี่สูง โดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 2.11 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด

โดยพื้นฐานของหม้อแปลงความถี่สูงจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปแต่แตกต่างกันตรงวัสดุที่ใช้ทำแกนและวงจรมูลที่มีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitance) ปรากฏขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทั้งด้านด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแสดงดังรูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุทั้งสอง (C_p และ C_s) เกิดจากการนำวัสดุฉนวนมารองระหว่างชั้นของขดลวดเพื่อป้องกันการลัดวงจร สักย์ไฟฟ้าที่ไม่

เท่ากันระหว่างชั้นทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น เมื่อนำวัสดุฉนวนมาวางกันจึงเสมือนมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมอยู่ระหว่างชั้น แสดงในรูปที่ 2.11 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) ของสูญญากาศ
 ϵ_r = ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน
 w = ความกว้างของชั้นขดลวด (m)
 d = ความหนาของวัสดุฉนวน (m)

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

$$N = \frac{V}{4 \times f \times B_m \times A_c} \quad (2.20)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวด
 V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)
 f = ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน (Hz)
 B_m = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ (T)
 A_c = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ (m²)

ในกรณีที่กำหนดพิกัดแรงดัน ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้แล้ว สามารถใช้สมการ (2.24) เพื่อคำนวณจำนวนรอบทางคานทุติยภูมิได้

$$N_s = N_p \times \frac{V_s}{V_p} \quad (2.21)$$

เมื่อ N_s = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

N_p = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_s = \text{แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ} \quad (\text{V})$$

$$V_p = \text{แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ} \quad (\text{V})$$

ค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ในตัวนำทองแดงที่ใช้ทำขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ คำนวณได้จากสมการ (2.22)

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

เมื่อ R = ค่าความต้านทานของขดลวด (H)

ρ_{cu} = ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานกระแสของวัสดุที่ใช้ทำขดลวด ($\Omega\text{-m}$)

l_{cu} = ความยาวของขดลวด (m)

A_{cu} = พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m²)

เมื่อได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงในส่วนของการคำนวณ เบอร์ลวดที่ใช้พัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพิภคกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านขดลวด (A/mm^2) โดยส่วนใหญ่กำหนดอยู่ที่ระหว่าง 3-5 A/mm^2 ในกรณีที่มีความถี่ใช้งานสูงการเลือกค่า A/mm^2 ต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ดี เพราะผลจากปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) จะทำให้พื้นที่การไหลของกระแสลดลงเนื่องจากกระแสจะมาไหลที่ผิวของตัวนำแทนหรือใช้วิธีแบ่งลวดออกเป็นเส้นเล็กๆ หลายเส้น โดยให้ผลรวมจำนวนพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเส้นเล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของลวดที่คำนวณได้

ขั้นตอนที่ 2 นำพิภคกระแสที่กำหนดคูณกับค่า A/mm^2 ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

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

2.4.1 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

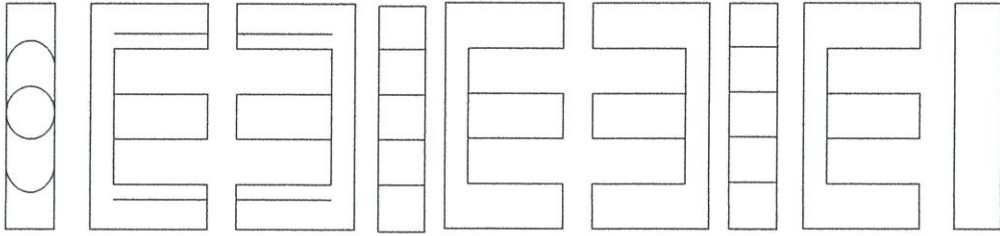
เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมากเฟอร์ไรต์มีค่าจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูงประมาณในช่วง 3,000 – 4,000 เกาส์ และเกิดความสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนหม้อแปลงสวิตชิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ที่มีขายทั่วไปมักมีขนาดและรูปร่างแบบเดียวกันกับตัวอย่างแกนแบบ EI, EE, ETD ในรูปที่ 2.12 โดยแต่ละแกนจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และขนาดที่แตกต่างกันไปให้

เลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน ซึ่งการเลือกใช้แกนนั้นหากเราเลือกใช้แกนที่มีขนาดใหญ่เกินไปก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นาเบ้ขอประยชน์ขึ้นด้านการค้า

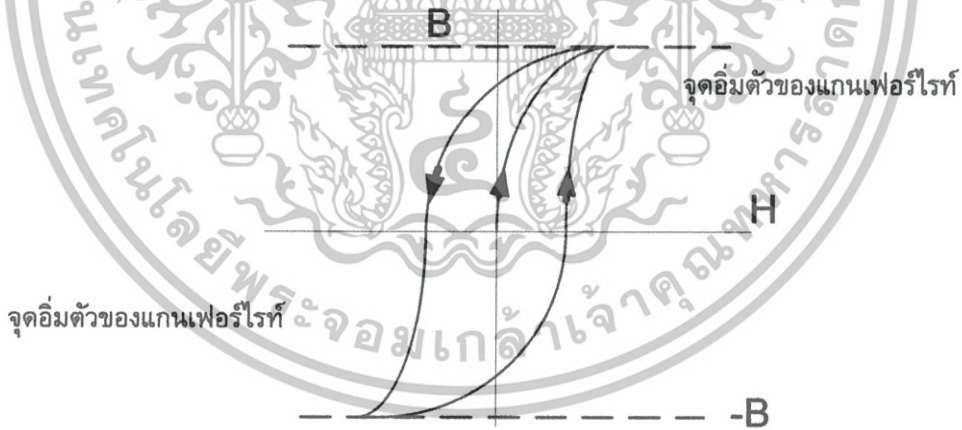
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ้นเปลือง หากเราเลือกขนาดแกนที่มีขนาดเล็กเกินไป ในขณะที่ทำงานจะเกิดความร้อนที่ขดลวด และแกน



รูปที่ 2.12 ลักษณะของแกนแบบ EI,EE,ETD

เส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Curve) เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกนจากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กก็ตาม จากจุดดังกล่าวจะเรียกว่าแกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation)

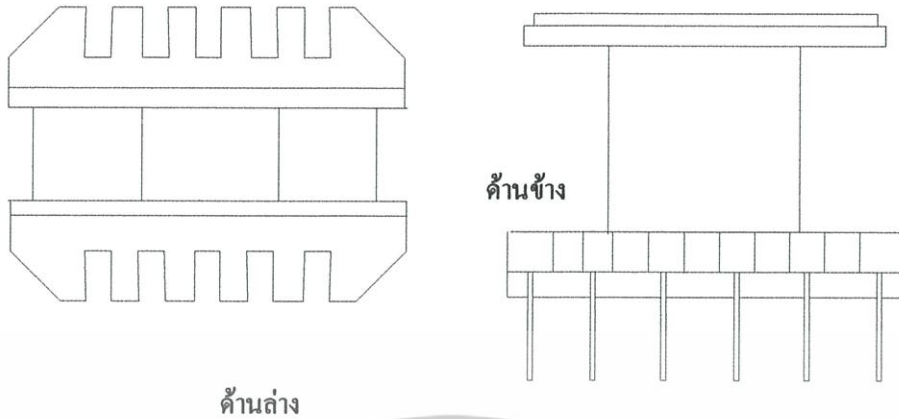


รูปที่ 2.13 ลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส ซึ่งจะมีลักษณะสมมาตรของกราฟ ซีกบนและซีกล่าง

2.4.2 บอบบี้น (Bobbin)

บอบบี้นหรือเบรรองพับปกติจะทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ บอบบี้นจะช่วยให้การพันขดลวดแบบแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้นและป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์ได้ บอบบี้นจะมีขนาดมาตรฐานตามขนาดของแกนเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะของบอบบิ้นแบบ EI Bobbin

2.4.3 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดทั้งขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ของหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งที่กำลังไม่สูงนัก ปกติ นำลวดอาบน้ำยาพันบนแกนบอบบิ้น เพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการขนาดของขดลวดทองแดง ที่ใช้พันนั้นขึ้นอยู่กับกระแสสูงสุดที่พันขดลวดความถี่และผลข้างเคียง

2.4.4 เทปฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นขดลวดในหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งและมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ส่วนวัสดุที่จะนำมาใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นพวค (Mylar) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyster) เทปฉนวนนี้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05 – 0.01 มิลลิเมตร

2.5 การออกแบบหม้อแปลงสวิตซ์ให้มีความปลอดภัย

หม้อแปลงสวิตซ์ จัดเป็นอุปกรณ์ที่ต้องออกแบบ ให้มีความปลอดภัยขณะใช้งานสูง เนื่องจากอาจเกิดความไม่ปลอดภัยจากหม้อแปลงได้ 2 ประการ คือ ความไม่ปลอดภัยจากการเกิดไฟไหม้ (fire hazard) และความไม่ปลอดภัยจากการถูกไฟฟ้าดูด (electrical shock)

2.5.1 การเลือกวัสดุเพื่อความปลอดภัยจากการเกิดไฟไหม้

หม้อแปลงสวิตซ์มีส่วนประกอบที่สามารถติดไฟได้ คือ เทปฉนวนและบอบบิ้น การเลือกใช้ควรได้มาตรฐานความปลอดภัยจากการเกิดไฟไหม้ จึงควรทำเป็นอันดับแรก

ก. เทปฉนวน

เทปฉนวนสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ตามวัสดุที่ใช้ที่อัตราอุณหภูมิขณะใช้งานของมัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 การเลือกใช้เทปฉนวนไม่ว่าเป็นกลุ่มใด จะต้องเลือกใช้ให้มีอัตราอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดทองแดงขณะหม้อแปลงทำงาน จะเห็นได้ว่า เทปฉนวนในกลุ่มที่มีอัตราอุณหภูมิใช้งานสูงสุดคือกลุ่ม H นั้น มีอัตราอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งานเพียง 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดของขดลวดในหม้อแปลงจึงไม่ควรเกิน 180 องศาเซลเซียส ในทางปฏิบัติเพื่อความปลอดภัย ควรกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของหม้อแปลงสวิตช์ไว้ไม่เกิน 85 องศาเซลเซียส ตามอัตราอุณหภูมิปกติ (typical ambient temperature) ของเทปฉนวน

ตารางที่ 2.6 การจัดกลุ่มของเทปฉนวนตามอัตราอุณหภูมิ (Thermal strength)

Class of insulation	Typical ambient Temperature in °C	Maximum operating Temperature in °C
O	40	90
A	40	105
B	75	130
F	75	155
H	85	180

ข. บอบบิ้น

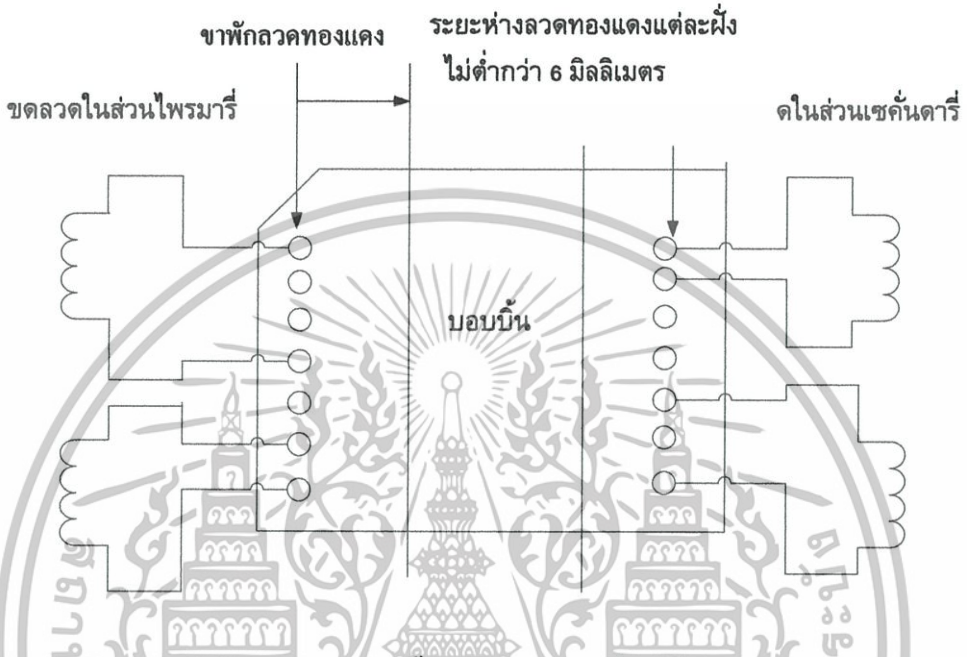
บอบบิ้นทำจากพลาสติกและสามารถติดถูกไฟได้เช่นเดียวกับกรณีของเทปฉนวนดังนั้น ตามมาตรฐานความปลอดภัยแล้ว เมื่อกพลาสติกที่นำมาฉนวนขึ้นรูปเป็นบอบบิ้น จึงต้องเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ บอบบิ้นมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงสวิตช์ควรทำจากวัสดุที่มีลักษณะการติดไฟอยู่ในกลุ่ม V-0, V-1 หรือ V-2 (มาตรฐาน IEC) โดยทั่วไปผู้ผลิตบอบบิ้นจะใช้วัสดุที่ผ่านมาตรฐานทดสอบของ UL (UL 94) เช่นวัสดุในกลุ่ม 94V-0, 94V-2 เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้ได้ดีเช่นเดียวกัน

2.5.2 การออกแบบเพื่อความปลอดภัยจากการถูกไฟฟ้าดูด

เนื่องจากหม้อแปลงสวิตช์นั้นจะต้องพันขดลวดไพรมารี และเซคันดารีบนแกนบอบบิ้นเดียวกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับระบบแรงดันไฟสลับ 220 โวลต์ ถ้าไม่มีการแยกส่วนจากกันทางไฟฟ้าระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารีแล้ว หากมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นที่ขดลวด ผู้ใช้อาจเกิดอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูดได้ ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยทางไฟฟ้า ดังนี้ คือ

ก. แยกส่วนระหว่างขดลวดไพรมารี เซคชั่นคาร์ทีชาของบอบบิ้น

โดยทั่วไปแล้วขาบอบบิ้น จะมีการเรียงขาพักขดลวดทองแดงบนตัวมันเช่นเดียวกับขาไอซี โดยแบ่งขาออกเป็นสองแนวสองแถวในการออกแบบหม้อแปลงสวิตชิงซึ่งควรแยกส่วนของขดไพรมารีและเซคชั่นคาร์ที ให้แยกกันอยู่คนละแถวโดยเฉพาะ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะการพันขดลวดบนบอบบิ้น ในลักษณะแยกฝั่งขดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่ขาพักลวดของบอบบิ้น

ข. ส่วนระหว่างขดไพรมารีและเซคชั่นคาร์ทีด้วยเทปฉนวน

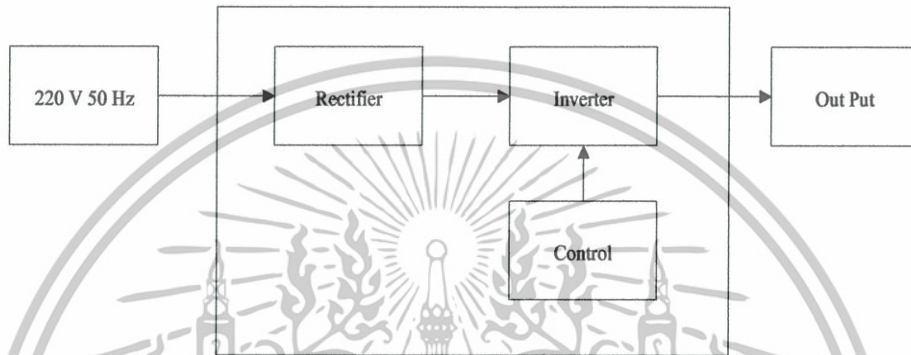
ให้แยกส่วนระหว่างขดไพรมารีและเซคชั่นคาร์ทีบนบอบบิ้นด้วยเทปฉนวน ความหนาของเทปฉนวนที่ใช้คั่นระหว่างขดต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.4 มิลลิเมตร (อาจทำได้โดยใช้เทปฉนวนที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตร พันทับ 4 รอบ หรือ 0.05 มิลลิเมตร พันทับ 8 รอบ ให้ได้ความหนา 0.4 มิลลิเมตร) เทปฉนวนต้องมีความกว้างเท่ากับขนาดความกว้างขดบอบบิ้นและการพันขดลวดที่เหลือ ระยะห่างจำเป็น (creepage) ระหว่างขดลวดและขอบของบอบบิ้นไม่ต่ำกว่า 4 มิลลิเมตรด้วย

ในกรณีการพันขดลวดแบบแยกพัน ต้องใช้เทปฉนวนพันคั่นระหว่างขดไพรมารีและเซคชั่นคาร์ทีทุกตำแหน่งที่มีการทับซ้อนกันและเพื่อเพิ่มความปลอดภัย ควรพันเทปฉนวนทับขดลวดชั้นบนสุดให้มีความหนาของเทปฉนวนไม่ต่ำกว่า 0.4 มิลลิเมตรเอาไว้ด้วย ถึงแม้ว่าขดลวดชั้นบนสุดจะเป็นขดเซคชั่นคาร์ทีก็ตาม

2.6 หลักการทำงานโครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังความถี่สูงและการควบคุม [21]

หลักการทำงาน โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังความถี่สูงและการควบคุม ที่ศึกษาและ ออกแบบจะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

1. ภาควงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันทางด้านอินพุท
2. ภาควงจรอินเวอร์เตอร์ (Invertor)
3. ภาควงจรควบคุม



รูปที่ 2.16 บล็อกโครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังความถี่สูงและการควบคุม

2.6.1 ภาควงจรเรียงกระแสและ วงจรกรองแรงดันทางด้านอินพุท (Rectifier)

ก. ไลน์ฟิลเตอร์ (Line Filter)

ไลน์ฟิลเตอร์ใช้ในการป้องกันการรบกวนของคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Interference- RFI) และการรบกวนของสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Interference) เพื่อเสถียรภาพในการทำงาน

ข. เรคตีไฟเออร์ (Rectifier)

เรคตีไฟเออร์ นับเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญที่สุดของวงจรในส่วนอินพุทของสวิตชิงเพาเวอร์ ซัพพลายและจะเป็นตัวกำหนดอัตราทอนกระแสพิวส์ เรคตีไฟเออร์ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ 3 ส่วน คือ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ C และไดโอด เรคตีไฟเออร์ $D_1 - D_4$ มีหน้าที่หลักคือ เปลี่ยนแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรงเพื่อจ่ายแรงดันอินพุทให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่วนตัวเก็บประจุฟิลเตอร์จะเป็นตัวกรองแรงดันไฟตรงที่ได้จากการเรียงกระแสของไดโอด $D_1 - D_4$ ให้มีค่าเรียบมากขึ้น และช่วยให้กระแสที่ได้มีค่าเพียงพอตามที่อินเวอร์เตอร์ต้องการ

การเลือกใช้ไดโอดเรคตีไฟอินพุท

- ทนกระแสกระชาก ขณะเปิดสวิตช์จ่ายไฟให้กับวงจร
- ทนกระแสสูงสุดชั่วขณะ ขณะชาร์จตัวเก็บประจุอีกครั้งหลังจากคายประจุให้โหลด (Load)
- ทนกระแสไบแอสตรง (Forward Bias) ควรมากกว่า 1.5 เท่าของกระแสปกติ

- ทนกระแสแรงดันไบแอสกลับ (Reverse Bias) สูงสุด เป็น 2 เท่าของแรงดันเอาต์พุต (Output Voltage)
- การเลือกตัวเก็บประจุฟิลเตอร์อินพุต
- อัตราทนกระแสกระแสเพื่อ
- แรงดันกระแสเพื่อ
- ขนาดและราคา
- ช่วงเวลาโฮลด์อัป (Hold Up) คือช่วงที่แหล่งจ่ายจะยังคงรักษาระดับแรงดันได้

ค. ตัวเก็บประจุกรองแรงดันทางด้านอินพุต

ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ C จะเป็นตัวกรองแรงดันที่ได้จากการเรียงกระแสของไดโอด $D_1 - D_4$ ให้มีค่าเรียบมากขึ้น และช่วยให้กระแสที่ได้มีค่าเพียงพอดำเนินที่วงจรอินเวอร์เตอร์ต้องการ ค่ากระแสขณะชาร์จประจุและคายประจุมากหรือน้อย ขึ้นกับค่าความจุของตัวเก็บประจุ C และภาระของโหลดที่เอาต์พุต โดยกระแสนี้จะเรียกว่า กระแสประสิทธิผล I_o ที่อินพุต ของวงจรเรกติไฟเออร์ที่จะหาได้จากสมการที่ 2.25

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in(rms)}} \quad (2.25)$$

โดย I_{in} คือ ค่าประสิทธิผลที่อินพุต (A)
 P_{in} คือ กำลังงานที่จ่ายให้อินพุต (W)
 $V_{in(rms)}$ คือ ค่าแรงดันที่อินพุต (V)

ง. การหาค่าของตัวเก็บประจุฟิลเตอร์

การกระแสเพื่อแรงดัน ที่แรงดันเอาต์พุตของเรกติไฟเออร์ จะมีผลโดยตรงต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ การกระแสเพื่อแรงดันที่แรงดันเอาต์พุตทำให้แรงดันที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าไม่คงที่ หากยอมให้แรงดันกระแสเพื่อที่เอาต์พุตของเรกติไฟเออร์มีค่ามาก ความสามารถในการคงค่าแรงดันของเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงไป และทำให้ช่วยแรงดันกระแสเพื่อไม่เกิน 10% ของค่าแรงดันเอาต์พุต ค่าของตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ C เพื่อให้ค่าแรงดันไม่เกินกำหนด อาจคำนวณได้จากสมการที่ 2.26

$$C = \frac{I_e \times \Delta t}{\Delta V_{ripple}} \quad (2.26)$$

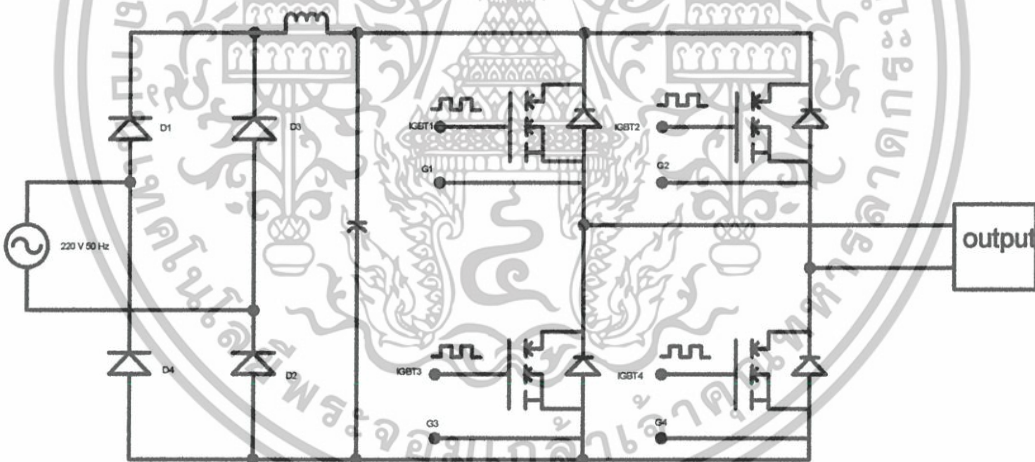
- เมื่อ I_e คือ ค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรกติไฟเออร์
 Δt คือ = ช่วงเวลาที่ C คายประจุ
 ΔV_{ripple} คือ ค่ายอดถึงยอดของแรงดันกระแสที่เอาท์พุทของเรกติไฟเออร์

2.6.2 ภาคอินเวอร์เตอร์ (Inverter) [21]

การแปลงผัน DC เป็น AC หรืออินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแรงดันเอาท์พุท AC ที่มีขนาดเล็กและความถี่ตามขนาดและความถี่ตามต้องการ นั่นคือ แรงเอาท์พุทอาจคงที่หรือแปรค่าได้ที่คงที่ หรือความถี่แปรค่าได้

ก. ลักษณะการทำงานของวงจร

ในงานวิจัยใช้อินเวอร์เตอร์ในการแปลงแรงดันกระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยอาศัยการสวิตซ์ซิงของไอจีบีทีหรือมอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ภาควงจรอินเวอร์เตอร์ที่รับแรงดันเอาท์พุท DC จากภาคเรกติไฟเออร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และมีหลักการทำงานดังนี้ ไอจีบีที 4 ตัว จะทำงานโดยการนำกระแสและหยุดนำกระแสกันเป็นคู่ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา Q_1 และ Q_4 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลา และเมื่อหยุดนำกระแสจะได้ Q_2 และ Q_3 นำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาที่เหลือ ซึ่งทำงานสลับกันอย่างนี้เรื่อยไป โดยแรงดันทางดักันไพรมารี (Primary) มีค่าเท่ากับ $V_{in} - 2V_{DS(SAT)}$ และแรงดันตกคร่อม Q_1 และ Q_4 ขณะหยุดนำกระแส

มีค่าเท่ากับ $V_{in} - 2V_{DS} Q_{2(SAT)}$ และ $V_{in} - 2V_{DS} Q_{3(SAT)}$ ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม Q_2 และ Q_4 ขณะหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับ $V_{in} - 2V_{DS} Q_{1(SAT)}$ และ $V_{in} - 2V_{DS} Q_{4(SAT)}$ ตามลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอดทำหน้าที่คอมมิวเตตติ้งไดโอด (Comutating Diode) ให้กับ วงจร

ป้องกันแรงดันสไปค์ขณะที่ไอจีบีทีหยุดนำกระแส เนื่องจากความเหนี่ยวนำแฝงในหม้อแปลงเทสลา โดยที่พลังงานแฝงนี้จะถูกถ่ายทอดไปยังภาคอินพุตด้วยคอมมิวเตตติ้งไดโอด จึงไม่ทำให้เกิดสไปค์เมื่อไอจีบีทีเริ่มหยุดนำกระแส

ในขณะที่ไอจีบีที Q_1 และ Q_4 หยุดนำกระแสชดลวดไพรมารีจะมีการกลับขั้วแรงดันเกิดขึ้น ถ้าไม่มีคอมมิวเตตติ้ง Q_2 และ Q_3 จะได้แรงดันคร่อมที่เป็นลบ ในขณะที่ Q_1 และ Q_4 ก็จะมีแรงดันตกคร่อมมากกว่าค่า V_{in} ในกรณีนี้ไดโอดจะอยู่ในลักษณะไบแอสตรงจากแรงดันของชดลวดไพรมารี และลดแรงดันนี้ลง ไปเพื่อป้องกัน ไอจีบีทีเกิดความเสียหายได้

เมื่อพิจารณาจากวงจรพบว่า Q_1 กับ Q_3 และ Q_2 กับ Q_4 จะนำกระแสพร้อมกันไม่ได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรของแรงดันอินพุตและไอจีบีทีอาจพังเสียหายได้

ถ้าไม่มีการจำกัดช่วงการนำกระแสเมื่อโหลดดึงกระแสมากขึ้น วงจรควบคุมจะสั่งให้ไอจีบีทีมีช่วงนำกระแสเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงนำกระแสของไอจีบีทีตัวที่เหลือมีค่าลดลง และเกิดการไม่สมมาตรของฟลักซ์เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์จะเข้าสู่จุดอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไอจีบีทีเสียหายได้

ถึงแม้ว่าจะกำหนดให้ควบคุมสั่งงานที่ครึ่งหนึ่งของคาบเวลาที่เท่ากันแล้วก็ตาม ไอจีบีทีก็ยังไม่ปลอดภัยเพียงพอ เพราะการตอบสนองของไอจีบีทีนั้นเป็นไปได้ช้า เนื่องจากการเกิดประจุสะสมขึ้นในไอจีบีทีขณะที่นำกระแสเมื่อหยุดจ่ายกระแสไบแอสให้กับไอจีบีทีที่เวลา $t=T/2$ ประจุสะสมจะทำให้ไอจีบีทีนำกระแสต่อไปได้อีกชั่วระยะเวลาหนึ่ง ก่อนที่กระแสจะลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่เดียวกัน ไอจีบีทีตัวที่เหลือเริ่มได้รับกระแสไบแอสที่เวลา $t=T/2$ เช่นเดียวกัน ทำให้ไอจีบีทีทั้ง 4 ตัว นำกระแสพร้อมกัน และเกิดการพังเสียหายอย่างรวดเร็ว

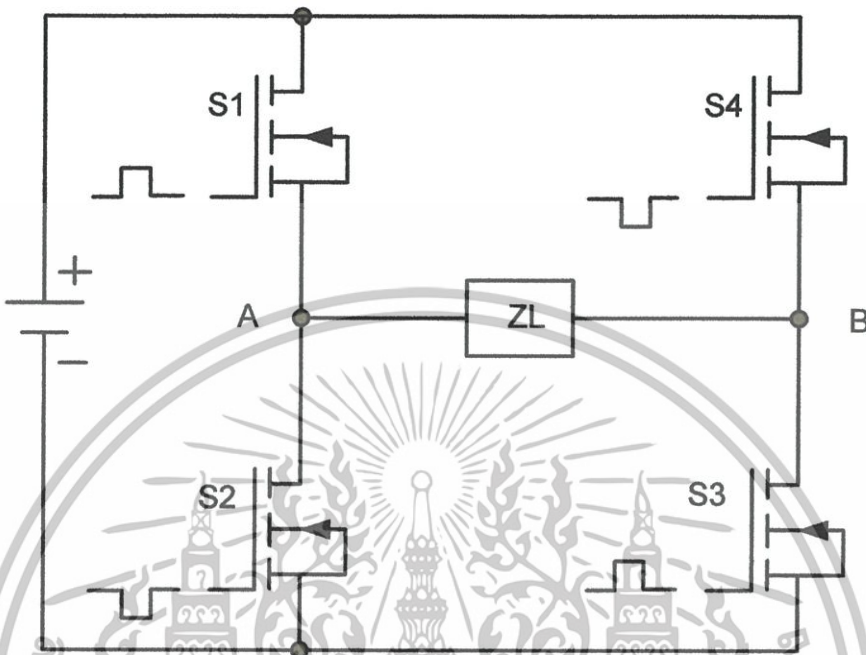
ดังนั้น การกำหนดเวลาเพื่อ t_d จึงมีความจำเป็น โดยปกติมักกำหนดค่าเวลาเพื่อไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของครึ่งคาบเวลา ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดของ ไอจีบีทีได้ไม่เกิน

$$T_{on(max)} = 0.4T \quad (2.27)$$

2.6.3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีคดับลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเป็นสวิตช์

พีคดับลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) เป็นรูปแบบหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์มีหลักการการทำงาน โดยอาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่โหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว คู่กันคือ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 วงจรของพีคดับลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

แสดงดังรูปที่ 2.18 การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่ $S_1 - S_3$ และ $S_2 - S_4$ ทำงานสลับกันคู่ละครั้งคาบเวลาการสวิตช์

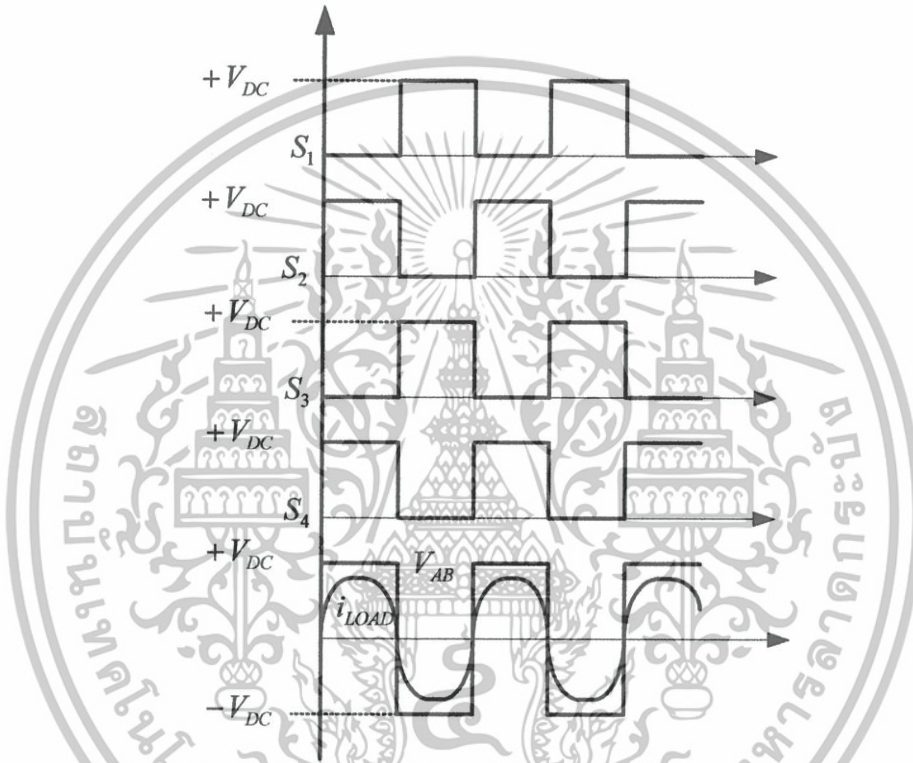


รูปที่ 2.18 วงจรพีคดับลิ้นเอ็มฟูแลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

เมื่อคู่อุปกรณ์สวิตช์ $S_1 - S_3$ ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปีควงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{DC} ตกคร่อมโหลด Z_L วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ $+V_{DC}$ จากนั้นที่ครึ่งคาบหลังคู่อุปกรณ์ $S_1 - S_3$ หยุดทำงานและ $S_2 - S_4$ ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปีควงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{DC} ตกคร่อมโหลด Z_L วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ $-V_{DC}$ การทำงานจะสลับกันไปตามคาบสัญญาณการสวิตช์แสดงในรูปที่ 2.19

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 2.19 ขณะที่ $S_1 - S_3$ turn on แรงดันตกคร่อมค่อย ๆ ลดลง กระแสที่ไหลผ่านเป็นลบ จากนั้นเมื่อแรงดันลดลงเป็นศูนย์กระแสจึงค่อยเพิ่มขึ้น ผลคูณของกระแสและแรงดันจึงเท่ากับศูนย์ การสวิตช์แบบนี้อุปกรณ์

สวิตช์ถูกบังคับให้ทำงานที่แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสที่ไหลผ่านจะถึงเรียกว่า Zero Voltage Switch (ZVS) ในขณะที่ $S_1 - S_3$ turn off กระแสเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่กับอุปกรณ์สวิตช์แทน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์แรงดันที่ตกคร่อมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ตัวเก็บประจุชาร์จ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์เป็นศูนย์ ผลลัพธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจึงเป็นศูนย์ การสวิตช์แบบนี้ อุปกรณ์สวิตช์ทำงานขณะกระแสที่ไหลผ่านเป็นศูนย์ก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นเรียกว่า Zero Current Switch (ZCS)



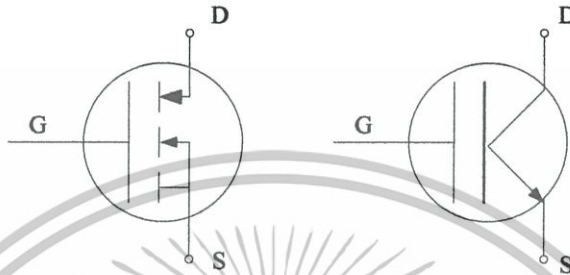
รูปที่ 2.19 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

2.7 ไอจีบีที (IGBT) และ มอสเฟต

อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในขณะนี้คือ เอสซีอาร์ (SCR), ไตรแอก (TRIAC), ทรานซิสเตอร์และมอสเฟต โดยเฉพาะทรานซิสเตอร์และมอสเฟต ที่จะเป็นจุดพัฒนาอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไปกล่าวคือ

ทรานซิสเตอร์กำลังขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานแต่มีอัตราทนแรงดันและขยายกระแสได้สูง แต่ความเร็วในการสวิตช์ทำงานยังต่ำอยู่ โดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแส ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ต่างกับเพาเวอร์มอสเฟต ที่มีความสามารถในการสวิตช์ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็วกว่ามาก แต่มีอัตราการสูญเสียกำลังสูงมากเช่นกัน

จากเหตุผลที่กล่าวมาของเพาเวอร์ทรานซิส และเพาเวอร์มอสเฟตจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้จนสามารถได้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพาเวอร์คอนโทรลชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติต่างๆ จะรวมเอาข้อได้เปรียบของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์และมอสเฟตเข้ามารวมไว้ในอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ โดยมีการตั้งชื่อหรือเรียกอย่างเป็นทางการว่า ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไอจีบีที

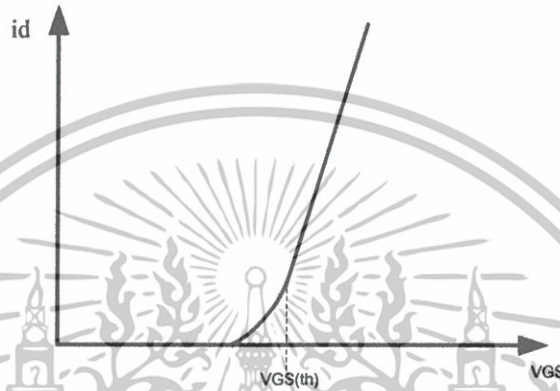
ไอจีบีที ก่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่อยู่ โดยเฉพาะในตลาดอิเล็กทรอนิกส์เมืองไทย ซึ่งก็พอจะมีใช้กันบ้าง และมีจำหน่ายกันหลายเบอร์ด้วยกันจากความเป็นอุปกรณ์หน้าใหม่ จึงมีสัญลักษณ์แทนชนิดและตัวไอจีบีที อยู่หลายเบอร์ด้วยกัน ขึ้นอยู่กับว่าผู้ผลิตจะใช้สัญลักษณ์ประจำสินค้าที่ผลิตขึ้น จากที่พบมากที่สุดก็มีใช้สองแบบ ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และชื่อเรียกขานต่างๆ ของไอจีบีทีเอ็นแซนเนล

จากรูปที่ 2.20 จะเห็นว่าลักษณะคล้ายกับสัญลักษณ์ของมอสเฟตมาก เพียงแต่สัญลักษณ์ของ ไอจีบีที นั้นจะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเกรนลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัวหรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัวไอจีบีทีส่วนสัญลักษณ์ในรูป 2.20 จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แต่ตรงขาเกต (หรือเบสของทรานซิสเตอร์) จะเพิ่มขีดขึ้นมาอีกหนึ่งขีด เพื่อชี้ให้เห็นว่าขีดที่เพิ่มขึ้นมานี้ไม่ได้ต่อถึงกันโดยตรงกับที่ต่อออกมาภายนอก

โครงสร้างของไอจีบีทีชนิดเอ็นแซนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวาง โครงสร้างโดยรวมส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของมอสเฟตมาจะแตกต่างกันตรงที่ไอจีบีที จะมีชั้น p^+ หรือชั้นอินเจกติ้ง (Injecting) ต่อยู่ระหว่างขาเกรน ซึ่งในมอสเฟตนั้นไม่มี จากการที่ขาเกตกันด้วยชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุทที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าในช่วง 10^9 โอห์ม

จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ ไอจีบีที มีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเกรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์สมากกว่า การควบคุมกระแสที่ขาเอ็นเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไอจีบีที แสดงไว้ดังรูป 2.21

รูปกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนมีค่าต่ำๆ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาคัดและขาซอร์สต่ำลงใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสถานะการทำงาน (จุด threshold voltage : $V_{GS(th)}$) แล้ว ไอจีบีทีจะอยู่ในสถานะหยุดนำกระแสหรือคัตออฟ ในกรณีของไอจีบีทีชนิดพีแชนเนล แต่โครงสร้างสัญลักษณ์จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนเนล เช่น ชนิดของสารที่ได้ไปจากเอ็นแชนเนลก็จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม สัญลักษณ์ลูกศรก็จะกลับเอาหัวลูกศรกลับไปในทางตรงกันข้าม)



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ ไอจีบีที

2.7.1 สถานะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สต่ำกว่าแรงดัน $V_{GS(th)}$ จะทำให้แรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี p เป็น n ได้ทำให้บริเวณ n⁻ ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ส n⁺ ไอจีบีที จึงอยู่ในสถานะนำกระแส ในสถานะนี้รอยต่อ J_2 ที่ได้รับแรงดันไบแอสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ขึ้นที่รอยต่อ J_2 ด้วย

บริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามาซึ่งบริเวณ n มากกว่าที่จะขยายไปยังบอดี p ทั้งนี้เพราะชั้นบอดี p มีความหนาแน่นในการโด๊ปสารมากกว่า ถ้าความหนาแน่นของสารที่โด๊ปในบริเวณลอยเลื่อน n⁻ มากเพียงพอ ก็จะทำให้การขยายของบริเวณปลอดพาหะสามารถแตะกับชั้นดินเจ็คติง p⁺ ได้ ชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ (buffer layer) ก็ไม่จำเป็นต้องโด๊ปสาร ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบแอสตรง สำหรับ ไอจีบีทีที่ไม่มีสารโด๊ปสารในชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ นี้จะเรียกว่า ไอจีบีทีแบบสมมาตร ซึ่งจะมีอัตราทนแรงดันย้อนกลับ (V_{RM} หรือ BV_{SDS}) สูงพอๆ กับค่าอัตราแรงดันไหลตรง (BV_{SDS}) เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การลดความหนาของบริเวณ n⁻ ลงแต่ยังคงสามารถของอัตราทนแรงดันไหลตรงไว้สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n⁺ เข้าไป ป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณ

อินเจ็คติ้ง p^+ ซึ่งจะเรียก ไอจีบีที ชนิดนี้ว่า ไอจีบีทีแบบไม่สมมาตรและจากการลดความหนาของบริเวณลอยเลื่อน n^- ลงจะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือ

ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงได้

แต่ข้อเสียของการเพิ่มขึ้นบีพีเฟอร์ n^+ ก็มี ก็จะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้น้อยลงเหลือเพียงไม่กี่สิบลโวลต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อ ไอจีบีทีได้รับแรงดันไปแอสกลับที่ขาแตรนรอยต่อ J_1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมาก จะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น ไอจีบีทีชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

2.7.2 เพาเวอร์มอสเฟต

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสอินพุตต่ำมากๆ ความเร็วในการสวิตช์สูง เวลาในการสวิตช์ซึ่งต่ำมากเป็นนาโนวินาที มอสเฟตกำลังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้าน CONVERTER ที่กำลังต่ำ ความถี่สูง ในส่วนวงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตนั้น สามารถทำได้ง่ายโดยอาจขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานได้จากไอซีควบคุม เช่น TL494 มอสเฟตไม่มีปัญหาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ Second Breakdown เหมือนกับทรานซิสเตอร์แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟตก็มีปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตย์และต้องการการเก็บ รักษาอย่างเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

เงื่อนไขของวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสที่แตกต่างจากการขับกระแสไบแอสใน โพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีเงื่อนไขการ ไบแอสที่แตกต่างกัน สำหรับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กระแสไหลผ่านคอลเล็กเตอร์ และอิมิตเตอร์ ได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไบแอสไหลผ่านที่เบสและอิมิตเตอร์ แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านแตรนและซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกตและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของมัน แต่ใช้กระแสต่ำ กับการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสจึงทำได้ง่าย และยุ่งยากน้อยกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้งานเพาเวอร์มอสเฟต สำหรับเพาเวอร์มอสเฟต การเกิดเซกชันคาร์เรียเรคควาน์ เช่น ในไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะไม่เกิดขึ้น เพราะค่าความต้านทานระหว่างแคโรนและซอร์ส ขณะนำกระแส RDS(on) ของมันจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลง ต่างจากกรณีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะเกิดเซกชันคาร์เรียเรคควาน์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กระแสจะไหลมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเกิดการพังเสียหายได้อย่างรวดเร็วเพาเวอร์มอสเฟตจึงมีพิภคความปลอดภัยในกราฟ SOA กว้างกว่าเมื่อเทียบกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ และเนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตไม่เกิดเซกชันคาร์เรียเรคควาน์ อัตราทนกำลังสูญเสียสูงสุดของมันจะถูกจำกัดด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อภายในตัวมันเท่านั้น กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ เช่นเดียวกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ คือกำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส แต่สำหรับเพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มากเพราะตามโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้นจึงไม่มีปัญหาในลักษณะเดียวกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตาม เพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะมันนำกระแสก่อนข้างสูงการสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักถูกใช้งานที่ความถี่สูง การใช้งานที่ความถี่สูงกว่า 50 กิโลเฮิร์ตซ์

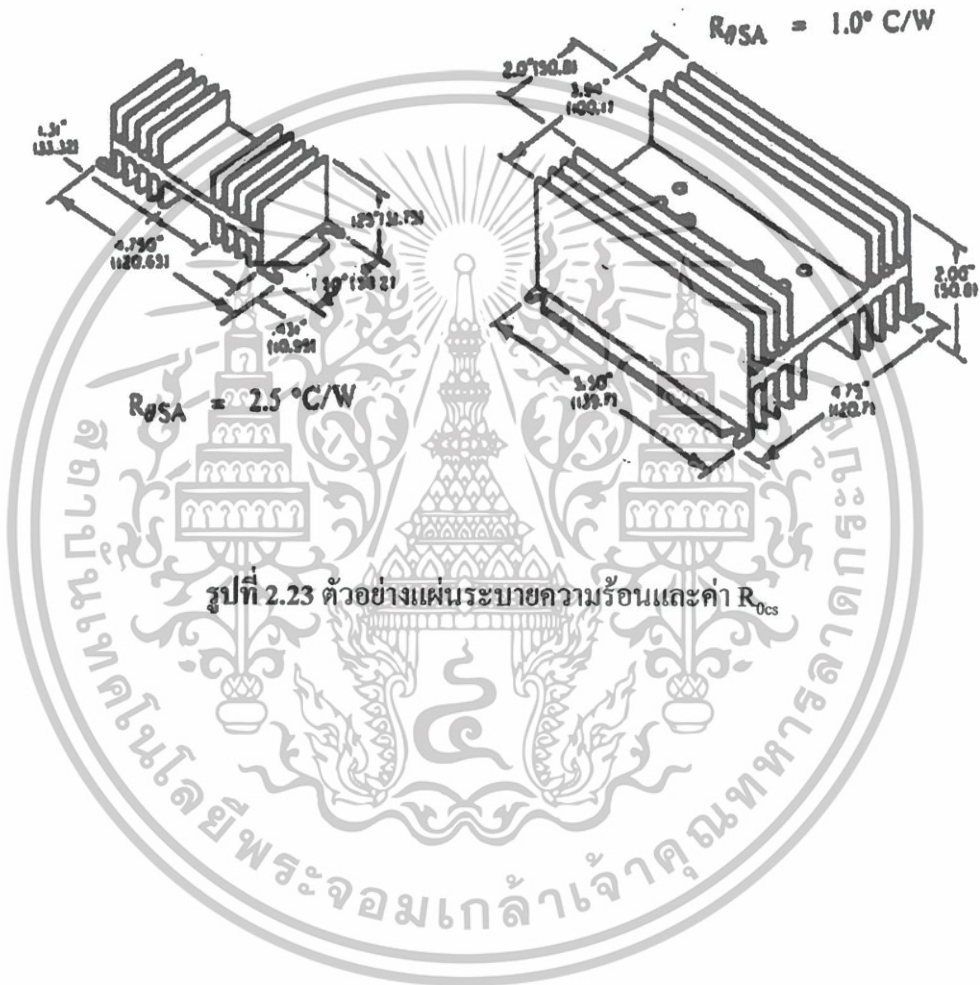
เมื่อขาแคโรนได้รับแรงดันไบแอสตรงคือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์ส และแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่เกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวมกันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ (body layer) ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n⁻ (drift region) เข้ากับบริเวณซอร์ส n⁺ (source region) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับการทำงานของมอสเฟต

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณลอยเลื่อน n⁻ จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะขั้วน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจกต์ดิง p⁺ เพราะรอยต่อ J₁ ได้รับแรงดันไบแอสตรง ทำให้โอจีบีที อยู่ในสภาวะนำกระแสการเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากแคโรนไปซอร์สได้ การรวมได้ของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n⁻ เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation)

ผลของการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n⁻ มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับทรานซิสเตอร์ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลง การสูญเสียกำลังงาน ขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางารไหลของอิเล็กตรอนและโฮล

การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (turn off time) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (turn on time) ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกัน จึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาดังกล่าวด้วย

ค่า $R_{\theta cs}$ สำหรับแผ่นระบายความร้อนแบบต่างๆ จะมีค่าแตกต่างกัน และมีกระบอกไว้ในสเปคของแผ่นระบายความร้อน โดยค่า $R_{\theta cs}$ จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแผ่นระบายความร้อน ค่า $R_{\theta cs}$ ของแผ่นระบายความร้อนแบบต่างๆ แสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 2.23



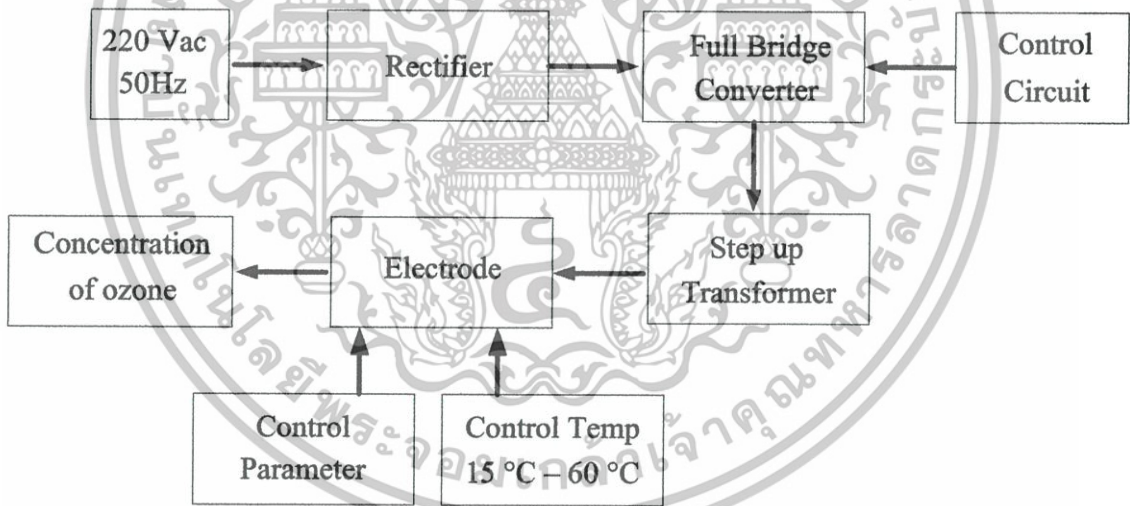
รูปที่ 2.23 ตัวอย่างแผ่นระบายความร้อนและค่า $R_{\theta cs}$

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลัก ๆ แล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโหมคเสียก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอนรวมจำนวน 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการออกแบบและวิจัยเครื่องผลิตก๊าซ โอโซน

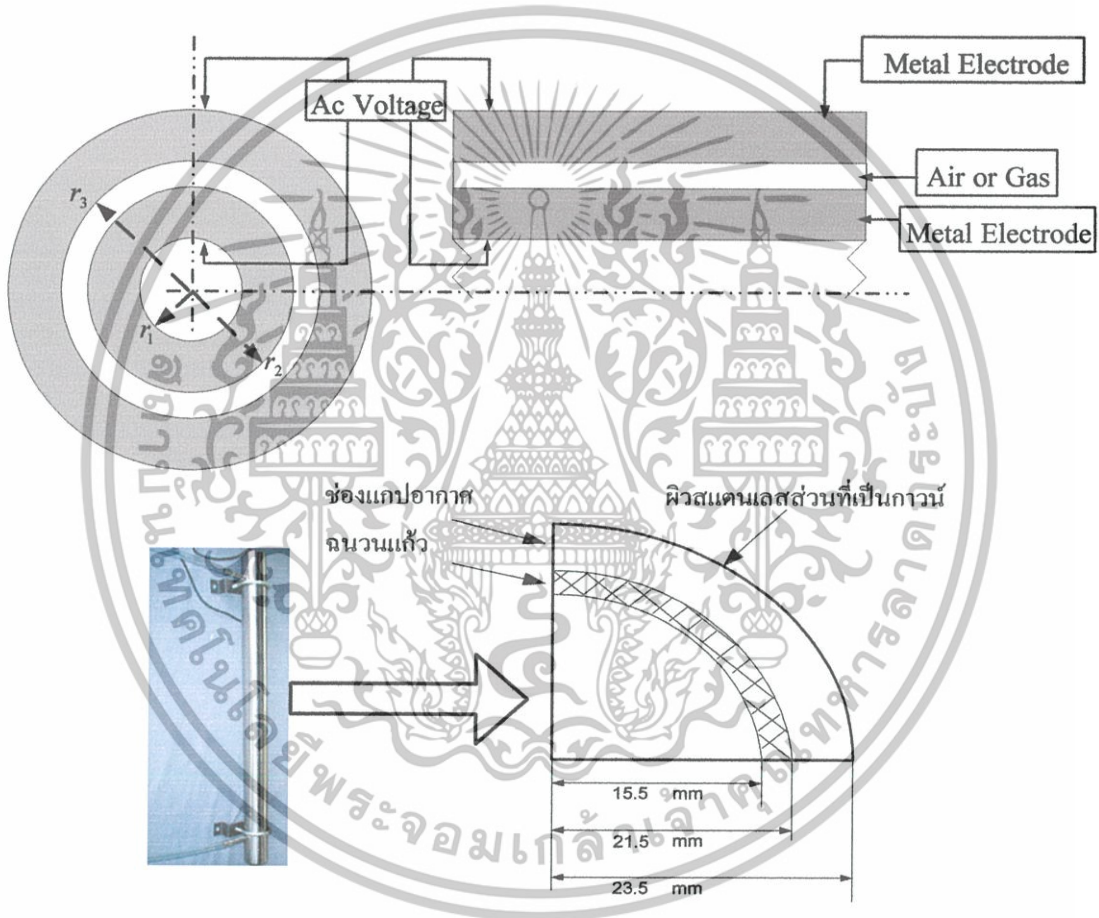
3.2 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน 2 ชั้น

ในการออกแบบแท่งอิเล็กโทรด ส่วนที่ต้องพิจารณาอันดับแรก คือความกว้างของรัศมีของอิเล็กโทรด ดังนั้นจะเลือกจากขนาดของหลอดแก้วก่อนเป็นหลักเพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดแก้วมีให้เลือกไม่มากนัก ซึ่งผู้ผลิตได้จัดทำตารางเพื่อสะดวกต่อการเลือกใช้งานไว้

เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงเลือกขนาดของท่อสเตนเลส ซึ่งผู้ผลิตได้จัดทำตารางขนาดท่อไว้แล้วเช่นกัน จึงจะสะดวกต่อการนำมาใช้งาน

ได้ว่าการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันเพื่อสร้างโคโรนาดังต่อไปนี้

- ใช้แกนของชุดสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงเป็นแผ่นอะลูมิเนียม
- ฉนวนไฟฟ้าเป็นแก้ว (Pirex)
- ทรงกระบอกนอกสุดใช้สเตนเลสซึ่งต่อลงกราวนด์



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

มีสมการค่าสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับแรงดันคือ

$$E = \frac{\epsilon_1 V}{r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/cm)
 V คือ แรงดันที่ป้อน (V)
 r_1 คือ รัศมีวงในของฉนวนแข็ง (m)
 r_2 คือ รัศมีวงนอกของฉนวนแข็ง (m)
 r_3 คือ รัศมีวงในแท่งอิเล็กโทรดส่วนที่เป็นกาว (m)
 ϵ_1 คือ ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของแก้ว
 ϵ_2 คือ ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของอากาศ

ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวนสองชั้นมีตัวแปรดังนี้
 โดย $r_1 = 0.0155$ m, $r_2 = 0.0215$ m, $r_3 = 0.0235$ m, $l = 0.6$ m
 ปริมาตรอากาศภายในแคบคือ

$$\begin{aligned}
 V &= \pi(r_3^2 - r_2^2) \times l \\
 &= \pi(0.0235^2 - 0.0215^2) \times 0.6 \\
 &= 169.646 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \\
 &= 169.646 \text{ cm}^3
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

- เมื่อ r_1 คือ รัศมีวงในของฉนวนแข็ง (m)
 r_2 คือ รัศมีวงนอกของฉนวนแข็ง (m)
 r_3 คือ รัศมีวงในแท่งอิเล็กโทรดส่วนที่เป็นกาว (m)
 l คือ ระยะความยาวแท่งอิเล็กโทรด (m)

ในงานวิจัยนี้ นำออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% มาเป็นก๊าซตั้งต้นเพื่อผลิตก๊าซ โอโซนตั้งนั้น
 ย่านพลังงานที่ทำให้ออกซิเจน 99.9% แยกตัวคือ $5.58 \text{ kW.h/m}^3 - 7.50 \text{ kW.h/m}^3$ ได้ว่า ช่วงย่านพลังงาน
 ที่ใช้ในการทำให้อากาศแตกตัวคือ

$$5.58 \times 10^3 \times 169.646 \times 10^{-6} = 0.947 \text{ W}_h$$

ถึง

$$7.50 \times 10^3 \times 169.646 \times 10^{-6} = 1.272 \text{ W}_h$$

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) ได้จากสมการพลังงานในสนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศ (3.2) ในกรณีที่สนามไฟฟ้าที่เวลานั้น สามารถวิเคราะห์ในสภาพสนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เนื่องจากในขณะที่ขนาดของแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่า ๆ หนึ่ง ก่อนถึงค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซได้ และไม่สามารถเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่และชนกับโมเลกุลก๊าซในช่องว่างอากาศให้แตกตัวได้ ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (W_i) ได้จึงเกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง เพราะฉะนั้นสามารถอินทิเกรตสมการ (3.3) ได้ดังนี้

$$W_i = \frac{1}{2} \int \epsilon_o \times \epsilon_r \times E^2 \times dVol \quad (3.3)$$

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

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

ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

$$E = \sqrt{\frac{2 \times W_i}{\epsilon_o \times \epsilon_r \times Vol}} \quad (3.4)$$

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 0.947}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 169.646}}$$

$$E_{\min} = 35.510 \text{ kV/cm}$$

ย่านพลังงานสูงสุด

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 1.272}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 169.646}}$$

$$E_{\max} = 41.155 \text{ kV/cm}$$

E_{\min} และ E_{\max} เป็นย่านสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศที่ทำให้เป็นก๊าซไอออนการใช้ทรงกระบอกแกนร่วมฉนวนสองชั้นจะมีสมการค่าสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับแรงดันดังนี้

เมื่อ

E = สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโอโซน 35.510 kV/cm

V = แรงดันที่ต้องใช้ทั้งสิ้น (V_{\min}, V_{\max})

ϵ_1 = ความคงทนสนามไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าชั้นที่ 1 คือฉนวนแก้วมีค่า $\epsilon_1 = 4.9$

หมายเหตุ ค่าความเป็นฉนวนของแก้วอยู่ในช่วง 4.9 - 9.3 [29]

ϵ_2 = ความคงทนสนามไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าชั้นที่ 2 คือฉนวนอากาศมีค่า $\epsilon_1 = 1$

$$E = \frac{\epsilon_1 V}{r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$V_{\min} = \frac{E}{\epsilon_1} \left[r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \right]$$

(3.5)

$$V_{\min} = \frac{35,510 \times 1 \times 1.55 \times \left(4.9 \times \ln \frac{2.35}{2.15} + 1 \times \ln \frac{2.15}{1.55} \right)}{4.9}$$

$$= 8.571 \text{ kV}$$

เมื่อ

E = สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโอโซน 41.155 kV/cm

$$E = \frac{\epsilon_1 V}{r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$V_{\min} = \frac{E}{\epsilon_1} \left[r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \right]$$

$$V_{\max} = \frac{41,155 \times 1 \times 1.55 \times \left(4.9 \times \ln \frac{2.35}{2.15} + 1 \times \ln \frac{2.15}{1.55} \right)}{4.9}$$

$$= 9.934 \text{ kV}$$

ในงานวิจัยนี้จากการคำนวณแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 9.934 kVp ในงานวิจัยนี้มุ่งประเด็นไปที่การผลิตก๊าซไอโซนให้ได้สูงสุด จึงได้มีการทดสอบเกี่ยวกับการเลือกใช้แรงดันที่จ่ายให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดความเครียดสูงสุดที่ไม่ส่งผลให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวน และจากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยป้อนแรงดัน 220 V ความถี่ 25 kHz ออกซิเจน 10 ลิตรต่อนาที พบว่าแรงดันด้านนอกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ผลิตก๊าซไอโซนได้สูงสุดคือ 10 kVp ซึ่งไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อฉนวน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปรับแรงดันให้คงที่ 10 kV เป็นแรงดันที่ใช้ทดสอบงานวิจัย

ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กโทรดจากสมการ (3.6) และ (3.7) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.6)$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (3.7)$$

ที่ความยาวแท่งอิเล็กโทรด 60 ซม.

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times 4.9 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.6}{\ln \frac{0.0215}{0.0155}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_1 = 49.98 \text{ nF}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.6}{\ln \frac{0.0235}{0.0215}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_2 = 37.53 \text{ nF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบชุดสวิตซ์ซึ่งฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

เริ่มต้นการออกแบบโดยพิจารณาส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสสลับ 220V 50 Hz ให้เป็นกระแสตรงได้ว่า กำหนดการออกแบบพิกัดกำลังไฟฟ้าให้เป็น 2 เท่า ของพิกัดจริง 300 W ให้เป็น 600 W

$$P_{in} = \frac{600}{0.8} = 750 \text{ W}$$

โดยกำหนดให้ $V_{in(AC)}$ ประมาณ 220 V

$$V_{in(dc)} = 220 \times \sqrt{2}$$

พิจารณากระแสที่ไหลผ่าน Device แต่ละตัวขณะนำกระแส

$$I_p = \frac{P_{out}}{\eta \sigma_{i(max)} V_{in}} \quad (3.8)$$

เมื่อ

I_p = กระแสที่ไหลผ่าน Device แต่ละตัว

$\sigma_{i(max)}$ = ค่าตัวชี้ไขถึรวมของ Device แต่ละตัว

η = ประสิทธิภาพของ Inverter

กำหนดประสิทธิภาพ 80 % และค่า $\sigma_{i(max)} = 0.8$ ดังนั้น

$$I_p = \frac{600}{0.8 \times 0.8 \times 310}$$

$$= 3.024 \text{ A}$$

หาค่าตัวเก็บประจุโดยใช้สมการ

$$C = \frac{I_p \times \Delta t}{\Delta V} \quad (3.9)$$

$$\Delta V = 0.1 \times 310 = 31 \text{ V}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \times 10^{-3} \text{ s}$$

คำนวณจาก ΔT คือ 20 ms

หาค่า C จากสมการ 3.6 โดยคิดที่ $\Delta T/2 = 10 \text{ ms}$

$$C = \frac{3.024 \times 0.01}{31} = 975.48 \text{ } \mu\text{F}$$

เลือกตัวเก็บประจุที่ใช้ขนาด 1000 μF 600 V_{dc}

อุปกรณ์สวิทช์ 4 ตัวในวงจรกำลังพลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ มอสเฟส เบอร์ IREP460 มีพิกัดทนแรงดันได้สูงสุดคือ 500 V และทนกระแสได้ 20 A เนื่องจากแรงดันดีซีลิงค์จากแหล่งจ่ายมีขนาด 310 V จึงต้องใช้อุปกรณ์สวิทช์ทนแรงดันได้สูง มอสเฟสเบอร์นี้มีแอนตี้พาราเลลไดโอด เพื่อคืนพลังงานในช่วงเวลาฟรีวีวป้องกันกาเสียหายให้กับมอสเฟส จึงไม่จำเป็นต้องต่อฟรีวิลลิงไดโอดภายนอกเพิ่มเติม ที่ขาแคทโอดและขาซอสของมอสเฟสต่อตัวเก็บประจุคร่อมไว้เพื่อให้เกิดการชอร์ฟสวิทช์ขณะ turn off

หลักการเกิดชอร์ฟสวิทช์ขณะ turn off ของมอสเฟสคือการทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟสยังคงเป็นศูนย์ในขณะที่กระแสไหลลัดที่ไหลผ่านมอสเฟสลดลงเป็นศูนย์ โดยใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสจากมอสเฟสไหลผ่าน C ในขณะที่มอสเฟสกำลัง turn off ค่าความต้านทานภายในมอสเฟสเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะนี้เสมือนเปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อม C จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด

แต่จะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นจากการที่ถูกรับประจุโดยกระแสไหลดที่เคบไหลผ่านมอสเฟสและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟสเริ่มลดลงเพราะมีทิศทางกระแสเปลี่ยนไปที่ C แรงดันที่ตกคร่อม C เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟส ดังนั้นผลคูณกระแสกับแรงดันที่มอสเฟสซึ่งเป็นกำลังสูญเสีย (P_{loss}) จึงลดลงแสดงในรูปที่ 3.10 สมการในคำนวณหาค่า C ใช้สมการ (3.4)

$$C_s = \frac{I_{load} \times t_{if}}{2 \times V_{dc}} \quad (3.10)$$

เมื่อ C_s = ค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดซอร์ฟสวิทช์ (F)
 I_{load} = กระแสไหลดที่ไหลผ่านมอสเฟส (A)
 t_{if} = ช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์ (s)
 V_{dc} = แรงดันดีซี-ลิง

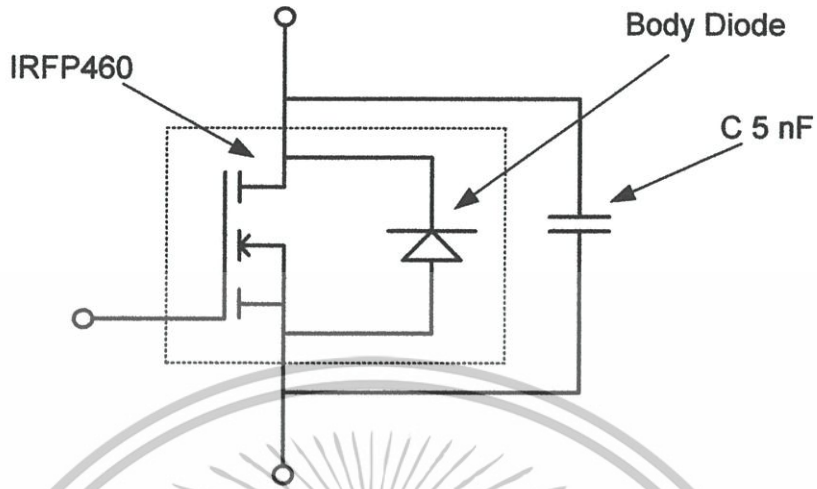
กำหนดช่วงเวลา (t_{if}) เพื่อใช้ในการคำนวณค่า C_s โดยดูจากช่วงเวลาเคทโทม (t_{DT}) ของมอสเฟสที่ความถี่ใช้งานสูงสุดคือ 25 kHz คาบเวลาใน 1 ลูกคลื่นเท่ากับ 10 s กำหนดเคทโทมเท่ากับ 5% ของลูกคลื่น เพราะฉะนั้น t_{if} เท่ากับ คาบเวลา 1 ลูกคลื่นคูณกับช่วงเวลาเคทโทม ได้ 0.5 us กระแสไหลด (I_{load}) จากหัวข้อที่ผ่านมาเท่ากับ 3.024 A แรงดันดีซี-ลิงเท่ากับ 310 V แทนค่าในสมการได้

$$C_s = \frac{3.024 \times 0.5 \times 10^{-6}}{2 \times 310}$$

เพราะฉะนั้น

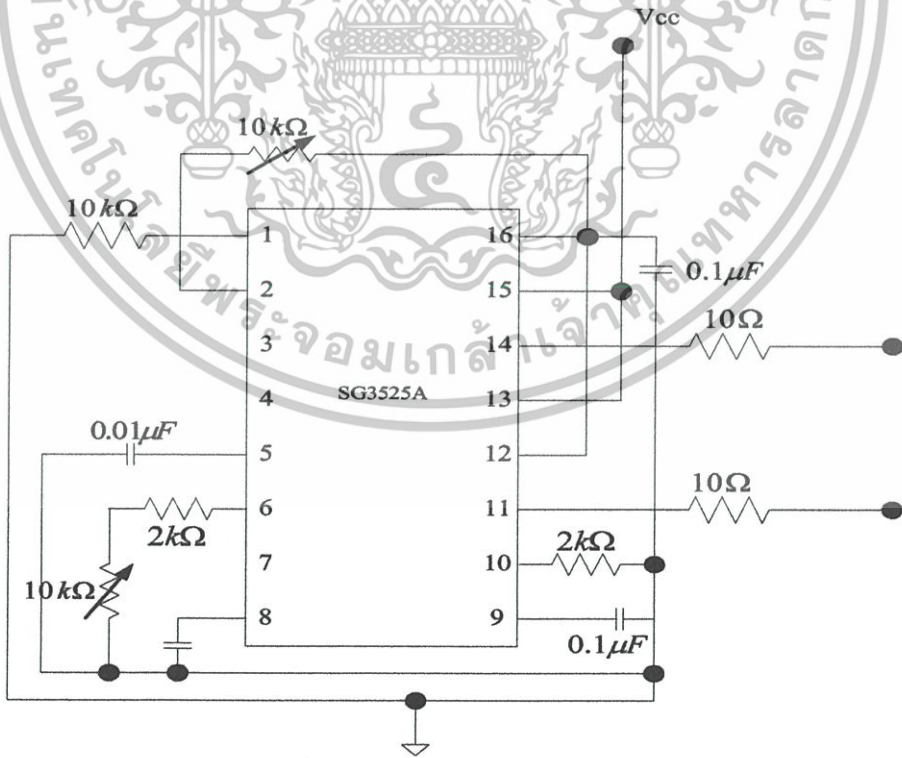
$$C_s = 2.44 \text{ nF}$$

ดังนั้นเลือกใช้ C_s เท่ากับ 2.44 nF แต่กรณีนี้เลือกใช้ 5 nF



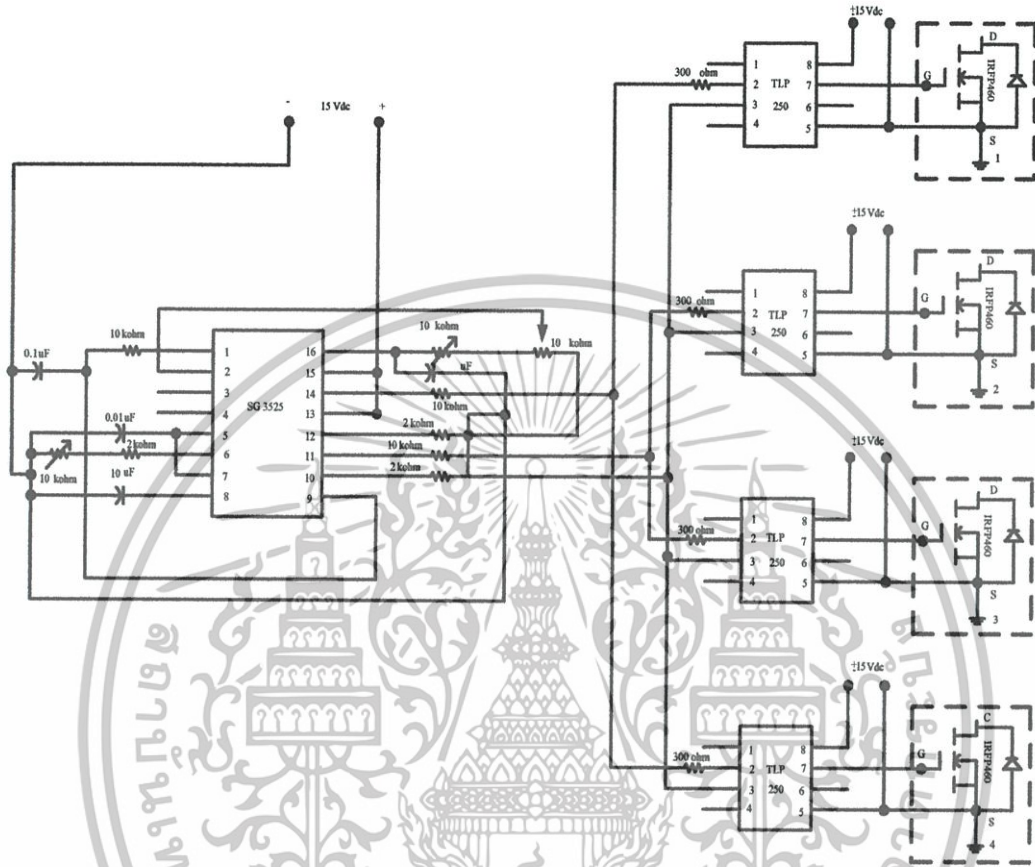
รูปที่ 3.3 มอสเฟสเบอร์ IRFP460 ต่อกรวมด้วยตัวเก็บประจุค่า 5 nF

ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุตัวเดียวต่อกรวมมอสเฟสดีกว่าการต่อแบบ RCD Snubber คือ ไม่มีกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานและไดโอดสับเบอร์ ประหยัดอุปกรณ์ โดยที่หลักการทำงานยังเหมือนกับ RCD Snubber



รูปที่ 3.4 วงจรสร้างสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรสร้างสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

ในงานวิจัยนี้ออกแบบกำลังงานของหม้อแปลงไว้ที่ 600 VA เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80 ซึ่งเป็นแกนแบบ EE ที่มีขนาดใหญ่ในท้องตลาดและจ่ายกำลังได้สูงสุด 2 kW โดยโครงสร้างคือการนำแกนเฟอร์ไรท์รูปร่างเหมือนตัว E สองตัวมาประกบกัน ลักษณะของแกนแสดงในรูปที่ 3.3 มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดแกน $A_c = 4.0 \times 10^{-4}$, $B_{max} = 0.48$ T, ความยาวทางเดินแม่เหล็กของแกน (l_c) 0.192 m ปริมาตรแกน $V_c = 69.8 \times 10^3$ mm³ และความยาวรอบด้านทั้ง (l_w) 4 ของแกน 0.08 m พื้นที่ช่องว่างของขั้วบิ้น 800 mm² แต่เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงานดังนั้นสิ่งที่พิจารณาคือกระแสโหลดและพื้นที่หน้าตัดการนำกระแสของขดลวดตัวนำ

กำหนดพิกัดของหม้อแปลงดังนี้ แรงดันทางด้านปฐมภูมิ $V_p = 310$ V แรงดันทางด้านทุติยภูมิ $V_s = 15$ kV, ความถี่ใช้งาน 25 kHz และกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 5 A

$$N_p = \frac{V_m \times 10^4}{K_f B_m f A_c} \quad (3.11)$$

เมื่อ

N_p = จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$V_m = 310$ V

$f = 25$ kHz

$B_m = 0.48$ T

$A_c = 4$ cm²

$K_f = 4$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.11

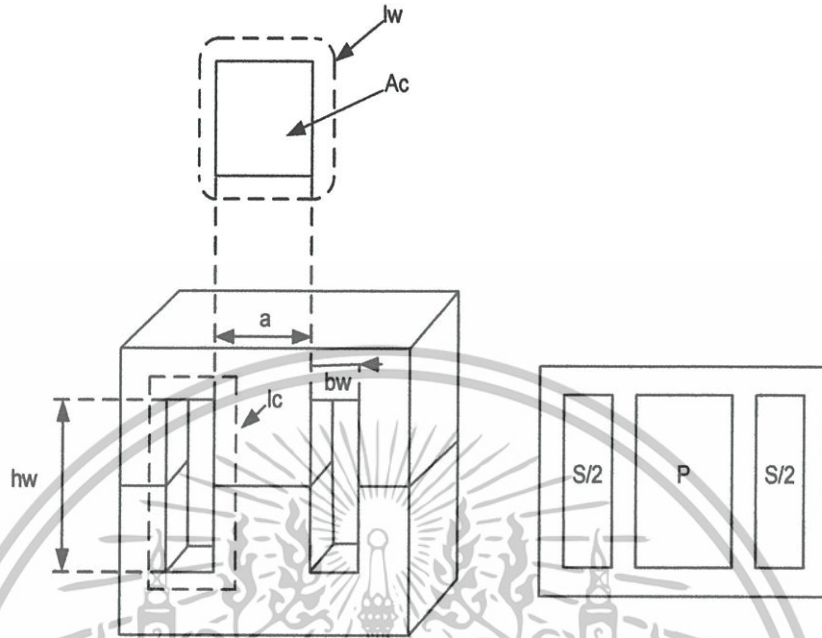
คำนวณหาจำนวนรอบปฐมภูมิจากสมการ (3.11) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$N_p = \frac{310 \times 10^4}{4 \times 0.48 \times 25000 \times 4.0}$$

เพราะฉะนั้น

$$N_p = 16 \text{ รอบ}$$

คำนวณหาจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิจากสมการ (3.12) โดยแทนค่าได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80

$$N_s = \frac{N_p \times E_s}{E_p} \tag{3.12}$$

เมื่อ

- N_s = จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ
- $E_s \approx V_s$ = แรงดันทางด้านทุติยภูมิ
- $E_p \approx V_{in}$ = แรงดันทางด้านปฐมภูมิ

$$N_s = 16 \times \frac{10000}{310}$$

$$= 516 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิประมาณ 516 รอบ

หาค่ากระแสทางปฐมภูมิ

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{P_{out}}{V_p \eta} \\
 &= \frac{600}{0.7 \times 310} \\
 &= 2.765 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

การออกแบบกำหนดให้เพิ่มกระแสเป็น 2 เท่า

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 I_p &= 2.765 \times 2 = 5.530 \text{ A} \\
 J &= K_f A_f^{(y)} \quad \text{A/cm}^2 \\
 &= 366(58.016)^{(-0.12)} = 224.831 \text{ A/cm}^2 \\
 \text{จำนวนหาขนาดเส้นลวด} \\
 A_w(p) &= \frac{I_p \times 0.707}{J} = \frac{5.530 \times 0.707}{224.831} = 0.017 \text{ cm}^2 \\
 \text{เปิดตารางหาเบอร์เส้นลวด} \\
 \text{ได้ลวด S.W.G.เบอร์ 15 มี Diameter} &= 0.153 \text{ cm}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

หาค่ากระแสทางทุติยภูมิ

$$\begin{aligned}
 I_s &= \frac{V_p \times I_p}{V_s} \\
 &= \frac{310 \times 5.530}{10 \times 10^3} \\
 &= 0.171 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

$$Aw(p) = \frac{0.171 \times 0.707}{J} = \frac{0.171 \times 0.707}{224.831} = 0.000539 \quad \text{cm}^2$$

เปิดตารางหาเบอร์เส้นลวดได้ลวดเบอร์ 31

หาค่า Skin depth

$$\text{Skin depth} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (3.16)$$

ขนาดขดลวดด้านปฐมภูมิ

∴ เลือกใช้ลวด S.W.G. เบอร์ 31 ตีเกลียว 6 เส้น ด้านปฐมภูมิ

ขนาดขดลวดด้านทุติยภูมิ

∴ เลือกใช้ลวดเบอร์ 31 จำนวน 1 เส้น ไม่ต้องตีเกลียวด้านทุติยภูมิ

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการสร้างเครื่องผลิต ไอโซน จากนั้นนำติดตั้งลงบนแผ่นอลูมิเนียมที่มีฐานสามารถปรับมุมมององศาได้ตามต้องการ ฐานที่ใช้ในการทดลองนี้ปรับไว้ที่ 45 องศา และติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิไว้กับแกนแนวตั้งที่สามารถปรับมุมมององศาได้เช่นกัน โดยเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดเป็นแบบเลเซอร์ความละเอียด 0.1 °C ส่วนกระบวนการควบคุมอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดตั้งแต่ 15 - 60 °C ทำได้โดยวิธีดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดการควบคุมอุณหภูมิโดยกระบวนการต่างๆ

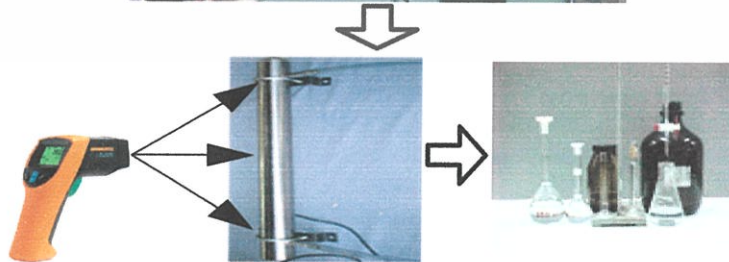
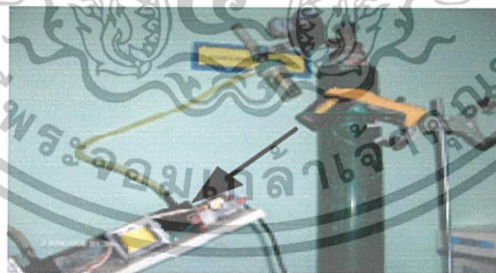
ลำดับที่	รายละเอียด	ช่วงองศาที่ควบคุม °C
1	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิต่ำวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านนอกและใช้เครื่องทำความเย็นช่วยระบายความร้อนด้านใน	15 – 20 °C
2	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมจากเครื่องทำความเย็นวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านในและด้านนอก	21 – 30 °C
3	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิต่ำวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านนอก	31 – 35 °C
4	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิห้องวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านในและใช้น้ำอุณหภูมิห้อง วิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านนอก	36 – 55 °C
5	ที่เวลาเดียวกันทำการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านนอกและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กโตรดด้านใน	56 – 60 °C

4.2 การเก็บผลอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิได้แล้ว ก็เข้าสู่กระบวนการเก็บผลปริมาณไอโซนโดยวัดปริมาณไอโซนด้วยวิธีการไตรเตรด โดยที่ทุกครั้งที่เก็บผลการทดลองจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยทิ้งระยะเวลาผ่านไป 5 นาที ทำการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 จุด เพื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตามรูปที่ 4.1 โดยที่ตำแหน่งแต่ละจุดที่ทำการยิงเลเซอร์ได้ระบุไว้ชัดเจนด้วยวิธีการแต้มเป็นจุดสีดำ เพื่อตอบสนองการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆด้วยเลเซอร์ และได้ประโยชน์ในการลดความผิดพลาดในการวัดที่อาจเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน



รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งทั้งหมด 5 จุด ที่ทำการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.2 ภาพรวมตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ และการวัดปริมาณ ไอโซน

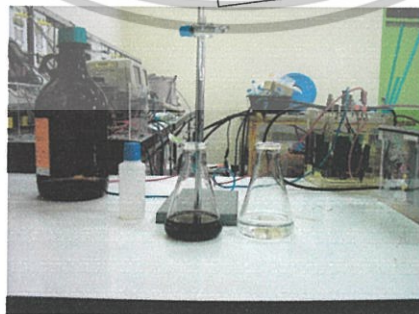
4.3 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดลองทางเคมี

จากการทดสอบทางไฟฟ้าที่ผ่านมาแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อผลิตก๊าซไอโซนจะกำหนดให้มีค่าคงที่เพื่อทำให้ค่าสนามไฟฟ้า (E) มีค่าคงที่ โดยที่แรงดันอินพุตและความถี่คงที่ ดังนั้นการเก็บผลอัตราการเกิดก๊าซไอโซนจะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศจากนั้นนำค่าอัตราการไหลของอากาศมาคำนวณหาค่าเวลาของอากาศที่ไหลผ่านแก๊ปอากาศปล่อยให้เครื่องผลิตก๊าซไอโซนทำงานผ่านไป 10 นาทีจากนั้นจึงวัดผลการเกิดก๊าซไอโซนโดยวิธีการทางเคมีที่เรียกว่า การไตเตรท (Titrate) การวัดผลไอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลจำนวนหยดของสารเคมี $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ KI ที่ผ่านกระบวนการแพร่กระจายของก๊าซไอโซนจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1) เพื่อหาค่าอัตราการเกิดไอโซนที่เกิดขึ้น

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

เมื่อ

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ คือ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
 $mg\text{O}_3$ คือ อัตราการเกิดก๊าซไอโซน

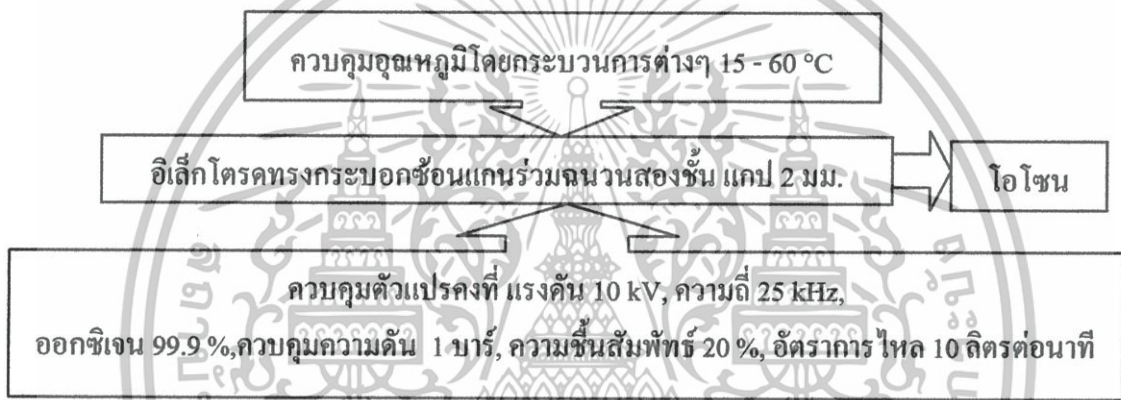


รูปที่ 4.3 ภาพรวมการเตรียมสารเคมีสำหรับกระบวนการไตเตรตปริมาณไอโซน

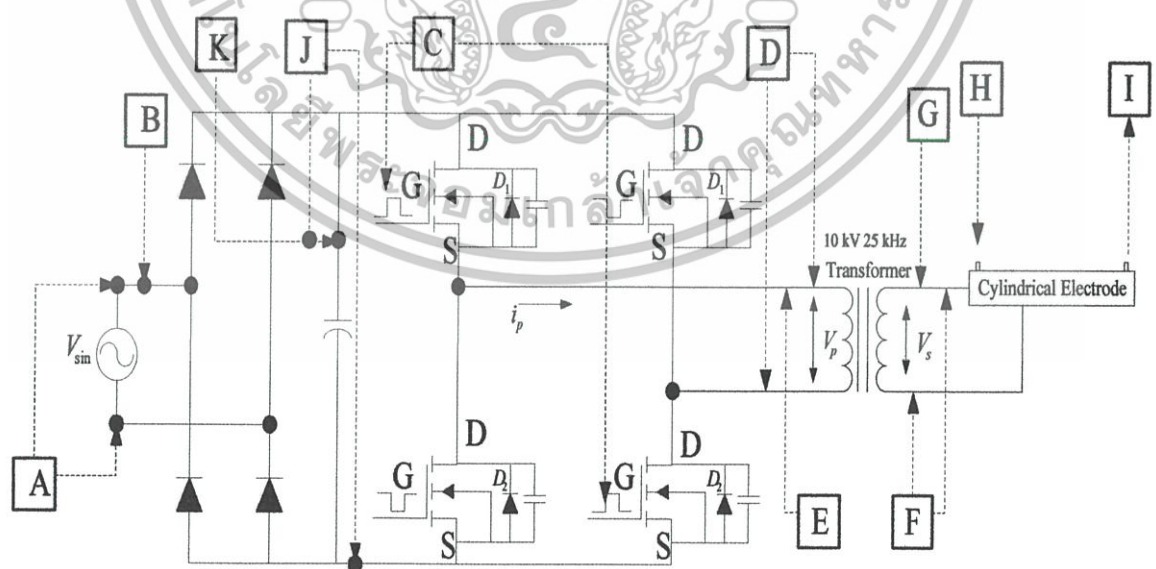
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

ผลการทดลองทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน โดยจะจ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 V ความถี่ 25 kHz แรงดันด้านเอาต์พุต 10 kVp คงที่ ทำการควบคุมค่าตัวแปรอื่นๆ ให้คงที่ตามรูปที่ 4.2 ทำการเก็บผลของซึ่งวงจรแสดงในรูปที่ 4.3 กระแสและแรงดันทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์และเก็บผลของแรงดันและกระแสที่โหลดเพื่อดูปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแส เมื่อทำการปรับองค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้น ค่าแรงดันที่โหลดจะใช้ C-Divider เป็นตัววัดเนื่องจากแรงดันด้านโหลดจะมีค่าสูงโดยเรโซจะอยู่ที่ 1:100 จากนั้นทำการจำลองการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.4 บล็อกโคะแกรมแสดงการควบคุมองค์ประกอบตัวแปรต่างๆ



รูปที่ 4.5 ภาพรวมวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน และตำแหน่งของการวัดค่าทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงรายละเอียดค่าที่ต้องการวัดตามรูปที่ 4.5

ตำแหน่ง	รายละเอียด
A	วัดค่าแรงดันอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีโหลดและมีโหลด
B	วัดกระแสอินพุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีโหลดและมีโหลด
C	วัดสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้ขาเกตของมอสเฟส ขณะไม่มีโหลดและมีโหลด
D	วัดแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะไม่มีโหลดและมีโหลด
E	วัดกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ขณะมีโหลด
F	วัดแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ขณะไม่มีโหลดและมีโหลด
G	วัดกระแสเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ขณะมีโหลด
H	วัดอัตราการเกิดอัตราการเกิด โอโซนจากการใช้สารไตรเซพท

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อกำหนดและเงื่อนไขในการทดสอบ

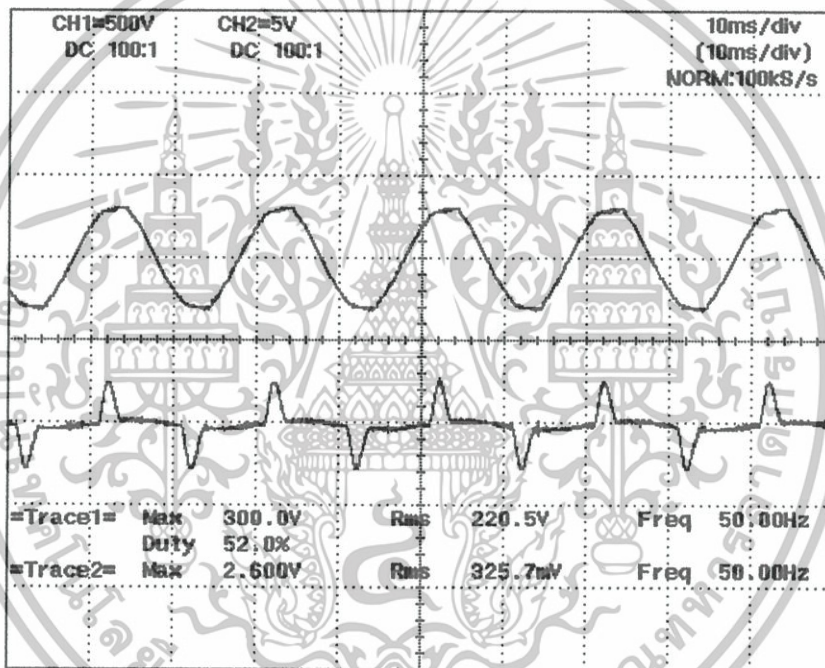
ลำดับ	รายละเอียด
1	ปรับแรงดันด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์ที่ 220 Vac 50 Hz
2	กำหนดความยาวแท่งอิเล็กโตรดที่ 60 ซม.
3	กำหนดช่องแกปอากาศแท่งอิเล็กโตรดที่ 0.2 ซม.
4	ใช้ออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.9 %
5	อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที ความดันด้านออก 1 บาร์ ความชื้นสัมพัทธ์ 20 %
6	ทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์แรงดัน 310 V ความถี่ 25 kHz
7	ทางด้านเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดันสูง 10 kVp ความถี่ 25 kHz
8	ควบคุมอุณหภูมิ 15 - 60 °C

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดเครื่องมือวัดส่วนที่สำคัญ

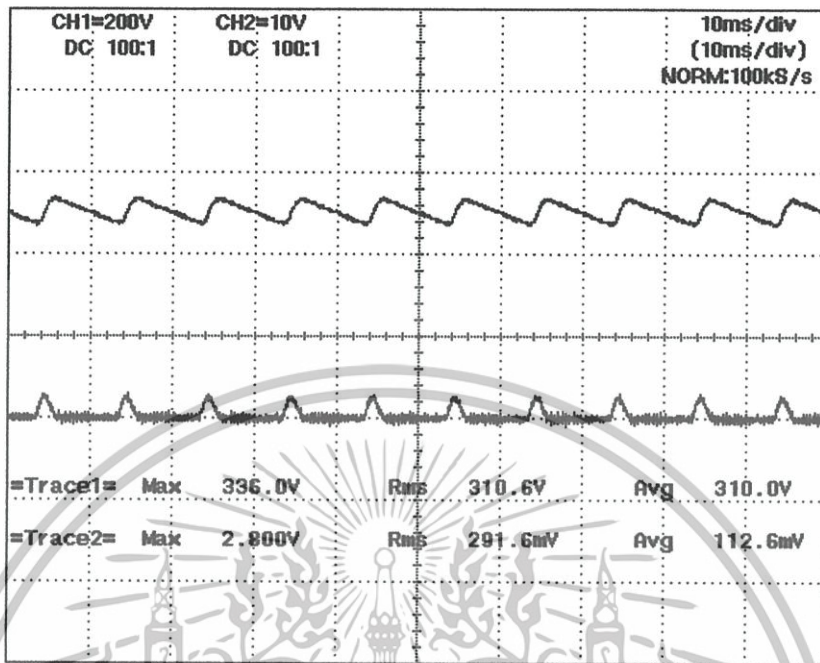
ลำดับ	รายละเอียด
1	Scope Yokogawa DL 1520
2	Fluke 41, Fluke 77, Fluke 561
3	Power Meter WT 200
4	C divider , Probe x100

4.4.1 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

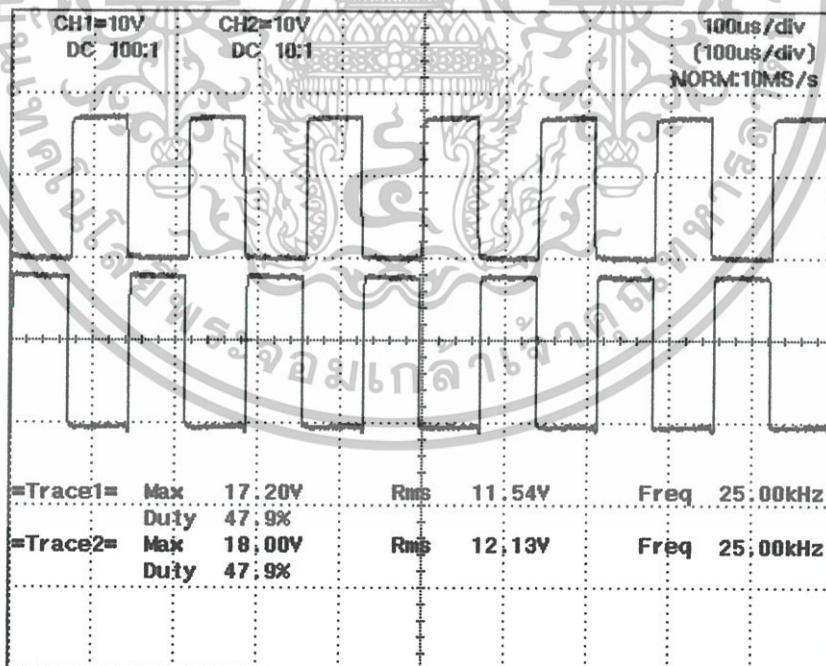
แสดงผลการทดลอง โดยการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสในสภาวะมีโหลดและไม่มีโหลด โดยที่จ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 V 50 Hz ผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์ ปรับความถี่เป็นความถี่ 25 kHz โดยที่แรงดัน 310 V โดยนำมาผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน ได้ว่าแรงดันด้านเอาต์พุตด้านออกสูงสุด 10 kVp คงที่ ความถี่ 25 kHz ซึ่งการวัดค่าแรงดันที่เอาต์พุตหม้อแปลงจะใช้ C-Divider เป็นตัววัดเนื่องจากแรงดันด้านโหลดจะมีค่าสูง โดยตัว C-Divider อัตราเรโซจะอยู่ที่ 1:100 ซึ่งตำแหน่งการวัดจะอ้างอิงตามรูปที่ 4.5 ที่ตำแหน่งต่างๆ



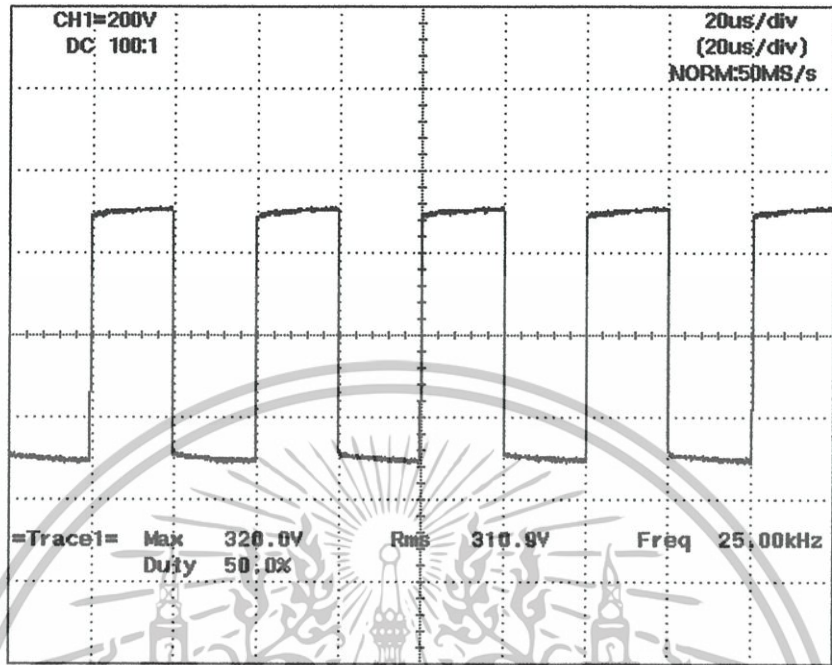
รูปที่ 4.6 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ขณะไม่มีโหลด



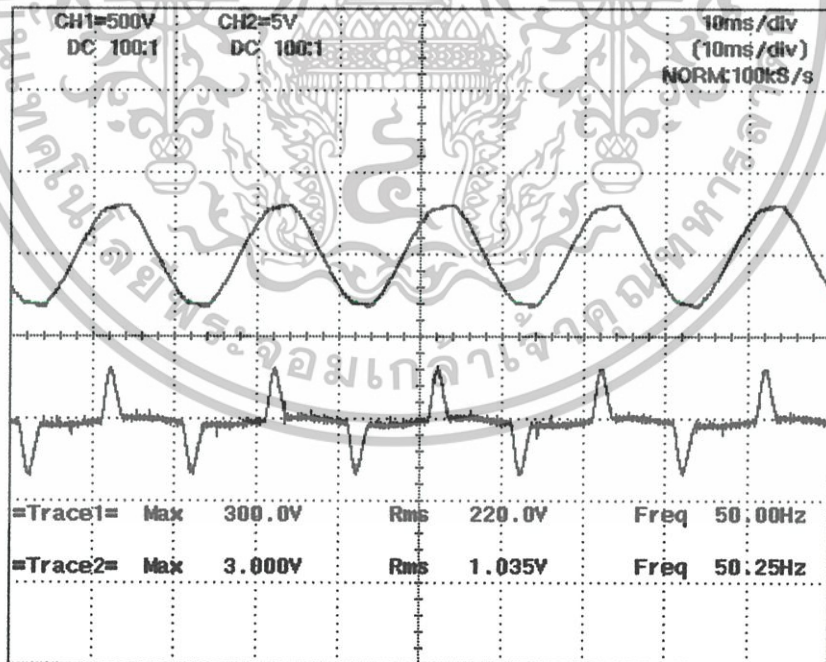
รูปที่ 4.7 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง J และกระแสที่ตำแหน่ง K ตามรูปที่ 4.5 ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 4.8 การวัดสัญญาณ PWM ที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 4.5 ในการขับเคลื่อน ขณะไม่มีโหลด

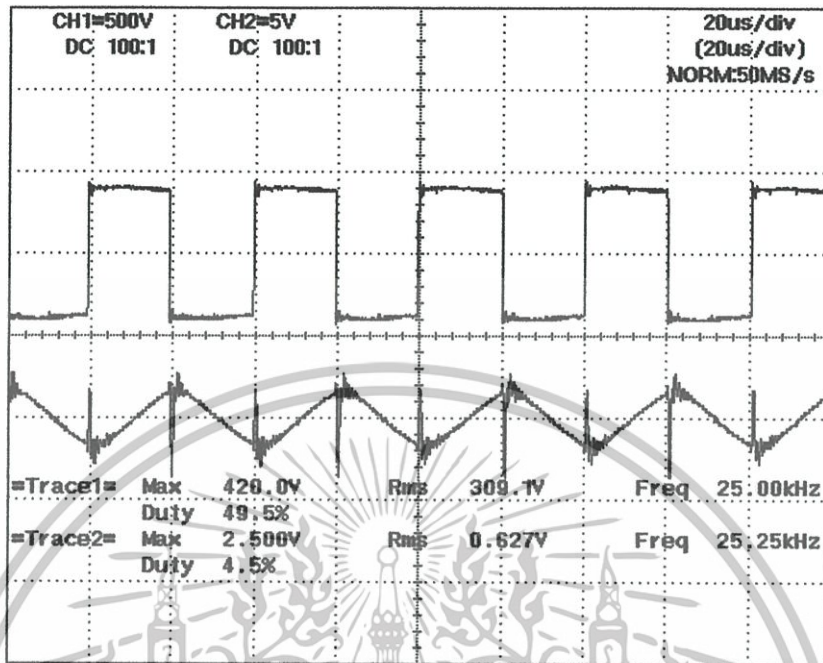


รูปที่ 4.9 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D ตามรูปที่ 4.5 ขณะไม่มีโหลด

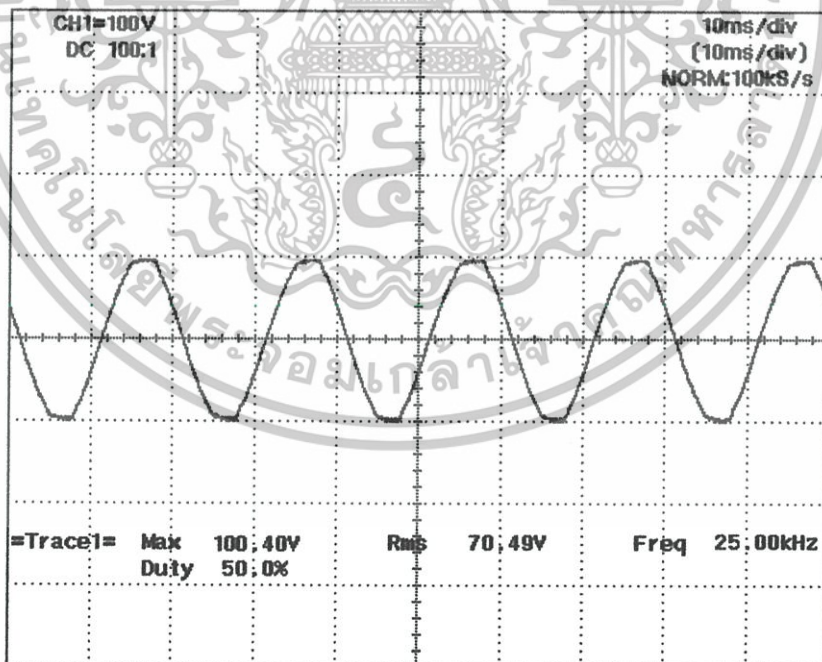


รูปที่ 4.10 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

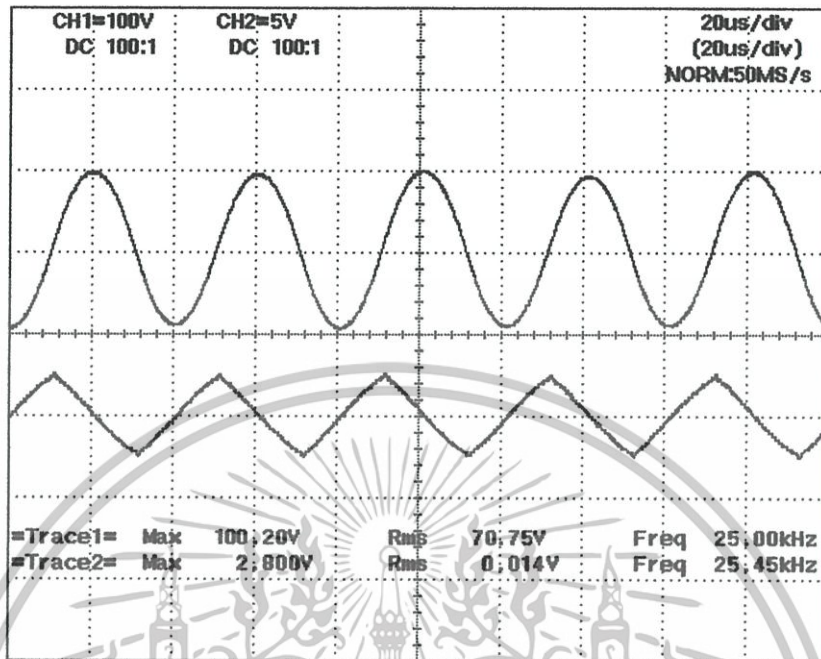


รูปที่ 4.11 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด



รูปที่ 4.12 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.13 ตามลำดับ เป็นการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าทางด้านแรงดัน กระแส และการขับเกท โดยใช้เครื่องมือวัดผลตามตารางที่ 4.4 ในการวัดสัญญาณ พบว่าลักษณะของสัญญาณต่างๆ ที่ได้ทำการวัด มีค่าแสดงออกมาใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งแสดงดังนี้ แรงดันด้านเข้าระบบ คือ 220 V 50 Hz เมื่อผ่านไดโอดทำการแปลงจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง จะได้แรงดันกระแสตรงที่ 310 V และเมื่อผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะได้แรงดันก่อนป้อนให้กับหม้อแปลงแรงดันสูงเท่ากับ 310 V และความถี่ 25 kHz นำมาผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดันจะได้แรงดันสุดท้ายเพื่อป้อนให้กับแท่งอิเล็กโตรด คือ 10 kV ความถี่ 25 kHz ตามรูปที่ 4.13

4.5 ผลการทดลองในการวัดอุณหภูมิจำนวน 5 จุด

ทำการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดอุณหภูมิภาย

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการเก็บค่าอุณหภูมิ 5 จุด อุณหภูมิเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วง 15 - 36 °C

ลำดับที่	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	ค่าเบี่ยงเบน
	จุดที่ 1 (°C)	จุดที่ 2 (°C)	จุดที่ 3 (°C)	จุดที่ 4 (°C)	จุดที่ 5 (°C)	เฉลี่ย (°C)	มาตรฐาน
1	15.1	15	15.1	15	15	15.04	0.022
2	16	16	16.1	15.9	16.1	16.02	0.033
3	17	16.9	17	16.9	16.9	16.94	0.022
4	18	18.1	18	17.9	18.1	18.02	0.033
5	19	19	19.1	19.2	18.9	19.04	0.046
6	20	20.1	20	20.1	20	20.04	0.022
7	20.9	21	21	20.9	21	20.96	0.022
8	22	22.1	22	22.1	22	22.04	0.022
9	23.1	23	23.1	23	22.9	23.02	0.033
10	24	24.1	24	24.1	24	24.04	0.022
11	25	24.9	25	25.1	25.1	25.02	0.033
13	26.1	26	25.9	25.9	26	25.98	0.033
14	27.1	27	27.2	27	26.9	27.04	0.046
15	28	28.1	28	28.1	28	28.04	0.022
16	29	29	29.1	29	29	29.02	0.018
17	30	30.1	30	30	30.1	30.04	0.022
18	31.1	31	31	31.1	31	31.04	0.022
19	31.9	32	32.1	32	31.9	31.98	0.033
21	33	33.1	33	33	33	33.02	0.018
22	34.1	34	34.1	33.9	34	34.02	0.033
23	35	35.1	35	35.1	34.9	35.02	0.033
24	36	36.1	36	36.1	36	36.04	0.022

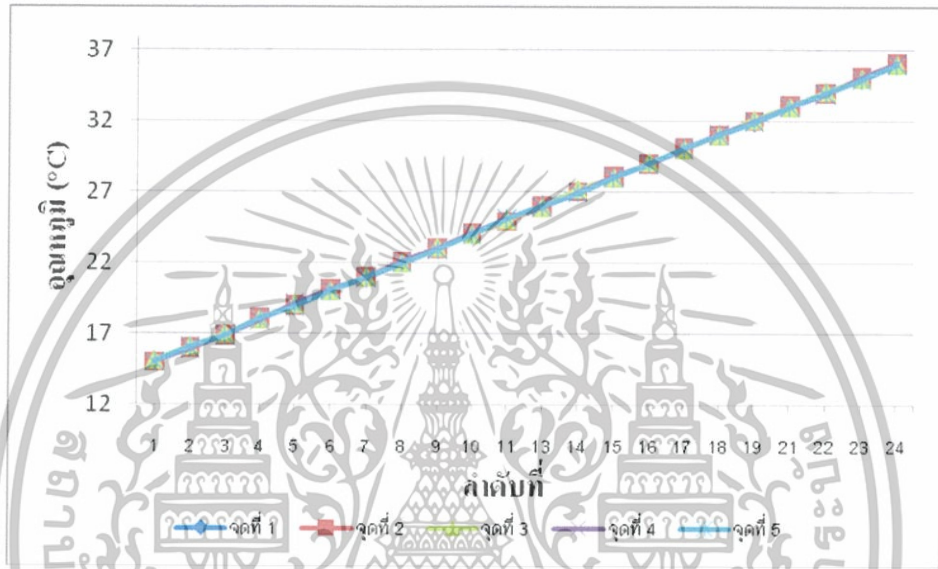
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเก็บค่าอุณหภูมิ 5 จุด อุณหภูมิเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วง 37 - 60 °C

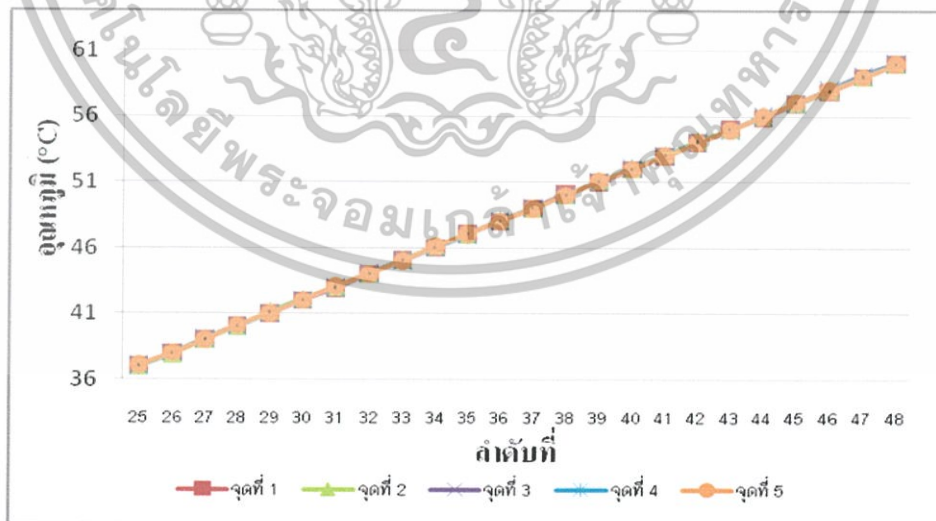
ลำดับที่	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	อุณหภูมิ	ค่าเบี่ยงเบน
	จุดที่ 1 (°C)	จุดที่ 2 (°C)	จุดที่ 3 (°C)	จุดที่ 4 (°C)	จุดที่ 5 (°C)	เฉลี่ย (°C)	มาตรฐาน
25	37	37	37.1	37	37.1	37.04	0.022
26	38	37.9	38	38	38	37.98	0.018
27	39	39	39.1	39.1	39	39.04	0.022
28	40.1	40	40.1	40	40.1	40.06	0.022
29	41	41.2	41	41	41	41.04	0.036
30	42	42.1	42	42.1	42	42.04	0.022
31	42.9	43	43	43	43.1	43.00	0.028
32	44	44	44.1	44	44	44.02	0.018
33	45.1	45.1	45	45.1	45	45.06	0.022
34	46	46.1	46	46	46.1	46.04	0.022
35	47.1	47	47.1	47	47.1	47.06	0.022
36	48	48.1	48	48.1	48	48.04	0.022
37	49	49	49.1	49	49	49.02	0.018
38	50.1	50	50.1	50	50	50.04	0.022
39	51	51.1	51	51.1	51.1	51.06	0.022
40	52	52	52	52.1	52	52.02	0.018
41	53	53.1	53	53.1	53	53.04	0.022
42	54	54.2	54	54.1	54	54.06	0.036
43	55.1	55	55	55	55	55.02	0.018
44	55.9	56	56	56.1	56	56.00	0.028
45	57	57	57.1	57	57.1	57.04	0.022
46	57.9	58	58.1	58.1	58	58.02	0.033
47	59	59	59.2	59.1	59	59.06	0.036
48	60	60	60.1	60.1	60	60.04	0.022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

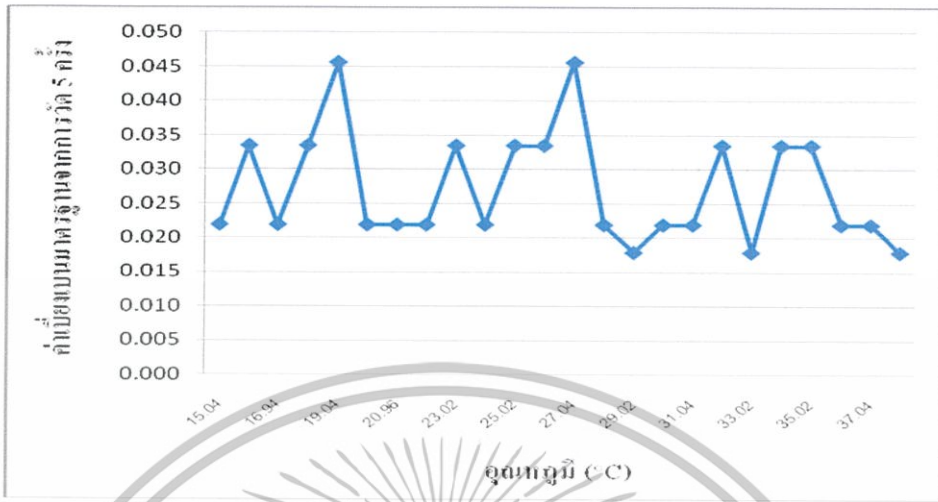
จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 เป็นการพล็อตกราฟเพื่อแสดงให้เห็นผลของการวัด ค่าอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 5 จุด เพื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าในการวัดแต่ละทีละจุดที่เวลาใกล้เคียงกัน ค่าอุณหภูมิก่อนข้างมีความสม่ำเสมอ และได้นำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการวัดมาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อประกอบความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะอธิบายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.14 แสดงการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.15 แสดงการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ตรงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดอุณหภูมิ 5 จุด



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ตรงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดอุณหภูมิ 5 จุด

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เป็นการเก็บผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 5 จุด เพื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ และจากการวัดได้พิสูจน์ความน่าเชื่อถือโดยใช้หลักทางสถิติมาช่วยแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าค่าการกระจายของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งได้นำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์วิเคราะห์ในกรณีต่อไป

4.6 ผลการทดลองการวัดปริมาณโอโซน

ที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที เพื่อหาค่าปริมาณ โอโซนเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิต โอโซน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ค่าโอโซน
		ที่ 3 นาที (g/hr)	ที่ 5 นาที (g/hr)	ที่ 7 นาที (g/hr)	เฉลี่ย (g/hr)	เบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	15.04	40	41	41	40.67	0.272
2	16.02	41	41	41.5	41.17	0.136
3	16.94	42	42	42	42.00	0.000
4	18.02	43	43.5	43	43.17	0.136
5	19.04	43	42	43	42.67	0.272
6	20.04	45	44	44	44.33	0.272
7	20.96	45	45	46	45.33	0.272
8	22.04	47	47	47.5	47.17	0.136
9	23.02	47.5	48	48	47.83	0.136
10	24.04	48	49	49	48.67	0.272
11	25.02	49	49.5	50	49.50	0.236
13	25.98	49	49	49.5	49.17	0.136
14	27.04	48	49	49	48.67	0.272
15	28.04	48.5	48.5	49	48.67	0.136
16	29.02	48	47.5	48	47.83	0.136
17	30.04	47.5	47.5	47	47.33	0.136
18	31.04	46	45.5	45.5	45.67	0.136
19	31.98	45	44.5	44	44.50	0.236
21	33.02	43	43	43	43.00	0.000
22	34.02	42.5	42.5	42	42.33	0.136
23	35.02	41	41	41	41.00	0.000

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิต โอโซน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

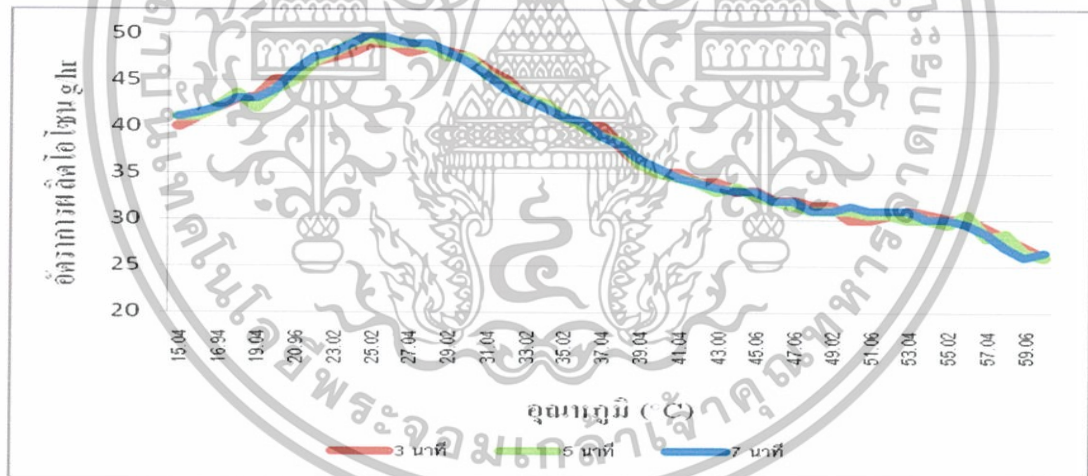
ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ค่าการวัด
		ที่ 3 นาที (g/hr)	ที่ 5 นาที (g/hr)	ที่ 7 นาที (g/hr)	เฉลี่ย (g/hr)	เบี่ยงเบนมาตรฐาน
24	36.04	40	40	40.5	40.17	0.136
25	37.04	40	39	39	39.33	0.272
26	37.98	37	37.5	37	37.17	0.136
27	39.04	36	36	36.5	36.17	0.136
28	40.06	35	35	35.5	35.17	0.136
29	41.04	35	34.5	34.5	34.67	0.136
30	42.04	34	34	34	34.00	0.000
31	43.00	34	33	33.5	33.50	0.236
32	44.02	33	33.5	33	33.17	0.136
33	45.06	33	32.5	33	32.83	0.136
34	46.04	32	32	32	32.00	0.000
35	47.06	32	31.5	32	31.83	0.136
36	48.04	31.5	31	31	31.17	0.136
37	49.02	31.5	31	31	31.17	0.136
38	50.04	30	31	31.5	30.83	0.360
39	51.06	30	30.5	31	30.50	0.236
40	52.02	30.5	30.5	31	30.67	0.136
41	53.04	31	30	31	30.67	0.272
42	54.06	30.5	30	30	30.17	0.136
43	55.02	30	29.5	30	29.83	0.136
44	56.00	30	30.5	29.5	30.00	0.236
45	57.04	29	28	28.5	28.50	0.236
46	58.02	28	28.5	27	27.83	0.360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิตโอโซน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

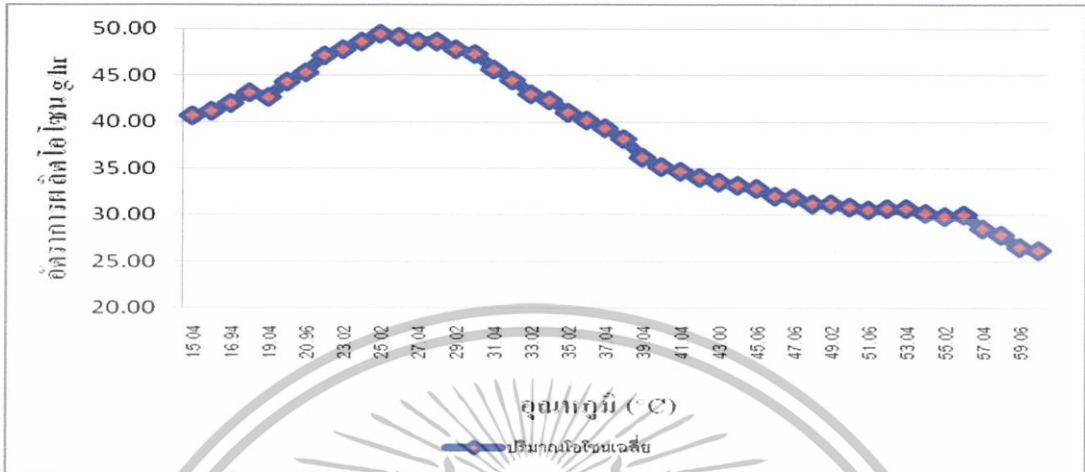
ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซน	ค่าการวัด
		ที่ 3 นาที (g/hr)	ที่ 5 นาที (g/hr)	ที่ 7 นาที (g/hr)	เฉลี่ย (g/hr)	เบี่ยงเบนมาตรฐาน
47	59.06	27	26.5	26	26.50	0.236
48	60.04	26	26	26.5	26.17	0.136

จากรูปที่ 4.18 เป็นการเก็บผลปริมาณโอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที ซึ่งทำการวัดโดยวิธีการไตรเตรดทางเคมี พบว่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ใช้เวลาแตกต่างกันแต่อุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ได้ค่าปริมาณการผลิตโอโซนค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงได้นำค่าปริมาณโอโซนแต่ละช่วงเวลา หาค่าปริมาณโอโซนเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ และนำไปวิเคราะห์ในกรณีต่อไป



รูปที่ 4.18 แสดงการวัดปริมาณโอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโตรด

จากรูปที่ 4.19 เป็นการเก็บผลปริมาณโอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที และนำมาหาปริมาณโอโซนเฉลี่ยที่ผลิตได้ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรด ซึ่งทำการวัดปริมาณโอโซนโดยวิธีการไตรเตรดทางเคมี พบว่าปริมาณโอโซนมีแนวโน้มในการผลิตได้สูงสุดที่อุณหภูมิช่วงหนึ่งเท่านั้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณโอโซนกับมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อถึงช่วงอุณหภูมิสูงช่วงหนึ่งปริมาณโอโซนมีแนวโน้มคงที่ และค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีก



รูปที่ 4.19 แสดงการวัดปริมาณไอ โชนเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตไอ โชนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ช่วงเวลาต่างๆกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดที่ 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที

จากรูปที่ 4.20 เป็นการแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดปริมาณไอ โชนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที และนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณไอ โชนเฉลี่ยในช่วงเวลานั้น โดยใช้วิธีการไตรเตรดทางเคมีวัดปริมาณไอ โชน พบว่าในการไตรเตรดหาปริมาณไอ โชนในแต่ละครั้งได้ผลออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน และในบางครั้งการวัดที่อุณหภูมิเท่ากันปริมาณไอ โชนที่ได้จากการวัดจะมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และเป็นศูนย์ตามรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้ออกมาเป็นค่าที่น่าเชื่อถือนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีต่อไปได้

4.7 ผลการทดลองทางไฟฟ้าส่วนคอนเวอร์เตอร์

เป็นการเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าช่วงอุณหภูมิ 15 - 60 °C เปรียบเทียบกันระหว่าง กำลังไฟฟ้าด้านเข้าระบบโอโซน ที่ตำแหน่งการวัดที่จุด A และ B ตามรูปที่ 4.5 กับกำลังไฟฟ้าด้านออก คอนเวอร์เตอร์ที่ตำแหน่งการวัดที่จุด D และ E ตามรูปที่ 4.5 เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดสร้างก๊าซ โอโซนในส่วนของภาคคอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 15 - 36 °C

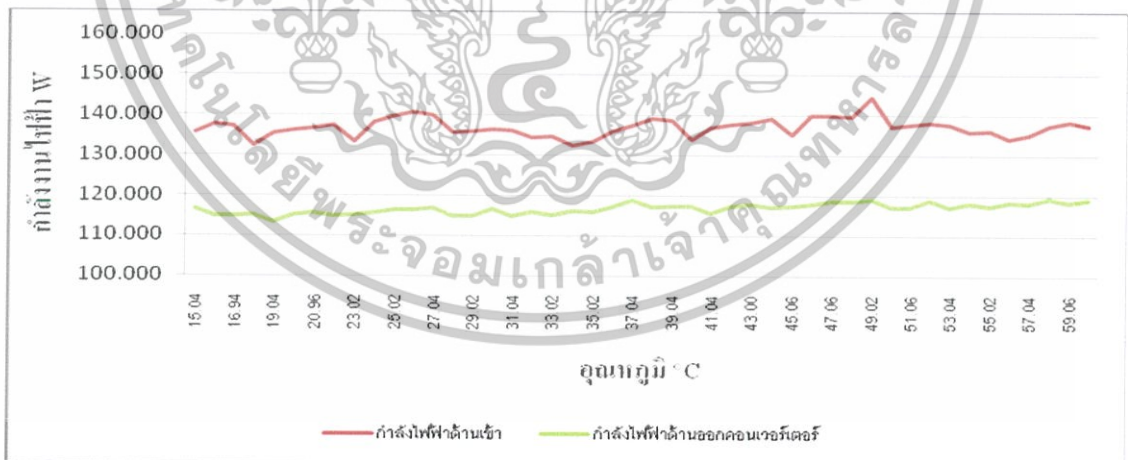
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	แรงดัน	กระแส	กำลังไฟฟ้า	ประสิทธิภาพ (%)
	ด้านเข้า (V)	ด้านเข้า (A)	ด้านเข้า (W)	ด้านออก (V)	ด้านออก (A)	ด้านออก (W)	
	แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์			
15.04	220.1	1.028	135.692	309.20	0.629	116.692	86.00
16.02	220	1.043	137.610	308.01	0.621	114.761	83.40
16.94	219.7	1.040	137.093	309.50	0.619	114.948	83.85
18.02	219	1.008	132.386	310.01	0.619	115.134	86.97
19.04	220	1.025	135.300	309.50	0.610	113.277	83.72
20.04	220.7	1.028	136.062	309.20	0.620	115.022	84.54
20.96	221	1.030	136.578	309.20	0.623	115.579	84.62
22.04	219.7	1.043	137.422	309.31	0.619	114.874	83.59
23.02	219.7	1.013	133.468	308.71	0.621	115.022	86.18
24.04	220	1.048	138.270	308.9	0.623	115.467	83.51
25.02	220	1.035	139.590	309	0.627	116.246	83.28
25.98	220	1.040	140.807	309.5	0.626	116.248	82.56
27.04	220.8	1.043	139.892	309.7	0.629	116.881	83.55
28.04	220	1.028	135.630	308.8	0.62	114.874	84.70
29.02	221	1.025	135.915	309.21	0.619	114.837	84.49
30.04	220.2	1.033	136.414	309.21	0.628	116.507	85.41

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 37 - 58 °C

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า	กระแสด้านเข้า	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	แรงดันด้านออก	กระแสด้านออก	กำลังไฟฟ้าด้านออก	ประสิทธิภาพ (%)
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	
แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์				
31.04	220.2	1.030	136.084	308.01	0.621	114.761	84.33
31.98	220	1.018	134.310	309.31	0.624	115.802	86.22
33.02	219.9	1.020	134.579	309.10	0.621	115.171	85.58
34.02	220.3	1.003	132.510	309.42	0.625	116.025	87.56
35.02	220.2	1.010	133.441	308.91	0.625	115.838	86.81
36.04	220.3	1.028	135.815	309.52	0.63	116.991	86.14
37.04	220.1	1.040	137.342	309.20	0.6413	118.974	86.63
37.98	220	1.055	139.260	308.00	0.6333	117.034	84.04
39.04	219.7	1.053	138.741	309.50	0.6313	117.232	84.50
40.06	219	1.020	134.028	310.01	0.6313	117.422	87.61
41.04	220	1.038	136.950	309.50	0.6223	115.561	84.38
42.04	220.7	1.040	137.717	309.20	0.6323	117.304	85.18
43.00	221	1.043	138.236	309.20	0.6353	117.861	85.26
44.02	219.7	1.055	139.070	309.30	0.6313	117.157	84.24
45.06	219.7	1.025	135.116	308.71	0.6333	117.300	86.81
46.04	220	1.060	139.920	308.90	0.6353	117.747	84.15
47.06	220	1.061	140.052	309.01	0.6393	118.526	84.63
48.04	220	1.059	139.788	309.50	0.6383	118.532	84.79
49.02	220.8	1.090	144.403	309.70	0.6413	119.166	82.52
50.04	220	1.040	137.280	308.80	0.6323	117.153	85.34
51.06	221	1.038	137.573	309.21	0.6313	117.119	85.13
52.02	220.2	1.045	138.065	309.21	0.6403	118.788	86.04

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 59 - 60 °C

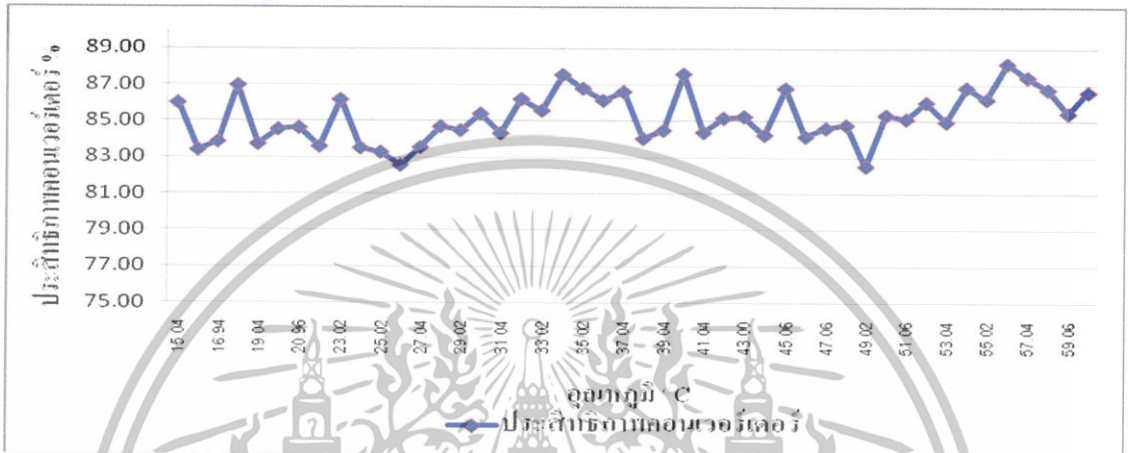
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า	กระแสด้านเข้า	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	แรงดันด้านออก	กระแสด้านออก	กำลังไฟฟ้าด้านออก	ประสิทธิภาพ (%)
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	
แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์				
53.04	220.2	1.043	137.735	308.01	0.6333	117.034	84.97
54.06	220	1.030	135.960	309.30	0.6363	118.085	86.85
55.02	219.9	1.033	136.228	309.10	0.6333	117.452	86.22
56.00	220.3	1.015	134.163	309.40	0.6373	118.308	88.18
57.04	220.2	1.023	135.093	308.90	0.6373	118.117	87.43
58.02	220.3	1.040	137.467	309.51	0.6423	119.275	86.77
59.06	221	1.045	138.501	310.01	0.6363	118.352	85.45
60.04	220.5	1.040	137.526	309.10	0.6423	119.121	86.62
ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)							85.23



รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่อุณหภูมิเฉลี่ย

จากรูป 4.21 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในช่วงการผลิตโอโซนที่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโทรด 15 – 60 °C โดยประมาณ พบว่าระบบผลิตโอโซนใช้กำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่

ได้รับจากการไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 130 – 145 W และกำลังไฟฟ้าด้านออกจากชุดคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 110 – 120 W เหตุที่กำลังไฟฟ้าด้านออกลดลงเนื่องจากผลของอุปกรณ์ไฟฟ้า และผลจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งผลที่ได้นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพจะอธิบายในขั้นตอนต่อไป



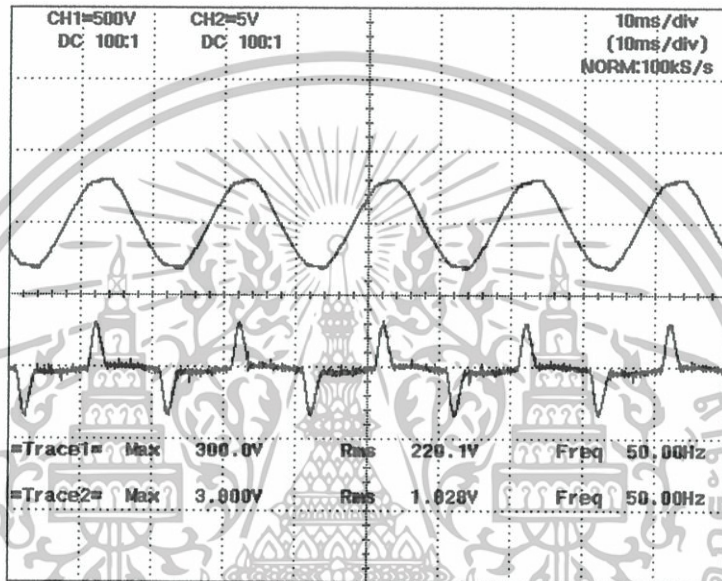
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ กับประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์



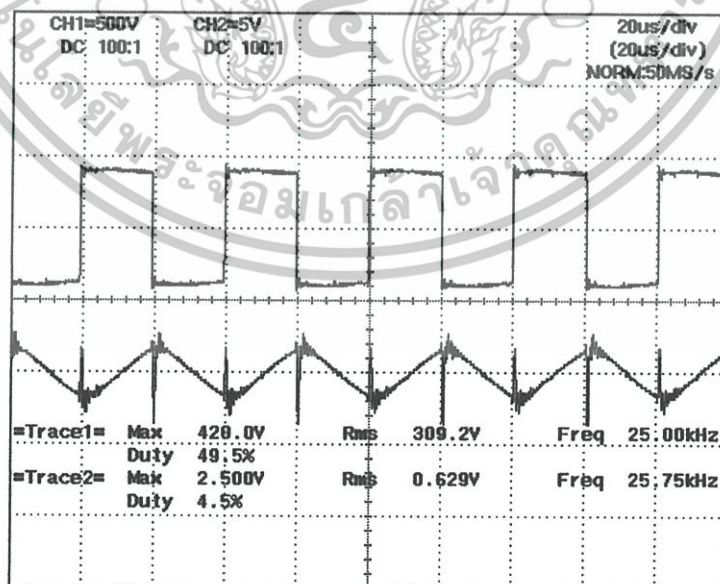
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตก๊าซไอโซน กับประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 เป็นการพล็อตกราฟเพื่ออธิบายประสิทธิภาพส่วนชุดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งผลที่ได้จะเห็นได้ชัดเจนว่าประสิทธิภาพของระบบ ไอโซนในส่วนนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ 81 – 89 % โดยที่ประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบส่วนคอนเวอร์เตอร์อยู่ที่ 85.23 % ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าไม่ได้มีผลมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ทำการผลิต ไอโซน

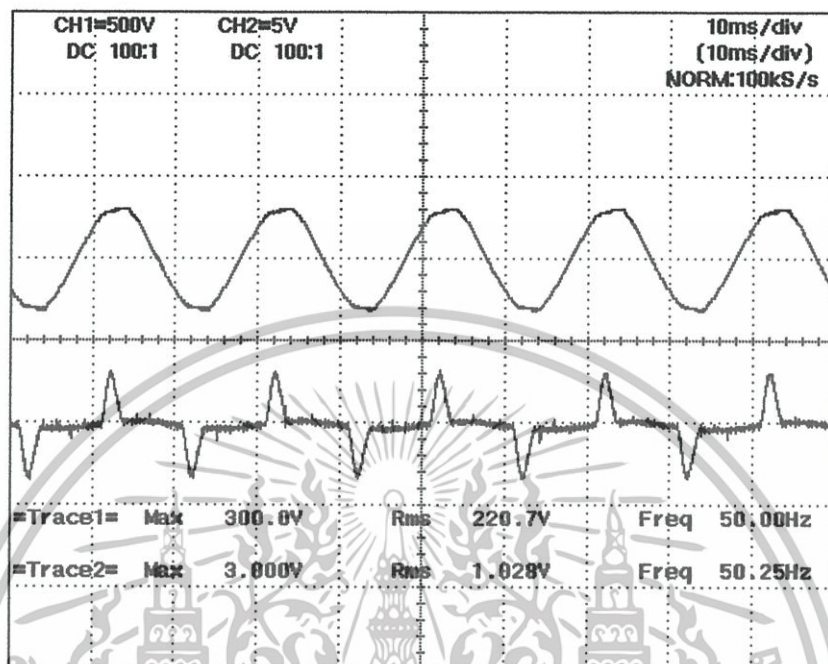
ต่อไปนี้เป็นผลการแสดงผลการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าระบบโอโซน ที่ตำแหน่งการวัดที่จุด A และ B ตามรูปที่ 4.5 กับกำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ตำแหน่งการวัดที่จุด D และ E ตามรูปที่ 4.5 เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดสร้างก๊าซโอโซนในส่วนของภาคคอนเวอร์เตอร์ โดยการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสในสภาวะมีโหลด ที่จ่ายแรงดันอินพุทเท่ากับ 220 V 50 Hz ผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์ ปรับความถี่เป็นความถี่ 25 kHz โดยที่แรงดัน 310 V



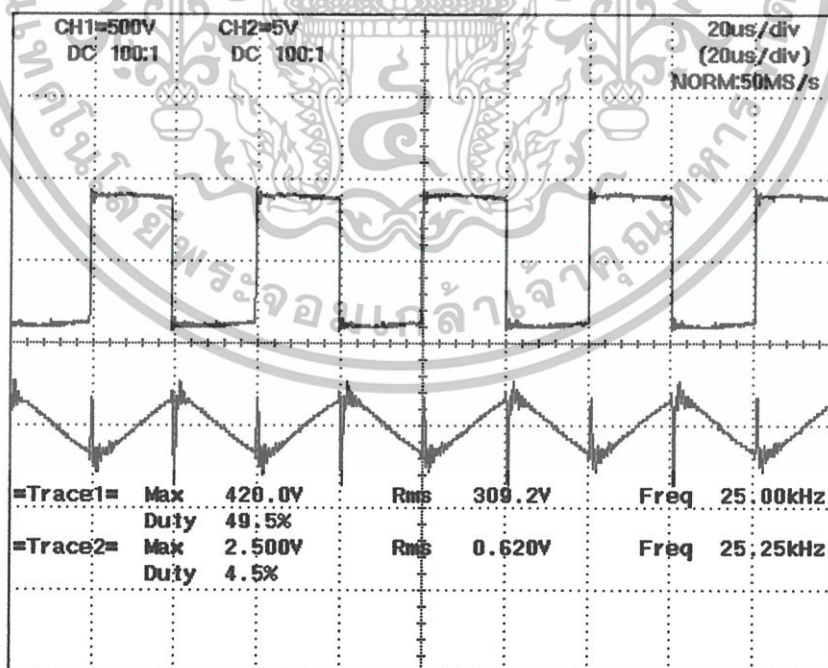
รูปที่ 4.24 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C



รูปที่ 4.25 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C

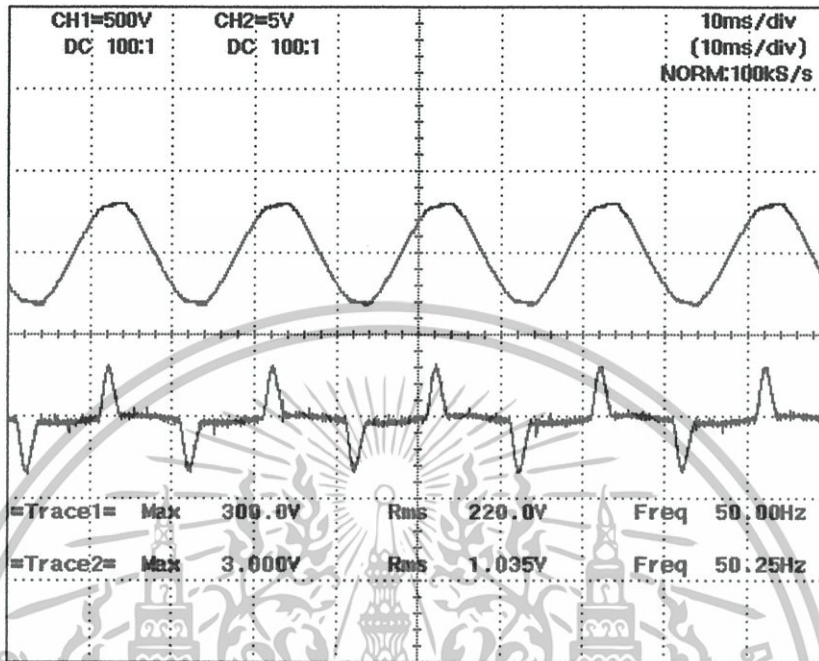


รูปที่ 4.26 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C

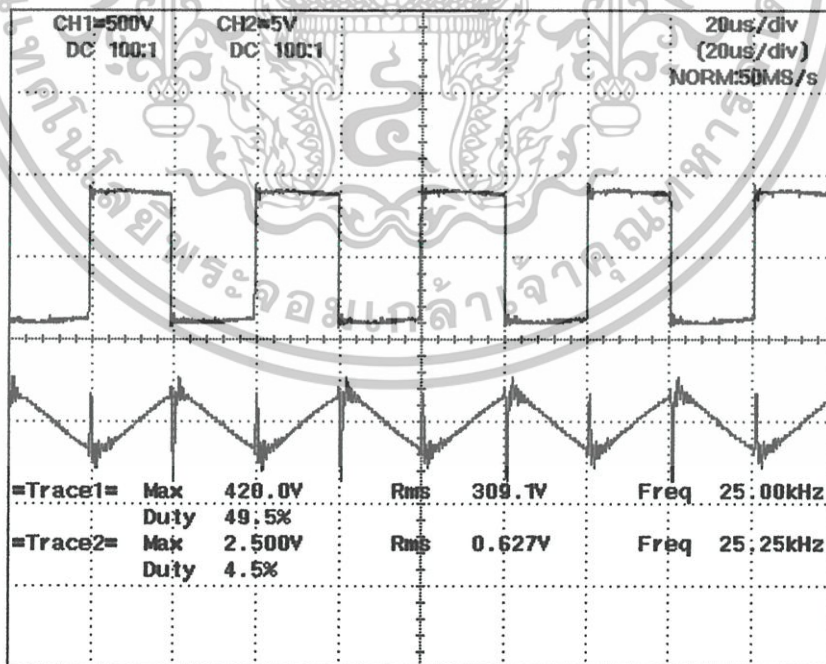


รูปที่ 4.27 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

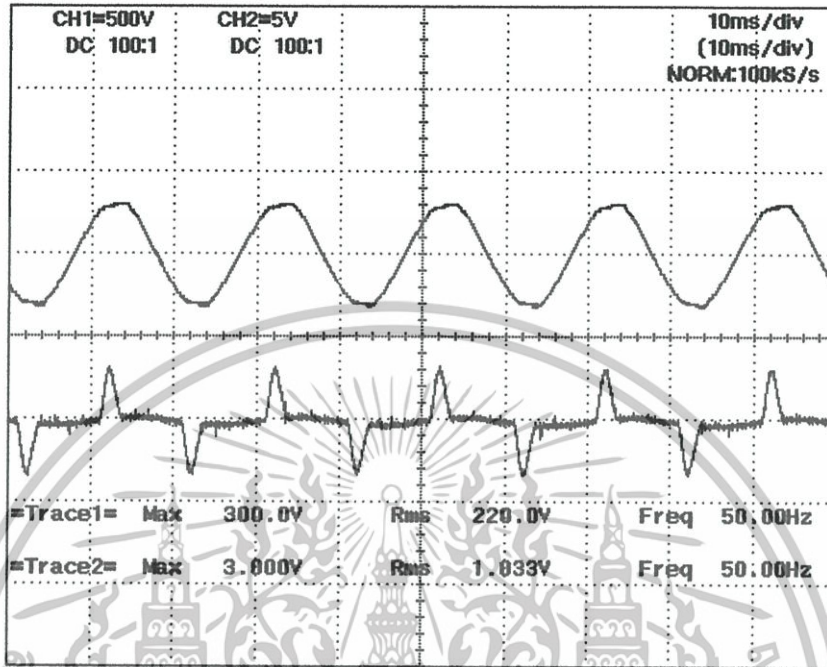


รูปที่ 4.28 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C

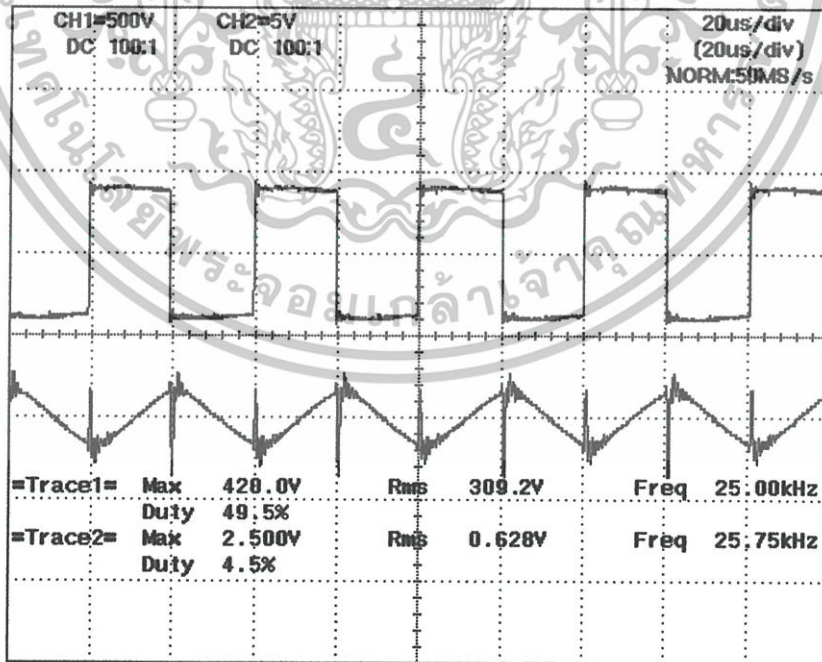


รูปที่ 4.29 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

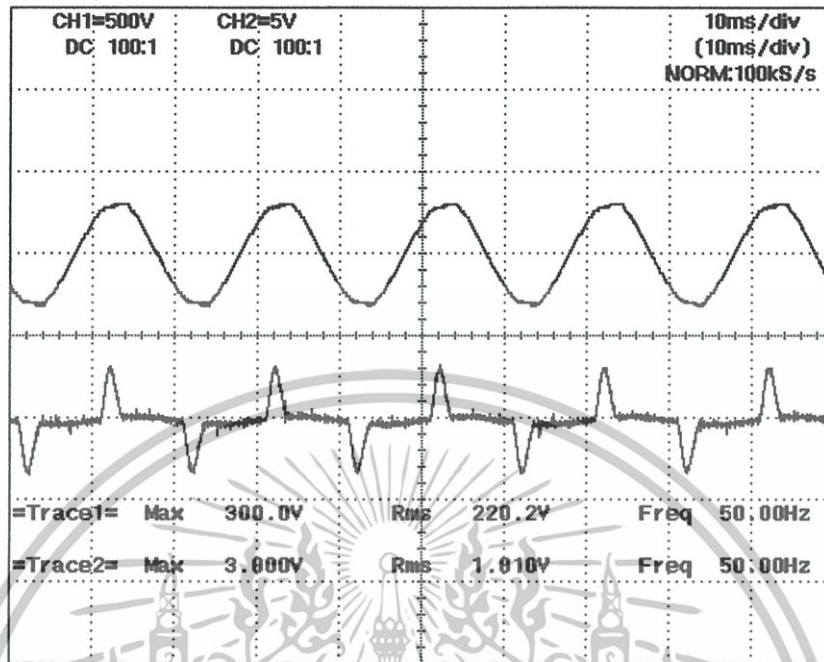


รูปที่ 4.30 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C

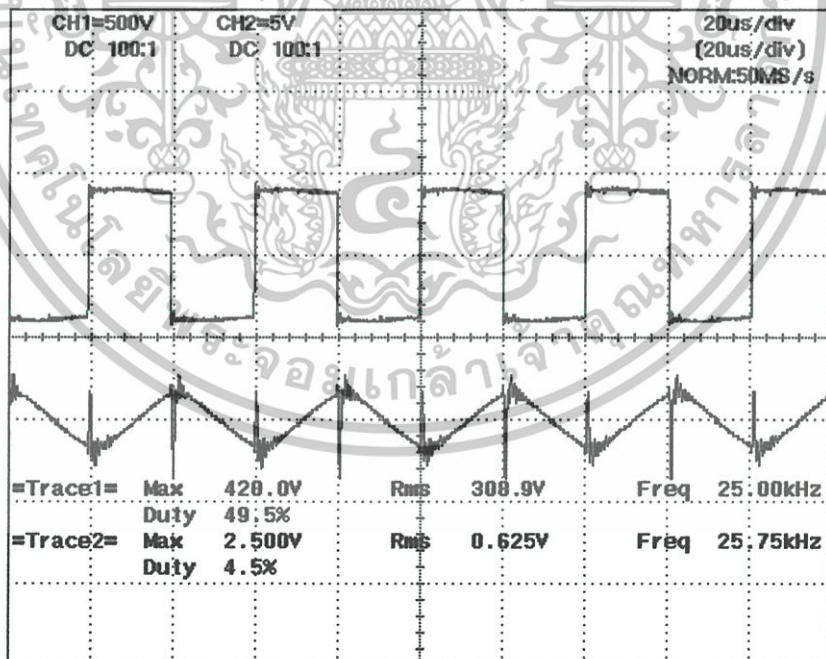


รูปที่ 4.31 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C

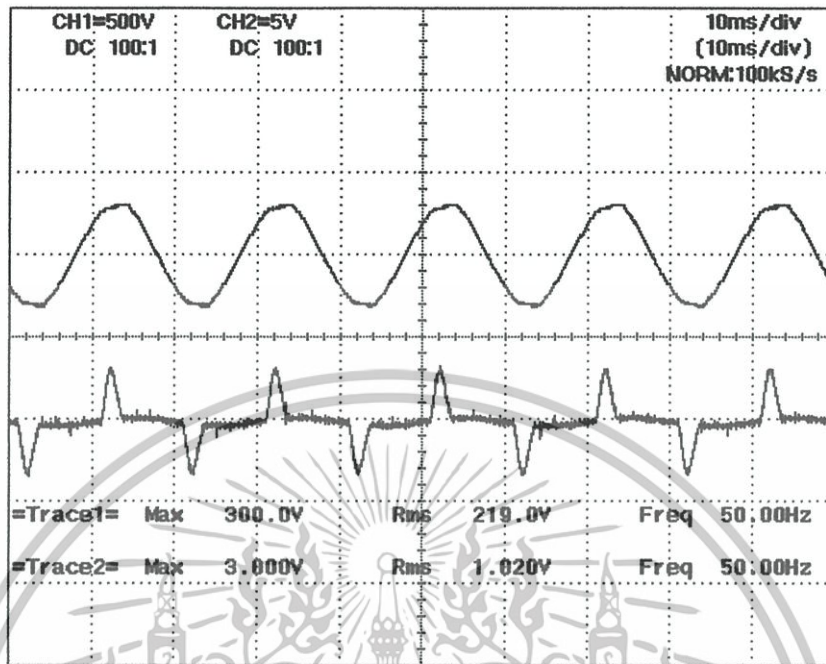
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



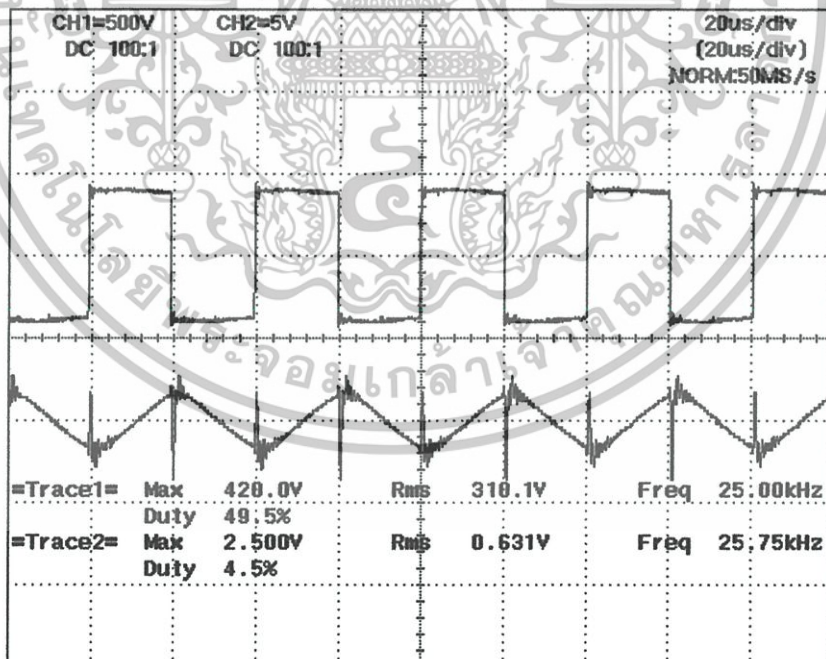
รูปที่ 4.32 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C



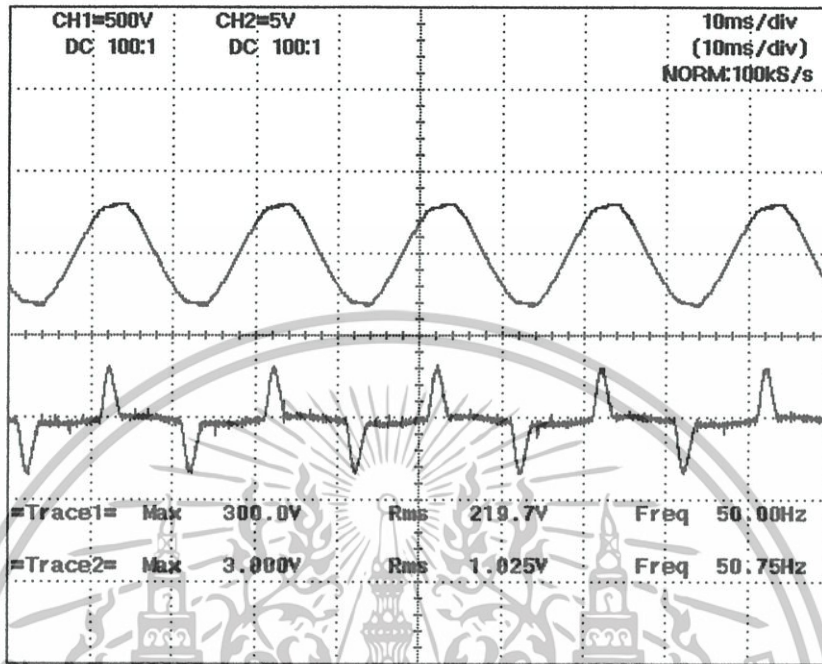
รูปที่ 4.33 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C



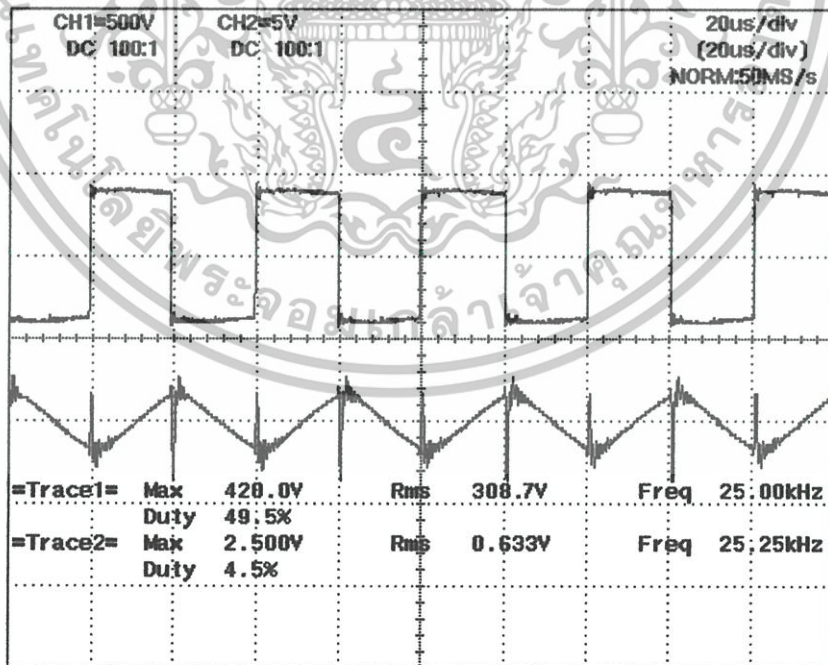
รูปที่ 4.34 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 4.35 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C

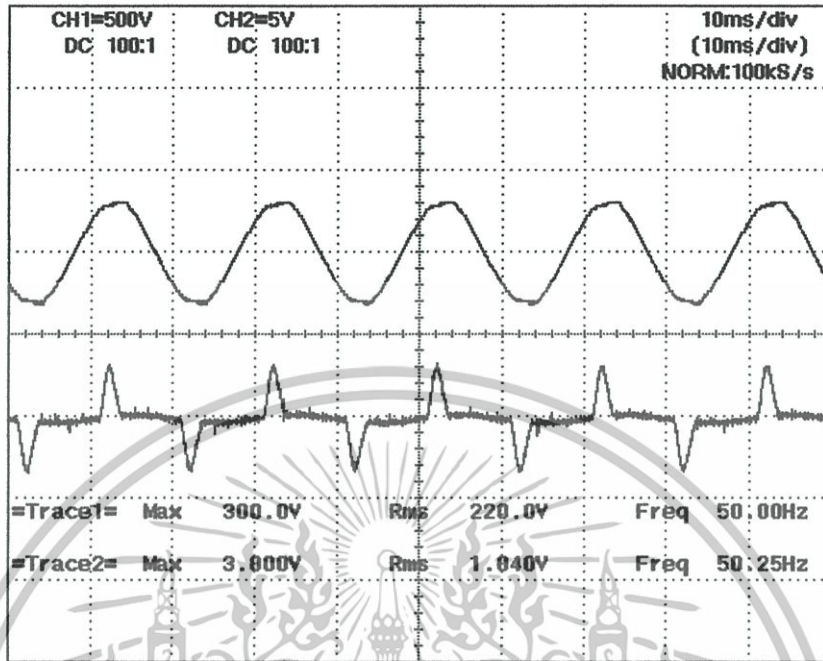


รูปที่ 4.36 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C

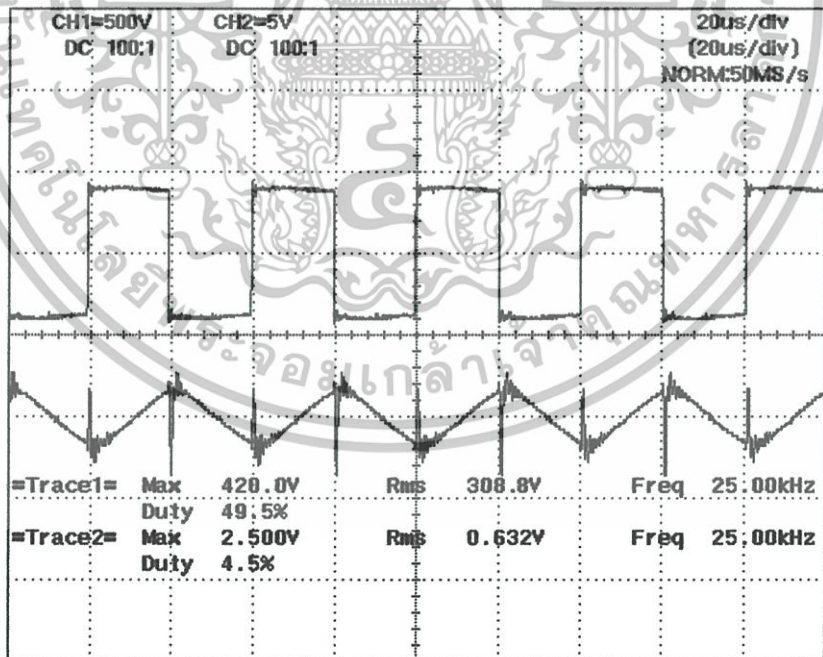


รูปที่ 4.37 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

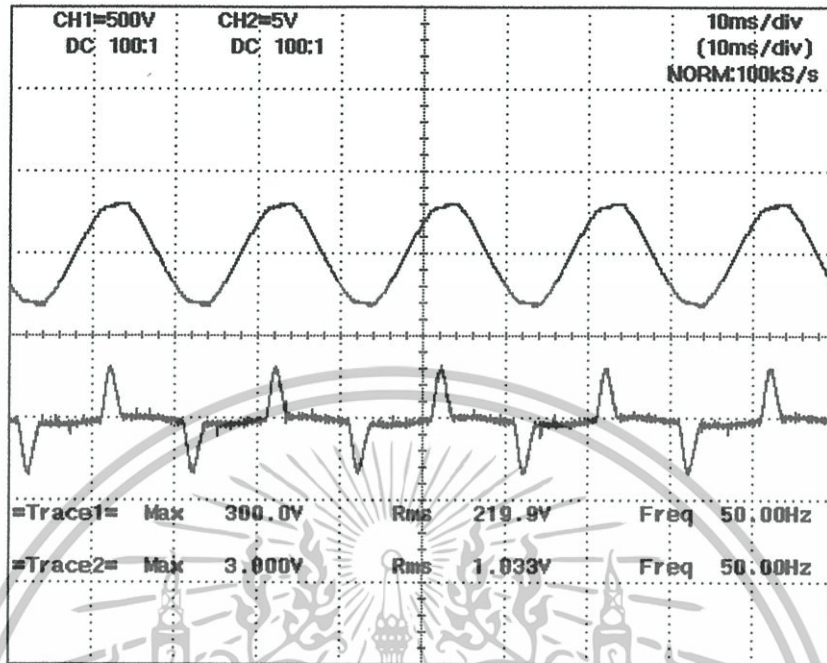


รูปที่ 4.38 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C

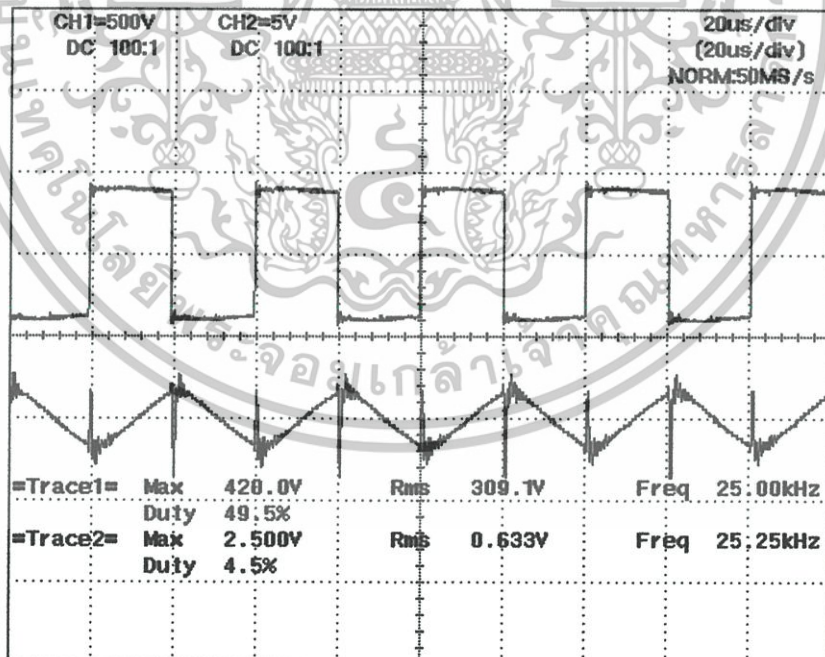


รูปที่ 4.39 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C

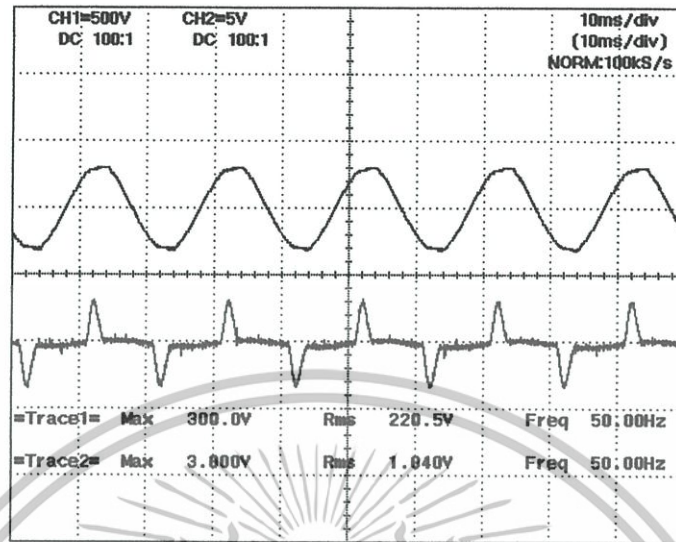
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



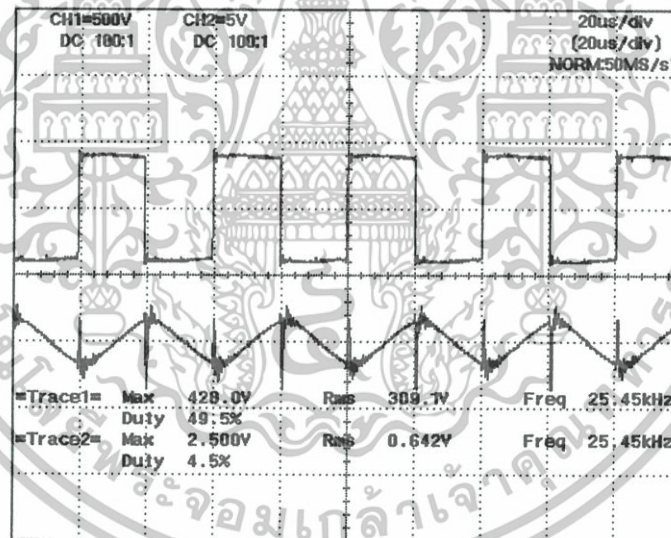
รูปที่ 4.40 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C



รูปที่ 4.41 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C



รูปที่ 4.42 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ 4.43 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C

จากผลการทดลอง การวัดสัญญาณกระแสและแรงดันพบว่า แรงดันและกระแสด้านเข้าที่จุดตำแหน่ง A และ B ตามรูปที่ 4.5 มีความปกติเกิดการกระเพิ่มเล็กน้อย และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการวัดที่ตำแหน่ง D และ E ตามรูปที่ 4.5 มี ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ พบว่าสัญญาณแรงดันอยู่ในเกณฑ์ปกติแต่เมื่อพิจารณาสัญญาณกระแส พบว่ามีผลของช่วงการสลับการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง และผลของการทำงานและหยุดการทำงานของไดโอดในตัวอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง

4.8 ผลการทดลองทางไฟฟ้าด้านแรงดันสูง

เป็นการเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าช่วงอุณหภูมิ 15 - 60 °C เปรียบเทียบกันระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าระบบโอโซน ที่ตำแหน่งการวัดที่จุด A และ B ตามรูปที่ 4.5 กับกำลังไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูงที่ตำแหน่งการวัดที่จุด G และ F ตามรูปที่ 4.5 เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดสร้างก๊าซโอโซนทั้งระบบ

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงช่วง 15 - 36 °C

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า	กระแสด้านเข้า	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	แรงดันด้านออก	กระแสด้านออก	กำลังไฟฟ้าด้านออก	ประสิทธิภาพ (%)
	(V)	(A)	(W)	(kV)	(mA)	(W)	
แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูง				
15.040	220.100	1.028	135.692	10.010	15.121	90.817	66.929
16.020	220.000	1.043	137.610	9.980	15.219	91.131	66.224
16.940	219.700	1.040	137.093	10.070	14.977	90.491	66.007
18.020	219.000	1.008	132.386	10.120	15.012	91.153	68.854
19.040	220.000	1.025	135.300	10.010	15.104	90.715	67.047
20.040	220.700	1.028	136.062	10.020	15.510	93.246	68.532
20.960	221.000	1.030	136.578	10.100	15.010	90.961	66.600
22.040	219.700	1.043	137.422	10.010	14.980	89.970	65.470
23.020	219.700	1.013	133.468	9.980	14.630	87.604	65.637
24.040	220.000	1.048	138.270	10.100	14.530	88.052	63.681
25.020	220.000	1.035	136.620	10.200	14.578	89.217	65.303
25.980	220.000	1.040	137.227	10.120	14.453	87.759	63.951
27.040	220.800	1.043	138.179	10.110	14.782	89.668	64.892
28.040	220.000	1.028	135.630	10.000	15.780	94.680	69.808
29.020	221.000	1.025	135.915	10.300	15.700	97.026	71.387
30.040	220.200	1.033	136.414	10.500	15.320	96.516	70.752

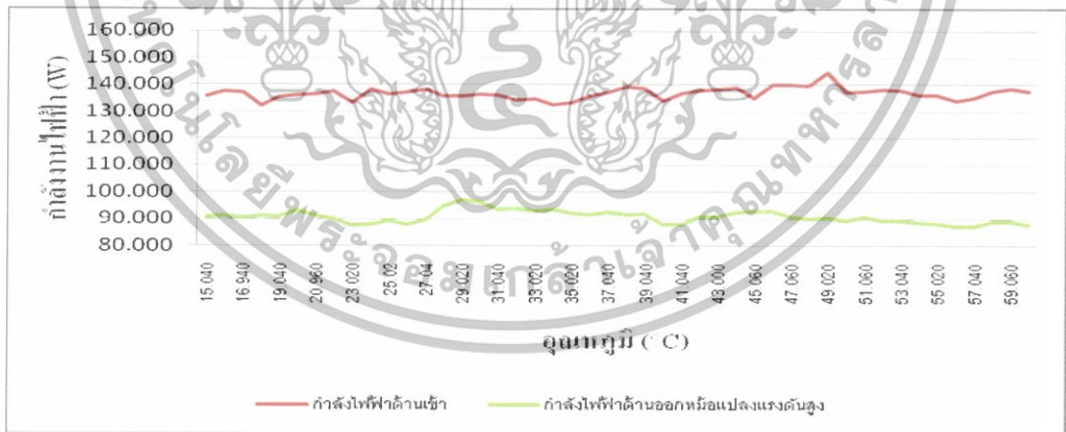
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงช่วง 37 - 58 °C

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า	กระแสด้านเข้า	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	แรงดันด้านออก	กระแสด้านออก	กำลังไฟฟ้าด้านออก	ประสิทธิภาพ (%)
	(V)	(A)	(W)	(kV)	(mA)	(W)	
แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูง				
31.040	220.200	1.030	136.084	10.100	15.432	93.518	68.721
31.980	220.000	1.018	134.310	10.200	15.323	93.777	69.821
33.020	219.900	1.020	134.579	10.300	15.011	92.768	68.932
34.020	220.300	1.003	132.510	10.300	15.125	93.473	70.540
35.020	220.200	1.010	133.441	10.100	15.213	92.191	69.087
36.040	220.300	1.028	135.815	10.020	15.211	91.449	67.333
37.040	220.100	1.040	137.342	10.100	15.261	92.482	67.337
37.980	220.000	1.055	139.260	10.040	15.160	91.326	65.580
39.040	219.700	1.053	138.741	10.070	15.216	91.934	66.263
40.060	219.000	1.020	134.028	10.120	14.483	87.939	65.613
41.040	220.000	1.038	136.950	9.987	14.692	88.037	64.284
42.040	220.700	1.040	137.717	10.010	15.125	90.841	65.962
43.000	221.000	1.043	138.236	10.012	15.128	90.878	65.741
44.020	219.700	1.055	139.070	10.110	15.276	92.665	66.632
45.060	219.700	1.025	135.116	10.120	15.291	92.849	68.718
46.040	220.000	1.060	139.920	10.120	15.291	92.849	66.359
47.060	220.000	1.061	140.052	10.010	15.125	90.841	64.863
48.040	220.000	1.059	139.788	9.970	15.065	90.117	64.467
49.020	220.800	1.090	144.403	9.980	15.080	90.298	62.532
50.040	220.000	1.040	137.280	9.920	14.989	89.215	64.988
51.060	221.000	1.038	137.573	10.000	15.110	90.660	65.900
52.020	220.200	1.045	138.065	9.900	15.048	89.385	64.741

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงช่วง 59 - 60 °C

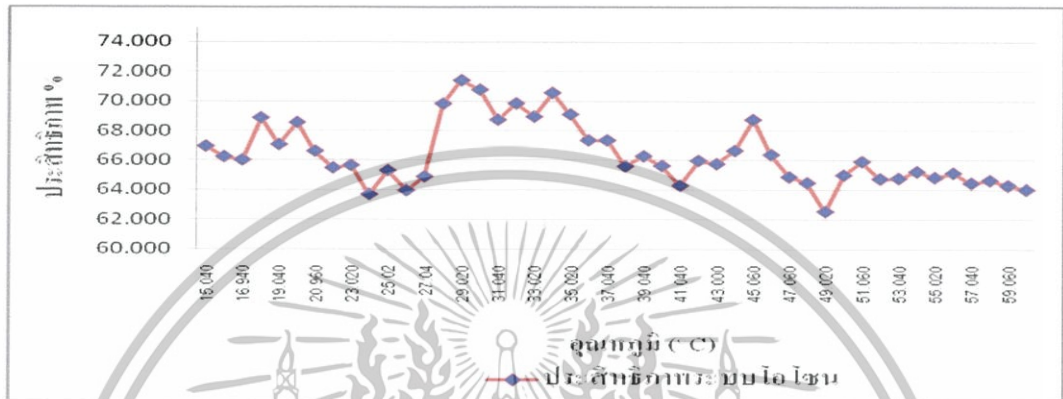
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า	กระแสด้านเข้า	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	แรงดันด้านออก	กระแสด้านออก	กำลังไฟฟ้าด้านออก	ประสิทธิภาพ (%)
	(V)	(A)	(W)	(kV)	(mA)	(W)	
แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูง				
53.040	220.200	1.043	137.735	9.920	14.989	89.215	64.773
54.060	220.000	1.030	135.960	9.890	14.944	88.676	65.222
55.020	219.900	1.033	136.228	9.870	14.914	88.318	64.831
56.000	220.300	1.015	134.163	9.850	14.785	87.378	65.129
57.040	220.200	1.023	135.093	9.800	14.808	87.070	64.452
58.020	220.300	1.040	137.467	9.900	14.959	88.856	64.638
59.060	221.000	1.045	138.501	9.910	14.974	89.035	64.285
60.040	220.500	1.040	137.526	9.920	14.791	88.034	64.013
ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)							66.37



รูปที่ 4.44 แสดงผลการทดลองการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 4.44 เป็นการพล็อตกราฟจากผลการทดลองโดยนำค่าพลังงานด้านเข้ากับพลังงานด้านของระบบไอโซน มาเปรียบเทียบกับในช่วงที่อุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ มีการเปลี่ยนแปลง 15 – 60 °C โดยประมาณ พบว่าระบบผลิตไอโซนใช้พลังงานด้านเข้าที่ได้รับจากการไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง

130 – 145 W และพลังงานด้านออกของระบบ ไอโซนอยู่ในช่วงระหว่าง 85 – 100 W เหตุที่พลังงานด้านออกลดลงเนื่องจากผลของอุปกรณ์ไฟฟ้า ผลจากหม้อแปลงแรงดันสูง ผลจากแท่งอิเล็กทรอนิกส์ และผลจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งผลที่ได้นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพจะอธิบายในขั้นตอนต่อไป



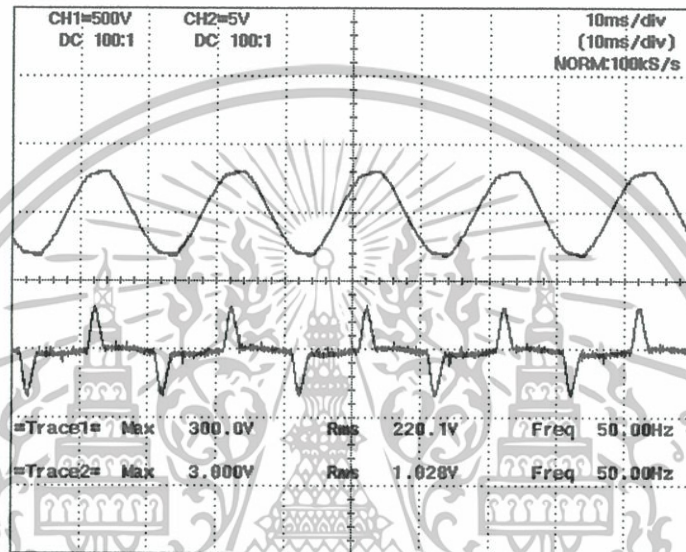
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ กับประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไอโซน



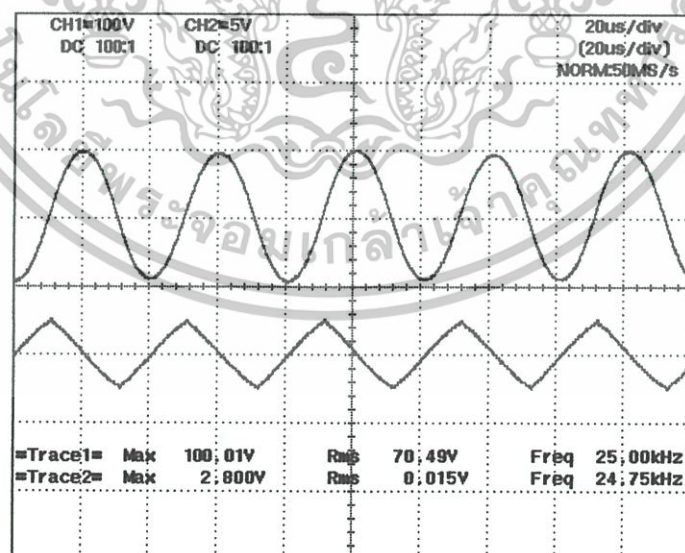
รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตก๊าซไอโซน กับประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไอโซน

จากรูปที่ 4.45 และ 4.46 เป็นการพล็อตกราฟจากการนำผลพลังงานด้านเข้าและพลังงานด้านออก มาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไอโซน ซึ่งจากการคำนวณหาประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 66.37 % คาดว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจาก ผลของหม้อแปลงแรงดันสูง ผลจากอิเล็กทรอนิกส์ และผลจากอุปกรณ์ทางไฟฟ้า แต่เมื่อมาดูผลจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นไม่ได้ชี้ชัดเจนว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบไอโซนมีการเปลี่ยนแปลง

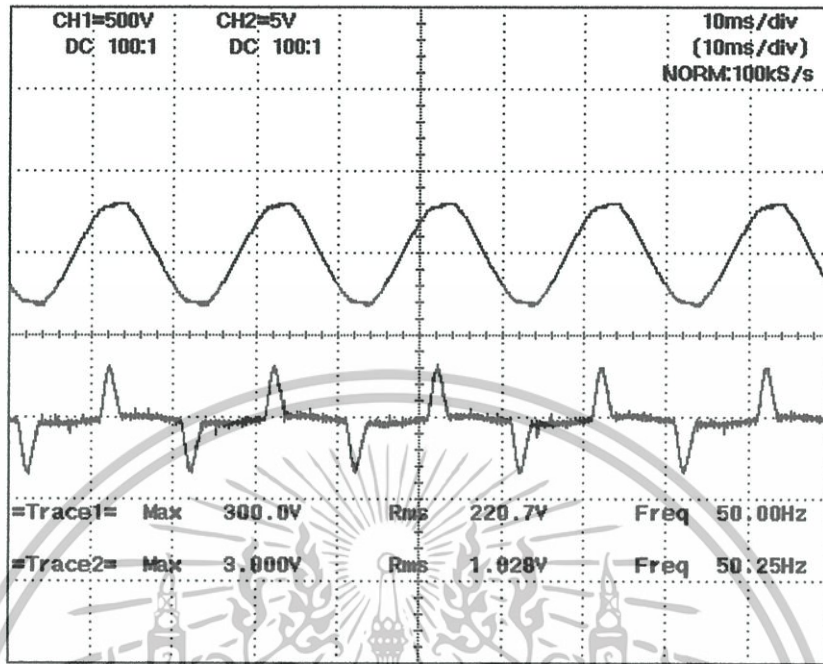
ต่อไปนี้เป็นผลการทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าระบบโอโซน ที่ตำแหน่งการวัดที่จุด A และ B ตามรูปที่ 4.5 กับกำลังไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูงที่ตำแหน่งการวัดที่จุด G และ F ตามรูปที่ 4.5 เพื่อหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของชุดสร้างก๊าซโอโซนทั้งระบบ โดยการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสในสภาวะมีโหลด ที่จ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 V 50 Hz ผ่านชุดหม้อแปลงแรงดันสูง โดยที่แรงดันด้านออกได้ 10 kV 25 kHz



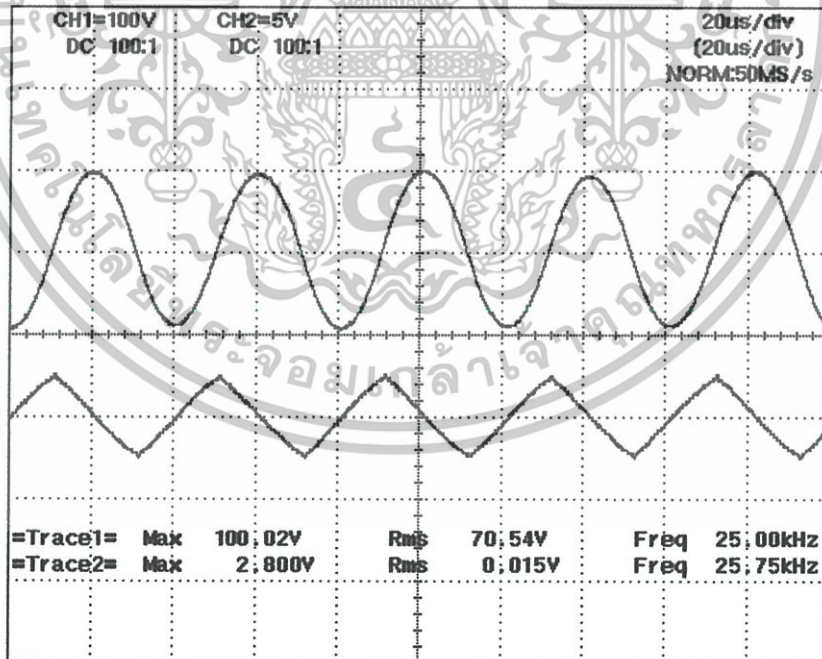
รูปที่ 4.47 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C



รูปที่ 4.48 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 15 °C

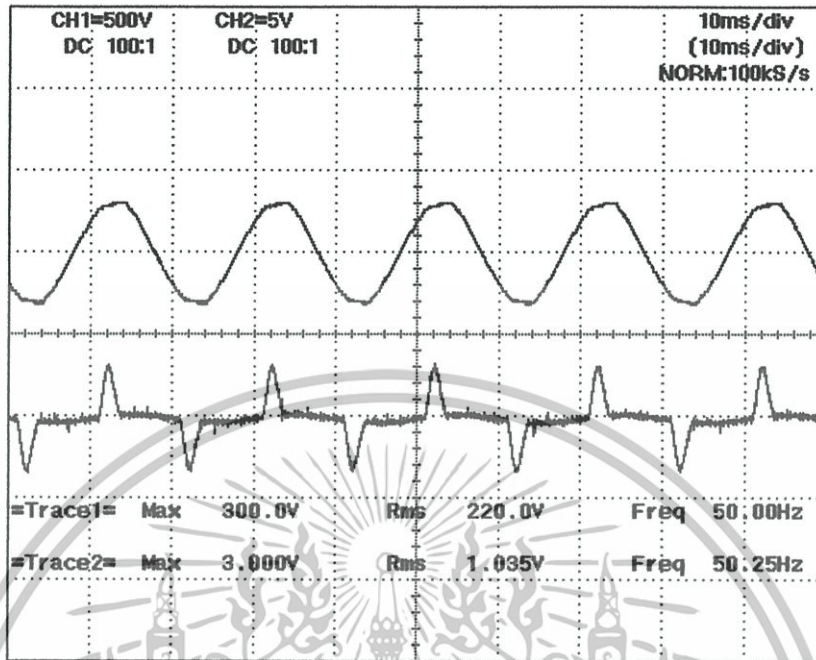


รูปที่ 4.49 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C

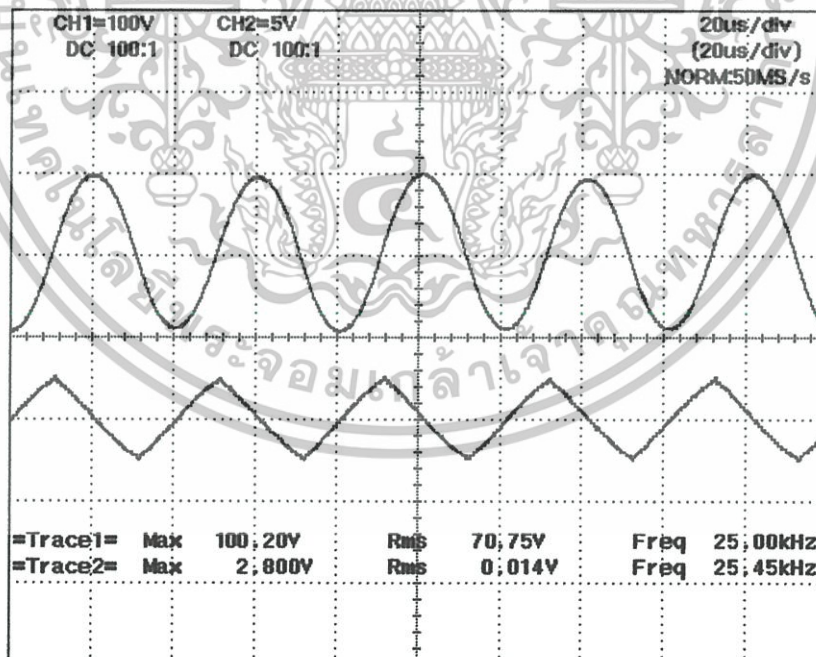


รูปที่ 4.50 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 20 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

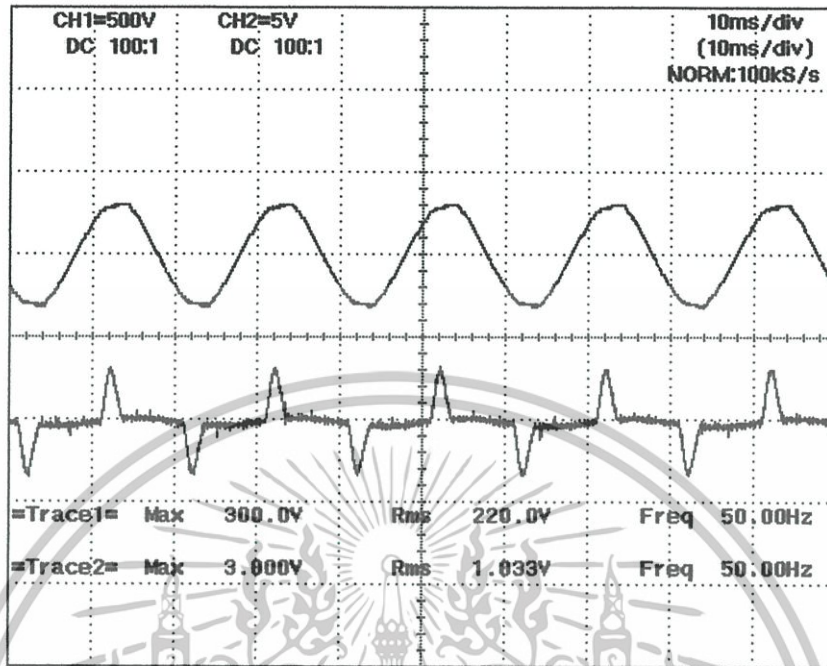


รูปที่ 4.51 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C

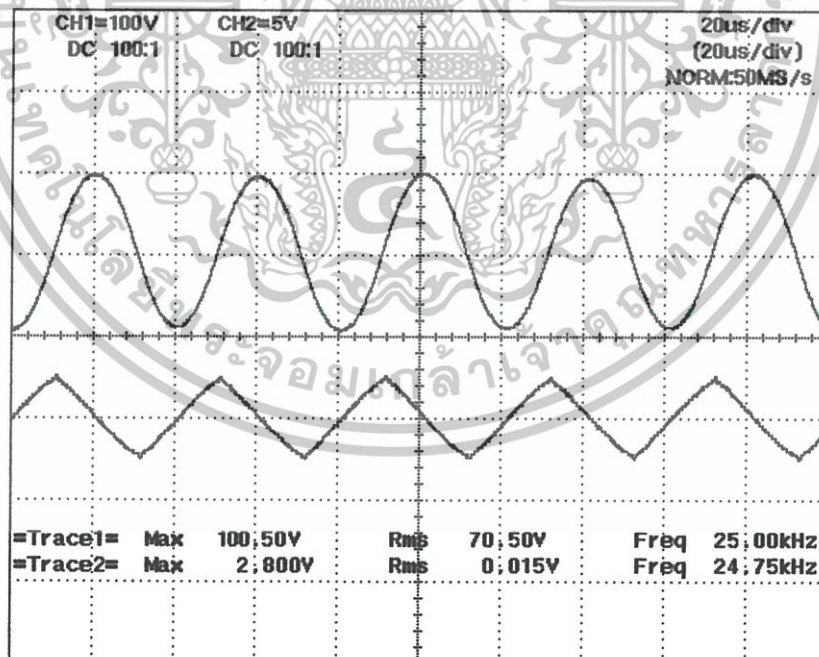


รูปที่ 4.52 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

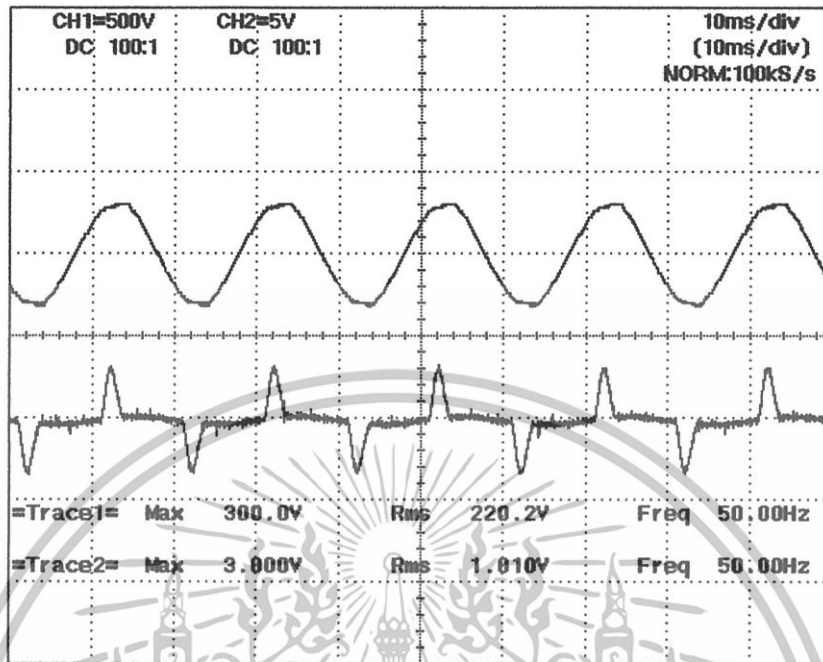


รูปที่ 4.53 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C

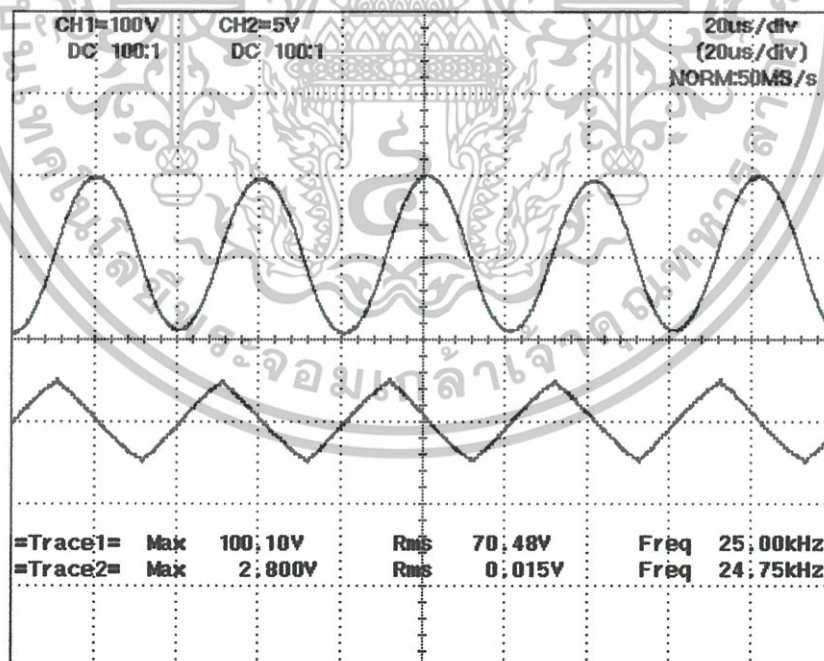


รูปที่ 4.54 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

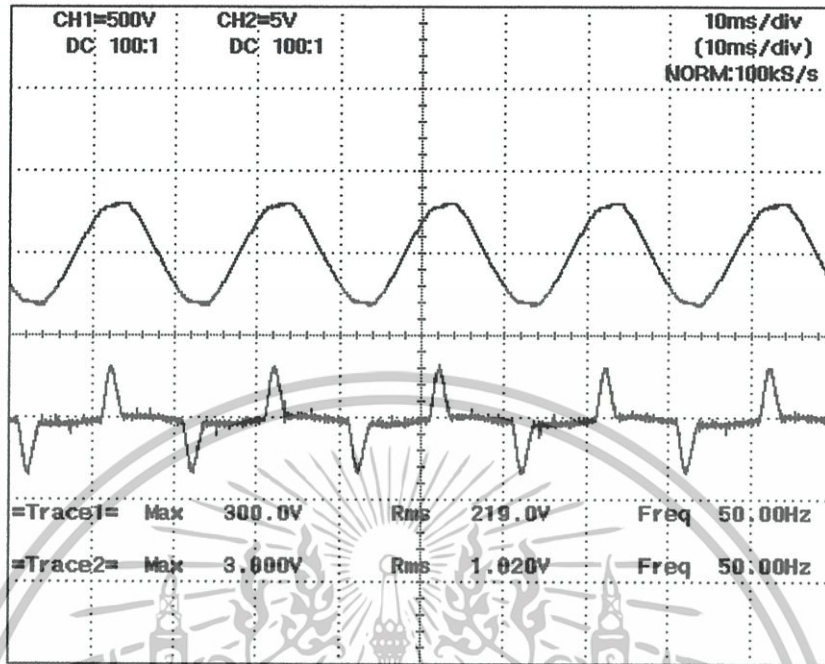


รูปที่ 4.55 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C

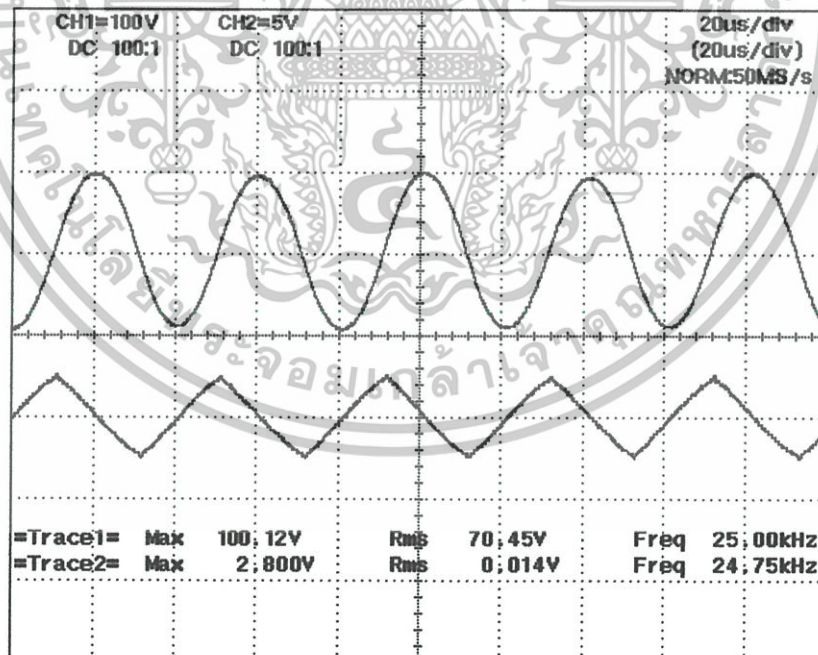


รูปที่ 4.56 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 35 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

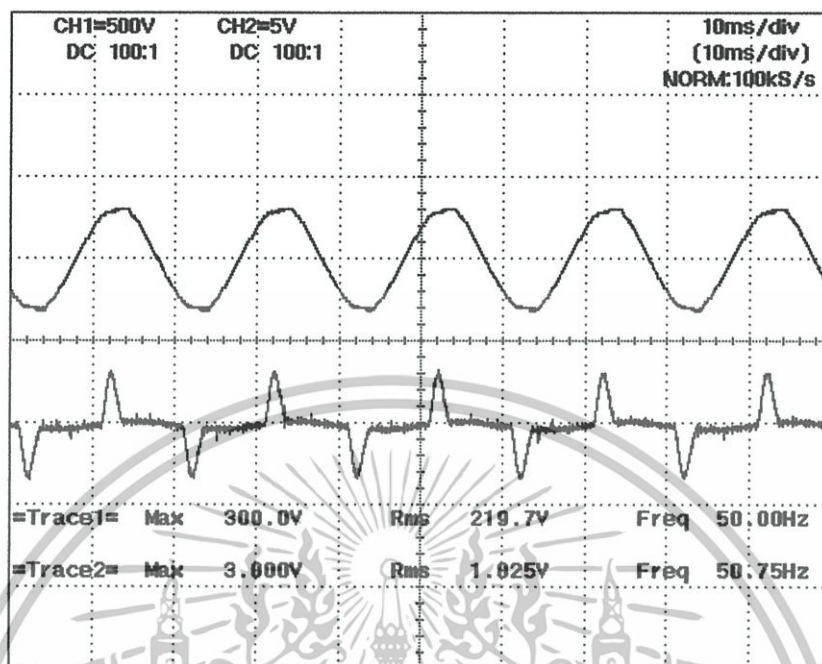


รูปที่ 4.57 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C

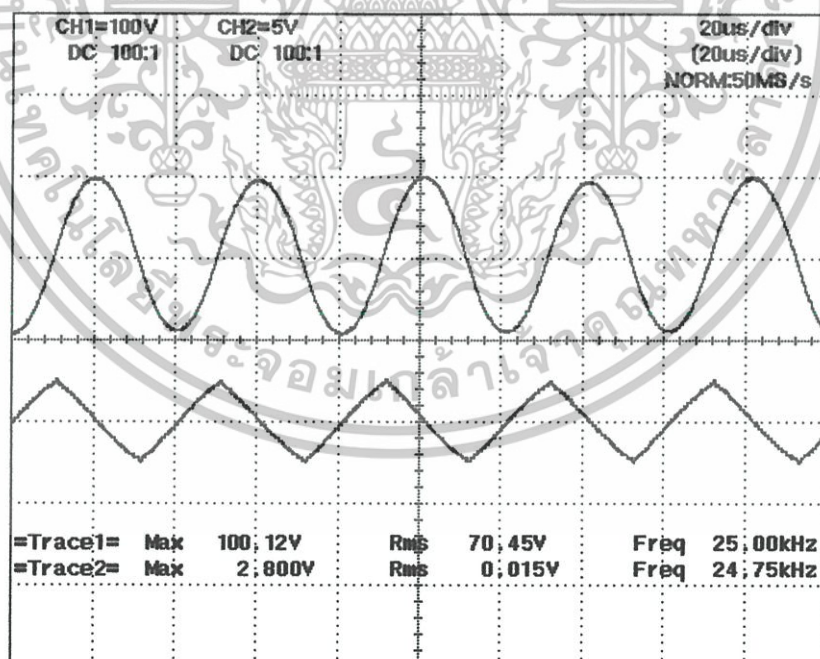


รูปที่ 4.58 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

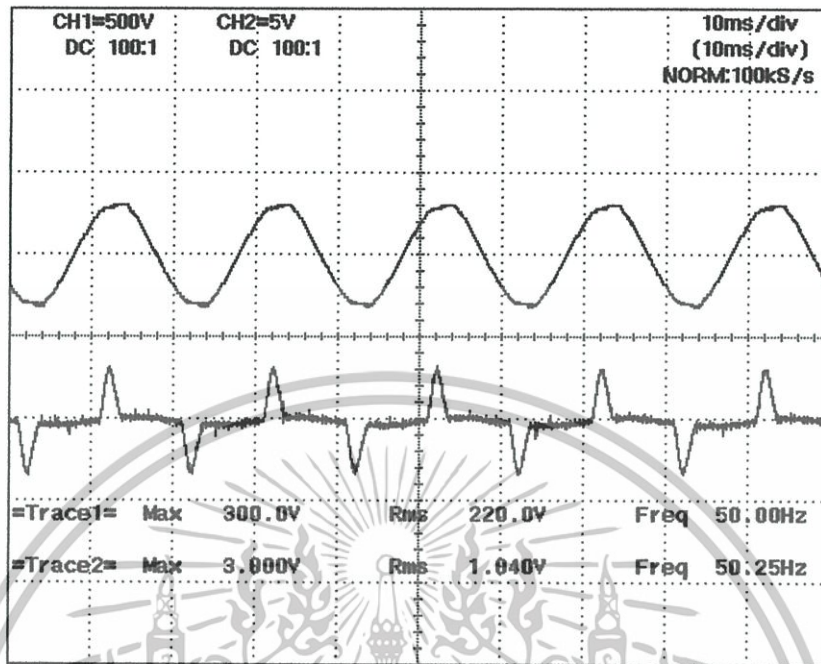


รูปที่ 4.59 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C

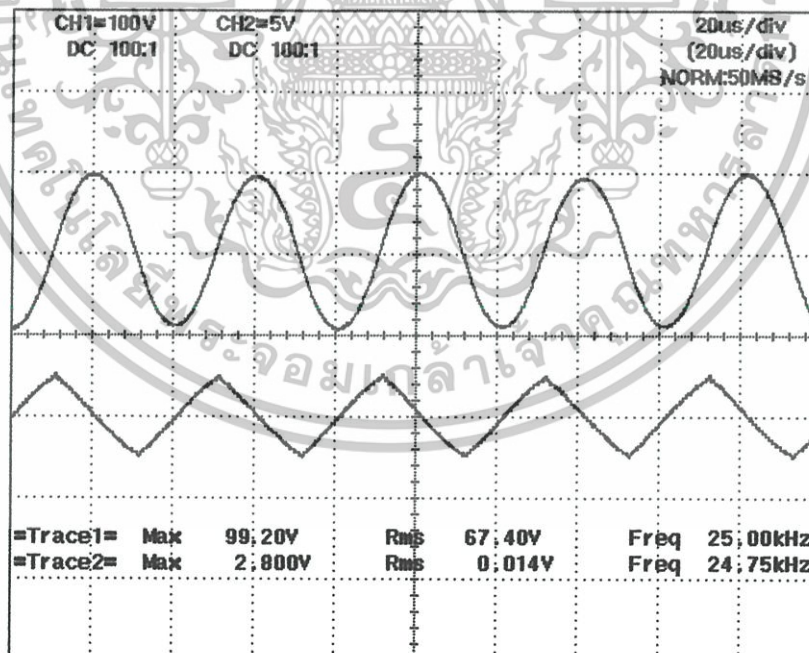


รูปที่ 4.60 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 45 °C

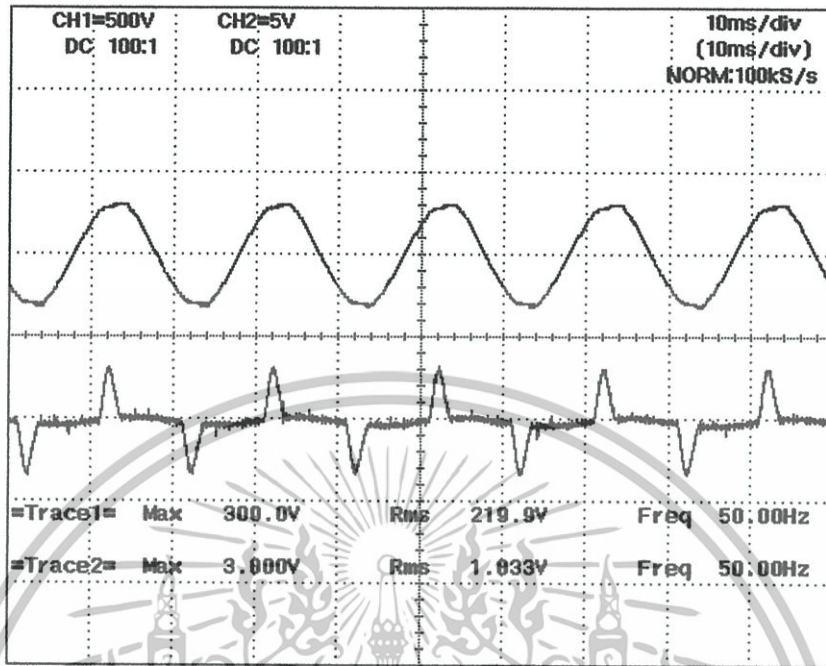
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



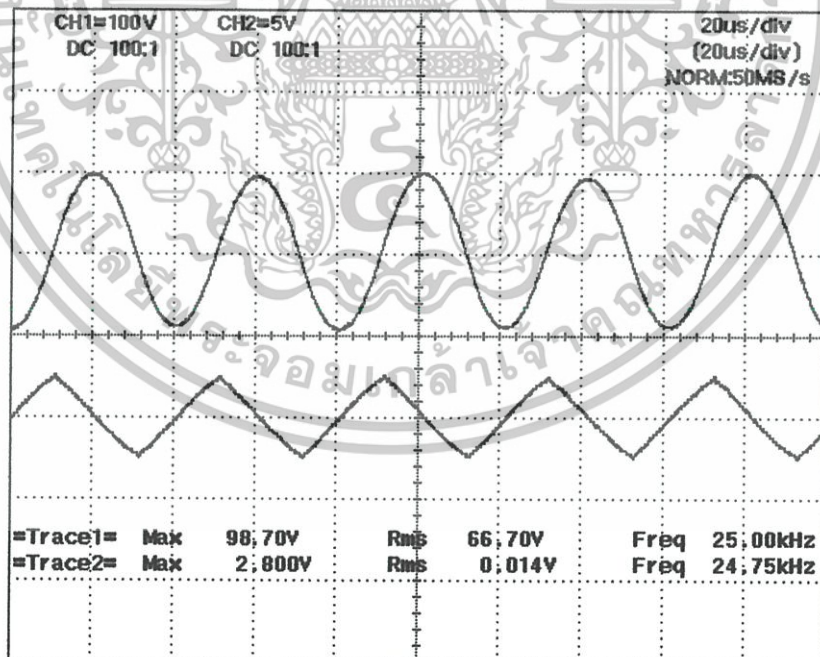
รูปที่ 4.61 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 4.62 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 50 °C

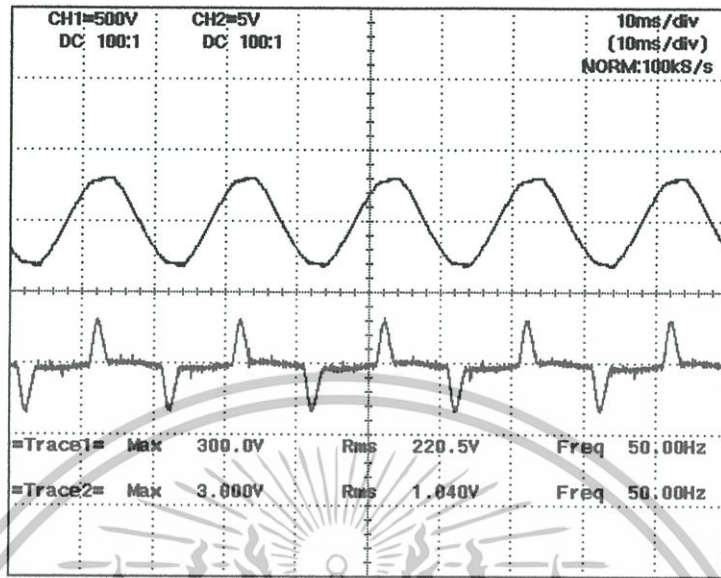


รูปที่ 4.63 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C

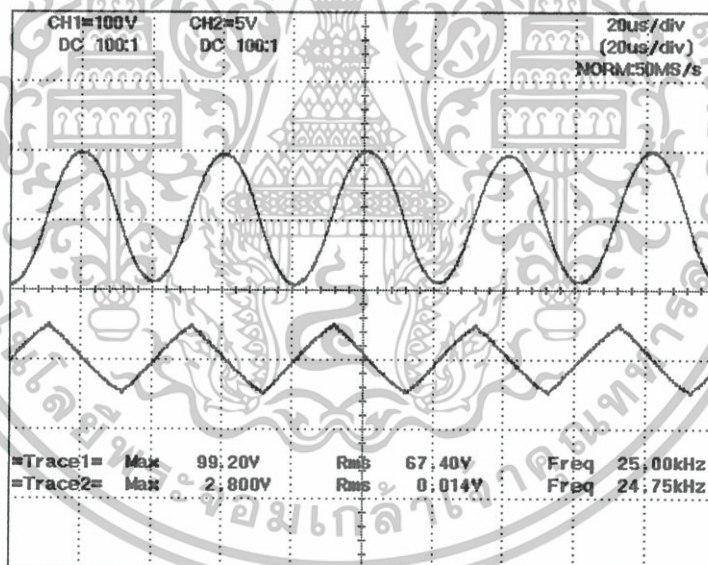


รูปที่ 4.64 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 55 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



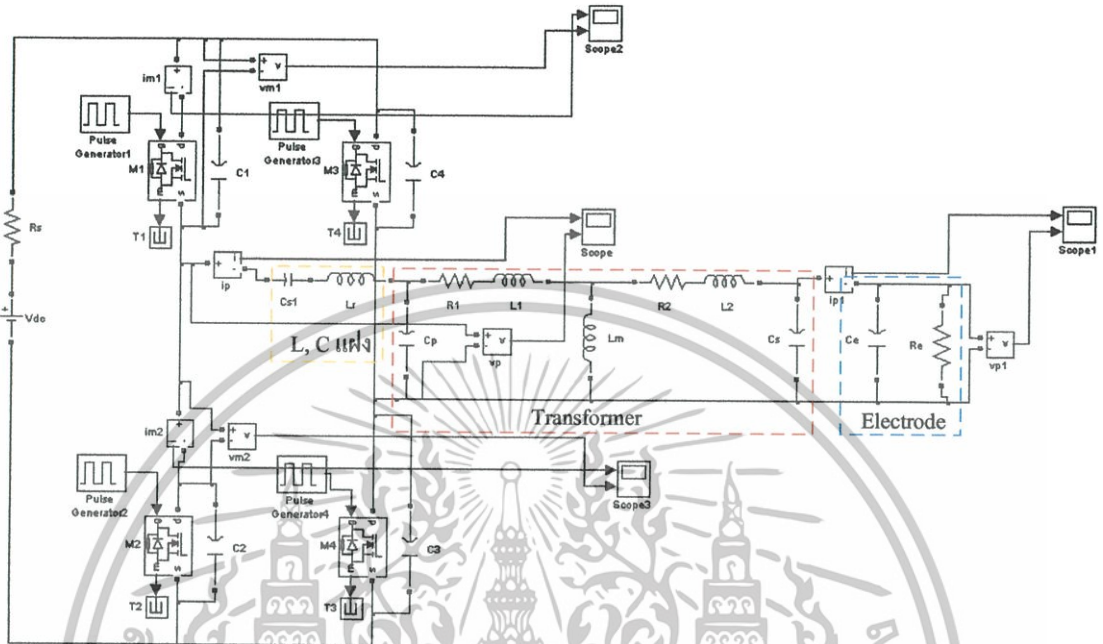
รูปที่ 4.65 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง A และกระแสที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ 4.66 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 60 °C

จากผลการทดลอง การวัดสัญญาณกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าแรงดันและกระแสด้านเข้าที่จุดตำแหน่ง A และ B ตามรูปที่ 4.5 มีความปกติเกิดการกระเพิ่มเล็กน้อย และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุทหม้อแปลงแรงดันสูงจากการวัดที่ตำแหน่ง F และ G ตามรูปที่ 4.5 พบว่าสัญญาณแรงดันอยู่ในเกณฑ์ปกติตามที่ได้ออกแบบไว้ คือ 10 kV 25 kHz

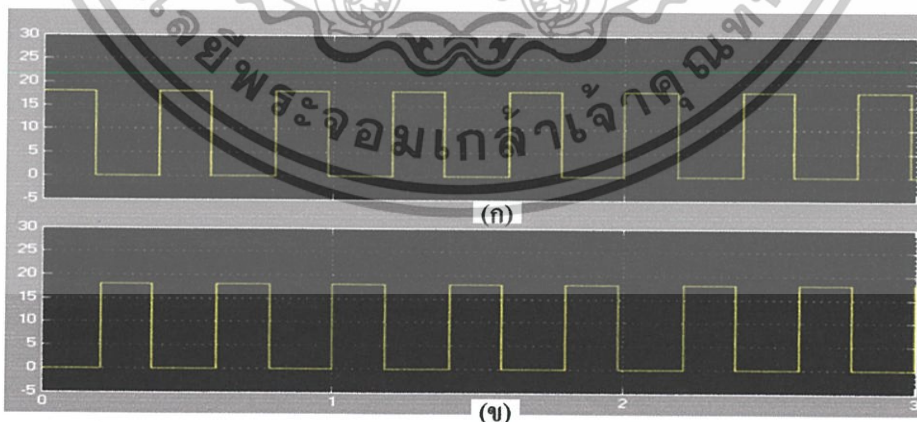
4.9 การจำลองการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน [14], [25]



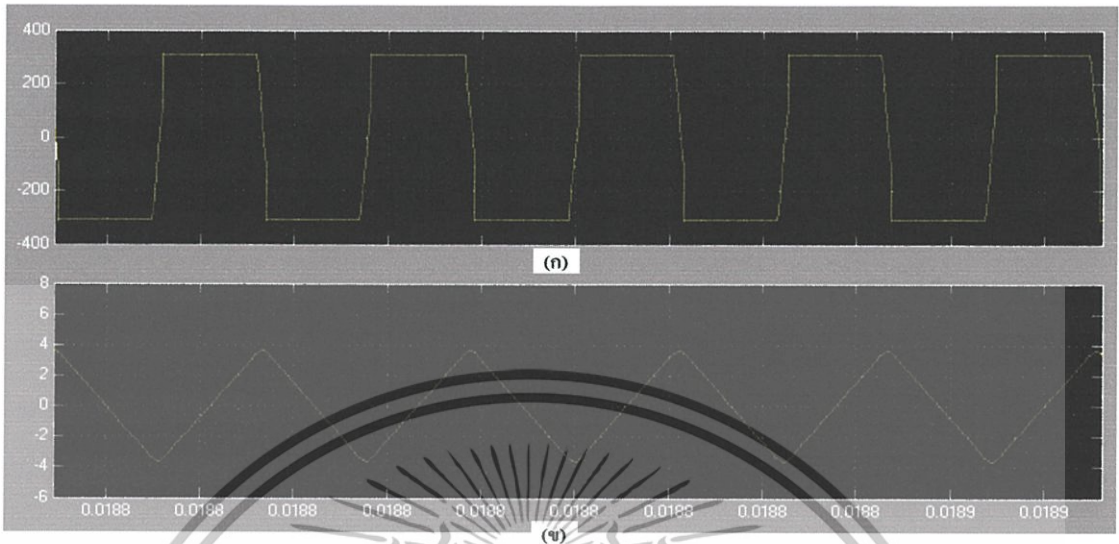
รูปที่ 4.67 วงจรจำลองการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB, Simulink

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

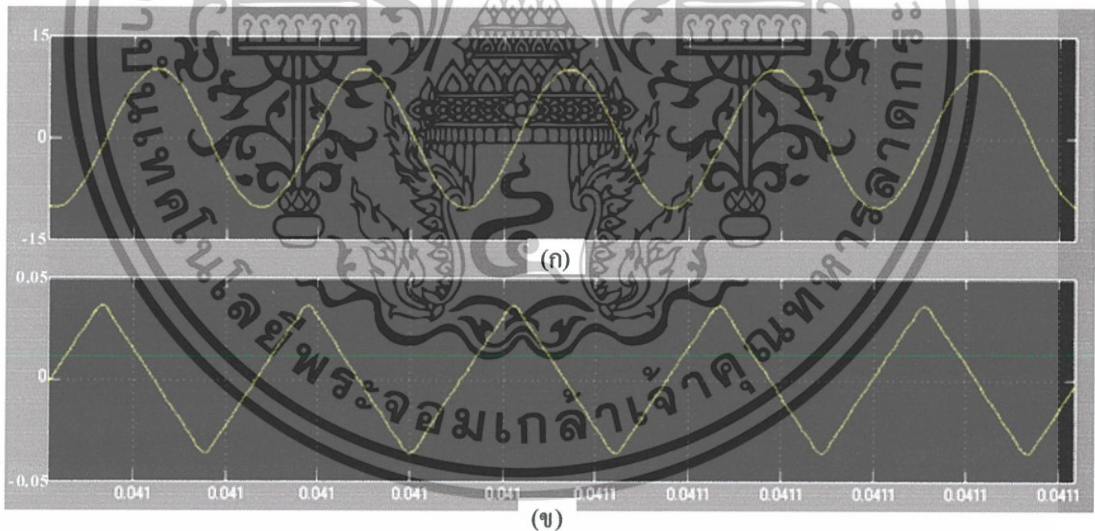
ค่าพารามิเตอร์จากวงจรจำลอง $Cs1 = 18.5 \mu F$, $Lr = 0.82 \text{ mH}$, $Cp = 2.78 \text{ nF}$, $R1 = 0.24 \Omega$, $L1 = 0.114 \text{ mH}$, $Lm = 28.21 \text{ mH}$, $R2 = 0.87 \Omega$, $L2 = 0.1389 \text{ mH}$, $Cs = 52.1 \text{ nF}$, $Ce = 24.43 \text{ nF}$, $Re = 2.63 \text{ k}\Omega$



รูปที่ 4.68 (ก) และ (ข) สัญญาณพัลส์ที่ถ่ายให้ขาเกตของมอสเฟสจากการจำลอง จากรูปสัญญาณกำหนด แนวแกว X คือ คาบเวลาของลูกคลื่น (100 $\mu s/div$) แนวแกน Y คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่น (5 V/div)

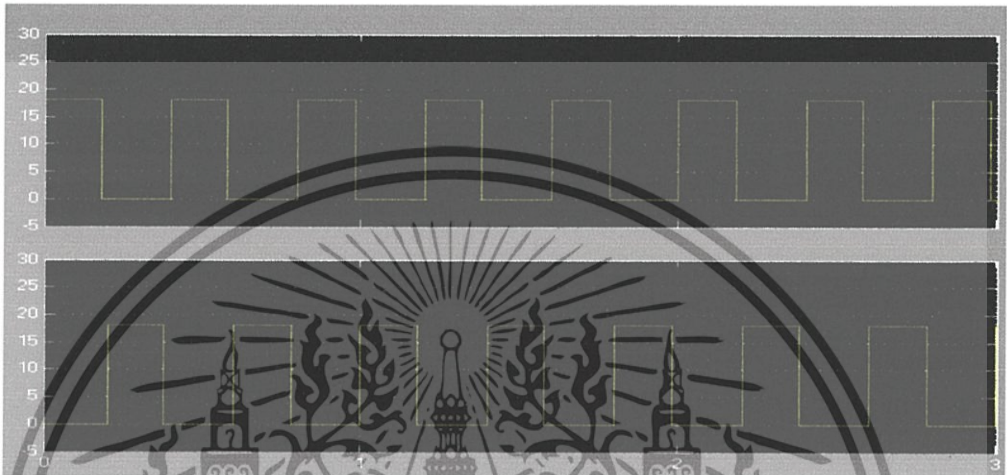


รูปที่ 4.69 (ก) แรงดันเอาต์พุตของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง
 (ข) กระแสเอาต์พุตของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง
 จากรูปสัญญาณกำหนด แนวแกน X คือ คาบเวลาของลูกคลื่น ($20 \mu\text{s}/\text{div}$)
 แนวแกน Y คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่น ((ก) $200 \text{ V}/\text{div}$, (ข) $2 \text{ A}/\text{div}$)



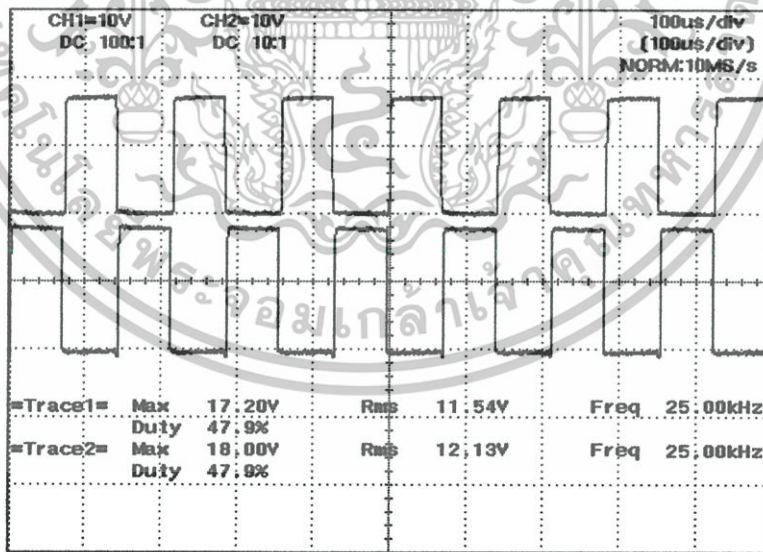
รูปที่ 4.70 (ก) แรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงจากการจำลอง
 (ข) กระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงจากการจำลอง
 จากรูปสัญญาณกำหนด แนวแกน X คือ คาบเวลาของลูกคลื่น ($20 \mu\text{s}/\text{div}$)
 แนวแกน Y คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่น ((ก) $15 \text{ V}/\text{div}$, (ข) $0.05 \text{ A}/\text{div}$)
 จากรูปที่ 4.68 , รูปที่ 4.69 และรูปที่ 4.70 เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม Math LAB จำลอง
 การทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยที่รูปที่ 4.68 (ก) และ (ข) สัญญาณ พัลส์ ที่จ่ายให้ขาเกตของ

มอสเฟสทั้งสองภาค ซึ่งจากการวัดค่าทางไฟฟ้าพบว่าสัญญาณที่จ่ายให้กับขาเกทของมอสเฟสมีความใกล้เคียงกับดังแสดงในรูปที่ 4.71 (ก) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลอง (ข) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้า



(ก) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการจำลอง

จากรูปสัญญาณกำหนด แนวแกน X คือ คาบเวลาของลูกคลื่น (100 μ s/div)
แนวแกน Y คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่น (5 V/div)

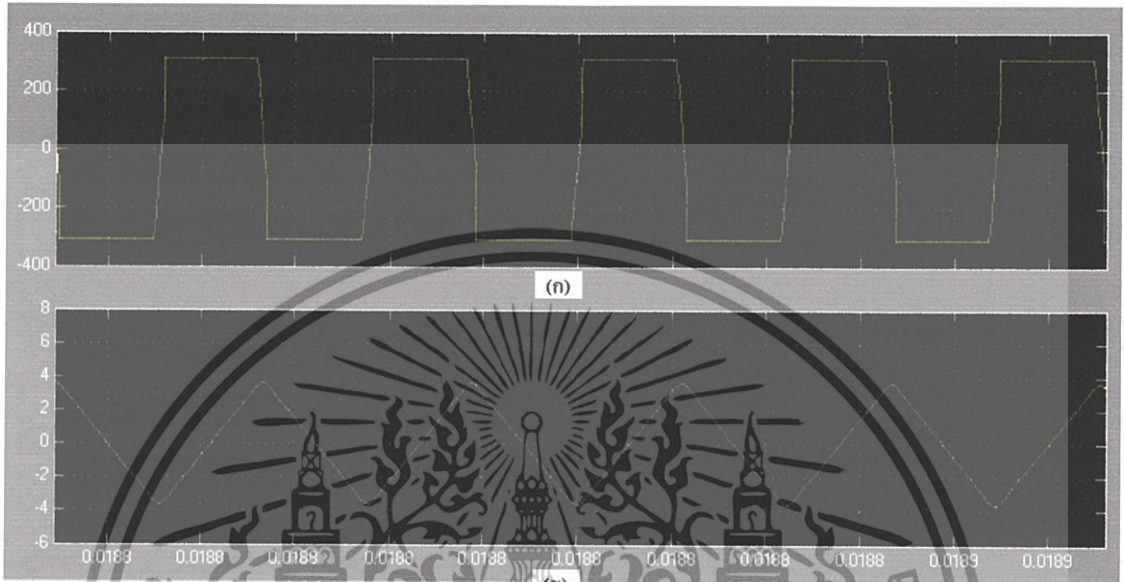


(ข) สัญญาณพัลส์ที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.71 การวัดสัญญาณ PWM ที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 4.5 ในการขับเคลื่อน ขณะไม่มีโหลด

รูปที่ 4.69 (ก) และ (ข) เป็นสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งรูปคลื่นของสัญญาณก็จะมี ความใกล้เคียงกับการวัดค่าทางไฟฟ้า แต่สัญญาณของกระแสที่วัดจริงนั้นจะ

มีสไปล์เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของกระแสในช่วงของการ turn on และ turn off ของตัวสวิตซ์ซึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.72 (ก) สัญญาณจากการจำลอง และ (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง

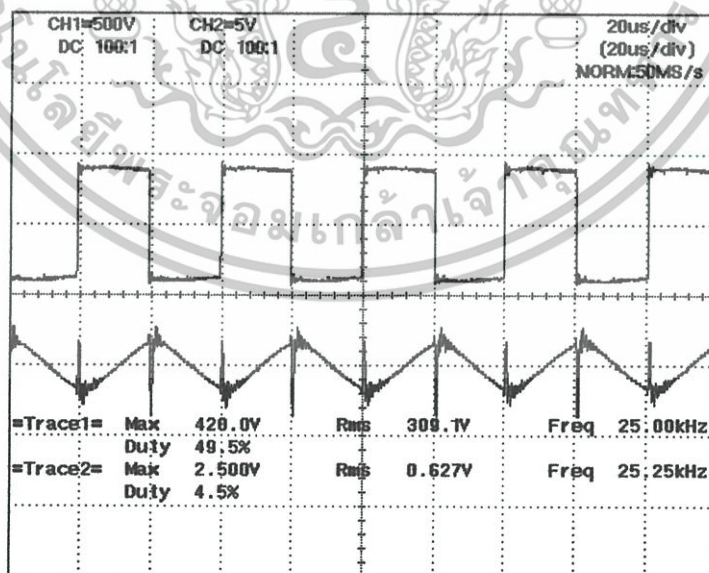


(ก) รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง

(ข) รูปสัญญาณกระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง

จากรูปสัญญาณกำหนด แนวแกน X คือ คาบเวลาของลูกคลื่น (20 µs/div)

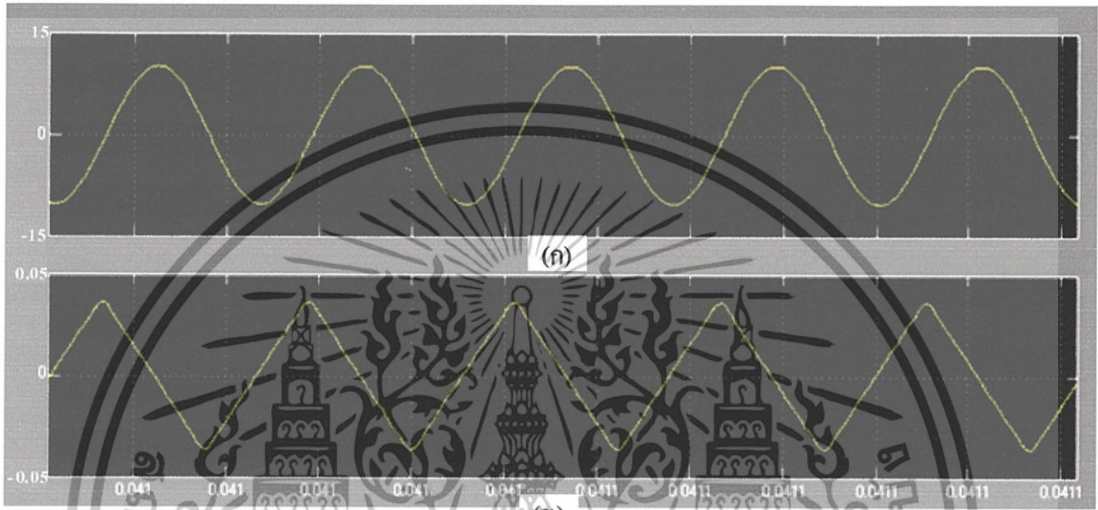
แนวแกน Y คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่น ((ก) 200 V/div, (ข) 2 A/div)



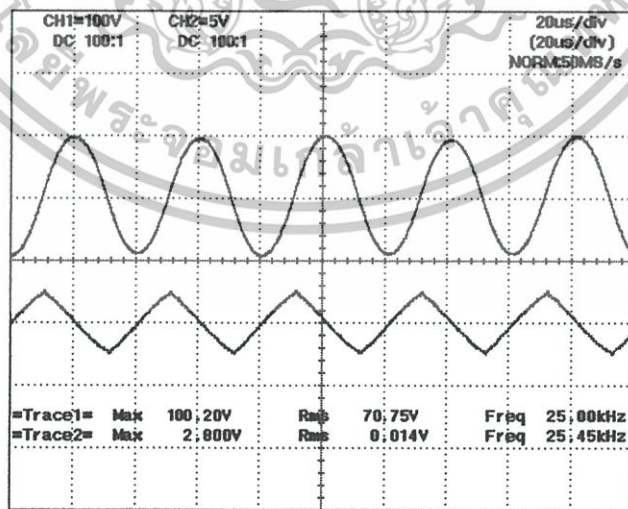
(ก) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.72 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง D และกระแสที่ตำแหน่ง E ตามรูปที่ 4.5 ขณะมีโหลด

รูปที่ 4.69 (ก) และ (ข) เป็นสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูงที่ได้จากการจำลองซึ่งค่าบนจะเป็นรูปสัญญาณกระแสส่วนด้านล่างจะเป็นรูปของแรงดัน โดยรูปคลื่นสัญญาณมีความใกล้เคียงกับการวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.73 (ก) สัญญาณจากการจำลอง และ (ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า



(ก) รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุทหม้อแปลงจากการจำลอง
 (ข) รูปสัญญาณกระแสเอาต์พุทของหม้อแปลงจากการจำลอง
 จากรูปสัญญาณกำหนด แนวแกน X คือ คาบเวลาของลูกคลื่น (20 μ s/div)
 แนวแกน Y คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่น ((ก) 15 V/div, (ข) 0.05 A/div)



(ข) สัญญาณที่ได้จากการวัดจริงทางไฟฟ้า

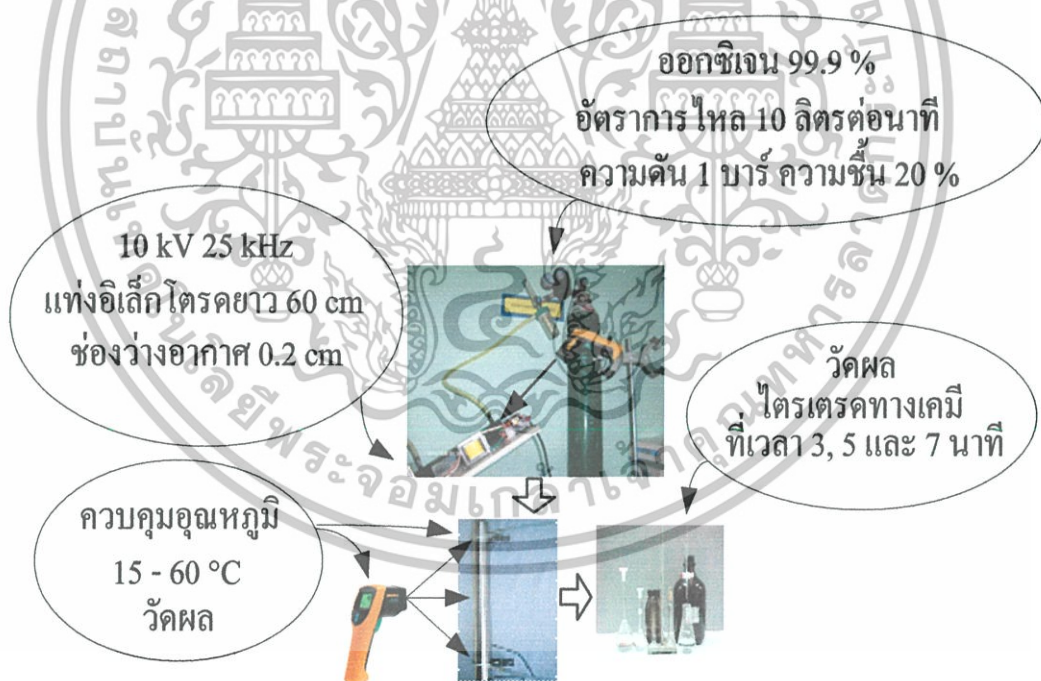
รูปที่ 4.73 การวัดสัญญาณ แรงดันที่ตำแหน่ง F และกระแสที่ตำแหน่ง G ตามรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

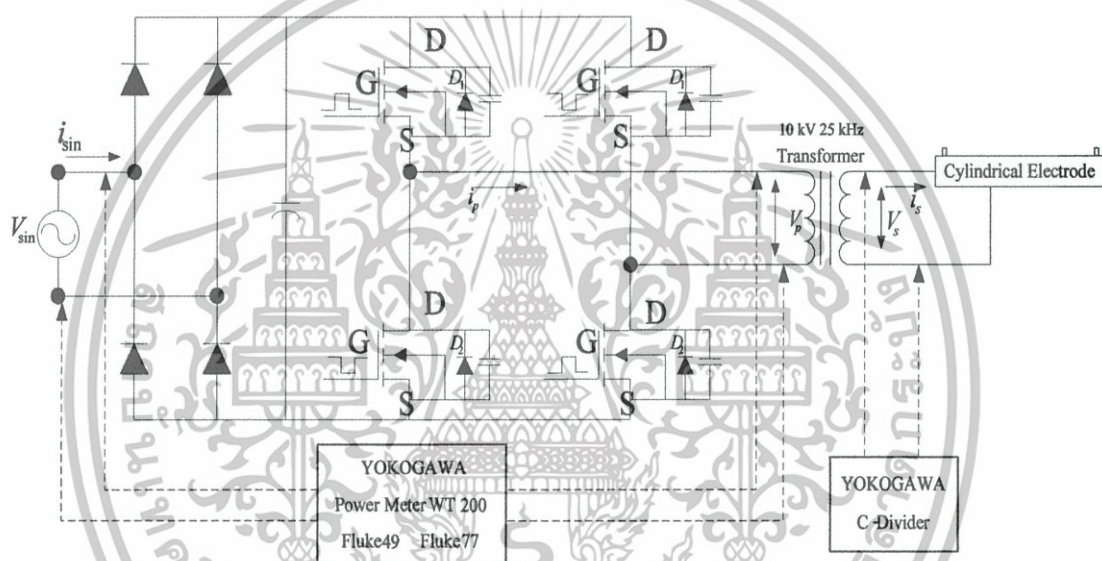
จากบทที่ 4 กระบวนการในทดลองคือควบคุมองค์ประกอบตัวแปรต่างๆให้คงที่ แล้วปรับอุณหภูมิช่วง 15 - 60 °C ที่ละค่าแล้วทำการวัดปริมาณโอโซน โดยวัดปริมาณโอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำค่าต่างๆมาวิเคราะห์โดยนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์เงื่อนไขต่างๆ ในการทดลองที่ผ่านมา จุดประสงค์เพื่อศึกษาและนำไปประยุกต์กับการใช้งานจริงของระบบโอโซน เรื่องที่วิเคราะห์ คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการผลิตโอโซน กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอัตราการผลิตโอโซน ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบโอโซนต่อการผลิตโอโซน สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซโอโซน เป็นต้น



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะกระบวนการทดลองและจุดสำคัญในขั้นตอนการทดลอง

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

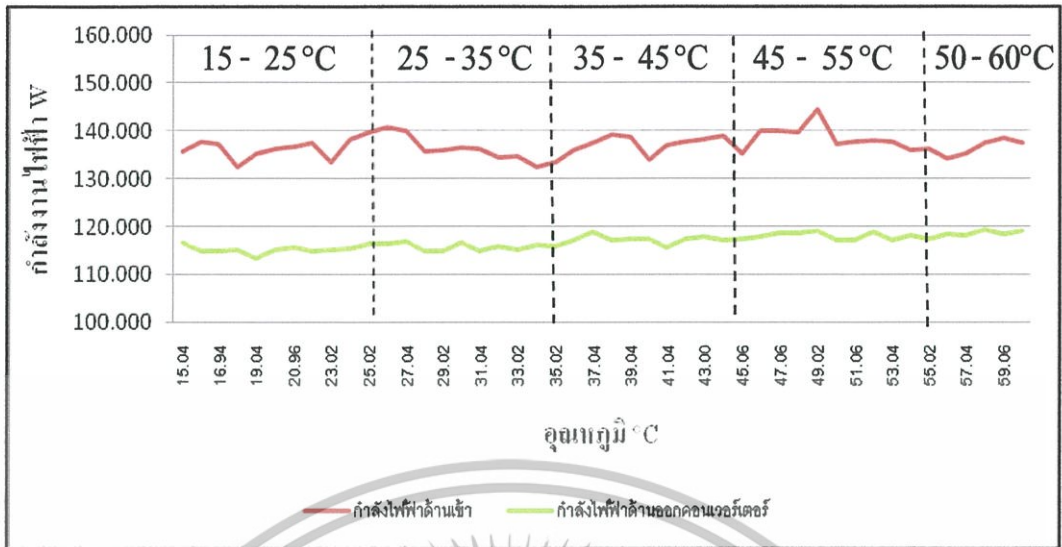
นำผลการทดลองจากบทที่ 4 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุท เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ และกำลังไฟฟ้าที่ระบบ ไอ โซน ใช้ทั้งหมด เพื่อที่นำไปศึกษาหาจุดที่ดีในการใช้ระบบ ไอ โซน ได้ประสิทธิภาพคุ้มค่าที่สุด ในงานวิจัยทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือดังนี้ Scope Yokogawa, Fluke 41, Fluke 77, Power Meter WT 200, C divider , Probe x 100 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะทำการอธิบายแบ่งออกเป็นช่วงๆ โดยที่จะนำมาอ้างอิงกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรด และอัตราการผลิตก๊าซไอโซน ตำแหน่งในการวัดผลการทดลองแสดงตามรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาท์พุทโดยใช้เครื่องวัด

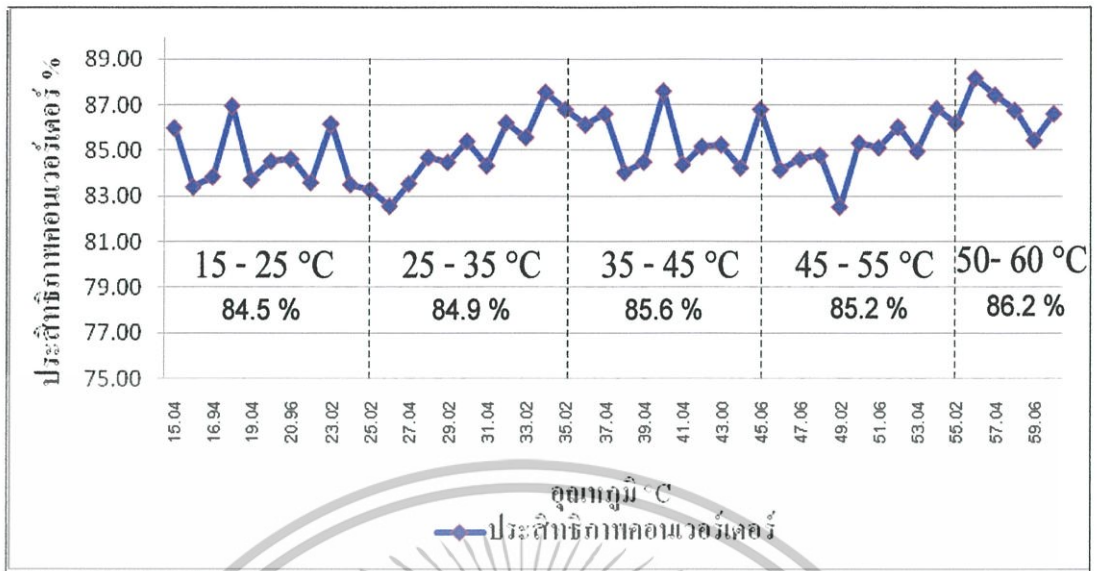
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้าส่วนด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองในบทที่ 4. ได้กล่าวถึงการวัดและการบันทึกผลของระบบ ไอ โซน โดยรวม และได้นำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรดช่วงอุณหภูมิ 15 - 60 °C ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นช่วงๆ ดังนี้ 15 - 25 °C , 25 - 35 °C, 35 - 45 °C, 45 - 55 °C และ 50 - 60 °C ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดประโยชน์มากที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ระบบ ไอ โซน กับงานทุกชนิด



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองได้แบ่งผลอุณหภูมิออกเป็น 5 ช่วง ดังแสดงตามรูปที่ 5.3 พบว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจร ไฟฟ้าชุดคอนเวอร์เตอร์สำหรับแปลงความถี่ให้เป็น 25 kHz มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นปริมาณกระแสจะเป็นตัวบ่งบอกถึงพลังงานที่ได้ใช้ในการผลิตไอโซน อธิบายเป็นช่วงๆ ได้ว่า ช่วงที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.32 W และกำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 115.18 W ช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.29 W และกำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 115.74 W ช่วงที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 35 - 45 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.88 W และกำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 117.15 W ช่วงที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 45 - 55 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 138.37 W และกำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 117.9 W และช่วงสุดท้ายช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.87 W และกำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 118.01 W จะเห็นได้ว่าช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C จะใช้พลังงานเฉลี่ยด้านเข้าน้อยที่สุด แต่พลังงานด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์ช่วงที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C กับเป็นช่วงที่ใช้พลังงานคอนเวอร์เตอร์น้อยที่สุด จะอธิบายเรื่องประสิทธิภาพในขั้นต่อไป



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองได้แบ่งผลอุณหภูมิออกเป็น 5 ช่วง ดังแสดงตามรูปที่ 5.4 ซึ่งทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากการวัดค่ากำลังทางไฟฟ้าทางด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์ ขณะจ่ายกำลังงานเพื่อการผลิตโอโซน พบว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจรไฟฟ้าชุดคอนเวอร์เตอร์สำหรับแปลงความถี่ให้เป็น 25 kHz มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง 82 – 89 % ประสิทธิภาพเฉลี่ยของอุณหภูมิตั้งแต่ 15 - 60 °C อยู่ที่ 85.23 % ดังนั้นเป็นการชี้ให้เห็นว่าปริมาณกระแสเป็นตัวบ่งบอกถึงกำลังงานที่ได้ใช้ในการผลิตโอโซน ทำการอธิบายเป็นช่วงๆ ได้ว่า ช่วงที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.32 W กำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 115.18 W และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 84.5 % ช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.29 W กำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 115.74 W และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 84.9 % ช่วงที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 35 - 45 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.88 W กำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 117.15 W และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 85.6 % ช่วงที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 45 - 55 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 138.37 W กำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 117.9 W และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 85.2 % ช่วงสุดท้ายช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C ได้ใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านเข้าเฉลี่ยอยู่ที่ 136.87 W กำลังไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ที่ 118.01 W และมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 86.2 % จะเห็นได้ว่าช่วงที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C ประสิทธิภาพน้อยที่สุด เกิดการสูญเสียมากที่สุด แต่ประสิทธิภาพด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์ช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C กลับเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพมากที่สุด เกิดการสูญเสียมากที่สุด จะอธิบายเรื่องประสิทธิภาพในการเกิดปริมาณก๊าซโอโซนในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์

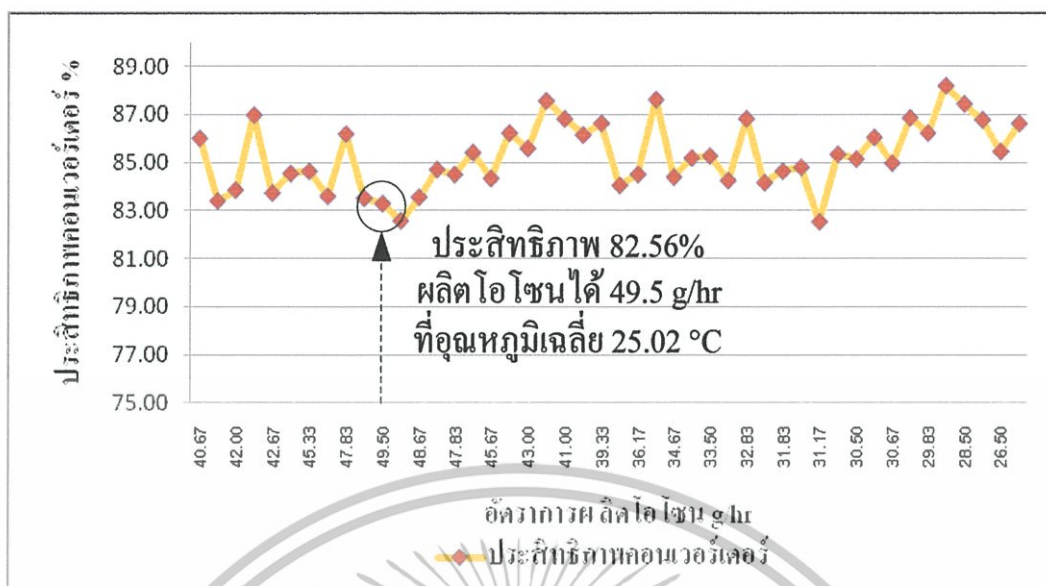
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า	กระแสด้านเข้า	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	แรงดันด้านออก	กระแสด้านออก	กำลังไฟฟ้าด้านออก	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาณไอโซนเฉลี่ย (g/hr)
	(V)	(A)	(W)	(kV)	(A)	(W)		
แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์					
15.04	220.1	1.0275	135.692	309.2	0.629	116.692	86.00	40.67
16.02	220	1.0425	137.610	308	0.621	114.761	83.40	41.17
16.94	219.7	1.04	137.093	309.5	0.619	114.948	83.85	42.00
18.02	219	1.0075	132.386	310	0.619	115.134	86.97	43.17
19.04	220	1.025	135.300	309.5	0.61	113.277	83.72	42.67
20.04	220.7	1.0275	136.062	309.2	0.62	115.022	84.54	44.33
20.96	221	1.03	136.578	309.2	0.623	115.579	84.62	45.33
22.04	219.7	1.0425	137.422	309.3	0.619	114.874	83.59	47.17
23.02	219.7	1.0125	133.468	308.7	0.621	115.022	86.18	47.83
24.04	220	1.0475	138.27	308.9	0.623	115.467	83.51	48.67
25.02	220	1.0575	139.59	309	0.627	116.246	83.28	49.50
25.98	220	1.06672	140.807	309.5	0.626	116.248	82.56	49.17
27.04	220.8	1.05595	139.892	309.7	0.629	116.881	83.55	48.67
28.04	220	1.0275	135.63	308.8	0.62	114.874	84.7	48.67
29.02	221	1.025	135.915	309.2	0.619	114.837	84.49	47.83
30.04	220.2	1.0325	136.414	309.2	0.628	116.507	85.41	47.33
31.04	220.2	1.03	136.084	308	0.621	114.761	84.33	45.67
31.98	220	1.0175	134.310	309.3	0.624	115.802	86.22	44.50
33.02	219.9	1.02	134.579	309.1	0.621	115.171	85.58	43.00
34.02	220.3	1.0025	132.510	309.4	0.625	116.025	87.56	42.33
35.02	220.2	1.01	133.441	308.9	0.625	115.838	86.81	41.00
36.04	220.3	1.0275	135.815	309.5	0.63	116.991	86.14	40.17
37.04	220.1	1.040	137.342	309.2	0.6413	118.974	86.63	39.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์

อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	แรงดัน ด้านเข้า (V)	กระแส ด้านเข้า (A)	กำลังไฟฟ้า ด้านเข้า (W)	แรงดัน ด้านออก (kV)	กระแส ด้านออก (A)	กำลังไฟฟ้า ด้านออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาณ ไอโซน เฉลี่ย (g/hr)
	แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์				
37.98	220	1.055	139.260	308	0.6333	117.034	84.04	38.17
39.04	219.7	1.053	138.741	309.5	0.6313	117.232	84.50	36.17
40.06	219	1.020	134.028	310	0.6313	117.422	87.61	35.17
41.04	220	1.038	136.950	309.5	0.6223	115.561	84.38	34.67
42.04	220.7	1.040	137.717	309.2	0.6323	117.304	85.18	34.00
43.00	221	1.043	138.236	309.2	0.6353	117.861	85.26	33.50
44.02	219.7	1.055	139.070	309.3	0.6313	117.157	84.24	33.17
45.06	219.7	1.025	135.116	308.7	0.6333	117.300	86.81	32.83
46.04	220	1.060	139.920	308.9	0.6353	117.747	84.15	32.00
47.06	220	1.061	140.052	309	0.6393	118.526	84.63	31.83
48.04	220	1.059	139.788	309.5	0.6383	118.532	84.79	31.17
49.02	220.8	1.090	144.403	309.7	0.6413	119.166	82.52	31.17
50.04	220	1.040	137.280	308.8	0.6323	117.153	85.34	30.83
51.06	221	1.038	137.573	309.2	0.6313	117.119	85.13	30.50
52.02	220.2	1.045	138.065	309.2	0.6403	118.788	86.04	30.67
53.04	220.2	1.043	137.735	308	0.6333	117.034	84.97	30.67
54.06	220	1.030	135.960	309.3	0.6363	118.085	86.85	30.17
55.02	219.9	1.033	136.228	309.1	0.6333	117.452	86.22	29.83
56.00	220.3	1.015	134.163	309.4	0.6373	118.308	88.18	30.00
57.04	220.2	1.023	135.093	308.9	0.6373	118.117	87.43	28.50
58.02	220.3	1.040	137.467	309.5	0.6423	119.275	86.77	27.83
59.06	221	1.045	138.501	310	0.6363	118.352	85.45	26.50
60.04	220.5	1.040	137.526	309.1	0.6423	119.121	86.62	26.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

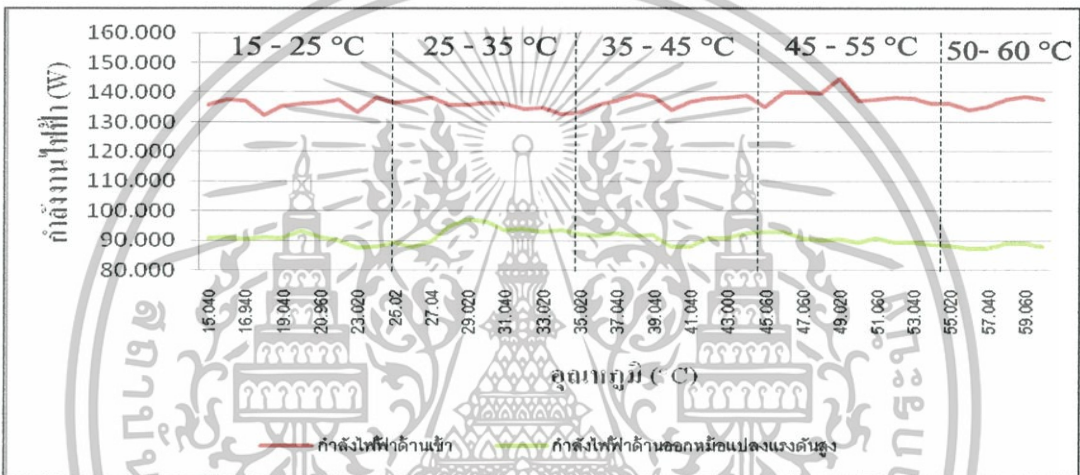


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลอง ดังแสดงตามรูปที่ 5.5 ซึ่งทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ จากการวัดค่ากำลังทางไฟฟ้าทางเข้าและด้านออกคอนเวอร์เตอร์ ขณะจ่ายกำลังงานเพื่อการผลิต ไอโซน พบว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจรไฟฟ้าชุดคอนเวอร์เตอร์สำหรับแปลงความถี่ให้เป็น 25 kHz มีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง 82 – 89 % ประสิทธิภาพเฉลี่ยของอุณหภูมิตั้งแต่ 15 – 60 °C อยู่ที่ 85.23 % มาเปรียบเทียบกับผลการอัตราผลิตก๊าซ ไอโซนจากการวัดปริมาตรก๊าซ ไอโซน โดยการไหลตรงทางเคมี จากผลการทดลองพบว่า อัตราการผลิตก๊าซ ไอโซน ได้สูงสุด 49.5 g/hr ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ 82.56 % ที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรด 25.02 °C แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยรวมเปรียบเทียบกับอัตราการผลิต ไอโซนพบว่าประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในช่วง 82 – 89 % ซึ่งประสิทธิภาพที่ยอมรับได้นั้น เป็นประสิทธิภาพที่เกิดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีแนวโน้มแน่นอน ซึ่งส่วนหนึ่งที่ส่งผลให้เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจากการไฟฟ้า และเกิดจากสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งปัญหาพวกนี้น่าจะทำการแก้ไขได้โดยออกแบบตัวตรวจจับและกรองสัญญาณรบกวน แต่ในงานวิจัยนี้ไม่มุ่งเน้นในการแก้ปัญหานี้

5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้าส่วนด้านเข้าและด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูง

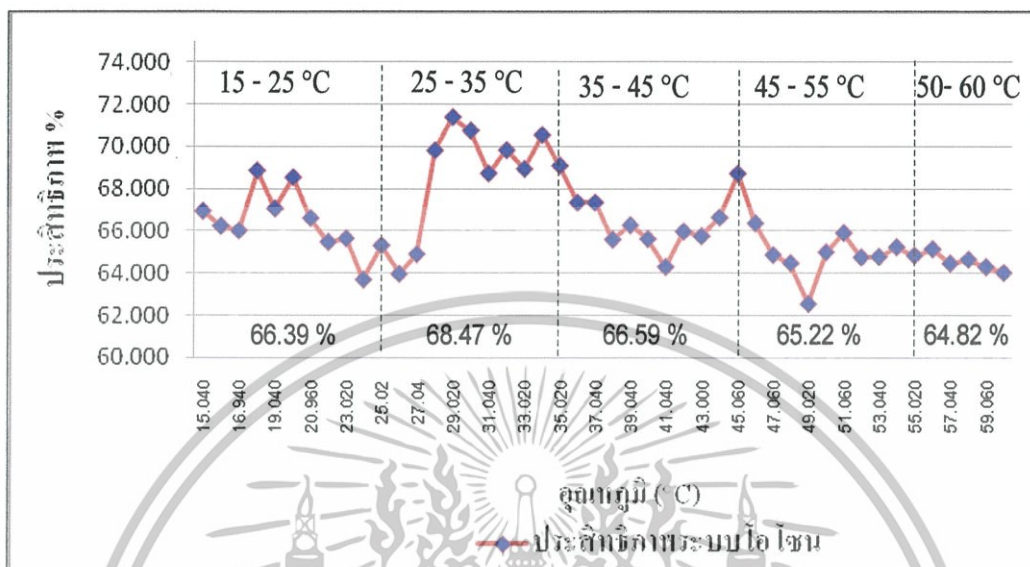
จากผลการทดลองในบทที่ 4. ได้กล่าวถึงการวัดและการบันทึกผลของระบบโอโซนโดยรวม และได้นำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรดช่วงอุณหภูมิ 15 - 60 °C ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นช่วงๆ ดังนี้ 15 - 25 °C , 25 - 35 °C, 35 - 45 °C, 45 - 55 °C และ 50 - 60 °C ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดประโยชน์มากที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ระบบโอโซนกับงานทุกชนิด



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ย กับกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปที่ 5.6 เป็นการพล็อตกราฟที่ได้จากข้อมูลการทดลอง ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าจากการไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ผลการทดลองได้แบ่งอุณหภูมิเฉลี่ยออกเป็น 5 ช่วง พบว่าข้อมูลจากการบันทึกผลกำลังไฟฟ้าด้านออก เมื่อนำมาพล็อตกราฟมีลักษณะการกินกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 85 - 100 W ซึ่งได้นำข้อมูลจากกำลังไฟฟ้าด้านเข้าระบบมาพล็อตเพื่อเปรียบเทียบ กำลังไฟฟ้าด้านเข้ามีการกินมีการใช้กำลังไฟฟ้าช่วง 130 - 150 W แสดงให้เห็นเบื้องต้นได้ว่า เกิดภาวะการสูญเสียกำลังไฟฟ้าค่อนข้างมาก แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าทั้งระบบ กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดที่เกิดขึ้น พบว่าผลของอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จากรูป 5.4 แสดงให้เห็นว่ากรณีที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่ามากขึ้นหรือน้อยลง ประสิทธิภาพก็ไม่ได้แปรผันตามหรือแปรผกผันตามค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าการสูญเสียและประสิทธิภาพจะอธิบายในขั้นตอนต่อไป

ทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ ไอโซน โดยรวมเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ย กับประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปที่ 5.7 เป็นการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการผลิตก๊าซไอโซน กับผลของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ขณะจ่ายกำลังงานเพื่อการผลิตไอโซน พบว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจรไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบไอโซนโดยรวมอยู่ในช่วง 62 – 72 % ประสิทธิภาพเฉลี่ยตั้งแต่ 15 - 60 °C อยู่ที่ 66.37 % ทำการอธิบายเป็นช่วงๆ ได้ว่า ช่วงที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 66.39 % ช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 68.47 % ช่วงที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 35 - 45 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 66.59 % ช่วงที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 45 - 55 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 65.22 % และช่วงสุดท้ายช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 64.82 % เห็นได้ว่าช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมเป็นช่วงที่ดีที่สุด เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด เหมาะกับการนำไปใช้งานในการสร้างระบบไอโซนสำหรับอุตสาหกรรม ซึ่งช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C กับเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพของระบบไอโซน โดยรวมน้อยที่สุด เกิดการสูญเสียมากที่สุด

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกหือแปลงแรงดันสูง

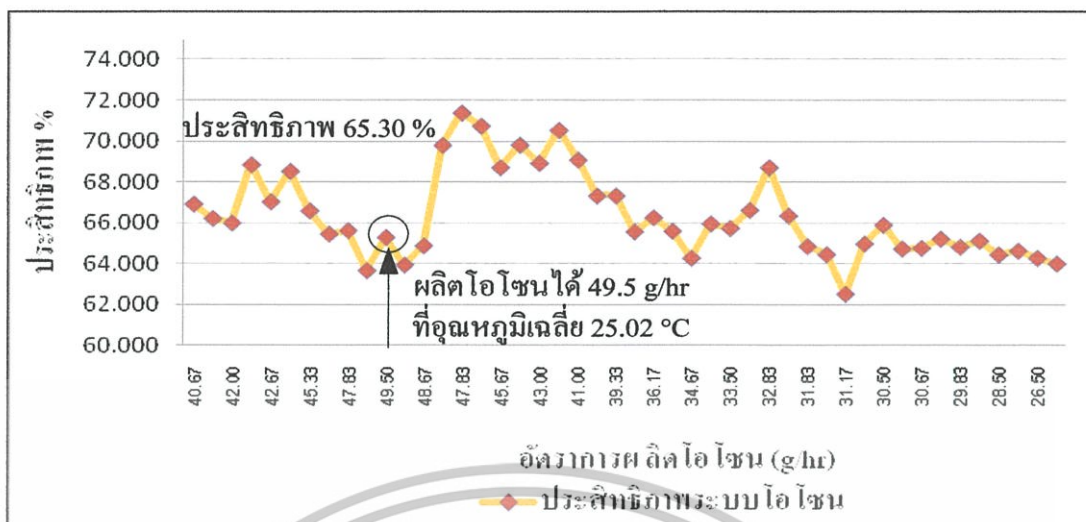
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า (V)	กระแสด้านเข้า (A)	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า (W)	แรงดันด้านออก (kV)	กระแสด้านออก (mA)	กำลังไฟฟ้าด้านออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาณไอโซนเฉลี่ย (g/hr)
	แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง				
15.040	220.100	1.028	135.692	10.010	15.121	90.817	66.929	40.67
16.020	220.000	1.043	137.610	9.980	15.219	91.131	66.224	41.17
16.940	219.700	1.040	137.093	10.070	14.977	90.491	66.007	42.00
18.020	219.000	1.008	132.386	10.120	15.012	91.153	68.854	43.17
19.040	220.000	1.025	135.300	10.010	15.104	90.715	67.047	42.67
20.040	220.700	1.028	136.062	10.020	15.510	93.246	68.532	44.33
20.960	221.000	1.030	136.578	10.100	15.010	90.961	66.600	45.33
22.040	219.700	1.043	137.422	10.010	14.980	89.970	65.470	47.17
23.020	219.700	1.013	133.468	9.980	14.630	87.604	65.637	47.83
24.04	220	1.048	138.27	10.1	14.53	88.052	63.681	48.67
25.02	220	1.035	136.62	10.2	14.578	89.217	65.303	49.50
25.98	220	1.04	137.227	10.12	14.453	87.759	63.951	49.17
27.04	220.8	1.043	138.179	10.11	14.782	89.668	64.892	48.67
28.04	220	1.028	135.63	10	15.78	94.68	69.808	48.67
29.020	221.000	1.025	135.915	10.300	15.700	97.026	71.387	47.83
30.040	220.200	1.033	136.414	10.500	15.320	96.516	70.752	47.33
31.040	220.200	1.030	136.084	10.100	15.432	93.518	68.721	45.67
31.980	220.000	1.018	134.310	10.200	15.323	93.777	69.821	44.50
33.020	219.900	1.020	134.579	10.300	15.011	92.768	68.932	43.00
34.020	220.300	1.003	132.510	10.300	15.125	93.473	70.540	42.33
35.020	220.200	1.010	133.441	10.100	15.213	92.191	69.087	41.00
36.040	220.300	1.028	135.815	10.020	15.211	91.449	67.333	40.17
37.040	220.100	1.040	137.342	10.100	15.261	92.482	67.337	39.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อกำลังด้านเข้าและด้านออกหือแปลงแรงดันสูง

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	แรงดันด้านเข้า (V)	กระแสด้านเข้า (A)	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า (W)	แรงดันด้านออก (kV)	กระแสด้านออก (mA)	กำลังไฟฟ้าด้านออก (W)	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาณไอโซนเฉลี่ย (g/hr)
	แรงดันด้านเข้าจากการไฟฟ้า			แรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง				
37.980	220.000	1.055	139.260	10.040	15.160	91.326	65.580	38.17
39.040	219.700	1.053	138.741	10.070	15.216	91.934	66.263	36.17
40.060	219.000	1.020	134.028	10.120	14.483	87.939	65.613	35.17
41.040	220.000	1.038	136.950	9.987	14.692	88.037	64.284	34.67
42.040	220.700	1.040	137.717	10.010	15.125	90.841	65.962	34.00
43.000	221.000	1.043	138.236	10.012	15.128	90.878	65.741	33.50
44.020	219.700	1.055	139.070	10.110	15.276	92.665	66.632	33.17
45.060	219.700	1.025	135.116	10.120	15.291	92.849	68.718	32.83
46.040	220.000	1.060	139.920	10.120	15.291	92.849	66.359	32.00
47.060	220.000	1.061	140.052	10.010	15.125	90.841	64.863	31.83
48.040	220.000	1.059	139.788	9.970	15.065	90.117	64.467	31.17
49.020	220.800	1.090	144.403	9.980	15.080	90.298	62.532	31.17
50.040	220.000	1.040	137.280	9.920	14.989	89.215	64.988	30.83
51.060	221.000	1.038	137.573	10.000	15.110	90.660	65.900	30.50
52.020	220.200	1.045	138.065	9.900	15.048	89.385	64.741	30.67
53.040	220.200	1.043	137.735	9.920	14.989	89.215	64.773	30.67
54.060	220.000	1.030	135.960	9.890	14.944	88.676	65.222	30.17
55.020	219.900	1.033	136.228	9.870	14.914	88.318	64.831	29.83
56.000	220.300	1.015	134.163	9.850	14.785	87.378	65.129	30.00
57.040	220.200	1.023	135.093	9.800	14.808	87.070	64.452	28.50
58.020	220.300	1.040	137.467	9.900	14.959	88.856	64.638	27.83
59.060	221.000	1.045	138.501	9.910	14.974	89.035	64.285	26.50
60.040	220.500	1.040	137.526	9.920	14.791	88.034	64.013	26.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์อัตราการผลิตปริมาณ ไอโซน กับประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า และกำลังไฟฟ้าด้านออกหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการผลิตก๊าซไอโซน กับผลของอัตราการผลิตก๊าซไอโซน ขณะจ่ายกำลังงานเพื่อการผลิตไอโซน ทำให้ประสิทธิภาพของระบบไอโซนโดยรวมอยู่ในช่วง 62 – 72 % ประสิทธิภาพเฉลี่ยตั้งแต่ 15 - 60 °C อยู่ที่ 66.37 % ทำการอธิบายเป็นช่วงๆ ได้ว่า ช่วงที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 66.39 % ช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 68.47 % ช่วงที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 35 - 45 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 66.59 % ช่วงที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 45 - 55 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 65.22 % และช่วงสุดท้ายช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบไอโซน 64.82 % เห็นได้ว่าช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมเป็นช่วงที่ดีที่สุด เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด เหมาะกับการนำไปใช้งานในการสร้างระบบไอโซนสำหรับอุตสาหกรรม ซึ่งช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C ก็เป็นช่วงที่ประสิทธิภาพของระบบไอโซนโดยรวมน้อยที่สุด เกิดการสูญเสียมากที่สุด

ซึ่งจากรูปที่ 5.8 ยังพบว่าอัตราการผลิตก๊าซไอโซน ได้สูงสุดอยู่ในช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผลิตไอโซนได้สูงสุดคือ 25.02 °C ได้ปริมาณก๊าซไอโซน 49.5 g/hr และประสิทธิภาพโดยรวมของชุดผลิตก๊าซไอโซนอยู่ที่ 65.30 % ซึ่งประสิทธิภาพเกิดการสูญเสียในขณะที่ผลิตก๊าซไอโซนไปจาก อุปกรณ์ทางไฟฟ้า อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง อุปกรณ์ที่แรงดันสูงความถี่สูง และส่วนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนรอบด้าน ขณะทำการทดลอง

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากการเก็บผลอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ต่ออัตราการผลิตก๊าซไอโซน

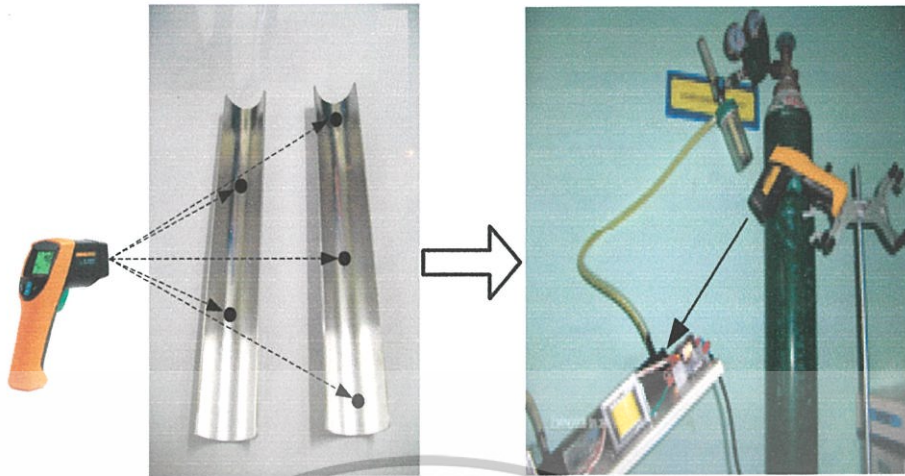
ส่วนกระบวนการควบคุมอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่ 15 - 60 °C ทำได้โดยวิธีดังนี้

ตารางที่ 5.5 แสดงรายละเอียดการควบคุมอุณหภูมิโดยกระบวนการต่างๆ

ลำดับที่	รายละเอียด	ช่วงองศาที่ควบคุม °C
1	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิต่ำวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกและใช้เครื่องทำความเย็นช่วยระบายความร้อนด้านใน	15 – 20 °C
2	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมจากเครื่องทำความเย็นวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านในและด้านนอก	21 – 30 °C
3	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิต่ำวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอก	31 – 35 °C
4	ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิห้องวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านในและใช้น้ำอุณหภูมิห้องวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอก	36 – 55 °C
5	ที่เวลาเดียวกันทำการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านผิวแท่งอิเล็กทรอนิกส์ด้านใน	56 – 60 °C

เมื่อทำการควบคุมตัวแปรได้แล้ว ก็เข้าสู่กระบวนการเก็บผลอุณหภูมิโดยวัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 จุด โดยที่ทุกครั้งที่เก็บผลการทดลองจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยที่ระยะเวลาผ่านไป 3 นาที ถึง 7 นาที ทำการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 จุด เพื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ โดยที่ตำแหน่งแต่ละจุดที่ทำการยิงเลเซอร์ได้ระบุไว้ชัดเจนด้วยวิธีการเดิมเป็นจุดสีดำ ซึ่งจะได้ประโยชน์ในการลดความผิดพลาดในการวัดที่อาจเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ภาพรวมวิธีการวัดและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 5 จุด

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

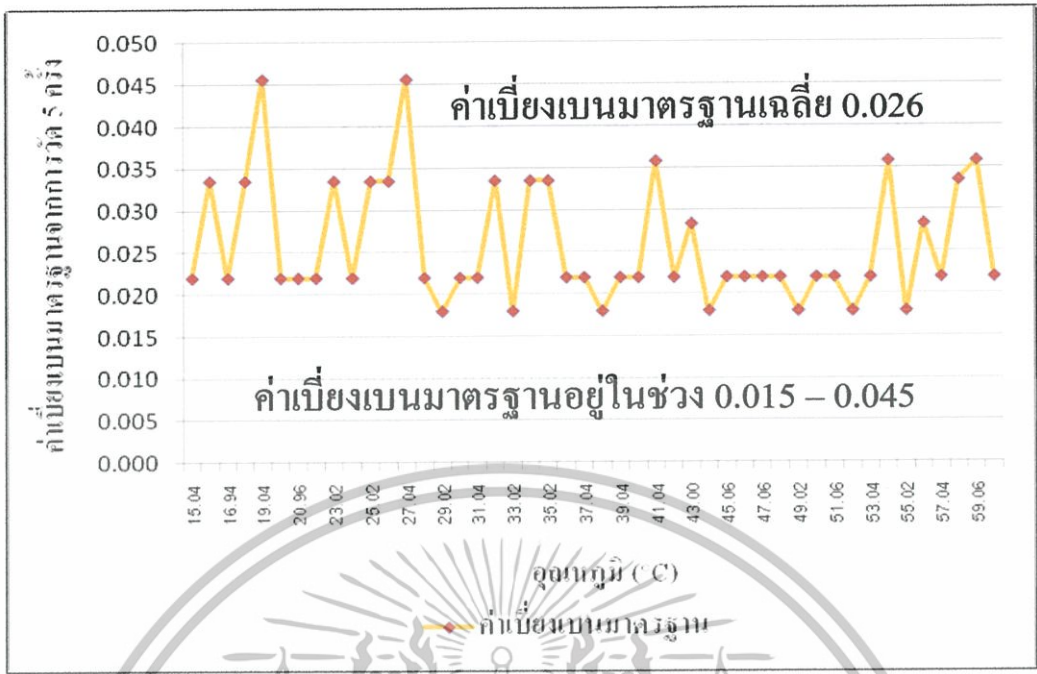
ลำดับที่	อุณหภูมิ จุดที่ 1 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 2 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 3 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 4 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 5 (°C)	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	15.1	15	15.1	15	15	15.04	0.022
2	16	16	16.1	15.9	16.1	16.02	0.033
3	17	16.9	17	16.9	16.9	16.94	0.022
4	18	18.1	18	17.9	18.1	18.02	0.033
5	19	19	19.1	19.2	18.9	19.04	0.046
6	20	20.1	20	20.1	20	20.04	0.022
7	20.9	21	21	20.9	21	20.96	0.022
8	22	22.1	22	22.1	22	22.04	0.022
9	23.1	23	23.1	23	22.9	23.02	0.033
10	24	24.1	24	24.1	24	24.04	0.022
11	25	24.9	25	25.1	25.1	25.02	0.033
13	26.1	26	25.9	25.9	26	25.98	0.033
14	27.1	27	27.2	27	26.9	27.04	0.046
15	28	28.1	28	28.1	28	28.04	0.022
16	29	29	29.1	29	29	29.02	0.018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

ลำดับที่	อุณหภูมิ จุดที่ 1 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 2 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 3 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 4 (°C)	อุณหภูมิ จุดที่ 5 (°C)	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
17	30	30.1	30	30	30.1	30.04	0.022
18	31.1	31	31	31.1	31	31.04	0.022
19	31.9	32	32.1	32	31.9	31.98	0.033
21	33	33.1	33	33	33	33.02	0.018
22	34.1	34	34.1	33.9	34	34.02	0.033
23	35	35.1	35	35.1	34.9	35.02	0.033
24	36	36.1	36	36.1	36	36.04	0.022
34	46	46.1	46	46	46.1	46.04	0.022
35	47.1	47	47.1	47	47.1	47.06	0.022
36	48	48.1	48	48.1	48	48.04	0.022
37	49	49	49.1	49	49	49.02	0.018
38	50.1	50	50.1	50	50	50.04	0.022
39	51	51.1	51	51.1	51.1	51.06	0.022
40	52	52	52	52.1	52	52.02	0.018
41	53	53.1	53	53.1	53	53.04	0.022
42	54	54.2	54	54.1	54	54.06	0.036
43	55.1	55	55	55	55	55.02	0.018
44	55.9	56	56	56.1	56	56.00	0.028
45	57	57	57.1	57	57.1	57.04	0.022
46	57.9	58	58.1	58.1	58	58.02	0.033
47	59	59	59.2	59.1	59	59.06	0.036
48	60	60	60.1	60.1	60	60.04	0.022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรดกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดอุณหภูมิ 5 จุด

จากรูปที่ 5.10 เป็นการเก็บผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรดจำนวน 5 จุด เพื่อหาอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโตรด และได้นำมาแสดงผลเปรียบเทียบในการวัดแต่ละจุดจำนวน 5 จุด พบว่าการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 จุด นั้นได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือโดยใช้หลักทางสถิติมาช่วยแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าค่าการกระจายของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าอยู่ในช่วง 0.015 - 0.045 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยคือ 0.026 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ จึงได้นำผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรดมาประกอบการวิเคราะห์อัตราการผลิตก๊าซโอโซนในขั้นตอนต่อไป

5.6 การเก็บผลอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโตรดเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตก๊าซโอโซน

เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิได้แล้ว ก็เข้าสู่กระบวนการเก็บผลปริมาณโอโซนโดยวัดปริมาณโอโซนด้วยวิธีการไตรเตรด โดยที่ทุกครั้งที่ได้เก็บผลการทดลองจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยที่ระยะเวลาผ่านไป 3 นาที เริ่มเก็บค่าปริมาณโอโซนครั้งที่ 1 ผ่านไป 5 นาที เก็บค่าปริมาณโอโซนครั้งที่ 2 และ 7 นาที เก็บค่าปริมาณโอโซนครั้งที่ 3 ตรวจสอบความน่าเชื่อถือโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำผลปริมาณโอโซนที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโตรด

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซโอโซนต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

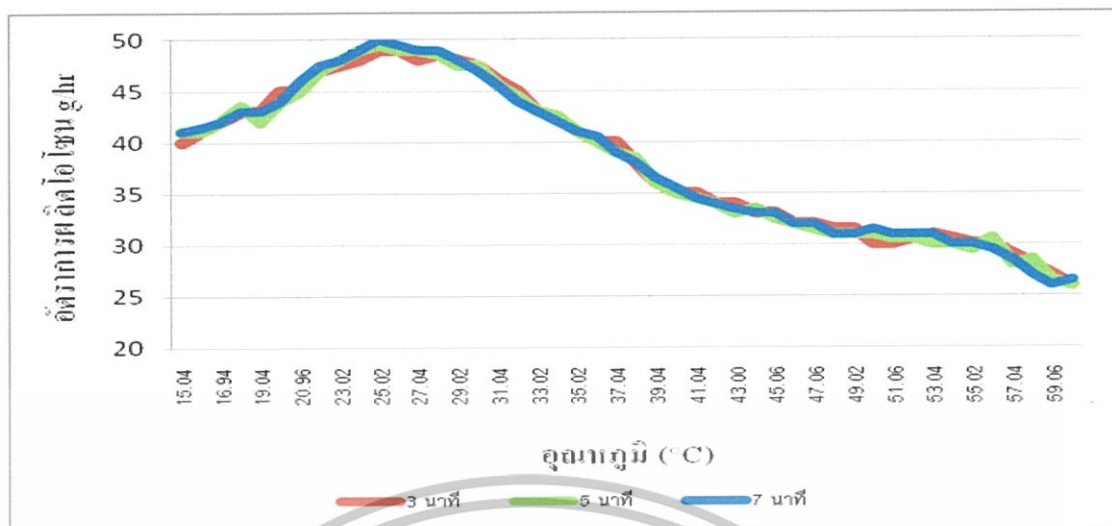
ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณโอโซนที่ 3 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ 5 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ 7 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย (g/hr)	ค่าโอโซนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	15.04	40	41	41	40.67	0.272
2	16.02	41	41	41.5	41.17	0.136
3	16.94	42	42	42	42.00	0.000
4	18.02	43	43.5	43	43.17	0.136
5	19.04	43	42	43	42.67	0.272
6	20.04	45	44	44	44.33	0.272
7	20.96	45	45	46	45.33	0.272
8	22.04	47	47	47.5	47.17	0.136
9	23.02	47.5	48	48	47.83	0.136
10	24.04	48	49	49	48.67	0.272
11	25.02	49	49.5	50	49.50	0.236
13	25.98	49	49	49.5	49.17	0.136
14	27.04	48	49	49	48.67	0.272
15	28.04	48.5	48.5	49	48.67	0.136
16	29.02	48	47.5	48	47.83	0.136
17	30.04	47.5	47.5	47	47.33	0.136
18	31.04	46	45.5	45.5	45.67	0.136
19	31.98	45	44.5	44	44.50	0.236
21	33.02	43	43	43	43.00	0.000
22	34.02	42.5	42.5	42	42.33	0.136
23	35.02	41	41	41	41.00	0.000
24	36.04	40	40	40.5	40.17	0.136
25	37.04	40	39	39	39.33	0.272

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซโอโซนต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัด

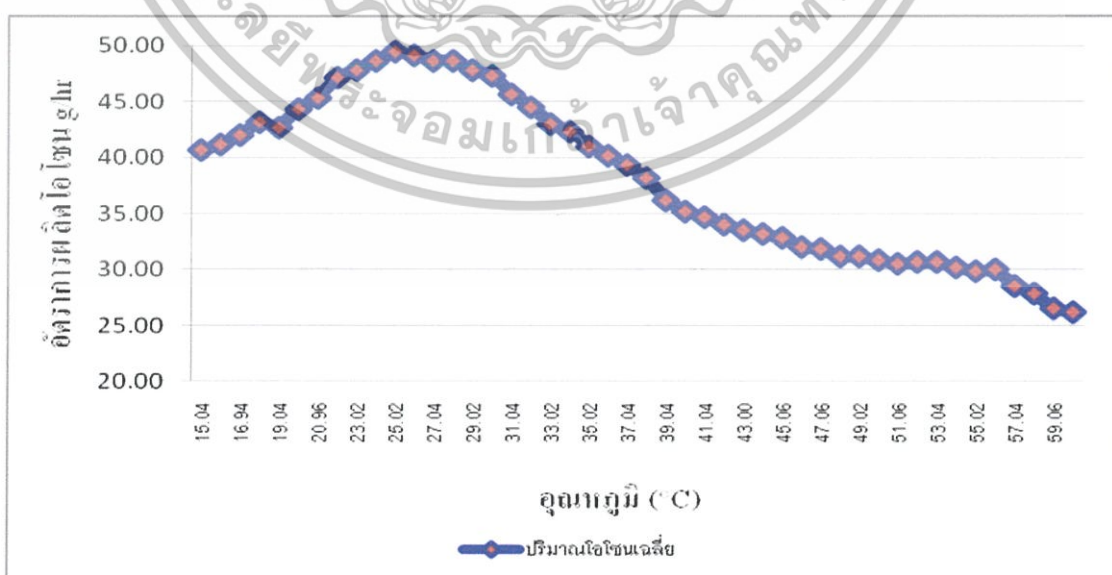
ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณโอโซนที่ 3 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ 5 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ 7 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย (g/hr)	ค่าการวัดเบี่ยงเบนมาตรฐาน
26	37.98	37	37.5	37	37.17	0.136
27	39.04	36	36	36.5	36.17	0.136
28	40.06	35	35	35.5	35.17	0.136
29	41.04	35	34.5	34.5	34.67	0.136
30	42.04	34	34	34	34.00	0.000
31	43.00	34	33	33.5	33.50	0.236
32	44.02	33	33.5	33	33.17	0.136
33	45.06	33	32.5	33	32.83	0.136
34	46.04	32	32	32	32.00	0.000
35	47.06	32	31.5	32	31.83	0.136
36	48.04	31.5	31	31	31.17	0.136
37	49.02	31.5	31	31	31.17	0.136
38	50.04	30	31	31.5	30.83	0.360
39	51.06	30	30.5	31	30.50	0.236
40	52.02	30.5	30.5	31	30.67	0.136
41	53.04	31	30	31	30.67	0.272
42	54.06	30.5	30	30	30.17	0.136
43	55.02	30	29.5	30	29.83	0.136
44	56.00	30	30.5	29.5	30.00	0.236
45	57.04	29	28	28.5	28.50	0.236
46	58.02	28	28.5	27	27.83	0.360
47	59.06	27	26.5	26	26.50	0.236
48	60.04	26	26	26.5	26.17	0.136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงการวัดปริมาณไอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 5.11 เป็นการเก็บผลอัตราการผลิตก๊าซไอโซนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดช่วง 15 - 60 °C ซึ่งทำการเก็บผลที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที โดยทำการวัดด้วยวิธีการไตรศรคทางเคมี พบว่าปริมาณก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ที่ที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที มีแนวโน้มต่ออัตราการผลิตก๊าซไอโซนไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงได้จากกราฟพล็อตกราฟสังเกตลักษณะที่เส้นสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ได้นำค่าอัตราการผลิตก๊าซไอโซนแต่ละช่วงเวลานำมาหาค่าปริมาณก๊าซไอโซนเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ

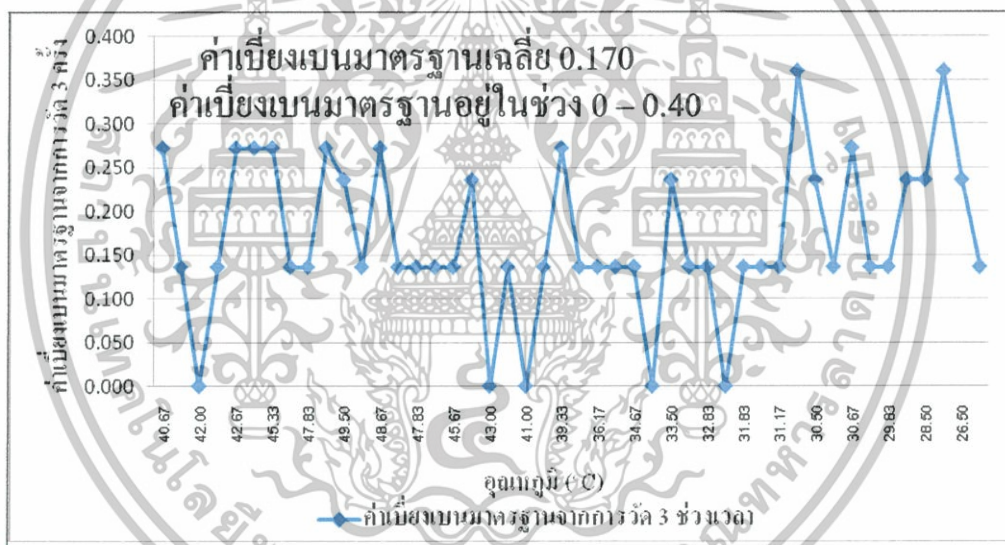


รูปที่ 5.12 แสดงการวัดปริมาณไอโซนเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.12 เป็นการเก็บผลอัตราการผลิตก๊าซโอโซนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดช่วง 15 - 60 °C ซึ่งทำการเก็บผลที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที โดยทำการวัดด้วยวิธีการไตรเตรดทางเคมี และนำมาหาอัตราการผลิตก๊าซโอโซนเฉลี่ยที่ผลิตได้ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรด พบว่าอัตราการผลิตก๊าซโอโซนได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 25 °C และต่ำสุดที่อุณหภูมิ 60 °C

การวิเคราะห์อัตราการผลิตก๊าซโอโซนมีผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดดังนี้ สภาวะเริ่มต้นจากอุณหภูมิต่ำที่ 15 °C จนถึงอุณหภูมิ 25 °C ปริมาณก๊าซโอโซนมีแนวโน้มแปรผันตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 25 °C ปริมาณโอโซนกับมีแนวโน้มลดลง ถึงช่วงอุณหภูมิสูงช่วงหนึ่งปริมาณโอโซนมีแนวโน้มคงที่ และค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีก ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลเป็นช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตก๊าซโอโซน ในขั้นตอนต่อไป

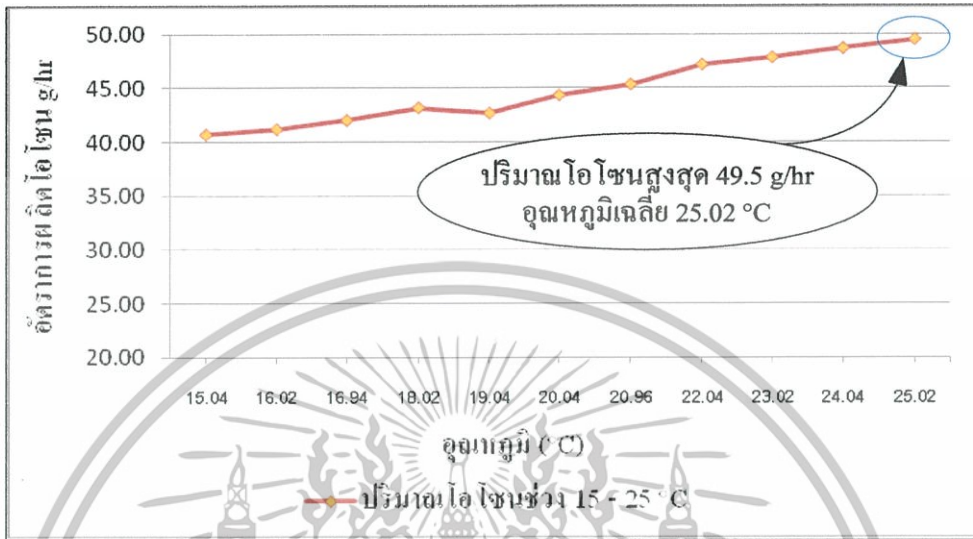


รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดที่ 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที

จากรูปที่ 5.13 เป็นการแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดปริมาณโอโซนที่เวลา 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที และนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณโอโซนเฉลี่ยในช่วงเวลานั้น โดยใช้วิธีการไตรเตรดทางเคมีวัดปริมาณโอโซน พบว่าในการไตรเตรดหาปริมาณโอโซนในแต่ละครั้งได้ผลออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน สังเกตจากเส้นแนวโน้มจากการพล็อตกราฟรูปที่ 5.11 นำมาแสดงให้เห็นโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และเป็นศูนย์ตามรูปที่ 5.13 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0 - 0.40 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ 0.17 ซึ่งถือว่าผลจากการวัดค่อนข้างมีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 การวิเคราะห์อัตราการผลิตก๊าซไอโซนเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดภายในแท่งอิเล็กโทรด เพื่อหาความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน



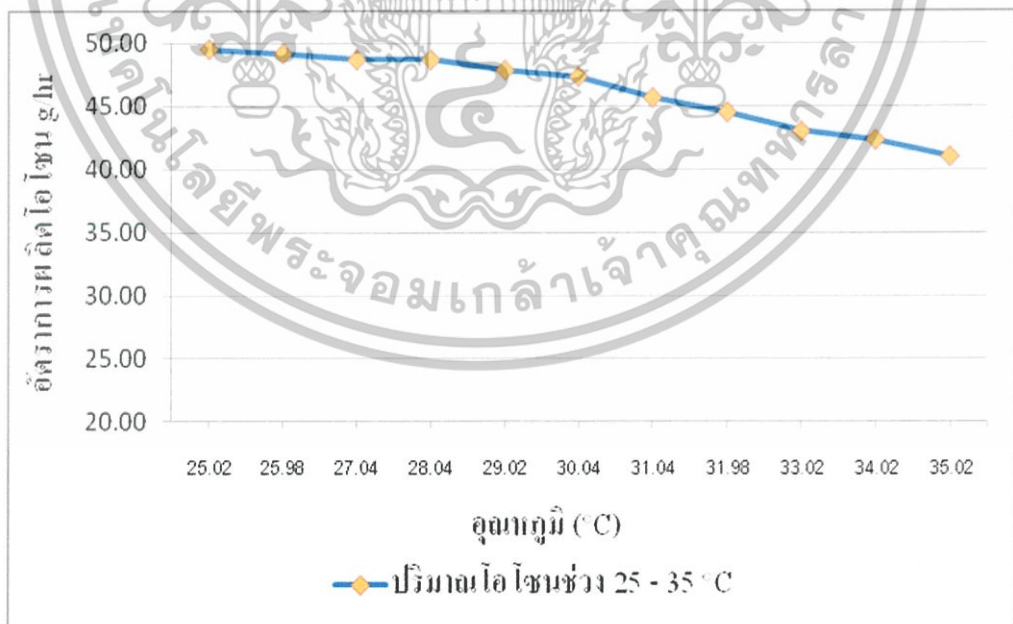
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิต ไอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 15 - 25 °C

จากรูปที่ 5.14 และข้อมูลตารางที่ 5.10 เป็นการวัดอัตราการผลิตก๊าซไอโซนช่วงอุณหภูมิ 15 - 25 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำการวิจัยทางด้านอุณหภูมิค่าพบว่าเมื่อได้ทำการปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นทีละ 1°C โดยประมาณ เมื่อทำการวัดปริมาณไอโซนโดยวิธีการ ไตรเรดตรงทางเคมี อัตราการผลิตก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ได้ว่าที่ 15 °C ได้ปริมาณก๊าซไอโซน 40.67 g/hr และปริมาณก๊าซไอโซนก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 25 °C เมื่อทำการวัดปริมาณ ไอโซน ได้ค่าปริมาณก๊าซ ไอโซนสูงสุด 49.5 g/hr ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิที่ 25 °C นี้สามารถผลิตก๊าซ ไอโซน ได้สูงสุด ซึ่งเมื่อมองย้อนกลับไปที่รูป 5.7 อุณหภูมิที่ 25 °C ยังอยู่ในช่วงที่ประสิทธิภาพทางด้านกำลังไฟฟ้าของระบบ ไอโซนอยู่ในช่วงนี้ ให้ประสิทธิภาพที่สูงสุด เกิดการสูญเสียกำลังงานทั้งระบบ ไอโซนน้อยที่สุด หรือสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นช่วงที่เหมาะสมกับการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซนใช้งานมากที่สุด

เหตุผลที่ทำให้ ช่วงอุณหภูมิ 25 °C นี้สามารถทำการผลิตก๊าซไอโซน ได้มากที่สุด เนื่องจากการเกิดก๊าซไอโซน ใช้หลักการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ จากสนามไฟฟ้าแรงสูงภายในแกปอากาศ ดังนั้นที่อุณหภูมิยิ่งสูงจะทำให้อากาศ ที่เป็นออกซิเจน 2 อะตอม เกิดการแตกตัวได้ง่ายกว่าอุณหภูมิ ต่ำ ซึ่งส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซไอโซนที่สูงกว่า

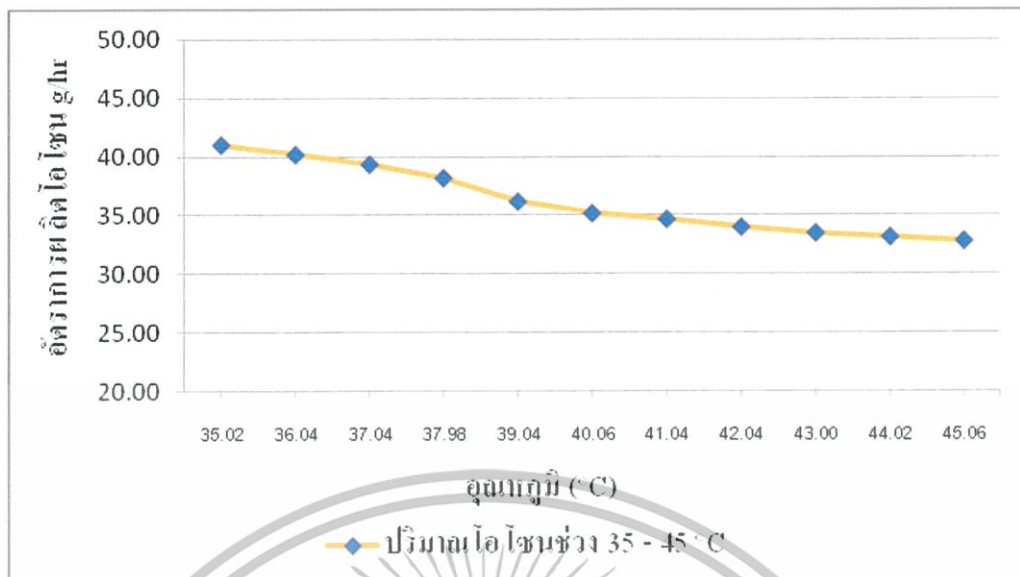
ตารางที่ 5.10 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิตโอโซน ในช่วง 15 - 25 °C

ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณโอโซนที่ 3 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ 5 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ 7 นาที (g/hr)	ปริมาณโอโซนเฉลี่ย (g/hr)	ค่าโอโซนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	15.04	40	41	41	40.67	0.272
2	16.02	41	41	41.5	41.17	0.136
3	16.94	42	42	42	42.00	0.000
4	18.02	43	43.5	43	43.17	0.136
5	19.04	43	42	43	42.67	0.272
6	20.04	45	44	44	44.33	0.272
7	20.96	45	45	46	45.33	0.272
8	22.04	47	47	47.5	47.17	0.136
9	23.02	47.5	48	48	47.83	0.136
10	24.04	48	49	49	48.67	0.272
11	25.02	49	49.5	50	49.50	0.236



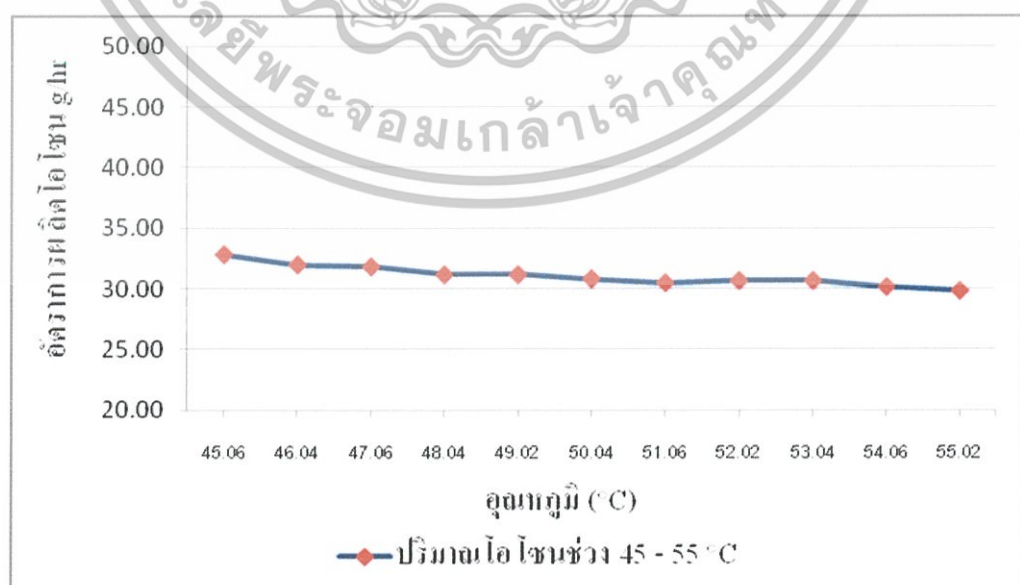
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตโอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 25 - 35 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตไอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 35 - 45 °C

จากรูปที่ 5.15 และ 5.16 สันเกตว่าอัตราการผลิตก๊าซไอโซนจากอุณหภูมิเฉลี่ย 25.02 °C ปริมาณก๊าซไอโซนได้ปริมาณสูงสุด และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณก๊าซไอโซนที่ผลิตได้ก็มีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับสถานะแรกของงานวิจัย และพลังงานที่ใช้ องค์ประกอบอื่นๆ ก็เหมือนกัน เนื่องจากก๊าซไอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร เกิดการสลายตัวได้ง่าย เมื่อเกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้น สถานะการเกิดไอโซนกลับมาเป็นออกซิเจนก็เกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากการวัดหรือการใช้ไอโซน ต้องมีระยะเวลาส่วนหนึ่งที่วิ่งผ่านท่อลำเลียงไอโซน ซึ่งสถานะนี้ทำให้ก๊าซไอโซนเกิดการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิลบข้างมีอุณหภูมิสูง

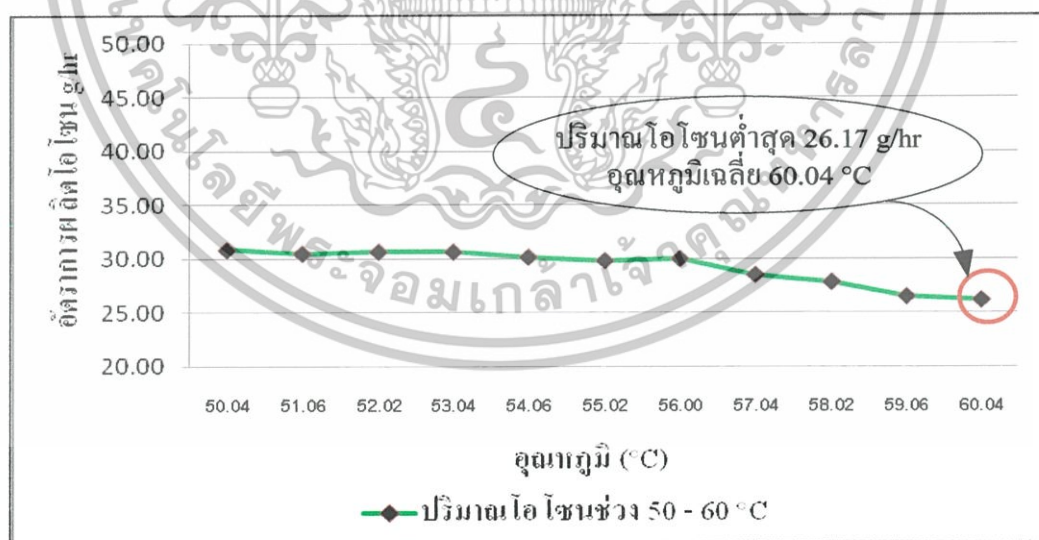


รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตไอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 45 - 55 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยต่อการผลิตไอโซน ในช่วง 50 - 60 °C

ลำดับที่	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ปริมาณไอโซนที่ 3 นาที (g/hr)	ปริมาณไอโซนที่ 5 นาที (g/hr)	ปริมาณไอโซนที่ 7 นาที (g/hr)	ปริมาณไอโซนเฉลี่ย (g/hr)	ค่าไอโซนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
38	50.04	30	31	31.5	30.83	0.360
39	51.06	30	30.5	31	30.50	0.236
40	52.02	30.5	30.5	31	30.67	0.136
41	53.04	31	30	31	30.67	0.272
42	54.06	30.5	30	30	30.17	0.136
43	55.02	30	29.5	30	29.83	0.136
44	56.00	30	30.5	29.5	30.00	0.236
45	57.04	29	28	28.5	28.50	0.236
46	58.02	28	28.5	27	27.83	0.360
47	59.06	27	26.5	26	26.50	0.236
48	60.04	26	26	26.5	26.17	0.136



รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตไอโซนเฉลี่ยกับช่วงอุณหภูมิ 50 - 60 °C

จากรูปที่ 5.17 และ 5.18 สันเกตว่าอัตราการผลิตก๊าซไอโซนมีแนวโน้มลดลงจริงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตามที่อธิบายมาข้างต้น แต่จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิช่วงหนึ่งปริมาณ

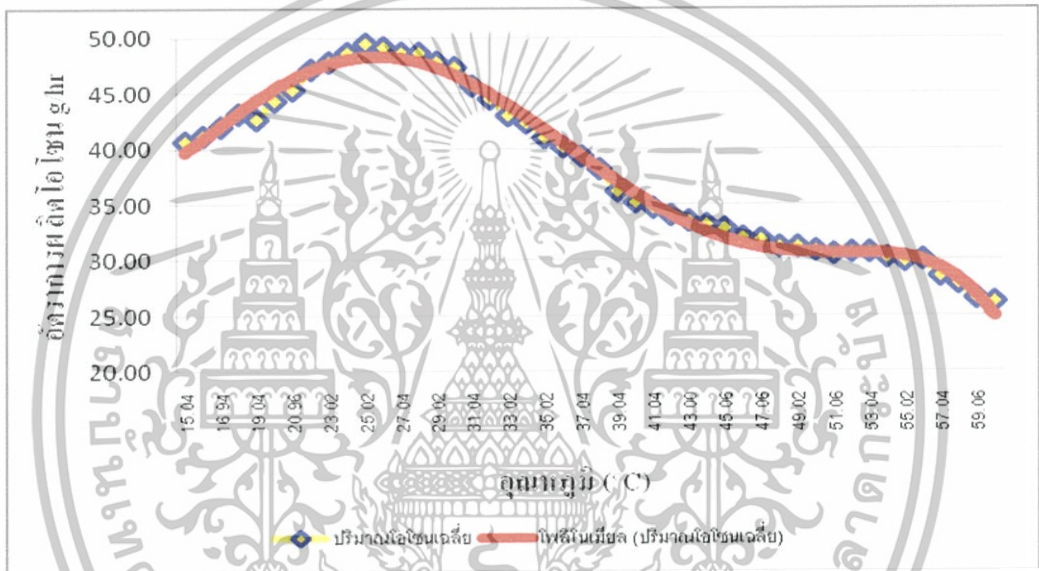
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตก๊าซโอโซนจะคงที่ ซึ่งเป็นข้อดีจุดหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งพลังงานที่ใช้และองค์ประกอบอื่นๆ ก็คงที่ แต่จากการสังเกตข้อมูลก็แสดงให้เห็นว่าเป็นเพียงช่วงอุณหภูมิช่วงหนึ่งเท่านั้น เพราะที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นปริมาณการผลิตก๊าซโอโซนมีค่าต่ำลงอีก จากรูปที่อุณหภูมิสูงสุดของงานวิจัยนี้ 60 °C ได้ปริมาณก๊าซโอโซน 26.17 g/hr

5.8 การวิเคราะห์ทำนายผลของการผลิตโอโซนในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย

การคำนวณหาปริมาณ โอโซนเพื่อเปรียบเทียบและประมาณค่าปริมาณ โอโซนค่าจริงและค่าที่คำนวณ ในช่วงการทดลองได้จากสมการ (5.1) [24]

$$y = a_1x^4 + b_1x^3 + c_1x^2 + d_1x + e_1 \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงปริมาณ โอโซนค่าจริง และปริมาณ โอโซน โดยสมการโพลีโนเมียล

จากรูปที่ 5.19 เป็นการวัดอัตราการผลิตก๊าซโอโซนช่วงอุณหภูมิ 15 - 60 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำการวิจัยทางด้านอุณหภูมิต่ำพบว่าเมื่อได้ทำการปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นทีละ 1°C โดยประมาณ เมื่อทำการวัดปริมาณ โอโซนโดยวิธีการไตรเตรดทางเคมี อัตราการผลิตก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ได้ว่าที่ 15 °C ได้ปริมาณก๊าซโอโซน 40.67 g/hr และปริมาณก๊าซโอโซนก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 25 °C เมื่อทำการวัดปริมาณ โอโซนได้ค่าปริมาณก๊าซโอโซนสูงสุด 49.5 g/hr ที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นปริมาณการผลิตก๊าซโอโซนมีค่าต่ำลงอีก ที่อุณหภูมิสูงสุดของงานวิจัยนี้ 60 °C ได้ปริมาณก๊าซโอโซน 26.17 g/hr ดังนั้น นำข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตกราฟและใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการประมาณค่าการผลิตก๊าซโอโซนในช่วงอุณหภูมิที่ทำการวิจัยได้ดังสมการ 5.2

$$y = 0.0004x^4 - 0.0126x^3 + 0.0864x^2 + 0.9749x + 38.684 \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีการมุ่งเน้นที่จะแก้ปัญหาด้านอนุรักษ์พลังงานและอนุรักษ์สภาพแวดล้อม จึงเป็นประเด็นที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆมาใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำเสียหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำดื่มมักใช้สารเคมีมีพิษในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ และทิ้งน้ำส่วนหนึ่งลงสู่ธรรมชาติ ทำให้ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก ปัญหาสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นพิษต่าง ๆ หลายประเทศกำลังพัฒนาเพื่อหาทางแก้ปัญหาในระยะยาว ดังนั้นจึงมีการตื่นตัวในการลดการใช้สารเคมีมีพิษและหาวิธีการอื่นทดแทนการใช้สารเคมี ซึ่งระบบหนึ่งที่ได้นำมาใช้และพัฒนาอย่างต่อเนื่องคือระบบ โอโซน

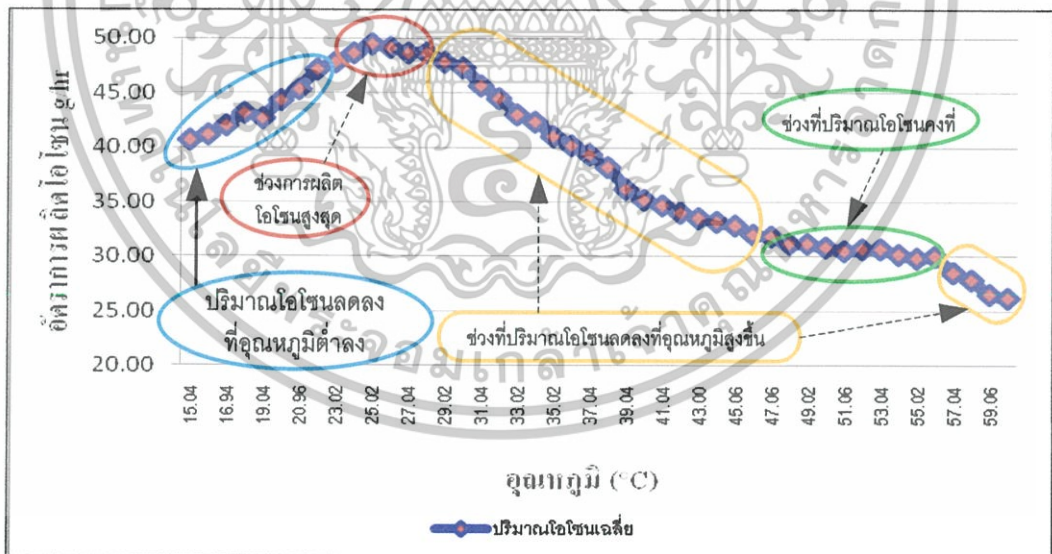
ก๊าซโอโซน (Ozone Gas) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือใช้ฆ่าเชื้อโรคในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริโภคโดยใช้แทนสารเคมีมีพิษ เช่น สารคลอรีนได้ แต่ข้อดีของก๊าซโอโซนคือ ปลอดภัยได้ง่ายและรวดเร็วโดยไม่เหลือความเป็นพิษตกค้าง สามารถผลิตได้ง่ายเพียงแต่เข้าใจคุณสมบัติการเกิดของก๊าซอย่างเพียงพอ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้สนามไฟฟ้าเป็นตัวการวิธีการนั้นใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนให้ชุดอิเล็กโทรด เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าจากนั้นจึงปล่อยให้อากาศไหลผ่านสนามไฟฟ้า ก๊าซออกซิเจน (O_2) จะแตกตัวออกเป็นโมเลกุลอิสระ (O) และรวมตัวกันใหม่กลายเป็นก๊าซโอโซนเกิดขึ้น (O_3)

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานผลิตก๊าซโอโซน จะใช้แหล่งจ่ายแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เพราะสามารถจ่ายกำลังได้สูงและการใช้งานความถี่สวิตชิงที่สูง การเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น แต่แหล่งจ่ายกำลังแบบนี้ค่อนข้างควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ยากเพราะเมื่อมองภาระทางไฟฟ้าของโหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน ทำให้อุปกรณ์สวิตชิงของคอนเวอร์เตอร์ถูกบังคับให้ยังคงทำงานต่อไปแม้จะถูกสั่งให้หยุดทำงาน จากการผลัดกันกระแสให้ไหลต่อเนื่องของอุปกรณ์สะสมพลังงาน ผลที่ตามมาก็คือแรงดันจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตและเกิดการเบรกดาวน์ได้ ส่งผลให้เกิดความร้อนและก๊าซโอโซนก็จะสลายตัวเร็วขึ้น ค่าประสิทธิภาพของเครื่องก็จะมีการลดลง ดังนั้นผลของอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแปรทางสิ่งแวดล้อมจะมีผลต่อการผลิตโอโซนค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำการวิจัยในส่วนนี้เพื่อหาความเหมาะสมของการผลิตโอโซนต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรด พัฒนาเพื่อการใช้งานจริง

6.2 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอถึงผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ต่ออัตราการผลิตก๊าซโอโซน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการควบคุมตัวแปรอื่นให้คงที่ และควบคุมแรงดันด้านออกและความถี่ไว้ที่ 10 kV 25 kHz โดยทำการปรับเปลี่ยนเพียงตัวแปรเดียวคืออุณหภูมิที่ผิวภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการปรับอุณหภูมิ

จากนั้นทำการวัดปริมาณโอโซน โดยวิธีการไตเตรต พบว่าอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์มีผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซโอโซนมีการเปลี่ยนแปลง และที่อัตราการผลิตโอโซนสามารถผลิตสูงสุดได้ที่อุณหภูมิช่วงหนึ่งเท่านั้น แต่เมื่ออุณหภูมิมิแนวโน้มเพิ่มขึ้นอัตราการผลิตโอโซนกลับมีแนวโน้มลดลง เหตุผลที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรเมื่ออุณหภูมิยังสูงการสลายตัวกลับสู่สถานะออกซิเจนก็เกิดขึ้นง่าย แต่ตรงจุดที่อุณหภูมิสูงมีข้อดีตรงที่ทำให้ไม่ต้องใช้แรงดันในการสร้างโคโรนาสูงที่ทำให้อากาศแตกตัว ดังนั้นจะได้ว่าที่อุณหภูมิสูงแต่จ่ายแรงดันเท่าเดิมทำให้อากาศแตกตัวได้ดีกว่า แต่เมื่ออุณหภูมิสูงก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จะสลายตัวและกลับสู่สถานะออกซิเจนได้ง่าย ส่งผลให้กรณีที่เมื่ออุณหภูมิถึงช่วงๆหนึ่ง อัตราการผลิตโอโซนได้ปริมาณก๊าซโอโซนค่อนข้างคงที่ ซึ่งจากรายละเอียดตามรูปที่ 6.1

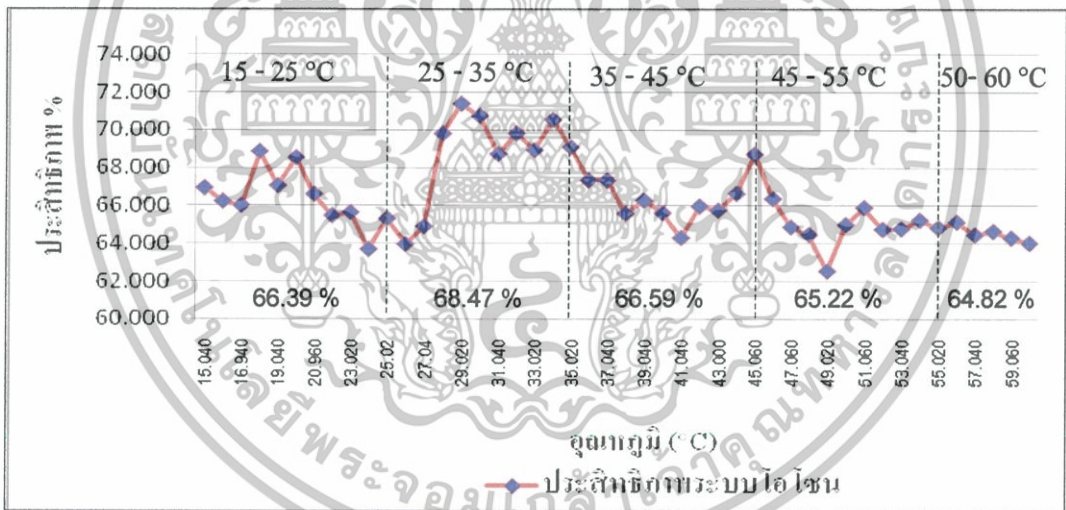


รูปที่ 6.1 แสดงการวัดปริมาณ โอโซนเฉลี่ย ต่อผลของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์

คือที่อุณหภูมิช่วง 15 - 25 °C ปริมาณ โอโซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ปริมาณ โอโซนที่ผลิตได้ 40 - 49.5 g/hr อุณหภูมิช่วง 25 - 35 °C ปริมาณ โอโซนมีแนวโน้มลดลง ปริมาณ

โอโซนที่ผลิตได้ 49.5 – 41 g/hr อุณหภูมิช่วง 35 - 45 °C ปริมาณโอโซนมีแนวโน้มลดลง ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ 41 – 32 g/hr อุณหภูมิช่วง 45 - 55 °C ปริมาณโอโซนมีแนวโน้มลดลง ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ 32 – 30 g/hr อุณหภูมิช่วง 50 - 60 °C ปริมาณโอโซนมีแนวโน้มลดลง ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ 30 – 26 g/hr ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 30 °C เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซโอโซน เพราะจากงานวิจัยสามารถให้อัตราการผลิตก๊าซโอโซนค่อนข้างสูง ถ้าเทียบเป็นประสิทธิภาพต่อพิกัดการผลิตโอโซนสูงสุด ช่วง 20 - 30 °C ประสิทธิภาพในการผลิตมากกว่า 90 % ซึ่งช่วงอุณหภูมิช่วงที่สูงขึ้นมากกว่า 36 °C ขึ้นไป ปริมาณโอโซนมีแนวโน้มลดลงและคงที่ที่อุณหภูมิช่วง 47 - 57 °C

จากการผลิตก๊าซโอโซนเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ในกรณีที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 15 - 60 °C ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบโอโซนค่อนข้างน้อยมาก แสดงตามรูปที่ 6.2 ซึ่งแสดงข้อมูลเป็นค่าประสิทธิภาพของระบบโอโซน



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ย กับประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

เป็นการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการผลิตก๊าซโอโซน กับผลของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่งอิเล็กโทรด ขณะจ่ายกำลังงานเพื่อการผลิตโอโซน พบว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับวงจรไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้ประสิทธิภาพของระบบโอโซนโดยรวมอยู่ในช่วง 62 – 72 % ประสิทธิภาพเฉลี่ยตั้งแต่ 15 - 60 °C อยู่ที่ 66.37 % ทำการอธิบายเป็นช่วงๆ ได้ว่า ช่วงที่ 1

อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 15 - 25 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบโอโซน 66.39 % ช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบโอโซน 68.47 % ช่วงที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 35 - 45 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบโอโซน 66.59 % ช่วงที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 45 - 55 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบโอโซน 65.22 % และช่วงสุดท้ายช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C มีประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบโอโซน 64.82 % เห็นได้ว่าช่วงที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25 - 35 °C ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมเป็นช่วงที่ดีที่สุด เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด เหมาะกับการนำไปใช้งานในการสร้างระบบโอโซนสำหรับอุตสาหกรรม ซึ่งช่วงที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 50 - 60 °C ก็เป็นช่วงที่ประสิทธิภาพของระบบโอโซนโดยรวมน้อยที่สุด เกิดการสูญเสียมากที่สุด

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ใช้ในการปรับระดับอัตราการผลิตก๊าซโอโซน ช่วยให้ใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. วิธีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์ เป็นการช่วยลดต้นทุนของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนและใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซน ได้คุ้มค่าที่สุด
3. ชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งถ้ามีการพัฒนาชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้มีประสิทธิภาพให้ดีขึ้น จะช่วยในการพัฒนาให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนสูงขึ้น
4. นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นที่น่าสนใจซึ่งสามารถใช้ปรับระดับปริมาณก๊าซได้
 - 4.1 ระดับของความดันอากาศภายในแท่งอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อการแตกตัว
 - 4.2 ความชื้นของอากาศภายในแท่งอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อการแตกตัว
5. การป้องกันสัญญาณรบกวน
6. การพัฒนาโครงสร้างของแท่งอิเล็กโทรด การปรับระยะแคบของแท่งอิเล็กโทรด เพื่อการผลิตโอโซน
7. ผลของความถี่ทางไฟฟ้าในการผลิตก๊าซโอโซน

6.4 ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. ช่วงอุณหภูมิด้านต่ำทำการควบคุมให้ได้ตามต้องการ ต้องใช้กระบวนการและเวลาก่อนข้างมาก เพราะชุดผลิตก๊าซโอโซนเป็นเกิดโคโรน่าซึ่งทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว

2. ในการวัดปริมาณ โอโซนแต่ละครั้ง ใช้วิธีการไตรเตรดทางเคมีทำให้ต้องใช้เวลามากในการวัดแต่ละครั้ง และเกิดการคลาดเคลื่อนได้ง่าย
3. ปัญหาที่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบค่าเพาเวอร์เฟกซ์เตอร์ค่อนข้างต่ำ

6.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถรู้จุดการออกแบบและควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะในการผลิตก๊าซ โอโซน
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงสำหรับการตรวจสอบระบบ โอโซน
3. สามารถสร้างระบบ โอโซน ได้คุ้มค่าเงินลงทุน
4. สามารถสร้างเป็นข้อกำหนดเพื่อเปรียบเทียบข้อกำหนดผู้ผลิตเครื่องผลิตก๊าซ โอโซน ได้
5. ง่ายและสะดวกต่อผู้ใช้ที่ไม่ชำนาญในการตรวจสอบการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซ โอโซน



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] M.Th.El-Mohandes, et.al.“Ozone Production in Corona Discharge in Air in a Multi-Needle to Plane Configuration.” Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol.2. 1992. pp.1567-1569.
- [8] เขมรัฐ วงศ์ทิมารัตน์ และคณะ. “เครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.” ปริชญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [9] อนรรักษ์ มั่นสุข “เครื่องผลิตก๊าซ โอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์,”วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [10] สำราย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [11] ศิริวัฒน์ โพรเวชกุล, เอกสารประกอบการเรียนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2544

- [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
- [22] J. Moom, *et al*, “ Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Ferroelectric-BalVMica-Sheet Barrier,” *IEEE Tram. Ind, Apphcot.*, vol.34 no. 6, 1998.
- [23] J. A. Dorsey, *et al*, “ Ozone Production in Electrostatic Air Cleaners with Contaminated Electrodes,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 30, no. 2, March/April 1994.
- [24] อ่ำพล ธรรมเจริญ, วิธีการคำนวณและการวิเคราะห์เชิง ตัวเลข ตำรามาตรฐานชุดคณิตศาสตร์ ประยุกต์ เล่มที่ 5, 1/2551

- [25] จตุพงษ์ คารารัตน์ “ศึกษาเวลาของอากาศที่ไหลผ่านช่องอากาศของแท่งอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องผลิตโอโซน” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552
- [26] http://www.ozoneapplications.com/info/ozone_properties.htm ข้อมูลวันที่ 20/03/2010
- [27] www.mksinst.com/docs/UR/astexozonedata.pdf ข้อมูลวันที่ 20/03/2010
- [28] <http://www.mcclainozone.com/research.html> ข้อมูลวันที่ 20/03/2010
- [29] http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_13/3.html ข้อมูลวันที่ 27/04/2010





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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

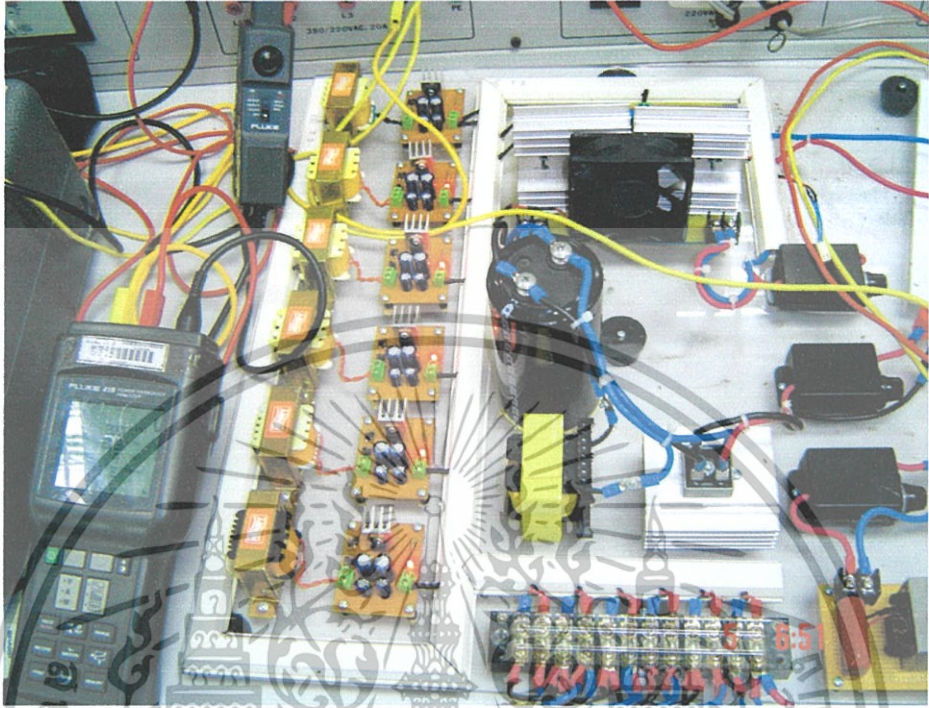
2.2 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 มาปรับค่า pH โดยการนำสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีค่าความเข้มข้น 1 N H_2SO_4 ปริมาณ 3 มิลลิตร (mL) และเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิตร (mL) (เป็นอินดิเคเตอร์) เติมลงไป ในสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองหรือสีส้ม จะกลายเป็นสีน้ำเงิน

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

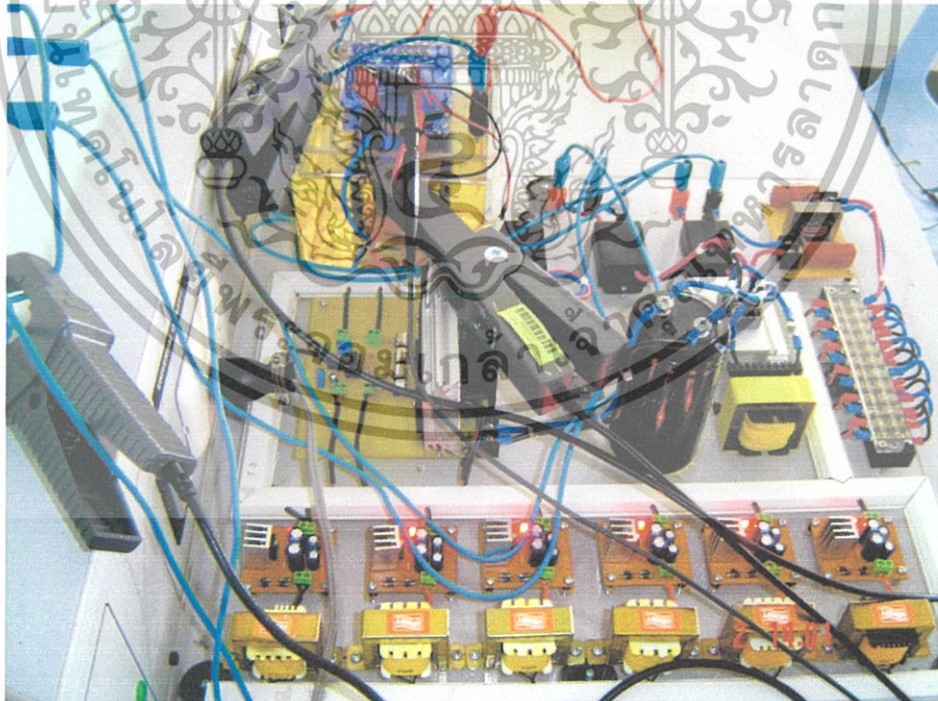
. การคำนวณหาปริมาณไอโชน

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 $1.7 \times 2.4 \times 60 = 122.4 \text{ mgO} / \text{hr}$

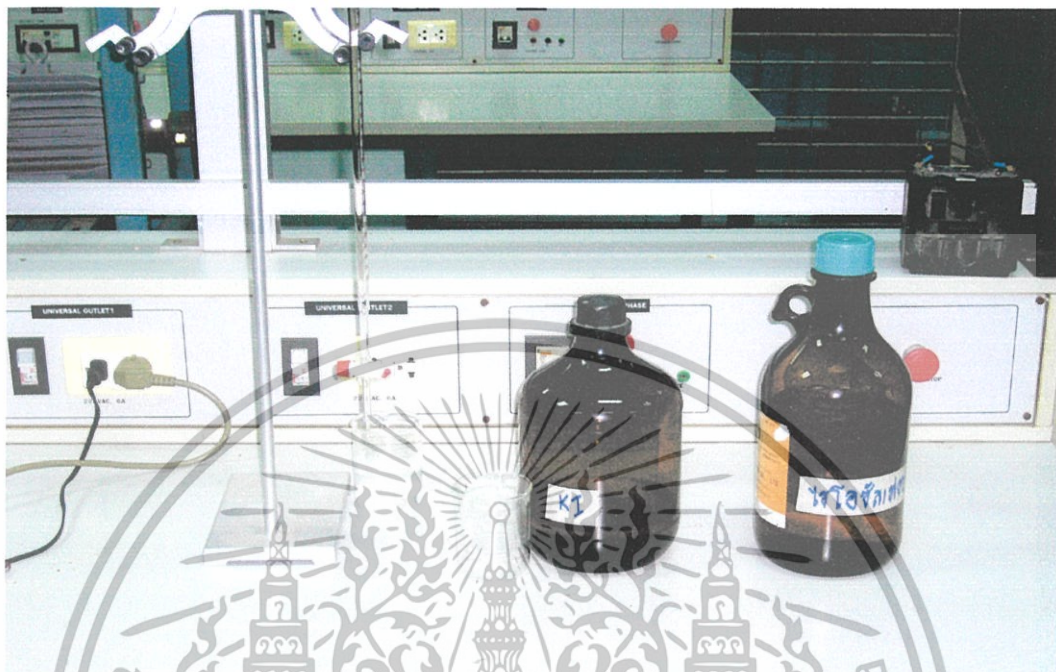


รูปที่ ก.1 การทดลองและเก็บผลการทดลอง

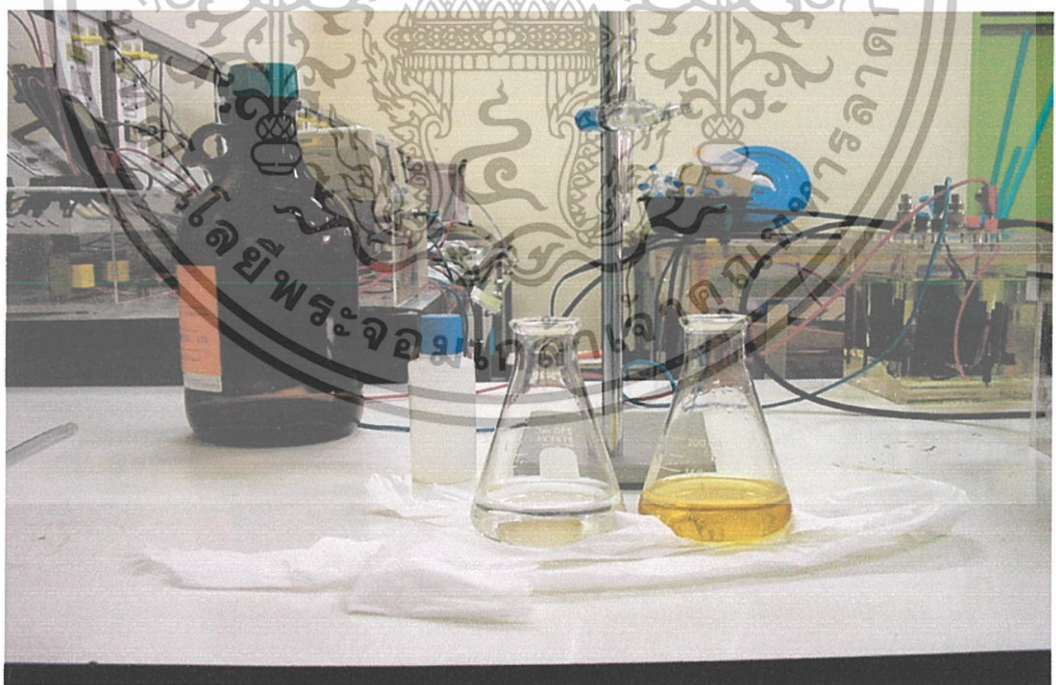


รูปที่ ก.2 การทดลองและเก็บผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

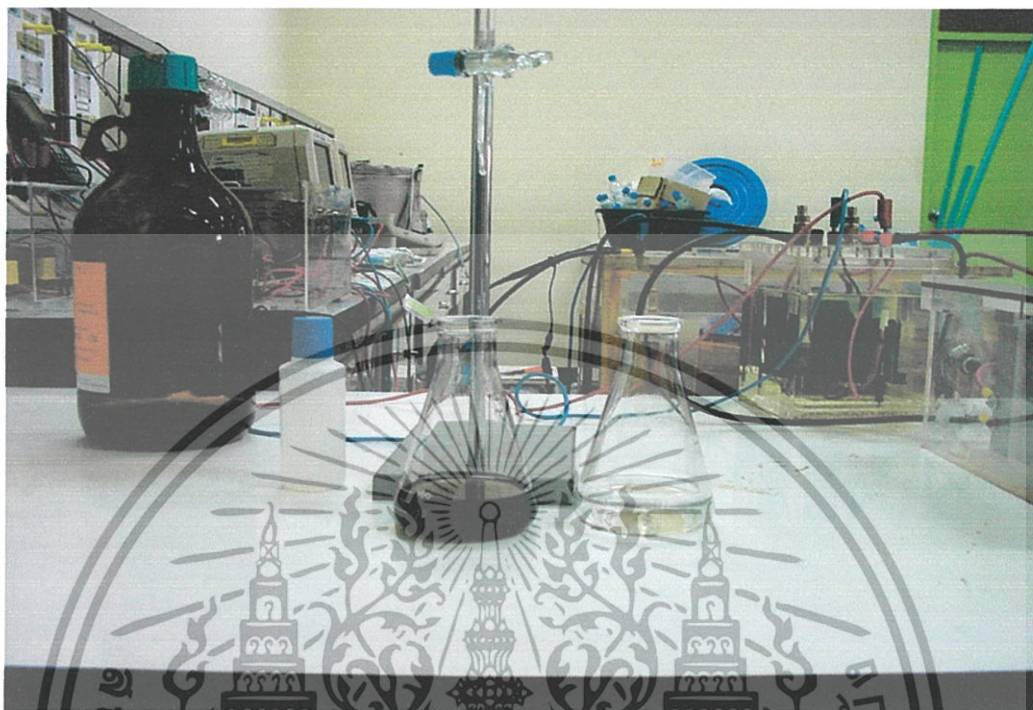


รูปที่ ก.3 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

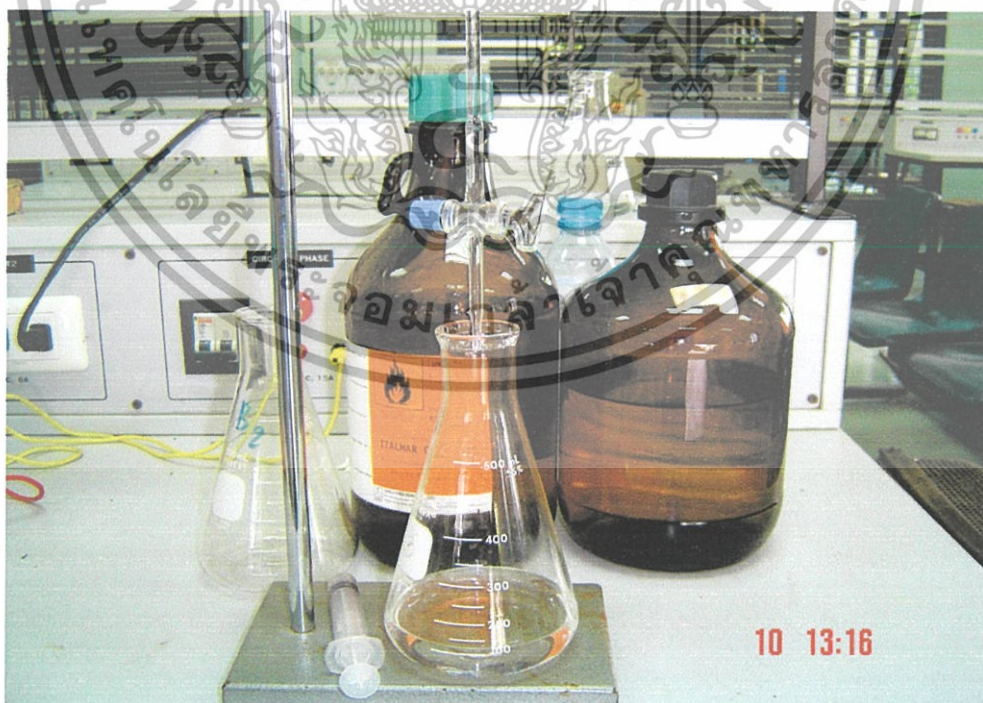


รูปที่ ก.4 สารละลาย KI ก่อนทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 สารละลาย KI หลังทำปฏิกิริยากับ ไอ โชนและผสมกับน้ำแข็ง



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data Sheet

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

IRFP460

Data Sheet

January 2002

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

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

Formerly developmental type TA17465.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRFP460	TO-247	IRFP460

NOTE: When ordering, use the entire part number.

Features

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

Symbol

Packaging

JEDEC STYLE TO-247

 SOURCE
 DRAIN
 GATE

 DRAIN
 (TAB)

IRFP460

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

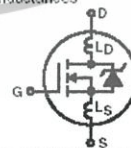
	IRFP460	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1)	500	V
Drain to Gate Voltage ($R_{GS} = 20\text{k}\Omega$) (Note 1)	500	V
Continuous Drain Current	20	A
$T_C = 100^\circ\text{C}$	12	A
Pulsed Drain Current (Note 3)	80	A
Gate to Source Voltage	± 20	V
Maximum Power Dissipation	250	W
Linear Derating Factor	2.0	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	950	mJ
Operating and Storage Temperature	-55 to 150	$^\circ\text{C}$
Maximum Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	300	$^\circ\text{C}$
Package Body for 10s. See Techbrief 334	260	$^\circ\text{C}$

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

NOTE:

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

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

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	$I_D = 250\mu\text{A}$, $V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 10)	500	-	-	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}$, $I_D = 250\mu\text{A}$	2	-	4	V
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = \text{Rated } BV_{DSS}$, $V_{GS} = 0\text{V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}$, $V_{GS} = 0\text{V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times R_{DS(ON)MAX}$, $V_{GS} = 10\text{V}$	20	-	3	A
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$	-	-	100	nA
Drain to Source On-Resistance (Note 2)	$R_{DS(ON)}$	$I_D = 11\text{A}$, $V_{GS} = 10\text{V}$ (Figures 8, 9)	-	0.24	0.27	Ω
Forward Transconductance (Note 2)	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{V}$, $I_{DS} = 11\text{A}$ (Figure 12)	13	19	-	S
Turn-On Delay Time	$t_{R(ON)}$	$V_{DD} = 250\text{V}$, $I_D = 21\text{A}$, $R_{GS} = 4.3\Omega$, $R_D = 12\Omega$, $V_{GS} = 10\text{V}$ MOSFET Switching Times are Essentially Independent of Operating Temperature	-	23	95	ns
Rise Time	t_r		-	81	120	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{R(OFF)}$		-	85	130	ns
Fall Time	t_f		-	65	98	ns
Total Gate Charge (Gate to On + Gate to Drain)	$Q_{g(TOT)}$	$V_{GS} = 10\text{V}$, $I_D = 21\text{A}$, $V_{DS} = 0.8 \times \text{Rated } BV_{DSS}$, $I_{G(REF)} = 1.5\text{mA}$ (Figure 14). Gate Charge is Essentially Independent of Operating Temperature	-	120	190	nC
Gate to Source Charge	Q_{gs}		-	18	-	nC
Gate to Drain "Miller" Charge	Q_{gd}		-	62	-	nC
Input Capacitance	C_{ISS}	$V_{DS} = 25\text{V}$, $V_{GS} = 0\text{V}$, $f = 1\text{MHz}$ (Figure 10)	-	4100	-	pF
Output Capacitance	C_{OSS}		-	480	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{RSS}		-	84	-	pF
Internal Drain Inductance	L_D	Measured from the Drain Lead, 6mm (0.25in) from Package to Center of Die	-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	L_S	Measured from the Source Lead, 6mm (0.25in) from Header to Source Bonding Pad	-	13	-	nH
		Modified MOSFET Symbol Showing the Internal Device Inductances				
						
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$		-	-	0.50	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Free Air Operation	-	-	90	$^\circ\text{C/W}$

IRFP460

Source to Drain Diode Specifications

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

NOTES:

- Pulse test: pulse width $\leq 30\mu\text{s}$, duty cycle $\leq 2\%$.
- Repetitive rating: pulse width limited by Max junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
- $V_{DD} = 50\text{V}$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 4.3\text{mH}$, $R_{GS} = 25\Omega$, Peak $I_{AS} = 20\text{A}$.

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified

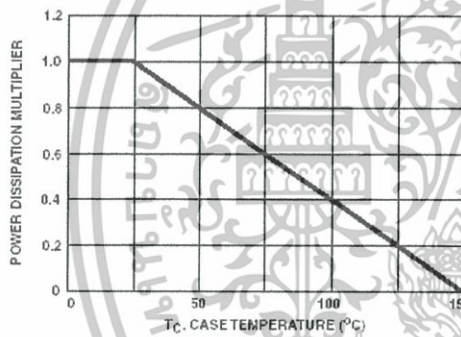


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

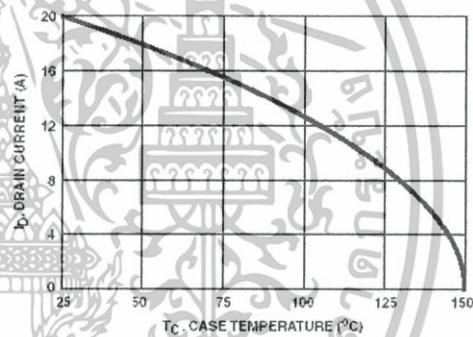


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

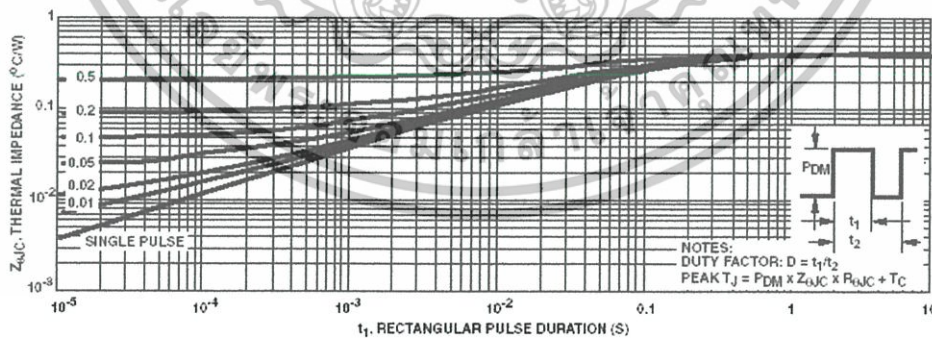


FIGURE 3. MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

IRFP460

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

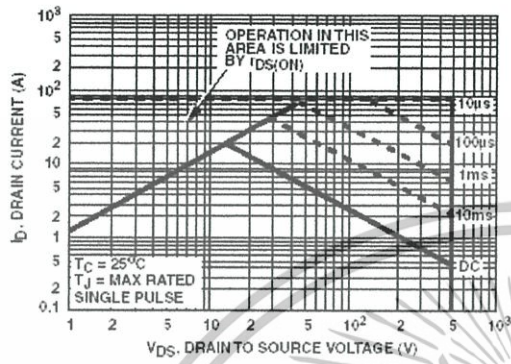


FIGURE 4. FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA

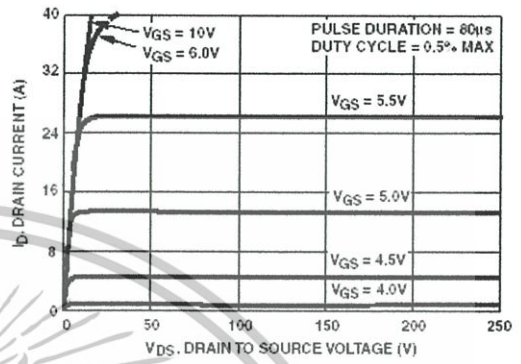


FIGURE 5. OUTPUT CHARACTERISTICS

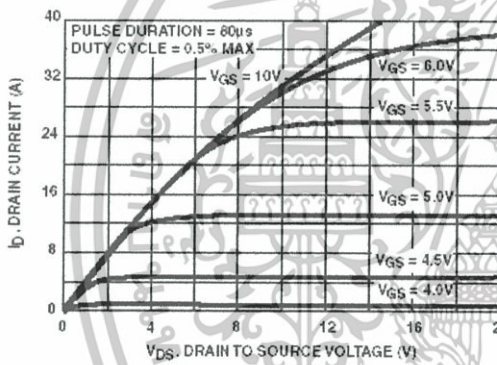


FIGURE 6. SATURATION CHARACTERISTICS

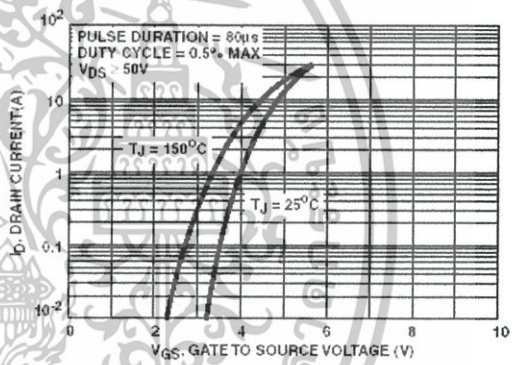


FIGURE 7. TRANSFER CHARACTERISTICS

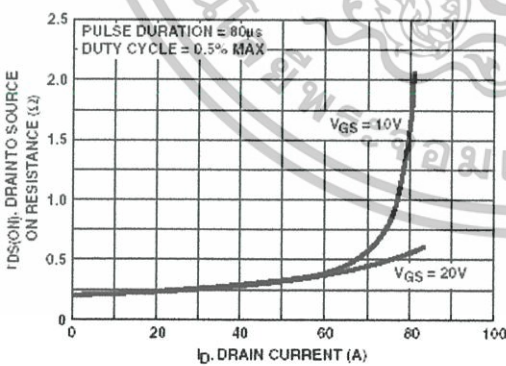


FIGURE 8. DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs GATE VOLTAGE AND DRAIN CURRENT

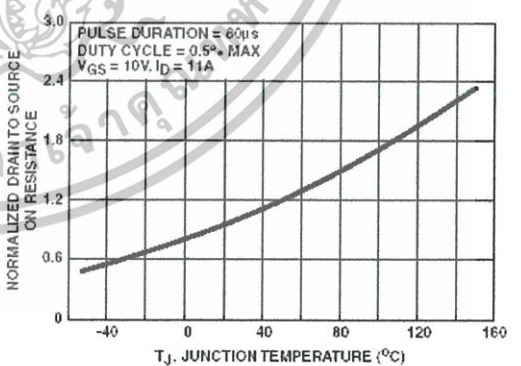


FIGURE 9. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs JUNCTION TEMPERATURE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified (Continued)

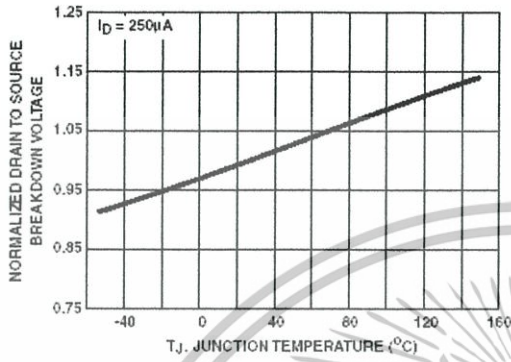


FIGURE 10. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE BREAKDOWN VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

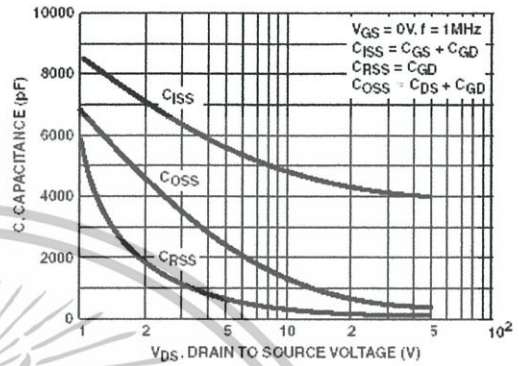


FIGURE 11. CAPACITANCE vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE

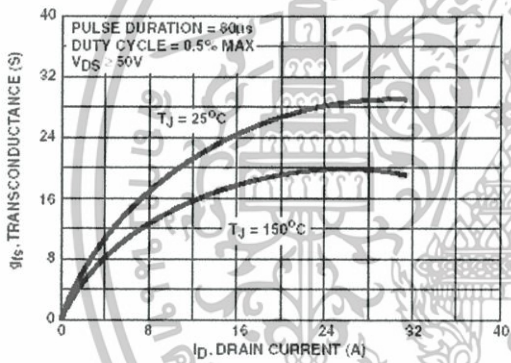


FIGURE 12. TRANSCONDUCTANCE vs DRAIN CURRENT

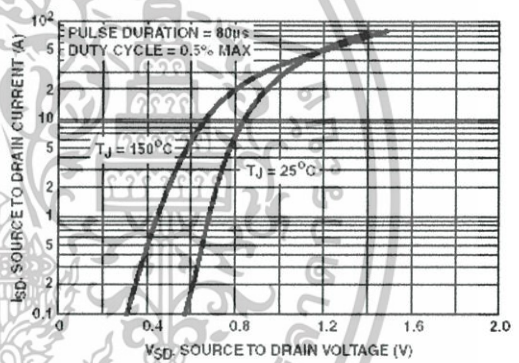


FIGURE 13. SOURCE TO DRAIN DIODE VOLTAGE

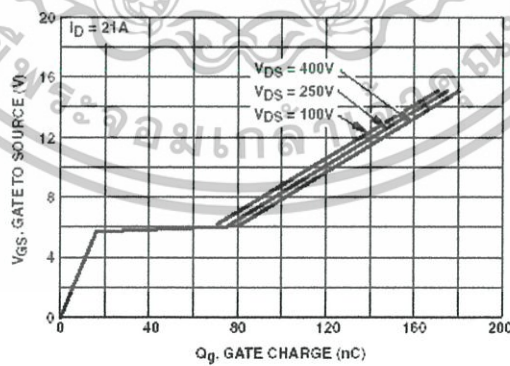


FIGURE 14. GATE TO SOURCE VOLTAGE vs GATE CHARGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Test Circuits and Waveforms

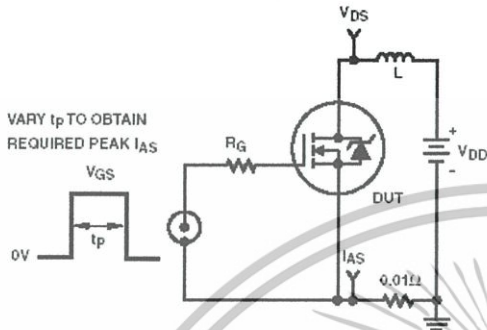


FIGURE 15. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

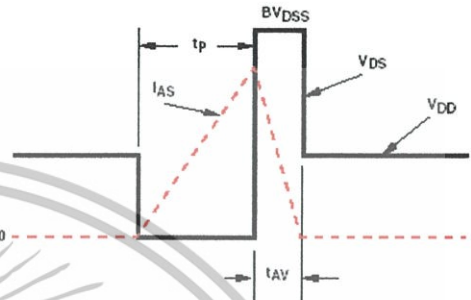


FIGURE 16. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

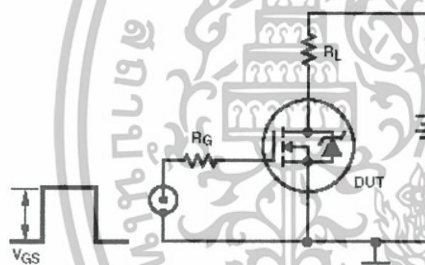


FIGURE 17. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

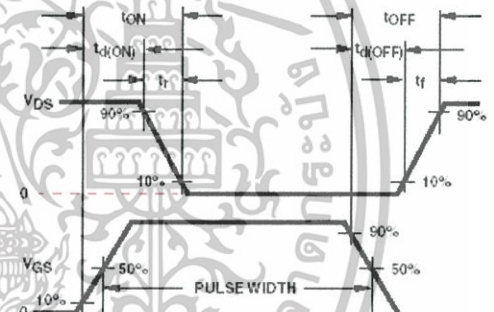


FIGURE 18. RESISTIVE SWITCHING WAVEFORMS

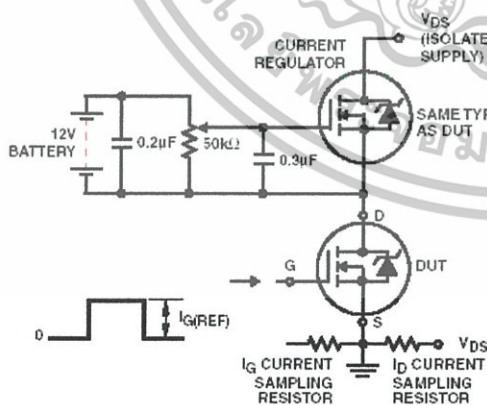


FIGURE 19. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

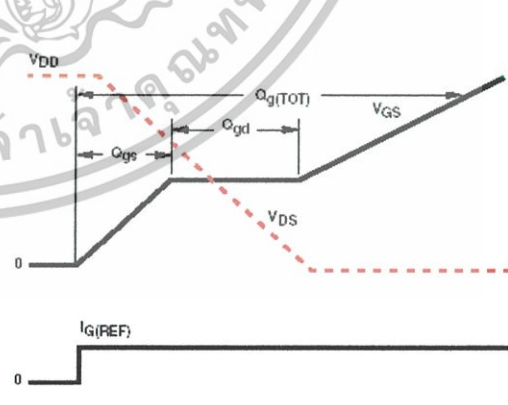


FIGURE 20. GATE CHARGE WAVEFORMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRADEMARKS

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

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

STAR*POWER is used under license

DISCLAIMER

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

LIFE SUPPORT POLICY

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

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

PRODUCT STATUS DEFINITIONS**Definition of Terms**

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

Rev. 114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

TLP250

TOSHIBA PHOTOCOUPLER GaAlAs IRED & PHOTO-IC

TLP250

TRANSISTOR INVERTER
INVERTER FOR AIR CONDITIONOR
IGBT GATE DRIVE
POWER MOS FET GATE DRIVE

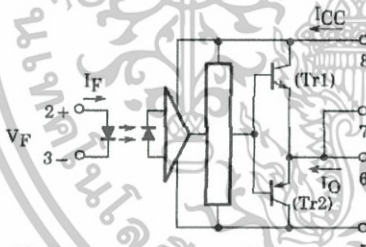
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input Threshold Current : $I_F = 5\text{mA (Max.)}$
- Supply Current (I_{CC}) : 11mA (Max.)
- Supply Voltage (V_{CC}) : $10\text{-}35\text{V}$
- Output Current (I_O) : $\pm 1.5\text{A (Max.)}$
- Switching Time (t_{pLH}/t_{pHL}) : $1.5\mu\text{s (Max.)}$
- Isolation Voltage : $2500\text{V}_{\text{rms}} (\text{Min.})$
- UL Recognized : UL1577, File No.E67349
- Option (D4) type
 VDE Approved : DIN VDE0884/06,92, Certificate No.76823
 Maximum Operating Insulation Voltage : 630V_{PK}
 Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}

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

- Creepage Distance : 6.4mm (Min.)
 Clearance : 6.4mm (Min.)

SCHMATIC

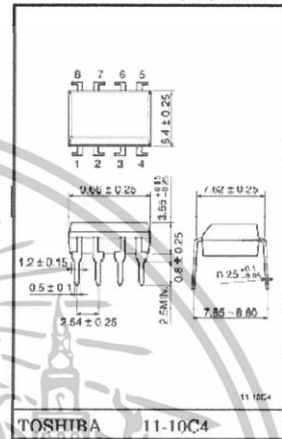


A $0.1\mu\text{F}$ bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

TRUTH TABLE

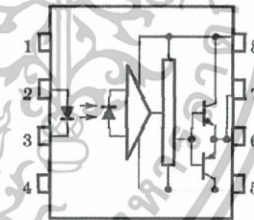
	Tr1	Tr2
Input LED ON	ON	OFF
Input LED OFF	OFF	ON

Unit in mm



TOSHIBA 11-10C4
Weight : 0.54g

PIN CONFIGURATION (TOP VIEW)



- 1 : N.C.
- 2 : ANODE
- 3 : CATHODE
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (OUTPUT)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

961001EBC2
 ● TOSHIBA is continually working to improve the quality and the reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to observe standards of safety, and to avoid situations in which a malfunction or failure of a TOSHIBA product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property in developing your design. Please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook.

TOSHIBA

TLP250

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	RATING	UNIT	
LED	Forward Current	I _F	20	mA	
	Forward Current Derating (Ta ≧ 70°C)	ΔI _F /ΔTa	-0.36	mA/°C	
	Peak Transient Forward Current (Note 1)	I _{FPT}	1	A	
	Reverse Voltage	V _R	5	V	
Junction Temperature		T _j	125	°C	
DETECTOR	"H" Peak Output Current (P _W ≦ 2.5 μs, f ≦ 15 kHz) (Note 2)	I _{OPH}	-1.5	A	
	"L" Peak Output Current (P _W ≦ 2.5 μs, f ≦ 15 kHz) (Note 2)	I _{OPL}	+1.5	A	
	Output Voltage	V _O	(Ta ≦ 70°C)	35	V
			(Ta ≦ 85°C)	24	
	Supply Voltage	V _{CC}	(Ta ≦ 70°C)	35	V
			(Ta ≦ 85°C)	24	
	Output Voltage Derating (Ta ≧ 70°C)	ΔV _O /ΔTa	-0.73	V/°C	
	Supply Voltage Derating (Ta ≧ 70°C)	ΔV _{CC} /ΔTa	-0.73	V/°C	
	Junction Temperature		T _j	125	°C
	Operating Frequency (Note 3)		f	25	kHz
Operating Temperature Range		T _{opr}	-20~85	°C	
Storage Temperature Range		T _{stg}	-55~125	°C	
Lead Soldering Temperature (10s)		T _{sol}	260	°C	
Isolation Voltage (AC, 1min., R.H. ≦ 60%) (Note 4)		BV _S	2500	Vrms	

(Note 1) Pulse width P_W ≦ 1 μs, 300pps

(Note 2) Exponential Waveform

(Note 3) Exponential Waveform, I_{OPH} ≦ -1.0A (≦ 2.5 μs), I_{OPL} ≦ +1.0A (≦ 2.5 μs)

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

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

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Input Current, ON	I _F (ON)	7	8	10	mA
Input Voltage, OFF	V _F (OFF)	0	—	0.8	V
Supply Voltage	V _{CC}	15	—	30 20	V
Peak Output Current	I _{OPH} /I _{OPL}	—	—	±0.5	A
Operating Temperature	T _{opr}	-20	25	70 85	°C

961001E6C2

- Gallium arsenide (GaAs) is a substance used in the products described in this document. GaAs dust and fumes are toxic. Do not break, cut or pulverize the product, or use chemicals to dissolve them. When disposing of the products, follow the appropriate regulations. Do not dispose of the products with other industrial waste or with domestic garbage.
- The products described in this document are subject to foreign exchange and foreign trade control laws.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

1998-03-05 2/7

TOSHIBA**TLP250**

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = -20~70°C, Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CIRCUIT	TEST CONDITION	MIN.	TYP.*	MAX.	UNIT	
Input Forward Voltage	V _F	—	I _F = 10mA, Ta = 25°C	—	1.6	1.8	V	
Temperature Coefficient of Forward Voltage	ΔV _F /ΔTa	—	I _F = 10mA	—	-2.0	—	mV/°C	
Input Reverse Current	I _R	—	V _R = 5V, Ta = 25°C	—	—	10	μA	
Input Capacitance	C _T	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF	
Output Current	"H" Level	I _{OPH}	3	I _F = 10mA V _{CC} = 30V V _{g-6} = 4V (*1)	-0.5	-1.5	—	A
	"L" Level	I _{OPL}	2	I _F = 0 V _{g-5} = 2.5V	0.5	2	—	
Output Voltage	"H" Level	V _{OH}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" Level	V _{OL}	5	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply Current	"H" Level	I _{CCH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
	"L" Level	I _{CCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11	
				V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11					
Threshold Input Current	"Output L→H"	I _{FLH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold Input Voltage	"Output H→L"	V _{FHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O ≤ 0V	0.8	—	—	V
Supply Voltage	V _{CC}	—	—	10	—	35	V	
Capacitance (Input-Output)	C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF	
Resistance (Input-Output)	R _S	—	V _S = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω	

* All typical values are at Ta = 25°C (*1) : Duration of I_O time ≤ 50μs

1998-03-05 3/7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA**TLP250**

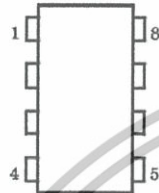
SWITCHING CHARACTERISTICS (Ta = -20~70°C, Unless otherwise specified)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CIR-CUIT	TEST CONDITION	MIN.	TYP.*	MAX.	UNIT
Propagation Delay Time	L→H	t _{plH}	6	I _F =8mA V _{CC1} =+15V, V _{EE1} =-15V R _L =200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t _{pHL}			—	0.15	0.5	
Output Rise Time		t _r			—	—	—	
Output Fall Time		t _f			—	—	—	
Common Mode Transient Immunity at High Level Output		C _{MH}	7	V _{CM} =600V, I _F =8mA V _{CC} =30V, Ta=25°C	-5000	—	—	V / μs
Common Mode Transient Immunity at Low Level Output		C _{ML}	7	V _{CM} =600V, I _F =0mA V _{CC} =30V, Ta=25°C	5000	—	—	V / μs

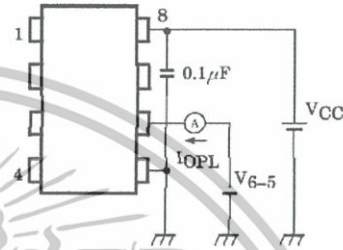
* All typical values are at Ta=25°C



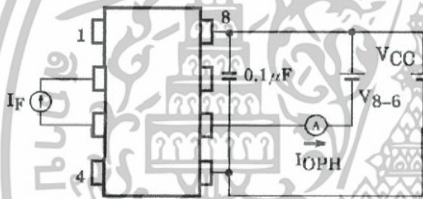
TEST CIRCUIT 1 :



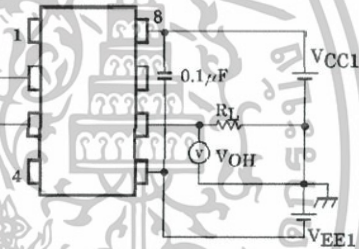
TEST CIRCUIT 2 : IOPL



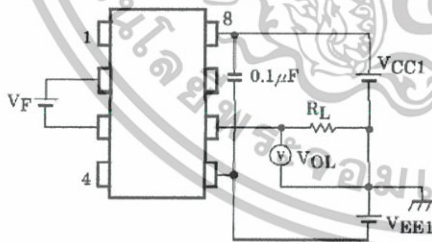
TEST CIRCUIT 3 : IOPH



TEST CIRCUIT 4 : VOH

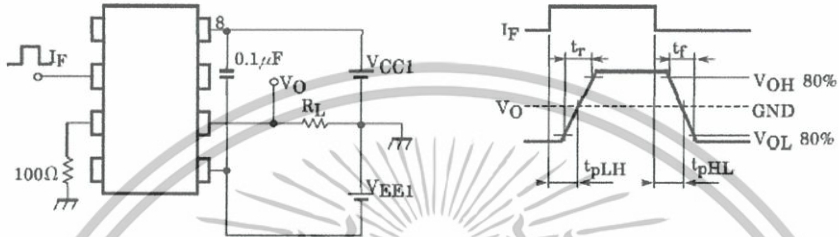


TEST CIRCUIT 5 : VOL

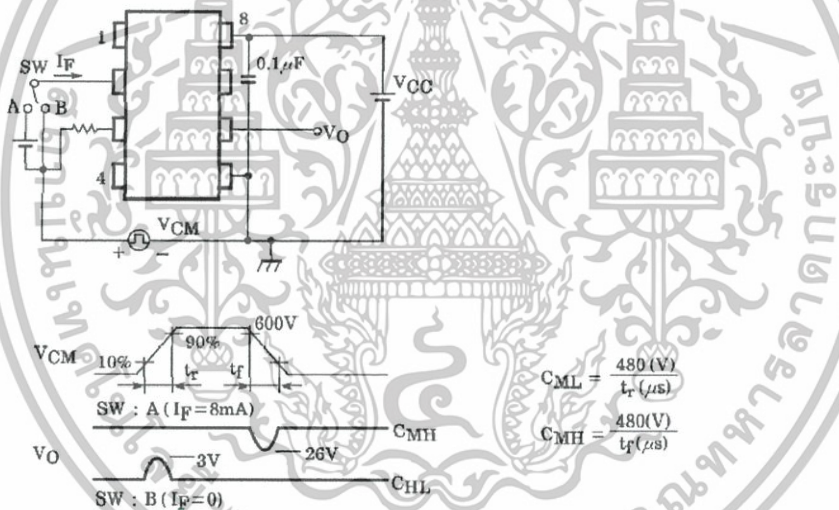


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

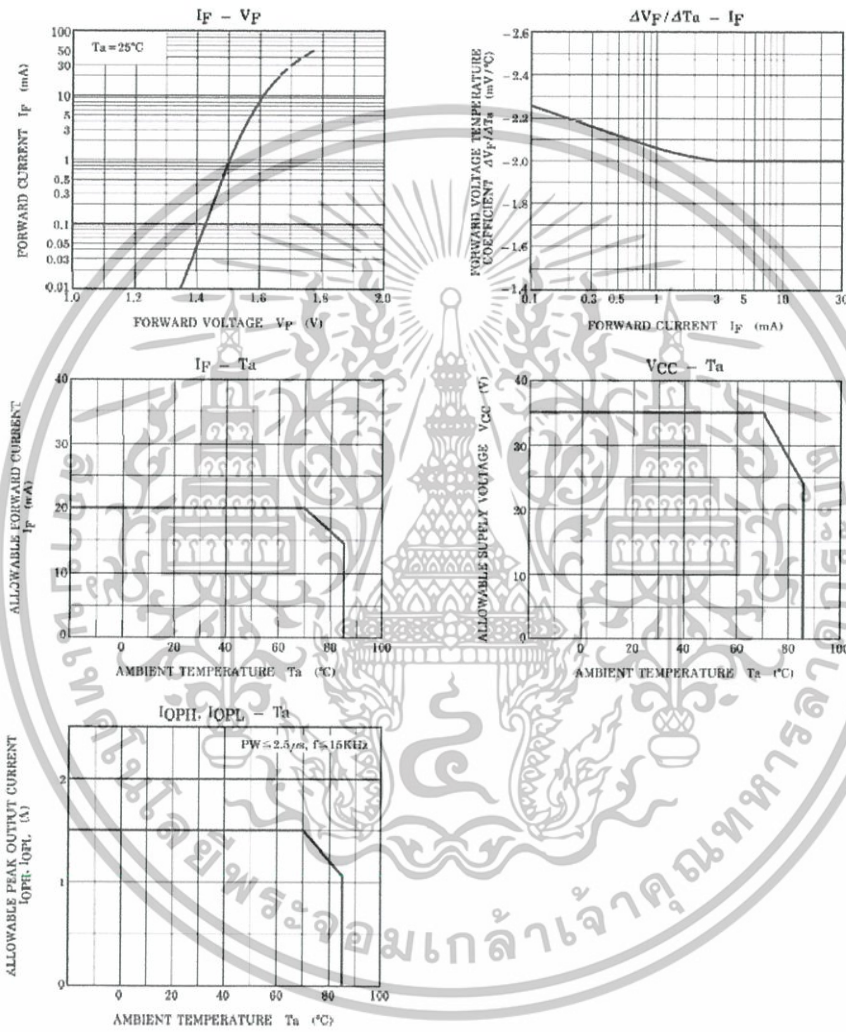
TEST CIRCUIT 6 : t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f



TEST CIRCUIT 7 : C_{MH} , C_{ML}



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



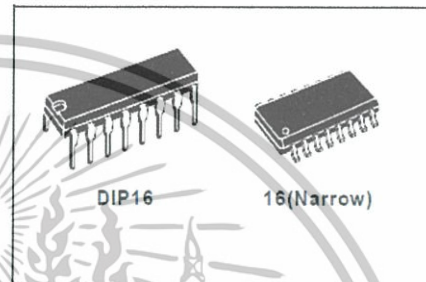
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SG2525A
SG3525A

REGULATING PULSE WIDTH MODULATORS

- 8 TO 35 V OPERATION
- 5.1 V REFERENCE TRIMMED TO $\pm 1\%$
- 100 Hz TO 500 KHz OSCILLATOR RANGE
- SEPARATE OSCILLATOR SYNC TERMINAL
- ADJUSTABLE DEADTIME CONTROL
- INTERNAL SOFT-START
- PULSE-BY-PULSE SHUTDOWN
- INPUT UNDERVOLTAGE LOCKOUT WITH HYSTERESIS
- LATCHING PWM TO PREVENT MULTIPLE PULSES
- DUAL SOURCE/SINK OUTPUT DRIVERS

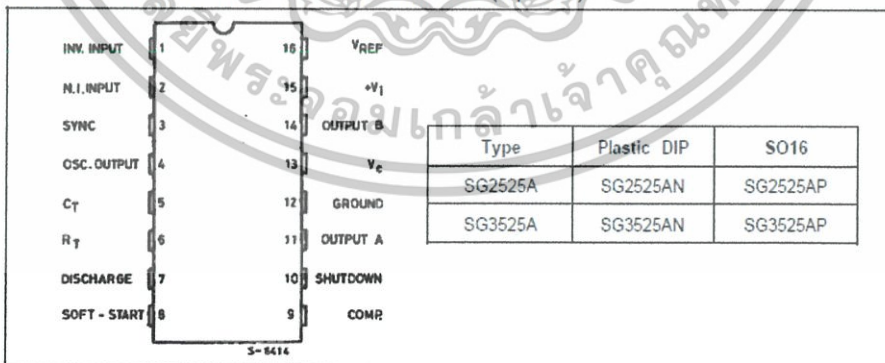


DESCRIPTION

The SG3525A series of pulse width modulator integrated circuits are designed to offer improved performance and lowered external parts count when used in designing all types of switching power supplies. The on-chip $+5.1\text{V}$ reference is trimmed to $\pm 1\%$ and the input common-mode range of the error amplifier includes the reference voltage eliminating external resistors. A sync input to the oscillator allows multiple units to be slaved or a single unit to be synchronized to an external system clock. A single resistor between the C_T and the discharge terminals provide a wide range of dead time adjustment. These devices also feature built-in soft-start circuitry with only an external timing capacitor required. A shutdown terminal controls both the soft-start circuitry and the output stages, providing instantaneous

turn off through the PWM latch with pulsed shutdown, as well as soft-start recycle with longer shutdown commands. These functions are also controlled by an undervoltage lockout which keeps the outputs off and the soft-start capacitor discharged for sub-normal input voltages. This lockout circuitry includes approximately 500mV of hysteresis for jitter-free operation. Another feature of these PWM circuits is a latch following the comparator. Once a PWM pulses has been terminated for any reason, the outputs will remain off for the duration of the period. The latch is reset with each clock pulse. The output stages are totem-pole designs capable of sourcing or sinking in excess of 200mA . The SG3525A output stage features NOR logic, giving a LOW output for an OFF state.

PIN CONNECTIONS AND ORDERING NUMBERS (top view)



SG2525A-SG3525A

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

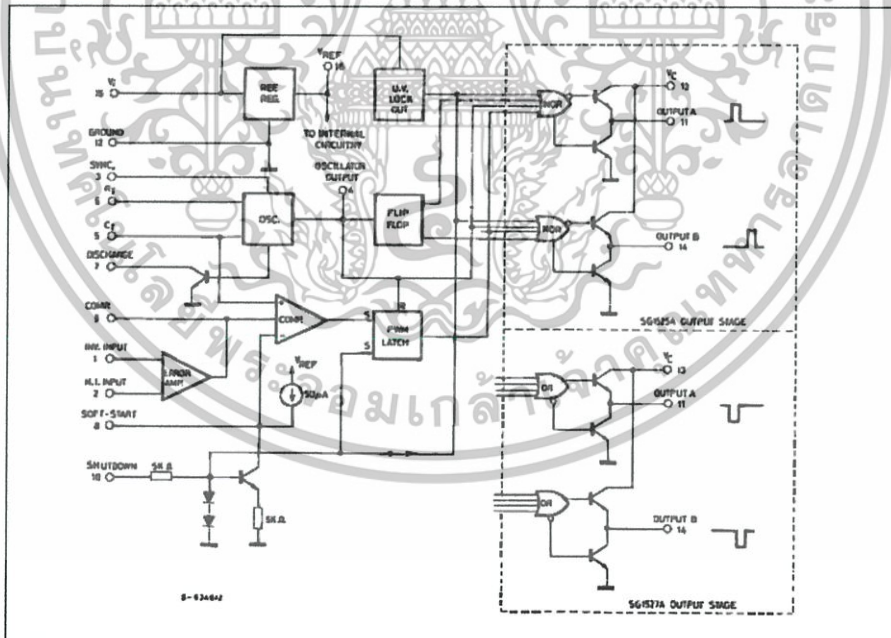
Symbol	Parameter	Value	Unit
V_i	Supply Voltage	40	V
V_C	Collector Supply Voltage	40	V
I_{OSC}	Oscillator Charging Current	5	mA
I_o	Output Current, Source or Sink	500	mA
I_R	Reference Output Current	50	mA
I_T	Current through C_T Terminal	5	mA
	Logic Inputs	- 0.3 to + 5.5	V
	Analog Inputs	- 0.3 to V_i	V
P_{tot}	Total Power Dissipation at $T_{amb} = 70^\circ\text{C}$	1000	mW
T_j	Junction Temperature Range	- 55 to 150	$^\circ\text{C}$
T_{stg}	Storage Temperature Range	- 65 to 150	$^\circ\text{C}$
T_{op}	Operating Ambient Temperature : SG2525A SG3525A	- 25 to 85 0 to 70	$^\circ\text{C}$

THERMAL DATA

Symbol	Parameter	SO16	DIP16	Unit
$R_{th(j-pins)}$	Thermal Resistance Junction-pins	Max	50	$^\circ\text{C/W}$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max	80	$^\circ\text{C/W}$
$R_{th(j-alumina)}$	Thermal Resistance Junction-alumina (*)	Max	50	$^\circ\text{C/W}$

* Thermal resistance junction-alumina with the device soldered on the middle of an alumina supporting substrate measuring 15×20 mm ; 0.65 mm thickness with infinite heatsink.

BLOCK DIAGRAM



SG2525A-SG3525A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V# i = 20 V, and over operating temperature, unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	SG2525A			SG3525A			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
REFERENCE SECTION									
V _{REF}	Output Voltage	T _J = 25 °C	5.05	5.1	5.15	5	5.1	5.2	V
ΔV _{REF}	Line Regulation	V _I = 8 to 35 V		10	20		10	20	mV
ΔV _{REF}	Load Regulation	I _L = 0 to 20 mA		20	50		20	50	mV
ΔV _{REF} /ΔT*	Temp. Stability	Over Operating Range		20	50		20	50	mV
*	Total Output Variation	Line, Load and Temperature	5		5.2	4.95		5.25	V
	Short Circuit Current	V _{REF} = 0 T _J = 25 °C		80	100		80	100	mA
*	Output Noise Voltage	10 Hz ≤ f ≤ 10 kHz, T _J = 25 °C		40	200		40	200	μVrms
ΔV _{REF}	Long Term Stability	T _J = 125 °C, 1000 hrs		20	50		20	50	mV
OSCILLATOR SECTION									
* •	Initial Accuracy	T _J = 25 °C		± 2	± 6		± 2	± 6	%
* •	Voltage Stability	V _I = 8 to 35 V		± 0.3	± 1		± 1	± 2	%
Δf/ΔT*	Temperature Stability	Over Operating Range		± 3	± 6		± 3	± 6	%
f _{MIN}	Minimum Frequency	R _T = 200 KΩ C _T = 0.1 μF			120			120	Hz
f _{MAX}	Maximum Frequency	R _T = 2 KΩ C _T = 470 pF	400			400			KHz
	Current Mirror	I _{RT} = 2 mA	1.7	2	2.2	1.7	2	2.2	mA
	Clock Amplitude		3	3.5		3	3.5		V
	Clock Width	T _J = 25 °C	0.3	0.5	1	0.3	0.5	1	μs
	Sync Threshold		1.2	2	2.8	1.2	2	2.8	V
	Sync Input Current	Sync Voltage = 3.5 V		1	2.5		1	2.5	mA
ERROR AMPLIFIER SECTION (V_{CM} = 5.1 V)									
V _{OS}	Input Offset Voltage			0.5	5		2	10	mV
I _b	Input Bias Current			1	10		1	10	μA
I _{of}	Input Offset Current				1			1	μA
	DC Open Loop Gain	R _L ≥ 10 MΩ	60	75		60	75		dB
*	Gain Bandwidth Product	G _v = 0 dB T _J = 25 °C	1	2		1	2		MHz
*	DC Transconduct	30 KΩ ≤ R _L ≤ 1 MΩ T _J = 25 °C	1.1	1.5		1.1	1.5		ms
	Output Low Level			0.2	0.5		0.2	0.5	V
	Output High Level		3.8	5.6		3.8	5.6		V
CMR	Comm. Mode Reject.	V _{CM} = 1.5 to 5.2 V	60	75		60	75		dB
PSR	Supply Voltage Rejection	V _I = 8 to 35 V	60	60		50	60		dB

SG2525A-SG3525A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	SG2525A			SG3525A			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
PWM COMPARATOR									
	Minimum Duty-cycle				0			0	%
•	Maximum Duty-cycle		45	49		45	49		%
•	Input Threshold	Zero Duty-cycle	0.7	0.9		0.7	0.9		V
		Maximum Duty-cycle		3.3	3.6		3.3	3.6	
*	Input Bias Current			0.05	1		0.05	1	μA
SHUTDOWN SECTION									
	Soft Start Current	$V_{SD} = 0\text{ V}, V_{SS} = 0\text{ V}$	25	50	80	25	50	80	μA
	Soft Start Low Level	$V_{SD} = 2.5\text{ V}$		0.4	0.7		0.4	0.7	V
	Shutdown Threshold	To outputs, $V_{SS} = 5.1\text{ V}$ $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$	0.6	0.8	1	0.6	0.8	1	V
	Shutdown Input Current	$V_{SD} = 2.5\text{ V}$		0.4	1		0.4	1	mA
*	Shutdown Delay	$V_{SD} = 2.5\text{ V}, T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$		0.2	0.5		0.2	0.5	μs
OUTPUT DRIVERS (each output) ($V_C = 20\text{ V}$)									
	Output Low Level	$I_{sink} = 20\text{ mA}$		0.2	0.4		0.2	0.4	V
		$I_{sink} = 100\text{ mA}$		1	2		1	2	V
	Output High Level	$I_{source} = 20\text{ mA}$	18	19		18	19		V
		$I_{source} = 100\text{ mA}$	17	18		17	18		V
	Under-Voltage Lockout	V_{comp} and $V_{SS} = \text{High}$	6	7	8	6	7	8	V
I_C	Collector Leakage	$V_C = 35\text{ V}$			200			200	μA
t_r^*	Rise Time	$C_L = 1\text{ nF}, T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$		100	600		100	600	ns
t_f^*	Fall Time	$C_L = 1\text{ nF}, T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$		50	300		50	300	ns
TOTAL STANDBY CURRENT									
I_s	Supply Current	$V_i = 35\text{ V}$		14	20		14	20	mA

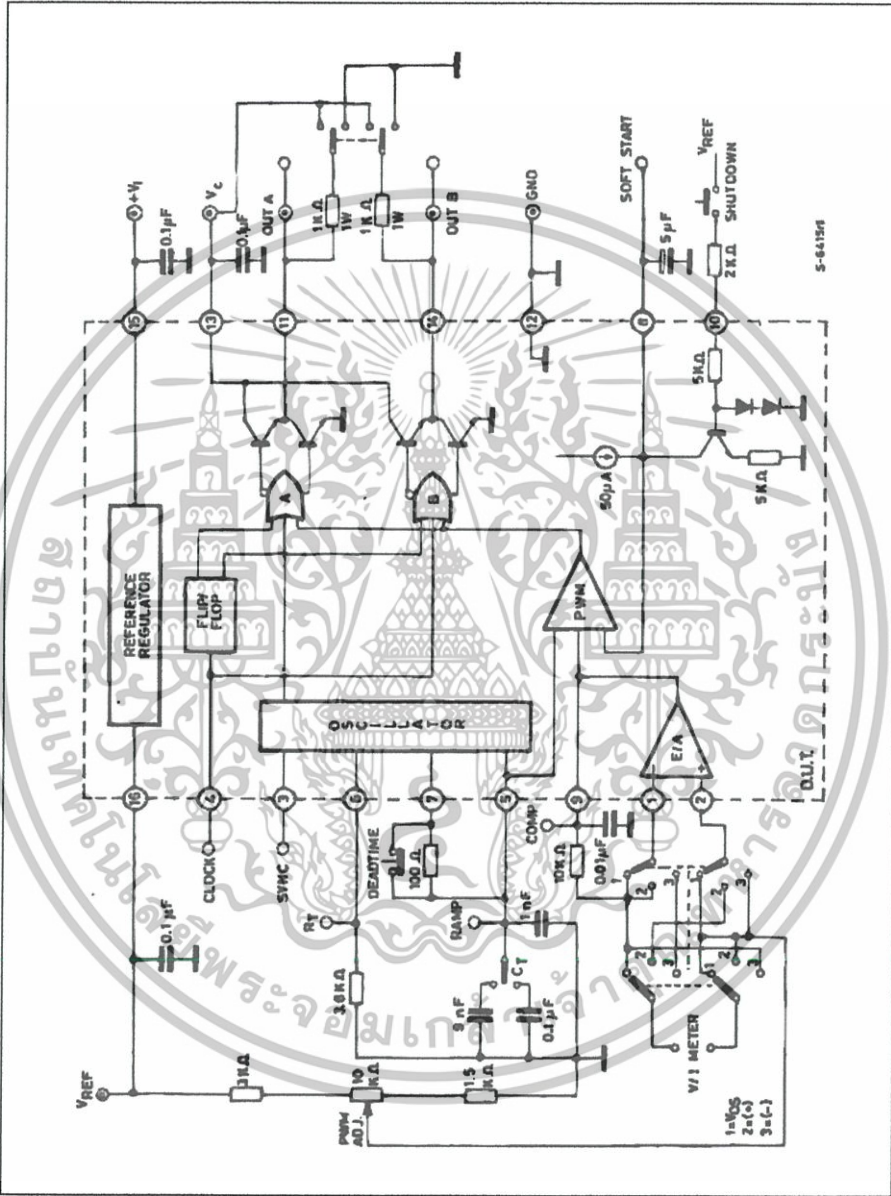
* These parameters, although guaranteed over the recommended operating conditions, are not 100% tested in production.

• Tested at $f_{osc} = 40\text{ kHz}$ ($R_T = 3.6\text{ k}\Omega, C_T = 10\text{ nF}, R_O = 0\text{ }\Omega$). Approximate oscillator frequency is defined by:

$$f = \frac{1}{C_T(0.7 R_T + 3 R_O)}$$

■ DC transconductance (g_m) relates to DC open-loop voltage gain (G_v) according to the following equation: $G_v = g_m R_L$ where R_L is the resistance from pin 9 to ground. The minimum g_m specification is used to calculate minimum G_v when the error amplifier output is loaded.

TEST CIRCUIT



S-64154



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG2525A-SG3525A

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS (*)

Parameter	Value
Input Voltage (V_i)	8 to 35 V
Collector Supply Voltage (V_C)	4.5 to 35 V
Sink/Source Load Current (steady state)	0 to 100 mA
Sink/Source Load Current (peak)	0 to 400 mA
Reference Load Current	0 to 20 mA
Oscillator Frequency Range	100 Hz to 400 KHz
Oscillator Timing Resistor	2 K Ω to 150 K Ω
Oscillator Timing Capacitor	0.001 μ F to 0.1 μ F
Dead Time Resistor Range	0 to 500 Ω

(*) Range over which the device is functional and parameter limits are guaranteed.

Figure 1 : Oscillator Charge Time vs. R_T and C_T .

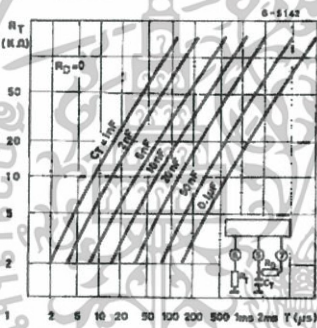


Figure 2 : Oscillator Discharge Time vs. R_D and C_T .

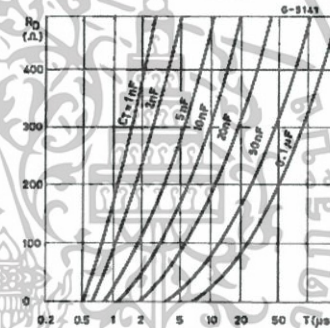


Figure 3 : Output Saturation Characteristics.

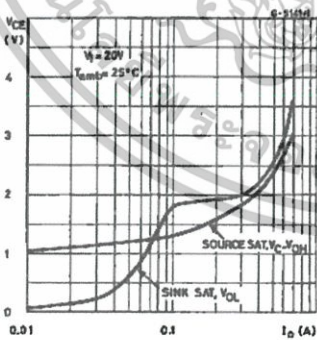


Figure 4 : Error Amplifier Voltage Gain and Phase vs. Frequency.

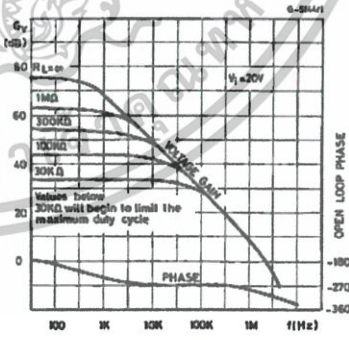
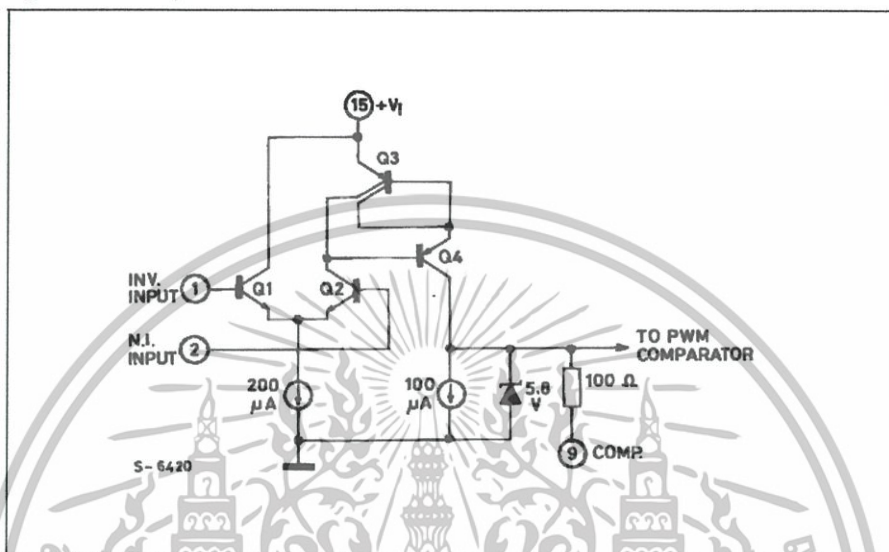


Figure 5 : Error Amplifier.



PRINCIPLES OF OPERATION

SHUTDOWN OPTIONS (see Block Diagram)

Since both the compensation and soft-start terminals (Pins 9 and 8) have current source pull-ups, either can readily accept a pull-down signal which only has to sink a maximum of 100 μA to turn off the outputs. This is subject to the added requirement of discharging whatever external capacitance may be attached to these pins.

An alternate approach is the use of the shutdown circuitry of Pin 10 which has been improved to enhance the available shutdown options. Activating this circuit by applying a positive signal on Pin 10 performs two functions: the PWM latch is immedi-

ately set providing the fastest turn-off signal to the outputs, and a 150 μA current sink begins to discharge the external soft-start capacitor. If the shutdown command is short, the PWM signal is terminated without significant discharge of the soft-start capacitor, thus, allowing, for example, a convenient implementation of pulse-by-pulse current limiting. Holding Pin 10 high for a longer duration, however, will ultimately discharge this external capacitor, recycling slow turn-on upon release.

Pin 10 should not be left floating as noise pickup could conceivably interrupt normal operation.

SG2525A-SG3525A

Figure 6 : Oscillator Schematic.

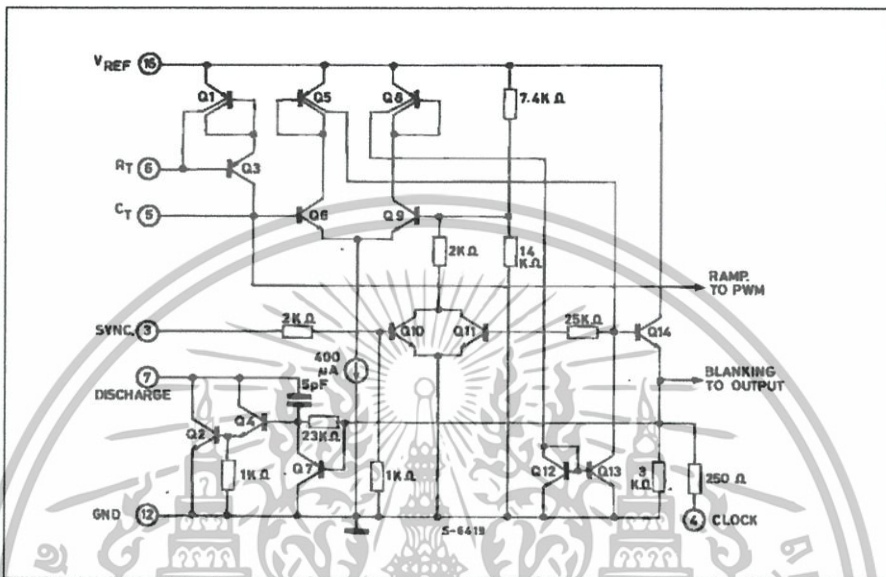


Figure 7 : Output Circuit (1/2 circuit shown).

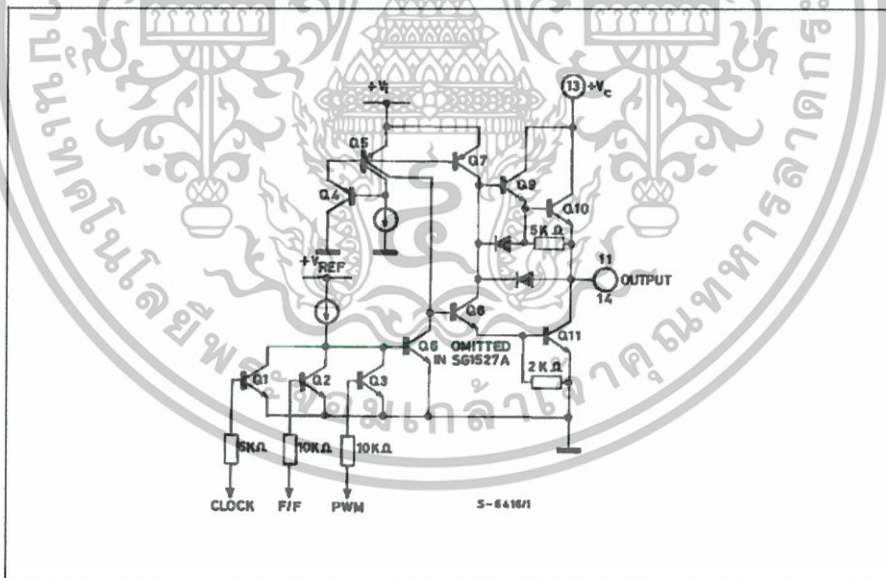
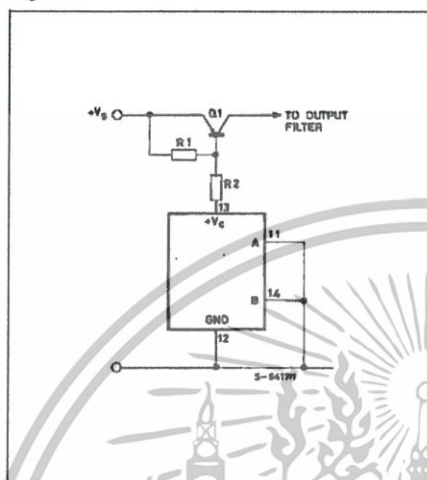
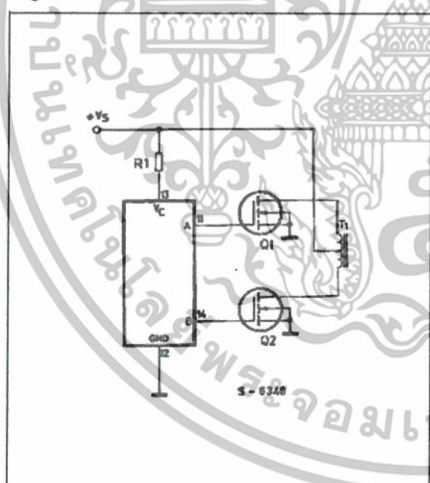


Figure 8.



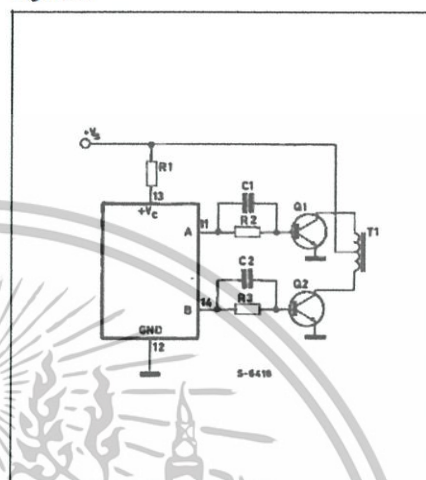
For single-ended supplies, the driver outputs are grounded. The V_c terminal is switched to ground by the totem-pole source transistors on alternate oscillator cycles.

Figure 10.



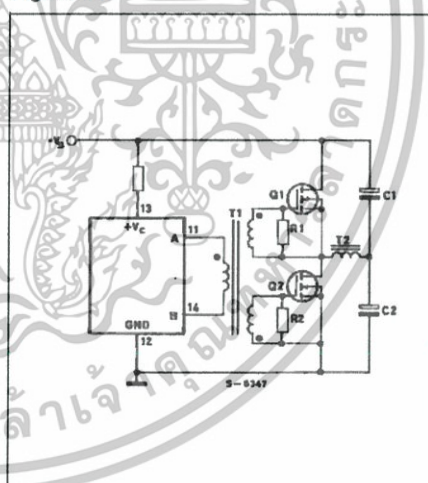
The low source impedance of the output drivers provides rapid charging of Power Mos input capacitance while minimizing external components.

Figure 9.



In conventional push-pull bipolar designs, forward base drive is controlled by $R_1 - R_3$. Rapid turn-off times for the power devices are achieved with speed-up capacitors C_1 and C_2 .

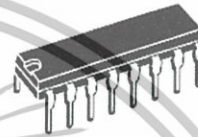
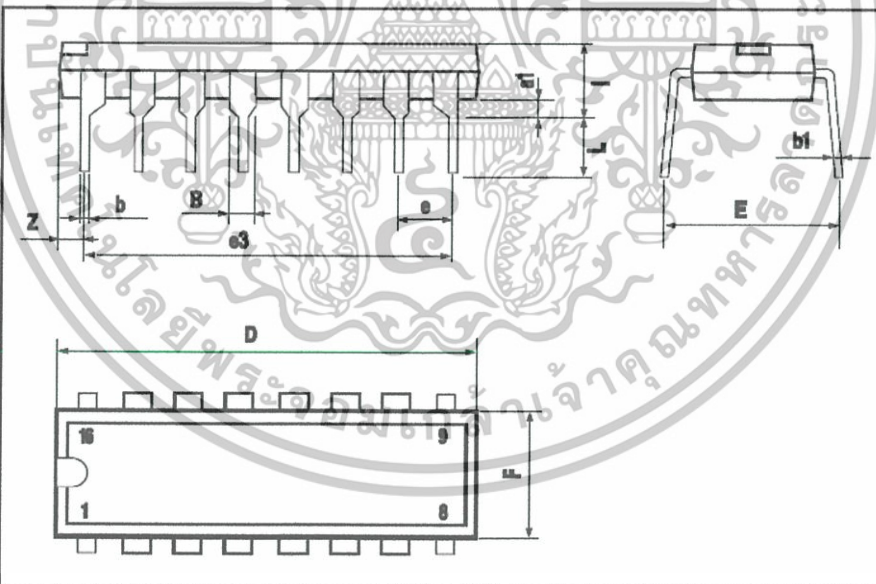
Figure 11.



Low power transformers can be driven directly. Automatic reset occurs during dead time, when both ends of the primary winding are switched to ground.

SG2525A-SG3525A

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
a1	0.51			0.020		
B	0.77		1.65	0.030		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		17.78			0.700	
F			7.1			0.280
l			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z			1.27			0.050

**OUTLINE AND
MECHANICAL DATA**

DIP16


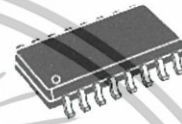
10/12



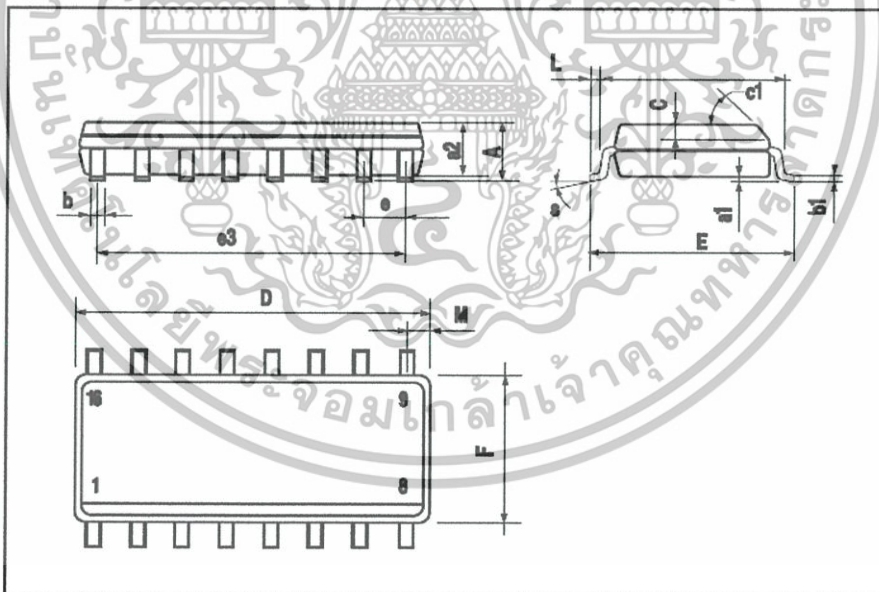
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG2525A-SG3525A

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.25	0.004		0.009
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1	45° (typ.)					
D (1)	9.8		10	0.386		0.394
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		8.89			0.350	
F (1)	3.8		4	0.150		0.157
G	4.6		5.3	0.181		0.209
L	0.4		1.27	0.016		0.050
M			0.62			0.024
S	8° (max.)					

**OUTLINE AND
MECHANICAL DATA**

SO16 Narrow

(1) D and F do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15mm (0.006inch).



11/12

SG2525A-SG3525A



Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics
 © 2000 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved
 STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES
 Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco -
 Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A.
<http://www.st.com>

12/12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

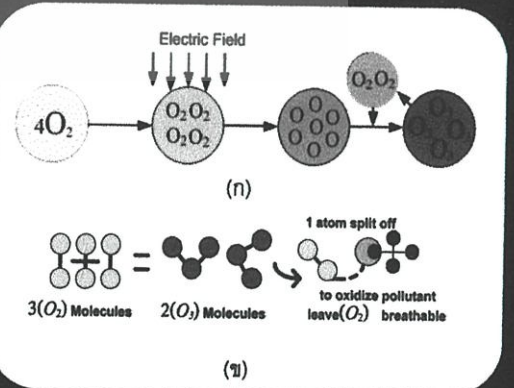
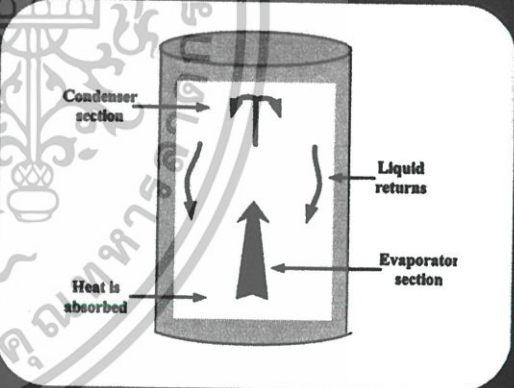
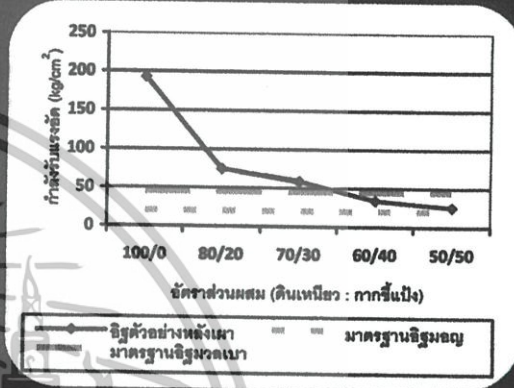


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วิศวกรรมศาสตร์

KKU ENGINEERING JOURNAL



การศึกษาผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรดเพื่อการผลิตไอโซน

เสนีย์ สาทลาลัย^{*} และ วีระเชษฐ ชื่นเงิน²⁾

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของอุณหภูมิที่เกิดภายในแท่งอิเล็กโทรดต่อปริมาณการผลิตไอโซนแบบโครนาดีสชาร์จ แรงดันสูงความถี่สูง ที่ 15 kV 25 kHz แท่งอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น ยานการผลิตก๊าซไอโซนสูงสุด 50 g/hr ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ด้านอุณหภูมิที่เกิดภายในแท่งอิเล็กโทรดต่อปริมาณการผลิตไอโซนโดยพิจารณาอุณหภูมิ ตั้งแต่ 15 °C ถึงอุณหภูมิก่อนการเบรกตัวนี้ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไอโซนสูงสุด โดยทำการควบคุมองค์ประกอบอื่นไว้คงที่ จากการทดสอบพบว่าช่วงอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรด 25 °C ได้อัตราการผลิตก๊าซไอโซนสูงสุดที่ 50 g/hr และได้ นำหลักการทางคณิตศาสตร์หาความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรดกับปริมาณการผลิตก๊าซไอโซน สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการโพลีโนเมียล ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์หาแนวโน้มผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดกับอัตราการผลิตก๊าซไอโซนและนำไปประยุกต์ใช้กับการประเมินประสิทธิภาพเครื่องผลิตไอโซนในอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: ผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรด, โครนาดีสชาร์จ, ไอโซน

* ¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520, Corresponding Author, อีเมล: sanee_psc@yahoo.com

²⁾ รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประโยชน์ด้านการค้า กรุงเทพฯ 10520, อีเมล: kkvveerac@yahoo.com เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Temperature Effect in Electrode Rods for Ozone Generation

Sanae Sathalalai ^{*1)} and Werachet Khan-ngern ²⁾

Abstract

This research presents the study of temperature effect in electrode rods of the ozone generator which can affect the productivity of ozone in ozone generator that using high voltage high frequency corona discharge technique at 15 kV 25 kHz . The electrode rods are the common core cylinders and two insulator layers. These electrode rods can produce ozone with maximum rate of 50 g/hr. In order to determine the suitable temperature for production of maximum ozone amount, the study of temperature effects ranging from 15 °C until the break down temperature point occurs, by minimize other variable factors. The temperature on electrode at 25 °C can generate ozone at highest capacity at 50 g/hr. The relationship of temperature occurs in electrode rods and generating efficiency of ozone can be shown in mathematic polynomial equation. This equation can predict the effectiveness of the resulted on ozone generation amount due to the temperature occur in producing process of ozone generators in manufacturing.

Keywords: Temperature Effect in Electrode Rods, Corona Discharge, Ozone



* ¹⁾ Post Graduated Students, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Corresponding Author, E-mail: sanae_psc@yahoo.com

²⁾ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, E-mail: kkveerac@yahoo.com

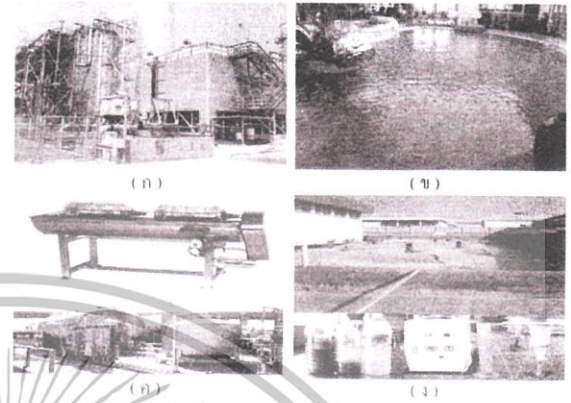
1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษตลอดจนปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสิ่งแวดล้อมถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่งของโลก จึงได้รับความสนใจและพยายามแก้ไขจากหลายๆ องค์การทั้งส่วนประชาชนจนถึงผู้นำประเทศ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อนำมาทดแทนและแก้ปัญหา เทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องอย่างหนึ่ง คือระบบโอโซนและเกิดการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Mohandes, et al., 1992) เพื่อนำมาทดแทนเคมีและแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่ส่งผลเสียต่อระบบสิ่งแวดล้อมในขนาดยกตัวอย่างเช่น ลดการใช้เคมีในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับระบบระบายความร้อนในหอผึ่งเย็น ดูแลกลิ่นและสีในระบบน้ำเสีย กำจัดกลิ่นเหม็นในอากาศ ฆ่าเชื้อในห้องปลอดเชื้อ ใช้แทนเคมีในสระว่ายน้ำ เป็นต้นตามรูปที่ 1 ซึ่งการผลิตโอโซนมีด้วยกันหลากหลายวิธี (พรทิมล, 2543), (Potvejkul, Kinnares and Rattanavichien, 1998) (Marcos Alonso, et al., 2004) เพื่อเป้าหมายในการประยุกต์เครื่องผลิตโอโซนโดยวิธีการต่างๆ ให้ได้ปริมาณโอโซนสูงตลอดจนเป้าหมายเพื่อการลดพลังงาน และใช้พลังงานอื่นทดแทน แต่ปัญหาคือด้านหนึ่งเกี่ยวกับการใช้งานระบบโอโซนคือ ทำอย่างไรจึงจะใช้ระบบโอโซนได้ผลและมีประสิทธิภาพตามต้องการต่อเนื่องตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งผลที่ทำให้ระบบโอโซนประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเด่น คือ ปัญหาทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้นำเสนอวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแท่งอิเล็กโทรดต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการเกิดปริมาณก๊าซโอโซน เพื่อที่นำมาตรวจสอบประสิทธิภาพระบบโอโซนในขณะที่ระบบโอโซนทำงาน โดยที่งานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึงผลของอุณหภูมิต่อพลังงานด้านเข้าและความถี่ (Boonseng, Kinnares and Apriratikul, 2000)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลงานวิจัยนี้ทำการควบคุมตัวแปรอื่นๆ ให้คงที่โดยปรับเพียงแค่ตัวแปรเดียวคือ อุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรดโดยวิธีการต่างๆ นำผล

ที่ได้มาใช้หลักการทางคณิตศาสตร์หาความสัมพันธ์เพื่อคาดเดาปริมาณก๊าซโอโซนในช่วงที่ระบบโอโซนทำงานได้



รูปที่ 1 (ก) โอโซนสำหรับหอผึ่งเย็น (ข) โอโซนสำหรับสระว่ายน้ำ (ค) โอโซนสำหรับน้ำดื่ม (ง) โอโซนสำหรับน้ำเสีย

2. ทฤษฎี

2.1 กระบวนการแตกตัวของก๊าซและการผลิตโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอม จับตัวกันอยู่ในสถานะไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายขึ้นอยู่กับเงื่อนไขแวดล้อมและความหนาแน่นของปริมาณที่ผลิต ในส่วนของขั้นตอนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจน (Free Radical) จากโมเลกุลก๊าซออกซิเจนในอากาศ หลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน (O_3) แต่ไม่เสถียรภาพ สลายตัวได้ง่าย กระบวนการเกิดโอโซนเกิดได้จากปรากฏการณ์

2 ชนิด คือ กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) และกระบวนการแยกตัว (Dissociation) (Kuffel and Abdulah, 1977), (Alston, 1968) ในกระบวนการแตกตัวของก๊าซนั้น ไอออไนเซชัน คือ การเพิ่มของประจุแบบทวีคูณ (Electron Avalanche) นำไปสู่การเบรกดาวนในฉนวนที่พิจารณา ทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งทะลุผ่านฉนวนสิ่งที่เกิดตามมา คือ ความร้อน เนื่องจากกระแสที่ไหลจากการเบรกดาวนที่เกิดขึ้น ทำให้โอโซนซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำเกิดการสลายตัว ดังนั้นในการผลิตโอโซนจึงไม่ควรเกิดการเบรกดาวนขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นควรเป็น

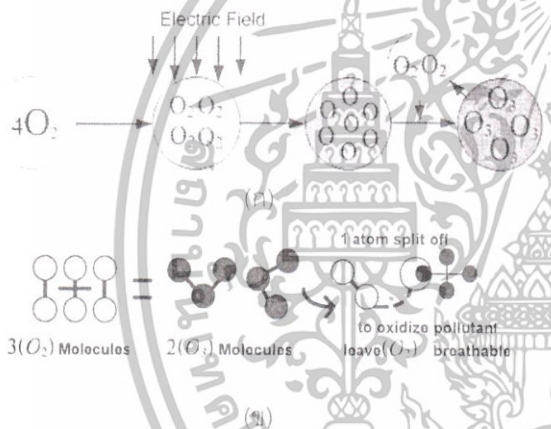
สภาวะการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (Moom, et al., 1996), การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Dorsey, et al., 1994) เนื่องจากพลังงานที่เลือกตรอนรับ และต้องอ้างถึงลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้ จากสนามไฟฟ้าควรมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมออกซิเจนออกจากกัน จากระดับพลังงานของออกซิเจน จะเห็นว่าออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับ ซึ่งออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็นโอโซนได้มี 2 ระดับ คือ

- การแตกโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจน ออกเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction)

- การจับตัวของอะตอมอิสระ กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นโอโซน (Ozone Generation)

หน้าที่หลักที่สำคัญและเป็นลักษณะเด่นของโอโซน คือ ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) (Bruno Langlias, et al., 1991) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และ (ข)



รูปที่ 2 (ก) กระบวนการแตกโครงสร้างโมเลกุลจากออกซิเจนเป็นโอโซน

(ข) กระบวนการทำงานของโอโซนในการออกซิไดซ์ (Oxidation)

2.2 พลังงานสะสมในสนามไฟฟ้า

สำหรับการคำนวณหาพลังงานสะสมในสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการแตกตัวของก๊าซภายในแท่งอิเล็กโทรดจะหาได้ตามสมการ (1), (Bruno Langlias, et al., 1991)

$$w = \frac{1}{2} \int \epsilon_0 E^2 dv \tag{1}$$

w คือ พลังงานที่ทำอากาศแตกตัว (J)

E คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)

v คือ ปริมาตรของก๊าซภายในแท่ง (m³)

ϵ_0 คือ ค่าความคงทนสนามไฟฟ้า = 8.845×10^{-12} F/m

2.3 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวนสองชั้น

การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกระบอกภายใน (สำราวย, 2538), (Samaranayake, Hackam and Akiyama, 2001) แต่งานวิจัยนี้การออกแบบอิเล็กโทรดรูปทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมเริ่มพิจารณาจากการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Optimum Dimension) ของรัศมี r_2 และ r_3 แต่ในการออกแบบเครื่องผลิตโอโซนหลักการจะตรงข้าม คือ ต้องการใช้แรงดันต่ำ [แรงดันเบรกดาวน์ (V_b) = แรงดันที่ทำให้อากาศในแท่งแตกตัว (V)] เพื่อสร้างความเครียดสูง (E_c) จนเพียงพอที่จะทำให้อากาศแตกตัว สิ่งที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขคงตัวในการออกแบบ คือ รัศมีทรงกระบอกนอก เนื่องจากทรงกระบอกนอกที่เป็นกราวด์ทำจากสแตนเลส มีความจำกัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ผลิตในทางอุตสาหกรรม และฉนวนกั้นความชื้นเป็นทรงกระบอกวงใน โดยให้ความกว้างของฉนวนกั้นและความกว้างของฉนวนอากาศที่เหมาะสมกัน ซึ่งการนำวิธีการออกแบบมิติที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้จึงถูกนำเสนอตั้งสมการ (2), (Bruno Langlias, et al., 1991)

$$E = \frac{\epsilon_0 k}{r_2 \left[\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \tag{2}$$

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/cm)

r คือ แรงดันที่ป้อน (V)

r_1 คือ รัศมีวงในของฉนวนแข็ง (m)

r_2 คือ รัศมีวงนอกของฉนวนแข็ง (m)

r_3 คือ รัศมีวงในแท่งอิเล็กโทรดส่วนที่เป็นกราวด์ (m)

ϵ_1 คือ ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของแก้ว = 9

ϵ_2 คือ ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของอากาศ = 1

2.4 การประมาณค่าในช่วงโดยสมการโพลีโนเมียล

การคำนวณหาปริมาณโอโซนเพื่อเปรียบเทียบและประมาณค่าปริมาณโอโซนค่าจริงและค่าที่คำนวณในช่วงการทดลองได้จากสมการ (3), (อำพล, 1/2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ขอสงวนสิทธิ์ในนโยบายความเป็นส่วนตัว
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = a_1x^4 + b_1x^3 + c_1x^2 + d_1x + e_1 \quad (3)$$

เมื่อ y = อัตราการผลิตก๊าซโอโซน (g/hr)

x = อุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรด ($^{\circ}\text{C}$)

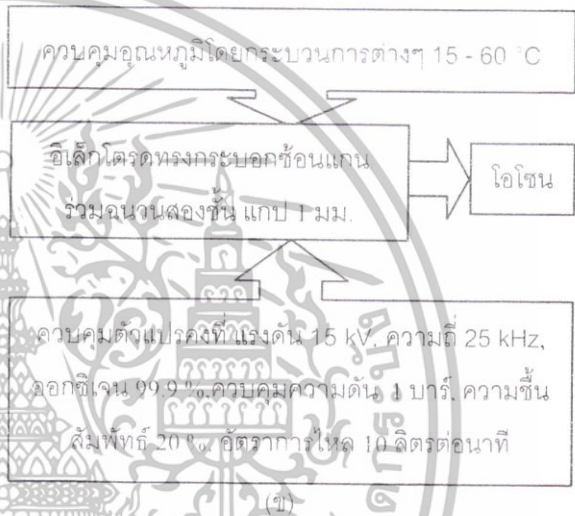
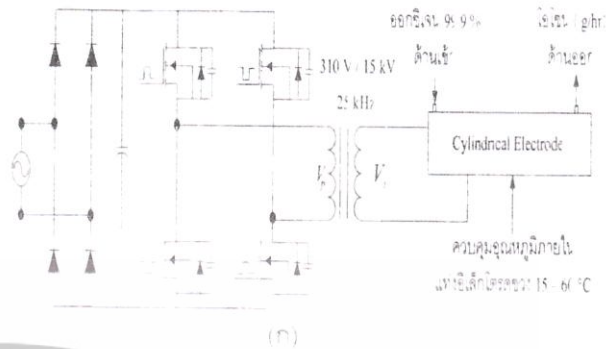
3. เงื่อนไขและการออกแบบ

ปัจจัยสำคัญที่ต้องเรียนรู้เพื่อให้ได้ปริมาณ

โอโซนปริมาณสูงก็คือ องค์ประกอบต่าง ซึ่งองค์ประกอบที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโอโซนแบ่งออกเป็น 2 ตัวแปร (Samaranayake, Hackam and Akiyama, 2001) คือ ตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ประเภทของก๊าซสนามไฟฟ้า ผลของความถี่ไฟฟ้า และตัวแปรทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นที่ผ่านสนามไฟฟ้า อุณหภูมิแท่งอิเล็กโทรด อัตราการไหลของอากาศผ่านแท่ง เป็นต้น

เงื่อนไขของงานวิจัยนี้หลักการ คือ เรืองของการเลือกวัสดุที่ใช้ต้องมีการผลิตและจำหน่ายในอุตสาหกรรมภายในประเทศ และมีความคงทนที่สามารถนำไปใช้ได้

จริง เพื่อการสร้างเครื่องผลิตโอโซนสำหรับใช้งานกับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการออกแบบงานวิจัยนี้ จะขึ้นกับเงื่อนไขและองค์ประกอบต่างๆ ตามรูปที่ 3 (ข) ซึ่งทำการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3 (ก) แหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูง และอิเล็กโทรด (ข) ชุดอุปกรณ์แสดงขั้นตอนการศึกษา

ให้คงที่ โดยที่ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันสูงความถี่สูงพิกัด 600 VA แรงดันสูง 15 kV ความถี่ 25 kHz แท่งอิเล็กโทรดเป็นแบบทรงกระบอกชั้นแกนรวมฉนวนสองชั้น (Dararash, et al., 2005) กำหนดแกบกว้างที่ 1 มิลลิเมตร แสดงลักษณะการเชื่อมต่อวงจรทางไฟฟ้าและการทำงานโดยรวมของระบบตามรูปที่ 3 (ก) ทำการควบคุมองค์ประกอบทางสิ่งแวดล้อมให้คงที่ โดยควบคุมออกซิเจนที่ทำการผลิตโอโซนให้มีความบริสุทธิ์ 99.9 % ควบคุมความดันด้านเข้าแท่งอิเล็กโทรดไว้ที่ 1 บาร์ อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ออกซิเจนไว้ที่ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทหรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กระบวนการทดลอง

งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการสร้างเครื่องผลิตโอโซน จากนั้นนำติดตั้งลงบนแผ่นอลูมิเนียมที่มีฐานสามารถปรับมุมมองค่าได้ตามต้องการ ฐานที่ใช้ในการทดลองนี้ปรับไว้ที่ 45 องศา และติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิไว้กับแกนแนวตั้งที่สามารถปรับมุมมองค่าได้ โดยเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรดเป็นแบบเลเซอร์หรือ Fluke 561 ความละเอียด 0.1 $^{\circ}\text{C}$ ส่วนกระบวนการควบคุมอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโทรดตั้งแต่ 15 - 60 $^{\circ}\text{C}$ ทำได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

- ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิค่าวิ่งผ่าน

- ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านผิวแห้งอิเล็กโทรดด้านนอก

- ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิต่ำวิ่งผ่านขั้วแห้งอิเล็กโทรดด้านใน

- ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านขั้วแห้งอิเล็กโทรดด้านใน

- ที่เวลาเดียวกันทำการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านผิวแห้งอิเล็กโทรดด้านนอกและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ลมอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านขั้วแห้งอิเล็กโทรดด้านใน

- ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เครื่องทำความเย็น เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิได้แล้ว ก็เข้าสู่กระบวนการเก็บผลปริมาณไอโซนโดยวัดปริมาณไอโซนด้วยวิธีการไตรเตรด (Samaranayake, Hackam and Akiyama, 2001) ซึ่งสารเคมีที่ใช้มีด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

- สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI) ละลายสารโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.5 กรัม (g) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิตร (mL)

- สารละลายกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ละลายสารกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ให้มีความเข้มข้น 1N H₂SO₄

- สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) ละลาย (Na₂S₂O₃ 5 H₂O จำนวน 25 กรัม (g) ในน้ำ 1 ลิตร (L) ให้มีความเข้มข้น 0.1 N Na₂S₂O₃

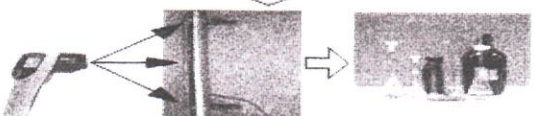
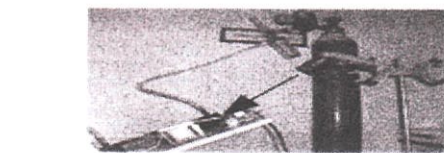
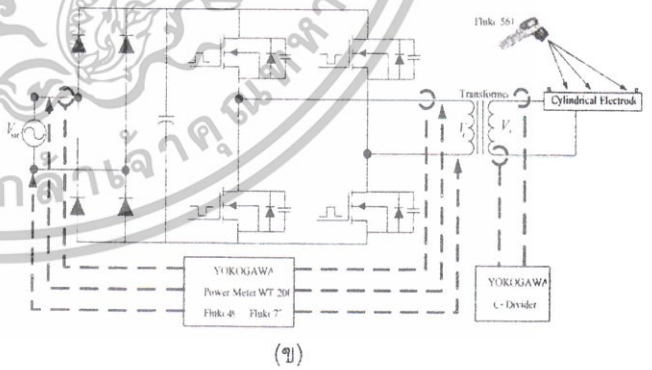
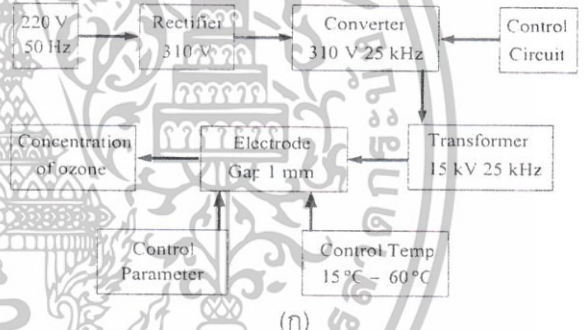
- น้ำแป้ง (1% Starch) ละลายน้ำแป้ง 1 กรัม (g) ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิตร (mL)

เก็บผลการทดลองปริมาณไอโซน 3 ครั้ง โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยทิ้งระยะเวลาผ่านไป 5 นาที ทำการวัดอุณหภูมิภายในแห้งอิเล็กโทรด 3 จุด เพื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตามรูปที่ 4 โดยที่ตำแหน่งแต่ละจุดที่ทำกรยิงเลเซอร์ได้ระบุไว้ชัดเจนด้วยวิธีการแต้มเป็นจุดสีดำ ซึ่งจะได้ประโยชน์

ในการลดความผิดพลาดในการวัดที่อาจเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างกัน และกระบวนการสุดท้ายนำผลที่ได้มาวิเคราะห์โดยสมการทางคณิตศาสตร์

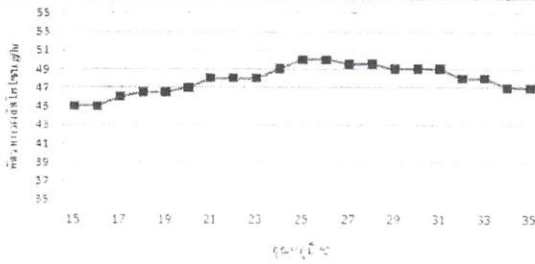
5. ผลที่ได้จากการทดสอบ

สำหรับงานวิจัยนี้กระบวนการทดลองตามรูปที่ 4. (ก). (ข) และ (ค) ได้ทดสอบปรับอุณหภูมิตั้งแต่ 15 - 60 °C ได้แบ่งการทดลองออกเป็นช่วงๆ คือ ช่วงที่ 1. อุณหภูมิตั้งแต่ 15 - 35 °C ช่วงที่ 2. อุณหภูมิตั้งแต่ 36 - 56 °C ซึ่งผลการทดลองพบว่าปริมาณไอโซนที่ผลิตได้สูงสุด 50 g/hr ที่อุณหภูมิจัดได้ 25 °C นำข้อมูลปริมาณไอโซนและผลของอุณหภูมิมายืนยันกราฟแสดงตามรูปที่ 5 (ก) และ (ข)

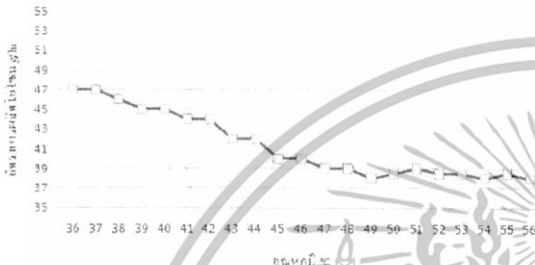


รูปที่ 4 แสดงลักษณะของกระบวนการทดลองและลักษณะการวัดผลโดยอุปกรณ์ต่างๆ

ในการศึกษานี้ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกฉบับที่มีการนำไปใช้



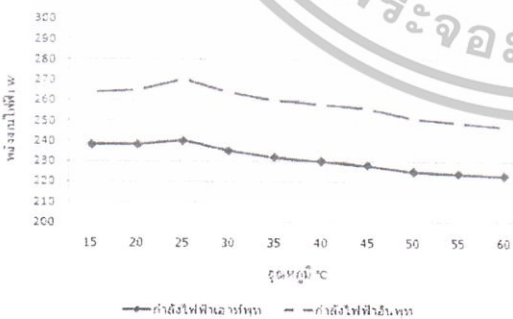
(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) แสดงผลอัตราการผลิตไอโซนกับผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ช่วง 15 - 35 °C
(ข) แสดงผลอัตราการผลิตไอโซนกับผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ช่วง 36 - 56 °C

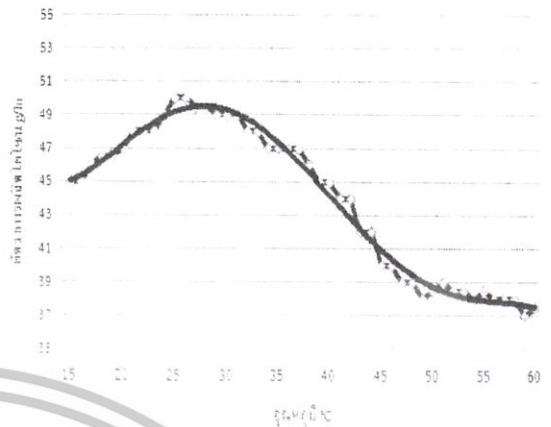
งานวิจัยนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงแต่ประสิทธิภาพทางกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อที่อุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์สูงขึ้นพลังงานอินพุตและเอาต์พุตกลับมีแนวโน้มลดลงตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงเปรียบเทียบผลพลังงานอินพุตและเอาต์พุตกับผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์

ดังนั้นนำผลการทดลองช่วง 15 - 60 °C เปรียบเทียบผลปริมาณไอโซนค่าจากการวัดและผลปริมาณไอโซนจากการคำนวณเพื่อคาดเดาปริมาณไอโซนจากการวัดที่ (3) ได้ตามรูปที่ 7 และสมการที่ (4)

เอกลศาสตร์ที่ (3) ได้ตามรูปที่ 7 และสมการที่ (4) ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอธิบายนามข้างต้น เหตุผลที่อุณหภูมิมีค่าจนนำไปปริมาณ



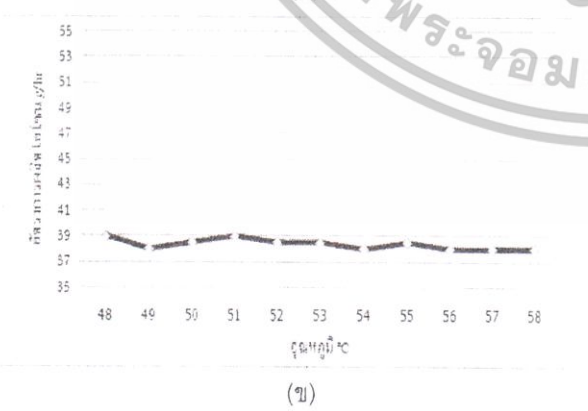
รูปที่ 7 กราฟแสดงปริมาณไอโซนค่าจริง และปริมาณไอโซนที่โดยสมการพหุนามเมื่อยลช่วง 15 - 60 °C

$$y = 0.0002x^4 - 0.0074x^3 + 0.0903x^2 + 0.0715x + 44.883 \quad (4)$$

6. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทำการเก็บผลปริมาณไอโซนที่อุณหภูมิเดียวกันจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความผิดพลาดที่เกิดจากการวัด พบว่าในการวัดปริมาณไอโซนมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.00 - 0.271 ซึ่งถือว่าเกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยการไตร่ตรองปริมาณค่าของไอโซนน้อยมาก จึงได้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่า เมื่อทำการควบคุมค่าตัวแปรทางไฟฟ้าคงที่และตัวแปรทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ คงที่ โดยยกเว้นเพียงผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์นั้น พบว่าอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซไอโซนมีการเปลี่ยนแปลง และที่อัตราการผลิตก๊าซไอโซนสามารถผลิตได้สูงสุดที่อุณหภูมิช่วงหนึ่งเท่านั้นตามรูปที่ 8 (ก) แต่เมื่ออุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอัตราการผลิตไอโซนกลับมีแนวโน้มลดลง เหตุผลที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากก๊าซไอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร เมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการสลายตัวกลับสู่สถานะออกซิเจนก็เกิดขึ้นง่าย แต่ตรงจุดที่อุณหภูมิสูงมีข้อดีตรงจุดที่ทำให้ไม่ต้องใช้แรงดันในการสร้างโคโรนาสูงที่ทำให้อากาศแตกตัว (สำรวจ, 2538) เมื่อพิจารณาทางด้านอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ 25 °C ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้กลับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายข้างต้น เหตุผลที่อุณหภูมิมีค่าจนนำไปปริมาณ

ไอโซนลดลงนั้นเนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงทำให้อากาศที่มีสถานะเป็นฉนวนเกิดการแตกตัวได้ยากมากขึ้นหรือเข้าใจได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำอากาศหนต่อการเบรกดาวน์ได้มากกว่าที่อุณหภูมิสูง(สำรวจ, 2538) ซึ่งเมื่อต้องการให้อากาศแตกตัวได้มากขึ้นหรือต้องการได้ปริมาณก๊าซไอโซนมากขึ้นก็ต้องมีการปรับแรงดันที่ทำให้เกิดโคโรนาสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองยังพบว่าที่อุณหภูมิถึงช่วงๆหนึ่ง อัตราการผลิตไอโซนได้ปริมาณก๊าซไอโซนค่อนข้างคงที่ตามรูปที่ 8 (ข) และจากการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นสามารถประยุกต์ใช้สมการคณิตศาสตร์มาช่วยประมาณค่าปริมาณไอโซนเพื่อเปรียบเทียบปริมาณไอโซนระหว่างค่าจริงและค่าที่คำนวณในสมการที่ไอโซนทำงานอยู่ได้ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบประสิทธิภาพของการผลิตไอโซน



รูปที่ 8 (ก) แสดงผลอัตราการผลิตไอโซนกับผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดช่วง 20 - 30 °C
(ข) แสดงผลอัตราการผลิตไอโซนกับผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดช่วง 48 - 58 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่หวังกำไรได้อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.สรุปผลการทดสอบ

จากการทดลอง สรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิภายในแท่งอิเล็กโตรดมีผลกระทบต่อปริมาณไอโซนโดยตรง คือที่อุณหภูมิช่วง 15 - 25 °C ปริมาณไอโซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและอุณหภูมิช่วง 26 - 36 °C ปริมาณไอโซนมีแนวโน้มลดลง แต่ปริมาณก๊าซไอโซนที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดที่ 50 g/hr ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 30 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิช่วงที่สูงขึ้นมากกว่า 36 °C ขึ้นไป ปริมาณไอโซนมีแนวโน้มลดลงและคงที่ที่อุณหภูมิช่วง 48 - 58 °C ซึ่งข้อเสียของอุณหภูมิต่อการผลิตก๊าซไอโซนทำให้เมื่อต้องการได้ก๊าซไอโซนที่คงที่ ต้องเสียค่าใช้จ่ายและพลังงานในการสร้างระบบระบายความร้อน ส่วนข้อดีคือสามารถนำข้อดีตรงส่วนนี้ประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพปริมาณไอโซนของเครื่องผลิตไอโซนได้ ซึ่งนำมาเทียบกับพิกัด ข้อมูลตามที่มีผู้ผลิตเครื่องระบุไว้ และจากการทดลองสามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์ มาช่วยคาดเดาประสิทธิภาพของปริมาณไอโซนได้ ดังนั้นจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการตรวจสอบระบบไอโซนได้สะดวกและรวดเร็ว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วีระเชษฐุ์ ชันเงิน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดไอโซน

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย EMC และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณพี่น้องห้องปฏิบัติการทุกคน

สำหรับคุณงามความดีที่ได้จากงานวิจัยฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพรักทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เอกสารอ้างอิง

- พรพิมล รัตนวิเชียร. "เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์"วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- สรวุฑ คำนับไทย. "เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูง ความถี่สูงโดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์" วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551
- สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- อำพล ธรรมเจริญ, วิธีการคำนวณและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ตำรามาตรฐานชุดคณิตศาสตร์ประยุกต์ เล่มที่ 5, 1/2551
- Bruno Langlias, et. al. Ozone in Water Treatment. 2nd Ed. Lewis Publishers, 1991.
- C. Boonseng, V. Kinnaree, P. Apriratikul "Harmonic Analysis of Corona Discharge Ozone Generator Using Brush Electrode Configuration" IEEE 2000, pp. 404-408.
- E. Kuffel, M. Abdulah. High - Voltage Engineering. Oxford : Pergamon Press, 1979.
- J. A. Dorsey. *Et al*, "Ozone Production in Electrostatic Air Cleaners with Contaminated Electrodes," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 30, no. 2, March/April 1994.
- J. A. Robinson, *et al*, "A New Type of Ozone Generator Using Taylor Cones on Water Surfaces," *IEEE Trans. Id Applicat.*, vol. 30 no. 2, July/August 1998 .
- J. Dararash , S. Sathalalai, N. Saengtarong, P.Kerdonfag and W.Khan-ngern, "The study of ozone generation using electric field with variation of air flow rate and electrode tube length" ICEMC July 2005. pp.1A-1
- 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
- J. Moom, et al, " Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Ferroelectric-Ba/Mica-Sheet Barrier," *IEEE Tram. Ind. Applicot.*, vol.34 no. 6, 1998.
- L. L. Alston , High Voltage Technology, Oxford University Press, London, 1968.
- M. Th. El - Mohandes, et.al "Ozone Production in Corona Discharge in Air in a Multi-Needle to Plane Configuration." *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol.2. 1992. pp.1567-1569.
- S. Potivejku, V. Kinnaree, P. Rattanavichien, Design of Ozone Generator using Solar Energy," *IEEE IAPCCAS*, 24-27 Nov 1998, pp. 217-220
- W. J. M. Samaranayake, R. Hackam, H. Akiyama "Ozone synthesis in oxygen using a pulse discharge " *IEEE*, pp. 449-452, 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเสน่ห์ สาทลาลัย
วัด เดือน ปีเกิด	7 สิงหาคม 2524 ที่จังหวัดตราด
ที่อยู่	101 หมู่ 6 ต.แหลมกลัด อ.เมือง จ.ตราด 23000
ประวัติการศึกษา	2548 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง 2.) การออกแบบและประยุกต์ใช้งานวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้