

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

OZONE GENERATOR BY SOLAR ENERGY



ฉบับนี้หนังสือนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-728-9

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

OZONE GENERATOR BY SOLAR ENERGY



พรพิมล รัตนวิเชียร

PORNPIMON RATANAWICHIEEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2543

ISBN 974-622-728-9

3543
8430000
2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 35721
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับฉวใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไปว่ากรณีสืบค้นหนังสือพิมพ์ให้ตัดแบ่งลงนิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OZONE GENERATOR BY SOLAR ENERGY



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2000

ISBN 974-622-728-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องผลิตก๊าซโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์
OZONE GENERATOR BY SOLAR ENERGY
ชื่อนักศึกษา นางสาวพรพิมล รัตนวิเชียร
รหัสประจำตัว 39061055
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์	
รศ.ดร.วันชัย วีรจุจา	
ผศ.จรงค์ บัญเส็ง	
ดร.วิจิตร กิณเรศ	
รศ.ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 มกราคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส ตั้งวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....10.....เดือน.....พ.ค.....2543

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์
นักศึกษา	นางสาวพรพิมล รัตนวิเชียร
รหัสประจำตัว	'39061055
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ร.ศ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอกระบวนการผลิตก๊าซโอโซนโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงดันสูงช่วยในการออกแบบโครงสร้างของชุดอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากก๊าซโอโซนเริ่มเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมในการบำบัดน้ำเสียและอากาศ ชุดอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นโครงสร้างหลักของระบบที่ทำการเปลี่ยนโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนในอากาศให้กลายเป็นก๊าซโอโซนด้วยพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ หลักการการแตกตัวของก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาและพิสูจน์ทฤษฎีพื้นฐานของการเกิดโอโซนซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ด้วยแปรทางไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อปริมาณโอโซนที่ผลิตได้แก่ ลักษณะสนามไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า และ คุณสมบัติของรูปสัญญาณ (เช่น ชนิดของแรงดันและความถี่) เป็นต้น นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของตัวแปรพื้นฐานเหล่านี้ ยังนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตและยังสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตลงมาต่ำกว่าแบบที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากโอโซนมีคุณสมบัติที่เด่นชัดในเรื่องการเป็นสารเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นระบบการผลิตที่นำเสนอจึงนำพลังงานจากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มาเป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยออกแบบให้ทำงาน 16 ชั่วโมง และสามารถใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220V 50Hz เป็นแหล่งพลังงานถูกเงินได้ เครื่องผลิตก๊าซโอโซนในวิทยานิพนธ์นี้สามารถผลิตโอโซนได้สูงสุด 1080 mg/hr โดยใช้กำลังไฟฟ้า 52 W

Thesis Title	Ozone Generator by Solar Energy
Student	Miss Pornpimon Ratanawichien
Student ID.	39061055
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis proposed the procedure of ozone generation by applying high voltage technology adapted for electrode structure design. Ozone, the most powerful oxidant was well known in industrial application for waste water and air treatment. Electrode set for generating corona is the main part of system, converting oxygen molecules in air to ozone molecules under electric field energy which is supplied. Based on high voltage technology, the basic concepts of ozone formation are proved. The results indicated that ozone generation process is able to control. Ozone yield is effected by many electrical parameters such as electric field configurations, electrical potential and signal characteristics (e.g. voltage types and frequency). The relations among these parameters can lead to improve the efficiency of ozone generation and decrease the required voltage level down lower than industrial applying. Enhancing the outstanding characteristic of ozone gas, "Environmental friendly reagent", PV system (Photovoltaic system) is selected to use as the major source of energy. It is designed based on 16 hours operation. In case of emergency, AC 220 V 50 Hz is used instead. The proposed ozone generator can yield 1080 mgO₃/hr in 52 W.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สืบเนื่องมาจากความช่วยเหลือและการเอาใจใส่อย่างดีของท่านอาจารย์ ร.ศ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ วันชัย สุทธิบุญ ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ที่สละเวลาให้ความรู้และความเข้าใจในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ที่เกี่ยวข้องกับน้ำและโอโซน ตลอดจนความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ พิสมัยและ อาจารย์กรองแก้ว ภาควิชาเคมี สำหรับความอนุเคราะห์เรื่องสารเคมีที่กรุณาแก่ผู้จัดทำมาเป็นเวลาหลายปีและความช่วยเหลือจากอีกหลาย ๆ ท่านที่ผู้จัดทำไม่อาจกล่าวได้หมดคนในที่นี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณพ่อ, คุณแม่ ที่เคารพและ และน้อง ๆ ที่รักยิ่งที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา ขอขอบคุณ พี่น้อง เพื่อนร่วมงานทุกคนที่มีส่วนอย่างมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาวิชาที่ต้องใช้ความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านสูง ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือทุกทางที่มีมาถึงผู้จัดทำเอง ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่มีคุณค่าอย่างมาก

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พรพิมล รัตนวิเชียร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 โครงการวิจัยทดลอง.....	2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.4 สรุปและวิเคราะห์ผล.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับโอโซนและระบบบำบัดน้ำ.....	4
2.3 กระบวนการแตกตัวของก๊าซและการผลิตโอโซน.....	9
2.4 การประยุกต์ใช้งาน FEM ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า [9].....	20
2.5 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system).....	25
บทที่ 3 เครื่องกำเนิด โอโซน.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 หลักการ.....	33
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณ โอโซน.....	34
3.4 การทดลองเพื่อศึกษาและออกแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	37
3.5 การใช้ไฟไนท์อิเลิเมนต์ช่วยในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม.....	50
3.6 การศึกษาการแตกตัวของอากาศภายในอิเล็กทรอนิกส์ฉนวนชั้นเดียวและสองชั้น.....	56
3.7 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงชนิดของฉนวนของแข็งในการผลิตโอโซน.....	57
3.8 ศึกษาผลของชนิดแรงดันที่ใช้ต่อความสามารถในการผลิตโอโซน.....	59
3.9 การศึกษาผลของความถี่ของแรงดันที่ป้อนต่อการผลิตโอโซน.....	61

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.10 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไอโซน	64
บทที่ 4 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	65
4.1 บทนำ.....	65
4.2 หลักการ.....	65
4.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน.....	66
4.4 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	76
4.5 การออกแบบและทดสอบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	79
4.6 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน.....	80
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบการออกแบบ.....	83
5.1 บทนำ.....	83
5.2 เครื่องกำเนิดไอโซน.....	83
5.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไอโซน.....	92
5.4 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	94
5.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.....	95
บทที่ 6 บทสรุป.....	97
เอกสารอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก.....	105
ภาคผนวก ข.....	121
ภาคผนวก ค.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	142

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซน.....	5
2.2 ระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA : International Ozone Association).....	6
2.3 ความสามารถในการฆ่าเชื้อ (99%) ที่เป็นอันตรายของสารประกอบคลอรีนเทียบกับโอโซน....	7
2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน.....	9
2.5 ระดับพลังงานในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของก๊าซ [1], [2].....	12
2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ Muscovite และ Phlogopite.....	20
3.1 ผลการทดสอบการผลิต โอโซนด้วยแสงอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้ารูปร่างต่างกัน.....	38
3.2 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสร้างโอโซนของแหล่งจ่ายทั้ง 2 แบบ [8].....	43
3.3 ผลการคำนวณค่าพลังงานที่รั่วมีต่าง ๆ ในแกปอิเล็กโตรด I.....	54
3.4 การทดสอบอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวนชั้นเดียว (อากาศ) เมื่อ $r_1 = 1.9\text{cm}$ และ $r_2 = 2.34\text{ cm}$	56
3.5 การทดสอบอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น (อากาศและพีวีซี $\epsilon_r = 5$) เมื่อ $r_1 = 1.9\text{ cm}$, $r_2 = 2.1\text{ cm}$ และ $r_3 = 2.34\text{ cm}$	56
3.6 ผลการวัดค่า C ของฉนวนของแข็ง (PVC, Mica และ แก้ว).....	57
5.1 ช่วงของพลังงานสำหรับการแปลงอากาศเป็น โอโซน.....	82
5.2 การผลิตโอโซนจากอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระยะห่างที่แรงดัน 8 kV.....	83
5.3 การวิเคราะห์ระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด.....	89
5.4 การพัฒนาการออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.....	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างโดยรวมของโครงการวิจัยเครื่องผลิตไอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.....	2
2.1 ตำแหน่งโรงบำบัดน้ำในทวีปอเมริกาเหนือที่ใช้ไอโซน.....	4
2.2 การทำงานของไอโซนในการออกซิไดซ์ (Oxidation) สารปนเปื้อน.....	7
2.3 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน.....	10
2.4 องค์ประกอบทางเคมีที่ถูกสร้างขึ้นจากการแตกตัวของก๊าซในอากาศ[25].....	11
2.5 แสดงกลไกการผลิตไอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry.....	13
2.6 คุณสมบัติสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโตรดต่างกัน.....	14
2.7 V_0 และ E_{r1} ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่.....	16
2.8 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซตัวอย่างในฟังก์ชันของความดัน [1].....	17
2.9 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ V_0 ของอิเล็กโตรดเทียบกับระยะนาบในอากาศในเทอมของระยะแกป d ที่ สภาวะมาตรฐาน IEC (760 torr 20°C 11 gH ₂ O/m ³) [1].....	18
2.10 ผลประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวกและลบ.....	19
2.11 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาที่พิจารณาด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์.....	21
2.12 ค่าความส่องสว่าง (Irradiance) โดยเฉลี่ยในช่วง 10 ปี บริเวณผิวโลก.....	25
2.13 การพิจารณาค่าแสงแดดใน 1 วันตามชั่วโมงที่แดดสูงสุด.....	26
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันที่ความเข้มแสงต่าง ๆ.....	27
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเทียบกับอุณหภูมิ.....	27
2.17 การต่อบายพาสไดโอดคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
2.18 การต่อบล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode).....	28
2.19 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
3.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไอโซนที่ออกแบบ.....	32
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการตรวจวัดปริมาณ ไอโซนด้วยวิธี Iodometric method.....	36
3.3 สีของสารละลาย KI ก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยากับไอโซน.....	36
3.4 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าแบบสมอ(I) , ไม่สมอเล็กน้อย (II) และไม่สมอสูง (III).....	37
3.5 ชุดอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระยะนาบ.....	39
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าผลผลิตก๊าซไอโซนของการจัดเรียงปลายแหลมต่าง ๆ.....	39
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากับผลผลิตก๊าซไอโซนต่อวินาทีต่อจุดของปลายแหลม.....	40
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากับผลผลิตก๊าซไอโซนต่อวินาทีต่อจุดของปลายแหลม.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ผลของความหนาแน่นอากาศกับโอโซนที่ได้อต่อ 1 หน่วยพลังงาน	41
3.10 ผลของขั้วแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ต่อก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ใน 1 หน่วยพลังงาน	41
3.11 บล็อกไดอะแกรมเครื่องผลิตแรงดันสูงกระแสตรงแบบความถี่แรงดันระลอกสูง.....	42
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_r และ V_b ที่รัศมี r_1 ใด ๆ เมื่อ $r_2 = 1.42$ cm.....	44
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_r และ V_b ที่รัศมี r_1 ใด ๆ เมื่อ $r_2 = 2.34$ cm.....	44
3.14 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากเส้นลวดไปยังทรงกระบอกที่เป็นกราวด์.....	45
3.15 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากทรงกระบอกในไปยังทรงกระบอกที่เป็นกราวด์ เมื่อ $r_1 = 1.09$, $r_D = 1.22$ และ $r_2 = 1.42$ cm. ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของแข็ง $\epsilon_r = 5$	46
3.16 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากทรงกระบอกในไปยังทรงกระบอกนอกที่เป็นกราวด์ เมื่อ $r_1 = 1.9$, $r_D = 2.1$ และ $r_2 = 2.34$ cm. ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของแข็ง $\epsilon_r = 5$	46
3.17 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโตรด I และ II.....	47
3.18 โครงสร้างอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมที่ออกแบบเพื่อทดสอบ	49
3.19 ลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	50
3.20 กริดแสดงการแบ่งอีลิเมนต์ภายในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรดของอิเล็กโตรด I และ II.....	51
3.21 ผลการคำนวณการกระจายของแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในแก๊สของอิเล็กโตรด I.....	52
3.22 ผลการคำนวณการกระจายของแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในแก๊สของอิเล็กโตรด II.....	53
3.23 ลักษณะการกระจายของเส้นสมศักย์ภายในฉนวนระหว่างช่องว่างอากาศ.....	54
3.24 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อความหนาแน่นของแข็งเปลี่ยนไป.....	55
3.25 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงไป.....	55
3.24 ทิศทางเส้นแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศ I	55
3.25 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อความหนาแน่นของฉนวนของแข็ง (r_2) เปลี่ยนแปลงไป.....	55
3.26 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เปลี่ยนแปลงไป.....	57
3.27 ภาพตัดขวางของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการศึกษา.....	58
3.28 อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบฉนวนต่างชนิด (PVC+ อากาศ กับ Mica + อากาศ).....	58
3.29 ความสามารถในการผลิตโอโซนที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่าง ๆ	59
3.30 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-330 kV _{DC}	60
3.31 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 0-125 kV _{rms}	60
3.32 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้เปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ.....	61
3.33 อิเล็กโตรด II โรงสร้างสำหรับทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโอโซน.....	62

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.34 ความสามารถในการผลิตโอโซนของอิเล็กโทรด II ที่ความถี่ 50 Hz.....	62
3.35 ผลของควมถี่ของรูปสัญญาณต่อการผลิตโอโซน.....	63
3.36 ผลของควมถี่ของรูปสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ในการผลิตโอโซน.....	63
3.37 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดโอโซน (อิเล็กโทรด II).....	64
4.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	65
4.2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงควมถี่สูง.....	66
4.3 วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	67
4.4 สัญญาณขั้วขาเกตควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรบูสต์.....	67
4.5 ผลการจำลองและทดสอบการทำงานของวงจรบูสต์ด้วย Pspice.....	68
4.6 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	68
4.7 ผลการจำลองและทดสอบการทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	69
4.8 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ควมถี่ 20-100 kHz ที่ภาระ 50 วัตต์.....	70
4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ที่ควมถี่ 20 – 100 kHz.....	71
4.10 หม้อแปลงฟลายแบคโทรท์สัน.....	71
4.11 ผลการทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับที่ควมถี่ 20 – 100 kHz.....	72
4.12 โพรบแรงดันสูงควมถี่สูงสำหรับตรวจสัญญาณที่เอาต์พุตของแหล่งจ่าย.....	73
4.13 a) - g) สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ควมถี่ 20-100 kHz ที่สถานะ Full load.....	74
4.15 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับสำหรับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน.....	75
4.16 ความสามารถในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มมเอียงแฉงต่าง ๆ กัน ใน 1 วัน.....	76
4.17 ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มมเอียงแฉงต่าง ๆ กัน.....	77
4.18 ผลการทดสอบV-I Characteristic ของแฉงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ.....	77
4.19 ผลการทดสอบV-I Characteristic ของแฉงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลา 13.00 น.....	78
4.20 ระบบผลิตก๊าซโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.....	81
6.1 ระบบผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษในปัจจุบันเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจและพยายามแก้ไขจากหลาย ๆ หน่วยงาน แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่เสียไปกับกระบวนการบำบัดและสารเคมีที่ใช้ยังสูงอยู่มาก ในปัจจุบันโอโซนคือก๊าซที่เริ่มเป็นที่แพร่หลายในแง่คุณสมบัติทางเคมีที่สามารถทำความสะอาดให้กับน้ำและอากาศที่มีสิ่งเจือปนได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น ๆ เพราะมีค่าศักย์ออกซิเดชัน สูงกว่าสารเคมีชนิดอื่นๆ มาก แต่โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร การผลิตจึงไม่สามารถเก็บไว้ได้ ต้องทำการผลิต ณ ตำแหน่งใช้งาน และกระบวนการผลิตเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสร้างปรากฏการณ์การแตกตัวแบบโคโรนา (Corona Discharge) ในทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูง ปัญหาที่ตามมาคือในระบบบำบัดด้วยโอโซนมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเรื่องพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง นอกจากอันตรายจากไฟฟ้าแรงดันสูงแล้วปัญหาสัณฐานรบกวนเนื่องจากปรากฏการณ์โคโรนายังส่งผลกระทบต่อระบบด้วย งานวิจัยซึ่งจะนำเสนอต่อไปนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

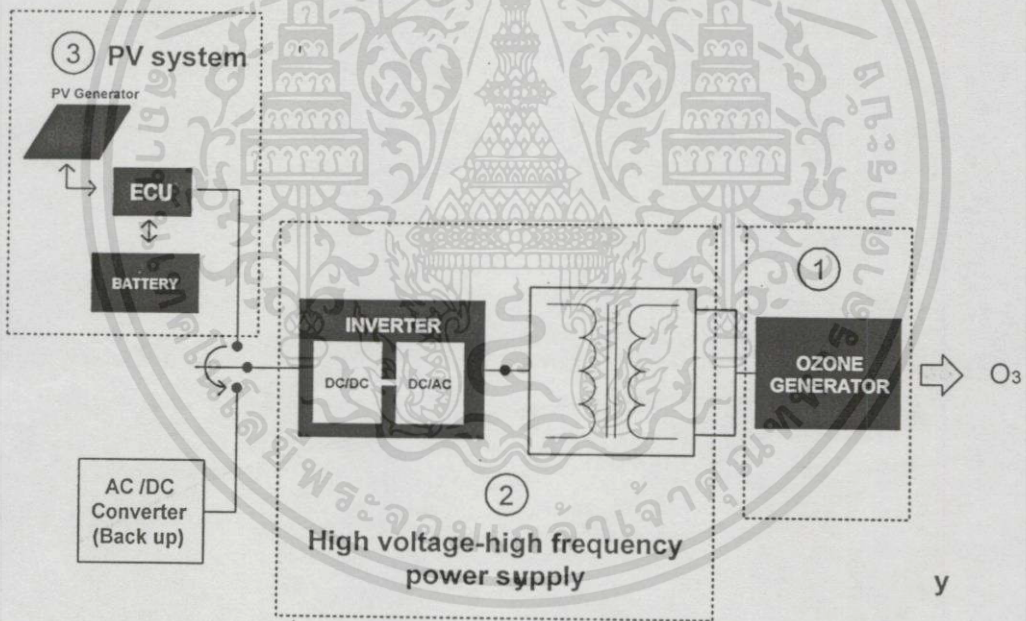
1. ศึกษาและประยุกต์ใช้งานทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงในการสร้างปรากฏการณ์โคโรนาเพื่อผลิตก๊าซโอโซนจากการแตกตัวของอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษากระบวนการเกิดโอโซนในสนามไฟฟ้าแรงดันสูง โดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของพลังงานทางเคมีกับไฟฟ้าในกระบวนการพื้นฐานของการผลิต และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิต เช่น รูปแบบแรงดัน, ความถี่ และ รูปร่างอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องผลิตที่ออกแบบ
3. นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานของระบบ เพื่อลดค่าใช้จ่ายหลักที่ต้องเสียไปในการดำเนินการ แม้ในงานวิจัยนี้จะเป็นระบบที่ยังมีขนาดไม่ใหญ่นัก แต่การลงทุนกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า 20 ปี ถ้าใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังโดยปกติ เงินทุนในส่วนนี้จะแปรเปลี่ยนเป็นค่าไฟที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ช่วยเสริมคุณสมบัติเด่นของโอโซนให้สมบูรณ์คือ เป็นระบบที่แก้ปัญหามลภาวะโดยไม่สร้างมลภาวะซ้ำซ้อนหลังการบำบัดอีก

หลักการที่เกี่ยวข้องคือ ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงและการแตกตัวของก๊าซ (Gas discharge) การออกแบบชุดอิเล็กโทรดจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องเช่น อุณหภูมิและความชื้นเป็นต้น บทความที่นำเสนอเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซนมักนำเสนอในส่วนของโครงสร้างย่อย ๆ เช่น การทดสอบแหล่งจ่ายที่ใช้งานเช่นใน [18] [25], การทดสอบอิเล็กโทรดใน [23] [24] [25] [27], การใช้โปรแกรมเพื่อทำนายผลการเกิดตามทฤษฎีใน [21], และ การนำเสนอหลักการพื้นฐานที่นำไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมใน [26] เป็นต้น ถึงแม้ว่าโอโซนจะมีใช้มาเป็นเวลานานหลายสิบปีแล้ว แต่ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตที่สัมพันธ์กับลักษณะการแตกตัวของก๊าซยังคงเป็นเรื่องที่ยังมีการศึกษาวิจัยกันอยู่ในปัจจุบันใน [26], [25] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาเพื่อออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เงื่อนไขที่พิจารณาคือพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้แก่ ลักษณะสนามไฟฟ้า, แรงดัน, ความถี่ และการเลือกฉนวนใช้งาน โดยพยายามลดเซชความต้องการใช้แรงดันสูง ๆ ด้วยการเพิ่มความถี่ของรูปสัญญาณที่ใช้ทดสอบ และแหล่งพลังงานของเครื่องสามารถเลือกใช้ได้จาก 2 แหล่งคือ แหล่งพลังงานหลักจากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และแหล่งพลังงานสำรองจากวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

1.2 โครงงานวิจัยทดลอง

การออกแบบสร้างเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์นี้ โครงสร้างของระบบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างโดยรวมของโครงการวิจัยเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.1 เครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone generator)

หลักการที่ใช้ในการออกแบบประยุกต์จากทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงและการแตกตัวของก๊าซในสนามไฟฟ้า โดยขั้นตอนการออกแบบเริ่มตั้งแต่การหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้า ค่าพลังงานดังกล่าวถูกนำมาใช้ออกแบบรูปร่างสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดและเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตโอโซนของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างชนิดกัน จนกระทั่งสร้างอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทดสอบและพัฒนาประสิทธิภาพ รายละเอียดการออกแบบและทดสอบจะนำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป

1.2.2 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system: PV System)

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มี 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การออกแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) แรงดันสูงความถี่สูง และการหาขนาดระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ รายละเอียดการออกแบบและทดสอบจะนำเสนอในบทที่ 5

1.2.3 วิเคราะห์ผลการออกแบบเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบที่ออกแบบในข้อ 1.2.1 และ 1.2.2 จะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อทดสอบการทำงานของระบบ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ระบบที่ออกแบบจะนำเสนอในบทที่ 6

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนออกเป็น ส่วนต่าง ๆ คือ

- การศึกษาคุณสมบัติของโอโซนและบทบาทในการทำหน้าที่ทดแทนสารเคมีอื่น ๆ รวมถึงกระบวนการเกิด และงานวิจัยทางด้านการผลิตก๊าซโอโซนที่มีอยู่ในปัจจุบัน
- การทดสอบเงื่อนไขต่าง ๆ ทางไฟฟ้าเพื่อหาแนวโน้มการออกแบบ
- การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์
- การทดสอบเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าลำดับขั้นตอนการพิจารณาเริ่มจาก

1. เครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone generator)
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (High voltage high frequency power supply)
3. การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (PV system)

1.4 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบเงื่อนไขต่าง ๆ แล้วจะสามารถออกแบบเครื่องผลิตโอโซนได้โดยมีที่มาจากปฏิกิริยาเคมีของการแปลงออกซิเจนเป็นโอโซน และใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงมาปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้น แหล่งพลังงานของการผลิตมาจากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และมีระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 Hz เป็นแหล่งพลังงานกรณีฉุกเฉิน ชั่วโมงการทำงานทั้งสิ้น 16 ชั่วโมง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้นทางการค้าและอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของโอโซนที่สามารถแก้ปัญหาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านมลภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประโยชน์ของโอโซนที่รู้จักกันแล้วโอโซนยังมีโทษรุนแรงด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรู้ความเข้าใจและการนำไปใช้งาน การออกแบบเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องรู้ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกตัวก๊าซในสนามไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสามารถออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างปรากฏการณ์การแตกตัวของอากาศภายในแคปออากาศที่ออกแบบได้ และเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานที่นำมาใช้คือระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงต้องมีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบพื้นฐานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์รวมทั้งการทำงาน และการออกแบบซึ่งจะนำเสนอในบทนี้เช่นกัน

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับโอโซนและระบบบำบัดน้ำ

จากข้อมูลใน [4] พบว่าโอโซนมีใช้มานานแล้วเพียงแต่ยังไม่กว้างขวาง และเทคโนโลยียังเป็นรูปแบบการค้าอยู่ในส่วนการวิจัยที่น่าเสนอใน [21]-[34] เป็นการวิจัยพัฒนาส่วนย่อยของระบบเช่น ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง หรือ ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การใช้งานโอโซนแพร่หลายในลักษณะของโรงบำบัดน้ำ รูปที่ 2.1 แสดงจำนวนโรงบำบัดที่กระจายอยู่ในทวีปอเมริกาเหนือจากข้อมูลใน [4] ที่ใช้ระบบบำบัดด้วยโอโซน



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งโรงบำบัดน้ำในทวีปอเมริกาเหนือที่ใช้โอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ของโอโซนที่เด่นมากที่สุด ในประเภทของสารที่ทำหน้าที่เหมือน ๆ กันคือ การฆ่าเชื้อโรค โดยเฉพาะไวรัส ซึ่งคลอรีนไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้นในปัจจุบันและอนาคตโอโซนจึงเป็นทางเลือกที่ดีมากในการบำบัดน้ำ เมื่อเทคโนโลยีการผลิตเป็นที่แพร่หลายและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.2.1 ก๊าซโอโซน

โอโซน (Ozone: O_3) เป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักและสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าสารเคมีอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่แบบเดียวกัน คือ เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidize) นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่อื่น ๆ ได้อย่างดีซึ่งจะกล่าวต่อไป ในบทนี้จะเป็นการแนะนำให้รู้จักโอโซน โดยกล่าวถึงคุณสมบัติ หน้าที่ ข้อดี ข้อเสีย และ วิธีการผลิต 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.

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี [4]

สารเป้าหมายในการทำปฏิกิริยาของโอโซนแบ่งเป็นหมวดหมู่ดังนี้

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

2.2.3 ความเป็นพิษ [18]

โอโซนเป็นสารเคมีที่ไม่เคยตรวจพบในการใช้งานเลยว่าเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมา ในขณะที่สารผลิตภัณฑ์ของคลอรีนหลายชนิดเป็นพิษอย่างรุนแรง นอกจากนี้ โอโซนยังจัดว่าเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อและปลอดเชื้อที่สมบูรณ์แบบ จาก [17] แต่โดยคุณสมบัติตัวมันแล้ว โอโซนเป็นก๊าซพิษ ค่าศักย์ออกซิเดชันสูงถึง 2.07 V (สำหรับคลอรีน 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 คำนีแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และ อุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรม และที่สาธารณะ
0.3	เริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เกิดการปวดศีรษะ ปอดถูกทำลาย คิดเชื่อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอก และทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4-5.6	การทดสอบกับคนพบว่าใน 70 วินาที ใบแก้วเกิดการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้ายแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

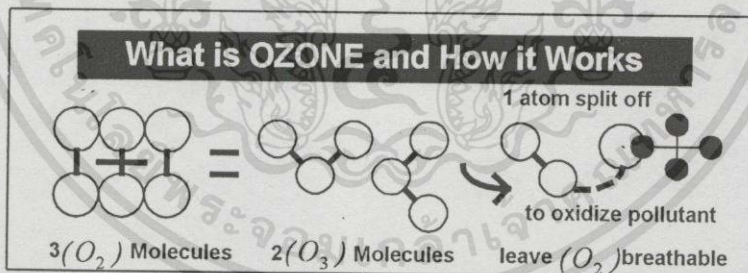
สารเคมีหลายชนิดมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค โดยเฉพาะสารประกอบคลอรีน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนแล้วจะเห็นข้อแตกต่างทางความสามารถที่ชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 2.3

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

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

2.2.4 ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) [4]

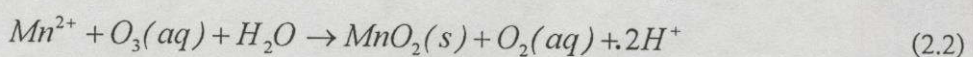
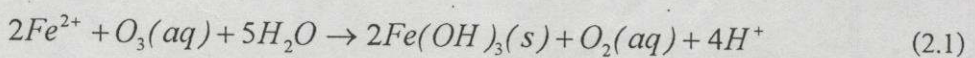
หน้าที่หลักที่สำคัญและเป็นลักษณะเด่นของโอโซนคือทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวอย่างเช่น



รูปที่ 2.2 การทำงานของโอโซนในการออกซิไดซ์ (Oxidation) สารปนเปื้อน

1) เหล็กและแมงกานีส

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือการทำให้ไอออนของเหล็กและแมงกานีสกลายเป็นของแข็งและตกตะกอน ดังแสดงในสมการที่ 2.1-2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณโอโซนที่ใช้คือ $0.43 \text{ mgO}_3/\text{mgFe}$ และ $0.88 \text{ mgO}_3/\text{mgMn}$ แต่ ถ้าเป็นสารเคมีชนิดอื่น ๆ เช่นคลอรีน (ClO_2) ต้องใช้ $1.20 \text{ mg}/\text{mgFe}$ และ $2.45 \text{ mg}/\text{mgMn}$ เป็นต้น

2) สารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นและรส (Taste and odor control)

กลิ่นและรสในน้ำเกิดเนื่องจากสารประกอบอินทรีย์และการเผาผลาญอาหารของสารอินทรีย์ เป็นต้น ถ้าสารประกอบเหล่านี้ไม่เป็นสารประกอบอิมตัว โอโซนจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารเหล่านี้ได้อย่างดี

3) กำจัดสี (Color abatement)

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

2.2.5 ระบบบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment process)

โอโซนอาจถูกใช้เป็นขั้นตอนย่อยก่อนการบำบัดน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดหลัก หรือ ลดความต้องการใช้สารเคมีต่าง ๆ ลง เช่น คลอรีน หรือเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกวนน้ำแล้วตกตะกอน เป็นต้น โอโซนช่วยให้ค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปในระบบบำบัดลดลงได้ ตัวอย่างเช่นงานวิจัยใน [16], [20] เป็นต้น

2.2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

ตัวอย่างระบบบำบัดที่มีปัญหาจากสารเคมีที่ใช้ในปัจจุบันที่ชัดเจนคือ สระว่ายน้ำ เนื่องจาก การสัมผัสโดยตรงของน้ำกับร่างกายของผู้ใช้บริการทำให้ความรุนแรงของการทำปฏิกิริยาของคลอรีนส่งผลกระทบต่อร่างกายของผู้ใช้สระโดยตรง โอโซนมีการทำปฏิกิริยาที่รุนแรงกว่าคลอรีน แต่มีช่วงเวลาสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาเนื่องจากโอโซนสามารถสลายตัวง่าย ดังนั้น ในต่างประเทศจึงมีการนำโอโซนมาใช้ในงานในสระว่ายน้ำอย่างกว้างขวางเนื่องจากไม่มีโทษต่อผู้ใช้และยังมีประโยชน์ต่อการรักษาโรคผิวหนังบางชนิดอีกด้วย แต่ทั้งนี้คืออยู่ภายใต้การตรวจสอบและดูแลอย่างดี เนื่องจากในสระว่ายน้ำต้องไม่มีโอโซนหลงเหลืออยู่แล้วจาก [16], [20] นอกจากนี้อันตรายที่พบจากการใช้งานคลอรีนในระบบที่น้ำสัมผัสโดยตรงกับเนื้อเยื่อที่อ่อนบางของมนุษย์โดยเฉพาะสาร ไครเดน (Chloroform) ซึ่งเป็นสารจำพวก THM: Trihalomethane ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นโทษต่อร่างกายมนุษย์ ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของโอโซนเมื่อเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับคลอรีน

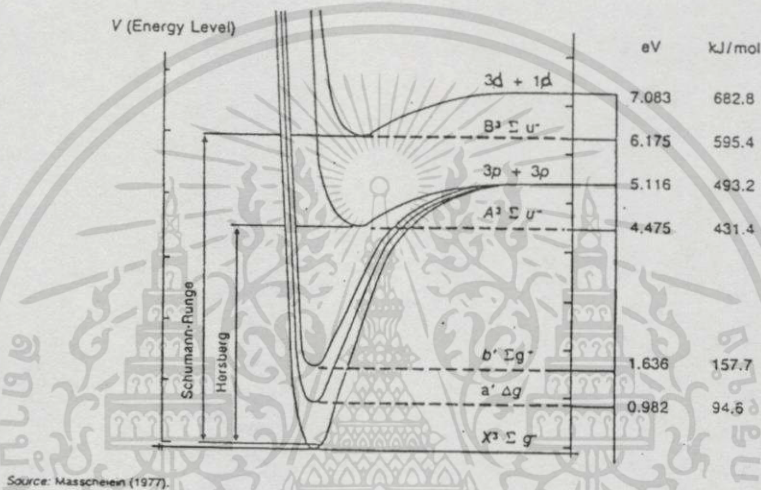
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

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

2.3 กระบวนการแตกตัวของก๊าซและการผลิตโอโซน

อากาศมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซไนโตรเจน (N_2) 79% และก๊าซออกซิเจน (O_2) 21% โดยประมาณนอกนั้นเป็นก๊าซเฉื่อยและไอน้ำ โอโซนเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอมจับตัวกันอยู่ในสถานะไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายขึ้นอยู่กับเงื่อนไขแวดล้อมและความหนาแน่นของปริมาณที่ผลิต ขั้นตอนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจน (free radical) จากโมเลกุลก๊าซออกซิเจนในอากาศ หลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน O_3 ซึ่งนำไปใช้ในระบบบำบัดทางอุตสาหกรรมต่อไป กระบวนการเกิดโอโซนเกิดได้จากปรากฏการณ์ 2 ชนิดคือ กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ กระบวนการเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนเว้าสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซนเกิดได้จากปรากฏการณ์ 2 ชนิดคือ กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ กระบวนการแยกตัว (Dissociation) จาก [8] และ [2] ในกระบวนการแตกตัวของก๊าซนั้น ไอออไนเซชันคือการเพิ่มของประจุแบบทวีคูณ (Electron avalanche) นำไปสู่การเบรกดาวนในฉนวนที่พิจารณา ทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งทะลุผ่านฉนวน สิ่งที่เกิดตามมาคือความร้อนเนื่องจากกระแสที่ไหลจากการเบรกดาวนที่เกิดขึ้น ทำให้ไอโซนซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำเกิดการสลายตัว ดังนั้นในการผลิตไอโซนจึงไม่ควรเกิดการเบรกดาวนขึ้น นั่นคือพลังงานที่อิเล็กตรอนรับจากสนามไฟฟ้าควรมีค่าน้อยกว่าพลังงานไอออไนเซชัน (W_i) แต่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมออกซิเจนออกจากกัน

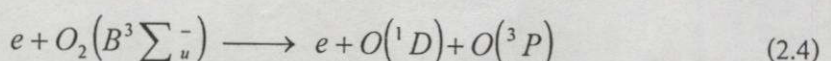
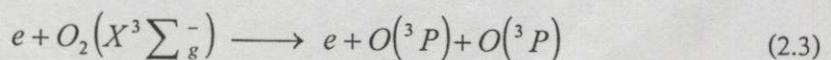


รูปที่ 2.3 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน

เมื่อพิจารณาจากระดับพลังงานของออกซิเจนในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับซึ่งออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็นไอโซนได้มี 2 ระดับด้วยกันคือ $O(^3P)$ และ $O(^1D)$ ขั้นตอนการสร้างไอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

a) การแตกโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนออกเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction)

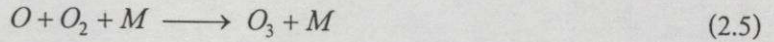
ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาคูดพลังงาน แหล่งพลังงานในงานวิจัยที่พิจารณาคือการชนถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่ออ้างอิงเทียบกับระดับพลังงานของออกซิเจนแล้วแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4



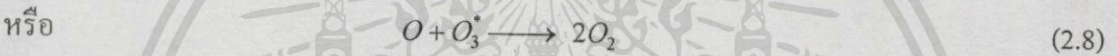
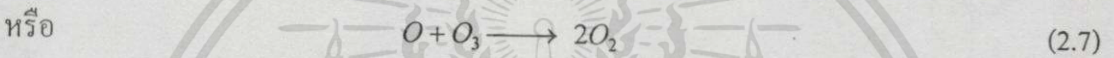
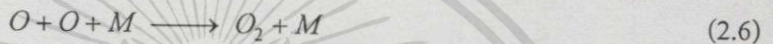
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานมากกว่า พลังงานพันธะของโมเลกุลก๊าซจากรูปที่ 2.3 โดยประมาณคืออยู่ในช่วง 6-9 eV หรือ 595.4 kJ/mol ถึงกว่า 700 kJ/mol

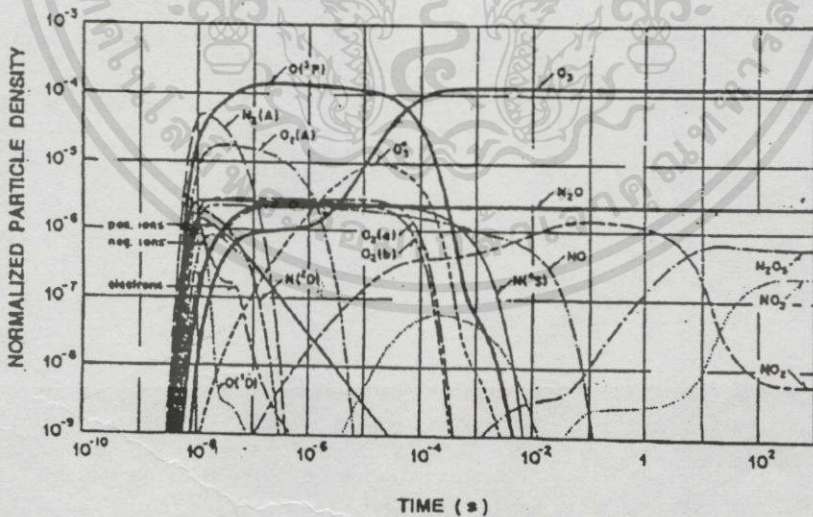
b) การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับ โมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็น โอโซน (Ozone Generation)



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



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



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีที่ถูกสร้างขึ้นจากการแตกตัวของก๊าซในอากาศ จาก [25]

ในอากาศที่ผ่านกระบวนการเพื่อผลิตโอโซนจะได้สารผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในก๊าซหลังการแตกตัวที่ความดัน 1 bar อุณหภูมิ 300 K. (79% N_2 + 21% O_2) นอกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

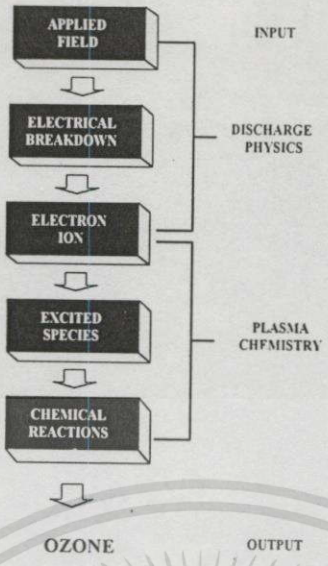
จากโอโซนแล้วยังตรวจพบออกไซด์ประเภท N_2O และ N_2O_5 ด้วย ซึ่งระดับความหนาแน่นต่ำกว่า โอโซนแต่ปริมาณที่ตรวจพบจะเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่คุณภาพก๊าซที่ใช้ไม่เหมาะสมคือมีความชื้นสูง ออกไซด์เหล่านี้ส่งผลเสียต่อชุดอิเล็กโตรดและปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ ดังนั้นระบบเตรียมก๊าซก่อน กระบวนการ (Feed gas preparation system) จึงเป็นส่วนสำคัญของระบบส่วนหนึ่งด้วย เมื่อพิจารณา แหล่งพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4 และ 2.5 แล้วพบว่าพลังงานเป็นองค์ประกอบ สำคัญในการสร้างอะตอมมูลฐานของการผลิตโอโซนคือ O การเลือกย่านพลังงานที่เลือกใช้อย่าง เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตดีขึ้น นั่นคือในการออกแบบส่วนผลิตก๊าซจึงต้องใช้ความรู้ เบื้องต้นเรื่องทฤษฎีจลน์ของก๊าซและสนามไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงกลไกการเกิดองค์ประกอบทางเคมีใน การแตกตัวก๊าซดังกล่าวต่อไปนี้

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และ อนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อน ที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม (Random motion) สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคที่มีประจุ เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แน่นอนแบบมีความเร่ง อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อ เทียบกับประจุบวกทั่ว ๆ ไป จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นใน การแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตโอโซนพลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างชั้นส่งถ่ายมาจากการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซ การชนมี 2 ชนิดคือการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนก่อนชนเท่ากับหลังชน และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) คืออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานไปบางส่วนระหว่างการชนให้กับอนุภาคที่ถูกชน พลังงานที่ถ่ายทอดไปนี้แบ่งออกเป็น 3 ระดับพลังงานคือ พลังงานแตกตัว (Dissociation energy : W_D) พลังงานกระตุ้น (Excited energy : W_E) และพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization Energy : W_I) ตัวอย่าง ระดับพลังงานเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ระดับพลังงานในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของก๊าซ ข้อมูลจาก [1], [2]

GAS	W_D (eV)	W_E (eV)	W_I (eV)
H ₂	4.46	7	15.4
H	-	10.16	13.59
N ₂	9.76	6.3	15.6
N	-	10.33	14.54
O ₂	5.11	7.9	12.5
O	-	9.15	13.61
H ₂ O	-	7.6	12.59
CO ₂	-	10	14.4

ในการผลิตก๊าซโอโซนนั้นเนื่องจากการใช้ทฤษฎีการแตกตัวก๊าซในสนามไฟฟ้าแรงสูงร่วมกับ การเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อรวมตัวเป็นโอโซน สามารถเขียนแผนภาพกลไกการผลิตโอโซนได้ดังรูปที่ 2.5 การค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท อีซีเอส จำกัด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการยินยอมจากบริษัทฯ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงกลไกการผลิต โอโซนในส่วนของ Discharge Physics และ Plasma Chemistry

2.3.1 สนามไฟฟ้า (Electric field)

สนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามแฟลคเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างอิเล็กโตรดลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดค่าแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้า η^* คำนวณได้จากสมการที่ 2.9

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

เมื่อ E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโตรด
 E_{av} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรด

- 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $\eta^* = 1$ นั่นคือกรณีที่ป้อนแรงดันให้ชุดอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบนี้ ถ้าค่า E_{max} ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับค่าความคงทนของฉนวนต่อสนามไฟฟ้า (E_b) จะเกิดเบรกควาน์ทันที เนื่องจากสนามไฟฟ้าเฉลี่ย (E_{av}) ทุกจุดเท่ากัน
- 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field)
 - สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $100\% < \eta^* \leq 40\%$ คุณสมบัติใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมาก
 - สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า $\eta^* \leq 20\%$ คุณสมบัติที่โดดเด่นของสนามไฟฟ้าแบบนี้คือมีผลของประจุค้างเกิดขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ จะเกิดกระแสไหลก่อนเกิดเบรกควานนานมาก เรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกลม

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

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

2.3.2.2 ทรงกระบอกซ้อนกัน

เส้นฟลักซ์สนามไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า โดยอาศัยสมการที่ 4 ของ Maxwell $Q = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{A}$ สำหรับทรงกระบอกแกนร่วมยาว 1 รัศมี r ($r_1 \leq r \leq r_2$) หากค่าสนามไฟฟ้าได้จาก

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

แรงดัน V ที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้ง 2

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

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

ได้

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

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกระบอกวงใน

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

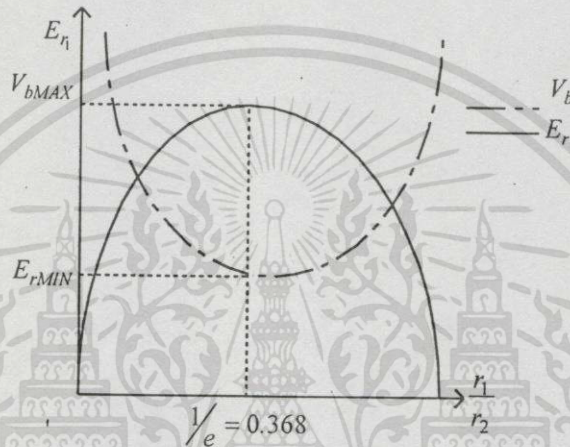
2.3.2.3 มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มิติที่พอเหมาะคือลักษณะการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดทนต่อแรงดันได้สูงที่สุด ตัวอย่างเช่นในกรณีกำหนดรัศมีอิเล็กโตรคนนอก r_2 ให้ ถ้าอิเล็กโตรคนในรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r_1 ใกล้เคียงกับ r_2 มาก ๆ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดนอกและในคือ $d = r_2 - r_1$ มีค่าน้อยเกิดเบรกดาวนง่าย แต่การลดรัศมี r_1 ลงเพื่อเพิ่มค่า d จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำเพิ่มสูงขึ้นมาก จนถึงค่าวิกฤติและเกิดโคโรนาได้ง่าย การหาค่าจุดที่พอเหมาะของ r_1 ที่อยู่ระหว่าง $0 - r_2$ ที่ทำให้ระบบทนแรงดันได้สูงสุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อนดังกล่าวใน [1] กรณีอิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมคือ

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



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง V_b และ E_r ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่

2.3.3 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน

2.3.3.1 รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration)

รูปร่างอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้า กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับความเครียดเฉลี่ยจะต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรกดาวนเป็นค่าเดียวกัน คือเมื่ออะวลานซ์วิกฤตได้ตามเงื่อนไขเบรกดาวนทันที ไม่มีโคโรนาเกิดก่อนเบรกดาวน แต่กรณีที่สนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง ระยะแกปกว้างมากเมื่อเทียบกับรัศมีอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้น (V_i) จะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวนอย่างชัดเจน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_m) เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

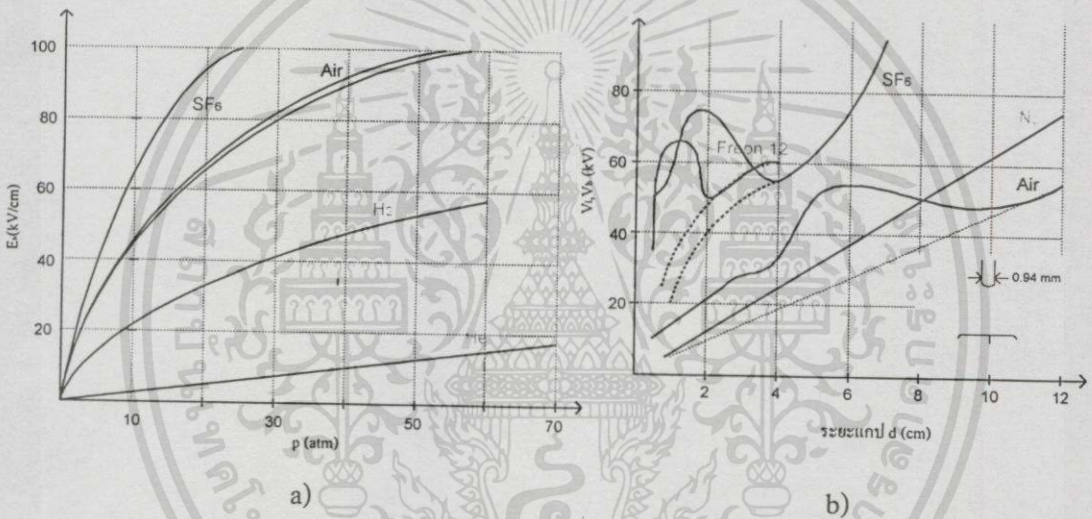
$$V_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.15)$$

เมื่อ d คือระยะช่องว่างอากาศ และ η^* คือแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 ผลของความหนาแน่นก๊าซ

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรกความถี่จะแปรตามความหนาแน่นก๊าซดังแสดงในกราฟรูป 2.8 (a) แต่กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงคือที่แฟลคเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* < 20-30 \%$ ลักษณะของค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่จะมีลักษณะค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum - minimum characteristic) เมื่อพิจารณาในเทอมของความดันก๊าซ กล่าวคือที่ความดันต่ำ ๆ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนการเกิดเบรกความถี่ และเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่จะลดต่ำลงด้วย จนกระทั่งค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่กับแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมีค่าเท่ากัน เป็นความดันที่ค่าแรงดันมีค่าต่ำ หลังจุดนี้ถ้าเพิ่มความดันก๊าซต่อไปอีกค่าแรงดันเบรกความถี่จะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันก๊าซอีก ในช่วงหลังจุดต่ำสุดนี้ ($p > p_c$)



รูปที่ 2.8 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซตัวอย่างในฟังก์ชันของความดัน จาก [1]

- a) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
- b) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

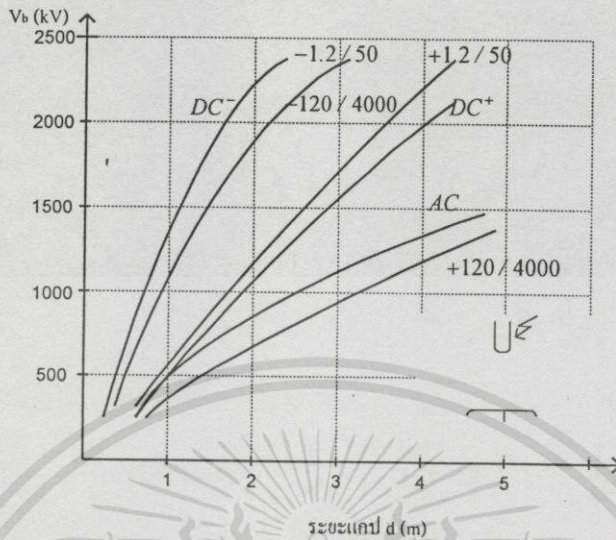
2.3.3.3 ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของ H_2O ในอากาศเป็นก๊าซไฟฟ้าลบอ่อน ๆ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงผลของความชื้นมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกความถี่และมีผลมากที่สุดต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.3.3.4 ผลของรูปแบบแรงดัน

แรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของแรงดันดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ในอากาศในฟังก์ชันของระยะแกปในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งชั่ววูบมีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกความถี่ต่ำสุด แรงดันชั่วลบกระแสตรงมีค่าแรงดันเบรกความถี่สูงสุด อาจกล่าวได้ว่าความคงทนของอากาศต่อแรงดันชั่วลบทุกชนิดใกล้เคียงกัน ส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงาน 50-60 Hz จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรกดาวน์เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์กระแสตรงในช่องว่างอากาศที่ระยะห่างไม่เกิน 150 cm .
แต่จะต่ำกว่าเมื่อระยะช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.9 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดแท่งกับระยะในอากาศในเทอมของระยะ d เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่าง ๆ ที่สภาวะมาตรฐาน IEC (760 torr 20°C $11 \text{ gH}_2\text{O}/\text{m}^3$) จาก [1]

2.3.3.5 ผลของประจุค้างต่อแรงดันไฟฟ้าต่างขั้ว (บวก - ลบ)

ประจุค้างเกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ผลคือค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_b) สูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (V_c) มากและทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC, AC และอิมพัลส์) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบไม่สมมาตร เช่นปลายแหลมกับระนาบ การอ้างอิงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบหมายถึงขั้วแรงดันบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

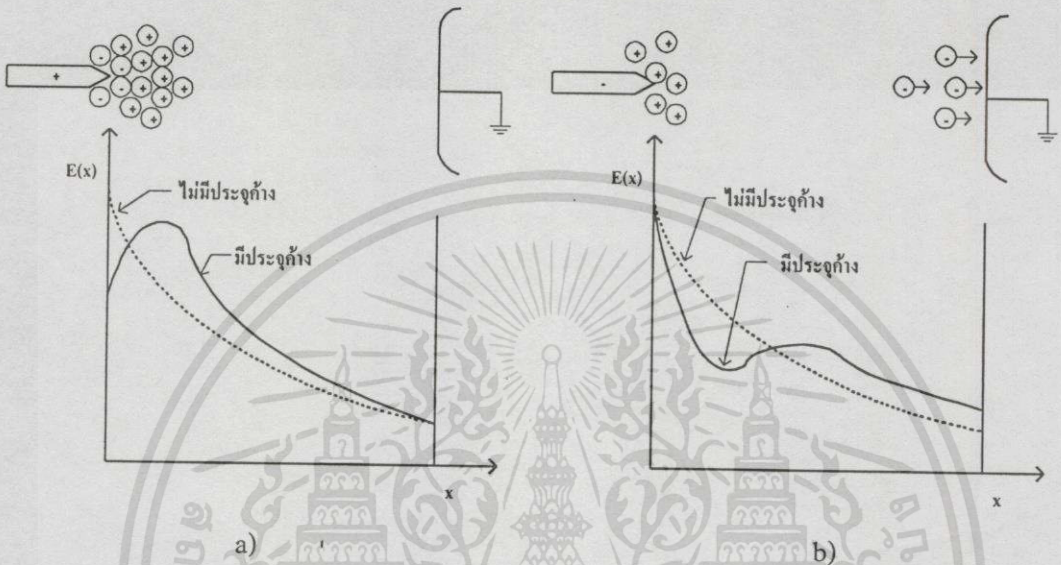
1) ปลายแหลมขั้วบวก

ผลของประจุค้างทำให้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (V_c) ของขั้วบวกสูง และค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_b) ต่ำ เมื่อพิจารณาความเครียดสนามในรูปที่ 2.10 a) การไอออนไนเซชันเริ่มที่บริเวณรอบ ๆ ปลายแหลม อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เร็ววิ่งเข้าหาแอโนดคือปลายแหลมรวมเป็นกลาง ปลดปล่อยไอออนบวกที่เคลื่อนที่ช้าออกันอยู่หน้าปลายแหลมทำให้ความเครียดที่ปลายแหลมลดลง แต่ความเครียดทิศทางเข้าหาอะโนดเพิ่มสูงขึ้น ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนทำให้ปลายแหลมยาวขึ้น ช่องว่างอากาศสั้นลงและในเวลาเดียวกันความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดการเบรกดาวน์ง่ายขึ้น

2) ปลายแหลมขั้วลบ

ผลของประจุค้างทำให้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (V_c) ของขั้วลบต่ำ และค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_b) สูง รูปที่ 2.10 b) ปลายแหลมขั้วลบทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดเนื่องจาก

กระบวนการไอออไนเซชันเคลื่อนที่สู่อะโนดซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจเกาะบนโมเลกุลรวมตัวเป็นกลางที่แอโนด ส่วนไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดปลายแหลม ออกข้างหน้าปลายแหลมทำให้ความเครียดหน้าปลายแหลมเพิ่มสูงขึ้น แต่สนามระหว่างหมอกประจุค้ำกับอะโนดกลับสมำเสมอดีขึ้นเนื่องจากประจุค้ำ ทำให้เบรกดาวน์ยากขึ้น



รูปที่ 2.10 ผลประจุค้ำของปลายแหลมขั้วบวกและลบ

2.3.3.6 ผลของแผ่นฉนวนบางกั้น

แผ่นฉนวนบางกั้นช่วยให้ช่องว่างอากาศทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงขึ้น แผ่นฉนวนบางที่กั้นไม่ทำให้สนามไฟฟ้าทางเรขาคณิตเปลี่ยน แต่แผ่นฉนวนจะกั้นการเคลื่อนที่ของไอออนประจุบวกที่เกิดขึ้นจากการไอออไนเซชันที่แคโทดไม่ให้ตีหน้าไป ประจุบวกจะรวมตัวกระจายอยู่บนระนาบของแผ่นฉนวนบาง ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นฉนวนบางกับระนาบอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสมำเสมอ ขณะเดียวกันความเครียดระหว่างแคโทดกับแผ่นฉนวนบางลดลง แรงดันเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับความคงทนของช่องอากาศในสนามสมำเสมอ ผลของแผ่นฉนวนบางกั้นทำให้ทนแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูงขึ้นในสนามไม่สมำเสมอสูงแต่มีผลเล็กน้อยในสนามสมำเสมอ ผลนี้จะเกิดในกรณีแรงดันเป็น DC, AC หรือ อิมพัลส์ ตัวอย่างฉนวนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิดตามย่านความถี่ที่จะทดสอบและความสะดวกในการออกแบบคือ

- 1) พีวีซี (Polyvinylchloride : PVC) ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรดและด่างและไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ชีตจำกัดด้านอุณหภูมิใช้ได้ไม่เกิน 60°C มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและเชิงปริมาตรสูง ค่า ϵ_r ประมาณ 3.8-4.3 ที่ 50 Hz ส่วน $\tan \delta = 0.012 - 0.15$ ที่ 50 Hz และ $0.006 - 0.1$ ที่ 1MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) แก้ว เป็นสารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติก ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต้านความร้อนได้สูง ประกอบด้วยออกไซด์ SiO_2 ที่ซับซ้อน ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ (ϵ_r) อยู่ในช่วง 3.5 – 9 มีค่าพลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก 0.005-0.01 จะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ ความคงทนไฟฟ้า 3000 – 5000 kV/cm และลดลงเหลือครึ่งหนึ่งที่อุณหภูมิ 100°C
- 3) ไมก้า (Mica) เป็นฉนวนที่มีความคงทนไฟฟ้าสูง มีพลังงานที่สูญเสียไปในไดอิเล็กตริกต้านต่อความร้อนได้ดี คงทนแรงกลได้ดี ไมก้าที่บริสุทธิ์มาก ๆ เหมาะจะใช้กับงานความถี่สูง ไมก้าเป็นชื่อเรียกรวมของแร่ผลึกซิลิเกตของอะลูมินาและโปแตสเซียม muscovite หรือ phlogopite ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ Muscovite และ Phlogopite

คุณสมบัติ	Muscovite	Phlogopite
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ 30°C	1000 kV/mm	700 kV/mm
ϵ_r ที่ 1 kHz-3000 MHz	6-7.5	6-7.5
$\text{tg } \delta$	0.03 (50Hz) 0.001 (1MHz)	0.03 (50Hz) (1MHz)

2.4 การประยุกต์ใช้งานไฟในอิลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ในทางไฟฟ้า [9]

2.4.1 การแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นอิลิเมนต์ (Element)

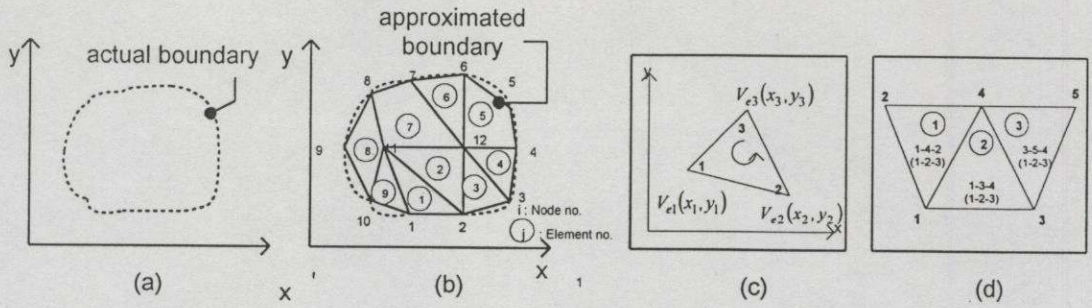
ขอบเขตปัญหาที่พิจารณาทั้งหมด ถูกแบ่งออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย ๆ ที่รู้จำนวนดังแสดงในรูปที่ 2.11 (a) ซึ่งอิลิเมนต์ทั้ง 9 ชิ้นไม่ซ้อนทับกัน และประกอบด้วย 12 โหนด เมื่อหาค่าศักดาไฟฟ้าโดยประมาณภายในอิลิเมนต์คือ V_e แล้วทำการเชื่อมโยงการกระจายศักดาไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์หลาย ๆ อิลิเมนต์ จะทำให้ศักดาไฟฟ้ามีความต่อเนื่องภายในขอบเขตของอิลิเมนต์ (Interelement boundary) คำตอบโดยประมาณของบริเวณทั้งหมดของปัญหาที่พิจารณาคือ

$$V(x, y) = \sum_{e=1}^N V_e(x, y) \quad (2.16)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนอิลิเมนต์ที่บริเวณของปัญหาถูกทำการแบ่ง

รูปแบบทั่ว ๆ ไปที่ใช้ในการประมาณค่า V ภายในอิลิเมนต์เป็น Polynomial Approximation ตัวอย่างสมการที่ใช้ในอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมคือ

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์ปัญหาด้วย Finite Element Method : FEM

- (a) ขอบเขตปัญหาจริง
- (b) การแบ่งพื้นที่ปัญหาออกเป็นส่วนย่อย
- (c) การวอนโหนดในอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม
- (d) การรวมอิลิเมนต์เข้าด้วยกัน

ค่าศักดาไฟฟ้า V_e ภายในอิลิเมนต์ที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 ส่วนภายนอกเท่ากับ 0 นิยมใช้อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมากกว่า โดยตั้งสมมติฐานให้ Linear variation ของ V_e ภายในอิลิเมนต์เป็นดังสมการที่ 2.17 เหมือนเป็นการสมมติว่าสนามไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์เป็นแบบสม่ำเสมอ

$$\bar{E}_e = -\nabla V_e = -(b\bar{a}_x + c\bar{a}_y) \tag{2.18}$$

2.4.2 การหาสมการของแต่ละอิลิเมนต์

จากรูปที่ 2.11 (c) คืออิลิเมนต์พื้นฐานรูปสามเหลี่ยม ค่าศักดาไฟฟ้า ณ โหนด 1, 2, 3 คือ V_{e1}, V_{e2}, V_{e3} ตามลำดับ จากสมการที่ 2.17 จะได้เมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

แทนค่า V_{ei} และ x_i, y_i เพื่อแก้สมการหาค่า a, b, c เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.17 รายละเอียดได้นำมาจากวิทยานิพนธ์ที่เคยมีกรนำเสนอใน [9]

ได้
$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \tag{2.20}$$

เมื่อ α คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเชิงเส้น เรียกว่า Element shape function ซึ่งมีคุณสมบัติ

$$\alpha_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \tag{2.21 a.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (2.21) \text{ b.}$$

พลังงานต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่สัมพันธ์กับอิลิเมนต์ e คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |\bar{E}^2| dS = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad (2.22)$$

เมื่อสมมติให้บริเวณของปัญหาในลักษณะ 2 มิติที่พิจารณาไม่มีประจุอิสระ ($\rho_s = 0$) แต่จากสมการที่ 2.20 พบว่า

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i \quad (2.23)$$

แทนสมการที่ 2.23 ใน 2.22 ได้

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon V_{ei} \left[\int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \right] V_{ej} \quad (2.24)$$

นิยามให้เทอมในวงเล็บเป็น

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \quad (2.25)$$

สมการที่ 2.24 จะเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V_e]^T [C^{(e)}] [V_e] \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$

และ

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$$

เมตริก $[C^{(e)}]$ เรียกว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์ (Stiffness matrix) สมาชิกแต่ละตัวพิจารณาระหว่างการจับคู่ระหว่างโหนด i และ j รายละเอียดการหาค่าสมาชิกแต่ละตัวอ้างอิงจาก [9] โดยมีพื้นฐานมาจากสมการที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การรวบรวมอิลิเมนต์เป็นขอบเขตของปัญหาดังเดิม

จากรูปที่ 2.11 (d) พลังงานที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการรวมอิลิเมนต์คือ

$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V_e]^T [C] [V] \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

n เป็นจำนวนโหนด, N เป็นจำนวนอิลิเมนต์ และ $[C]$ เรียกว่า Global coefficient matrix คือการรวม Element coefficient matrix เข้าด้วยกัน เพื่อสร้าง Global coefficient matrix ตัวอย่างรูปที่ 2.11 (d) เป็นไฟไนท์อิลิเมนต์เมช (Finite element mesh) ซึ่งประกอบด้วยอิลิเมนต์ 3 ชั้น โหนด 1,2,3,4 และ 5 เป็น global node และ โหนด i-j-k เรียกว่า Local node ซึ่งคือโหนด 1-2-3 การรวมโหนด Local จะลำดับในทิศทางเข็มนาฬิกาเริ่มจากโหนดใดก็ได้ ดังนั้นวิธีการเรียงลำดับเลขจึงมีหลายลักษณะ เช่น อิลิเมนต์ที่ 3 อาจใช้ 4-3-5 แทน 3-4-5 ก็ได้ Global coefficient matrix ของตัวอย่างในรูปที่ 2.11 (d) คือ

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เป็นเมตริกซ์ 5×5 เนื่องจากรูปที่ 2.11 (d) มีทั้งหมด 5 โหนด ($n=5$) เนื่องจาก C_{ij} เป็นการจับคู่ระหว่างโหนด i และ โหนด j ค่า C_{ij} หาได้จากข้อเท็จจริงที่ว่า การกระจายของศักดาไฟฟ้าต้องมีค่าต่อเนื่องตลอด Interelement boundary องค์กรประกอบ i, j ใด ๆ ใน $[C]$ จึงมาจากทุก ๆ อิลิเมนต์ที่มีโหนด ij ตัวอย่างเช่น

$$C_{11} = C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} \quad (2.30) \text{ a.}$$

ส่วนโหนด 2 เป็นของอิลิเมนต์ 1 เท่านั้น

$$C_{22} = C_{33}^{(1)} \quad (2.30) \text{ b.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่มีการจับคู่กันเช่นระหว่าง โหนด 2 และ 3

$$C_{23} = C_{32} = 0 \tag{2.30} c.$$

ทำเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป จะได้ Global coefficient matrix ในรูปที่ 2.11 (d) คือ

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} & C_{11}^{(3)} & C_{12}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & C_{32}^{(1)} & 0 \\ C_{21}^{(2)} & 0 & C_{22}^{(2)} + C_{11}^{(3)} & C_{23}^{(2)} + C_{13}^{(3)} & C_{12}^{(3)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{31}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{32}^{(2)} + C_{31}^{(3)} & C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} & C_{32}^{(3)} \\ 0 & 0 & C_{21}^{(3)} & C_{23}^{(3)} & C_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

คุณสมบัติของ [C] มีดังต่อไปนี้

1. เป็นเมตริกซ์สมมาตร ($C_{ij} = C_{ji}$) เหมือน Element coefficient matrix
2. $C_{ij} = 0$ เมื่อไม่มีการจับคู่ของ i และ j แสดงว่า กรณีที่อิทธิพลที่มีจำนวนมาก ๆ [C] จะเบาบางลงเนื่องจากเทอมที่เป็น 0 มีมากขึ้น
3. เป็น Singular ($\det = 0$)

2.4.4 การแก้ระบบสมการเพื่อหาผลลัพธ์

สมการ Laplace's จะสามารถหาคำตอบที่สอดคล้องได้เมื่อพลังงานรวมที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหาที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุด การทำ Partial derivatives ค่า W เทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าที่ทุก ๆ โหนดจะได้ว่า

$$\frac{\partial W}{\partial V_1} = \frac{\partial W}{\partial V_2} = \dots = \frac{\partial W}{\partial V_3} = 0$$

หรือ

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0 \text{ เมื่อ } k = 1, 2, \dots, n \tag{2.32}$$

นำไปสู่

$$0 = \sum_{i=1}^n V_i C_{ik} \tag{2.33}$$

สมการที่ 2.33 เป็นสมการสำหรับทุก ๆ โหนด $k = 1, 2, \dots, n$ เซตคำตอบของสมการสามารถหาค่าของ $[V]^T = [V_1, V_2, \dots, V_n]$ ได้ วิธีหามี 2 วิธีคือ Iteration method และ Band matrix method จาก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

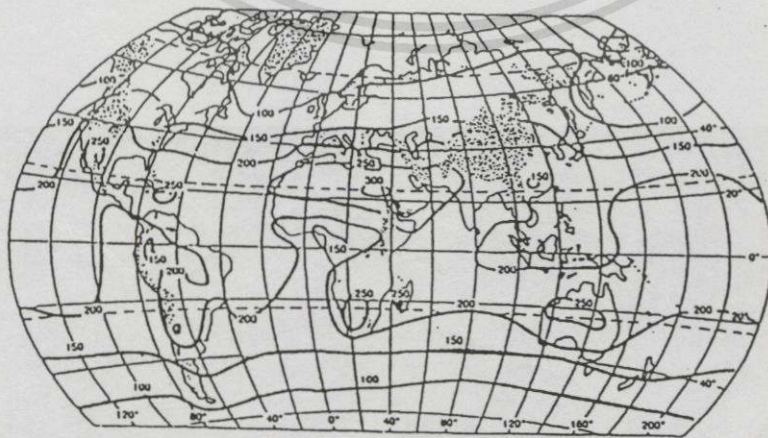
2.5 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system)

จากเอกสารที่ [35] ได้นำเสนอถึงเรื่องของพลังงานที่ปลอดภัย (Green energy) และผลกระทบ เนื่องจากการเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งมีแนวโน้มจะเพิ่มมากยิ่งขึ้นอีกในอนาคต ตัวอย่างเช่น ฝนกรด (Acid rain) หรือ ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green house effect) พลังงานแสงอาทิตย์จัดอยู่ในพลังงาน ชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Renewable) ดวงอาทิตย์คือแหล่งพลังงานที่ใหญ่ที่สุดของโลก ผลิต เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้ผลของไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic effect) ปัญหาที่เป็นอุปสรรคสำคัญ ในปัจจุบันคือเรื่องของประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงานและค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการเริ่มต้นระบบ เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตรจึงเหมาะแก่การใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ รายละเอียดโดยย่อของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) มีดังนี้

2.5.1 แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar resource)

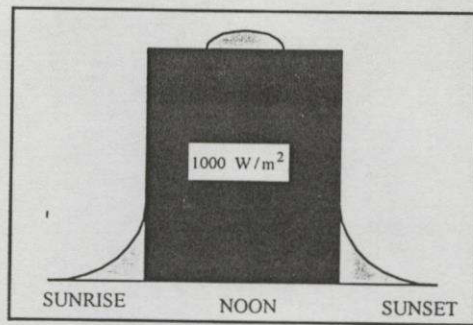
การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาก่อนตัดสินใจใช้ระบบไฟ ฟ้าแสงอาทิตย์คือ สถานที่ตั้ง เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักมาจากดวงอาทิตย์ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสม มากแก่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้คือบริเวณที่มีค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ต่อตารางเมตร สูงสุด ค่า ความสว่าง (Irradiant) คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่หนึ่ง จากการสำรวจค่าความ สว่างโดยเฉลี่ยทั่วโลกพบว่าเป็นดังรูปที่ 2.12

ค่าการรับแสงแดด (Insolation) ซึ่งคือปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ที่พิจารณา จาก [36] ค่านี้มีหน่วยเป็น $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ถ้านี้เท่ากับชั่วโมงที่แดดสูงสุด (peak sun hours) ซึ่งคือ จำนวนชั่วโมงต่อวันซึ่งค่าความสว่างของดวงอาทิตย์ เท่ากับ $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ซึ่งจะให้พลังงานปริมาณ เท่ากัน ข้อมูลของการส่องสว่างของแสงอาทิตย์มักเป็นข้อมูลต่อวัน ดังนั้นเมื่อฤดูกาลเปลี่ยนไปค่า นี้จึงเปลี่ยนไป ค่าการถูกแสงแดดต่อวัน (Daily insolation) ที่พิจารณาแสดงในรูปที่ 2.13 จาก [12]



รูปที่ 2.12 ค่าความส่องสว่าง (Irradiant) โดยเฉลี่ยในช่วง 10 ปี บริเวณผิวโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



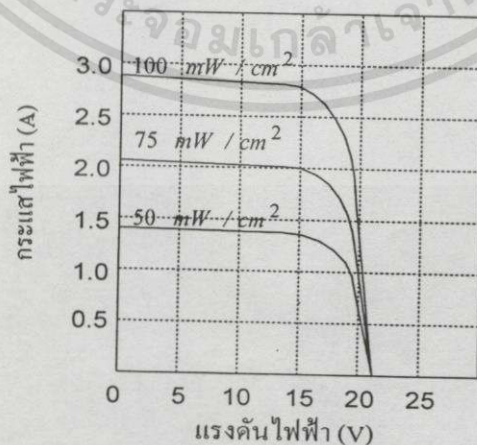
รูปที่ 2.13 การพิจารณาค่าแสงแดดใน 1 วันตามชั่วโมงที่แดดสูงสุด

การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงพลังงานเอาท์พุทที่แผงเซลล์ให้ด้วย เนื่องจากพลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์จะได้เมื่อแผงเซลล์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ เมื่อกล่าวถึงระบบการแปลงรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าเพื่อใช้งานจะหมายถึงระบบที่ประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ หลายส่วน คงจะกล่าวต่อไปนี้ เซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถเรียกว่าระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้ ข้อดีของการนำระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มาใช้งานมีหลายประการดังแสดงใน [12], [8]

2.5.2 แหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Generator)

หน่วยพื้นฐานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์คือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ซึ่งเป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำมีแรงดันคงที่ประมาณ 0.5 V แต่กระแสแปรเปลี่ยนไปตามพื้นที่หน้าตัดของเซลล์ โดยเฉลี่ยประมาณ $3A/100 \text{ cm}^2$ ชั้นเซลล์นี้จะถูกนำมาเรียงต่อกันในแผงเซลล์ 1 แผงเพื่อให้ได้แรงดันตามต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะที่สำคัญคือ

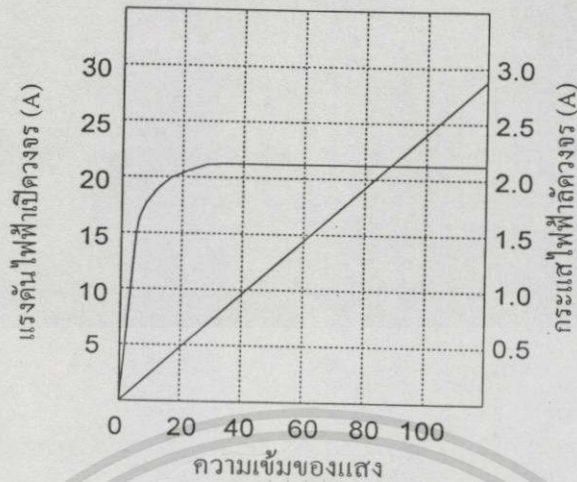
- 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กระแสคงที่ โดยทั้งแรงดันและกระแสมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.14 โดยแผงเซลล์จะให้กระแสคงที่จนถึงจุดให้พลังงานสูงสุด



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

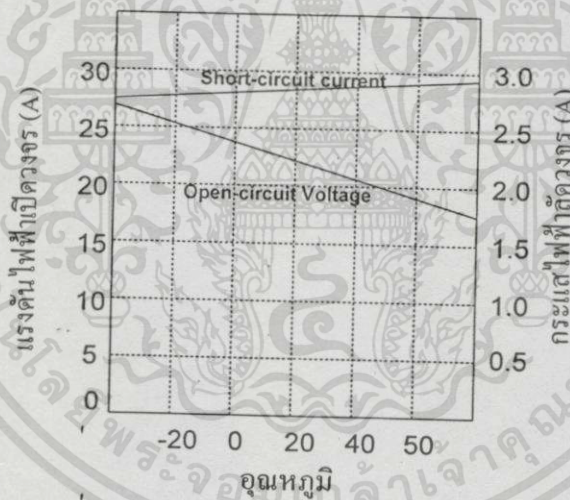
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กระแสแปรตามความเข้มแสง ในขณะที่แรงดันค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันที่ความเข้มแสงต่างๆ

3) แรงดันลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่กระแสแทบไม่เปลี่ยนแปลง

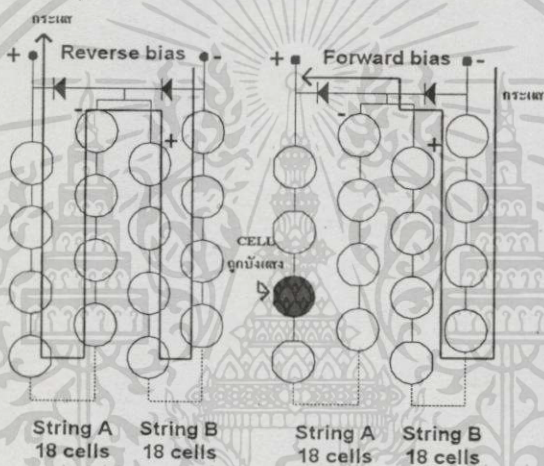


รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเทียบกับอุณหภูมิ

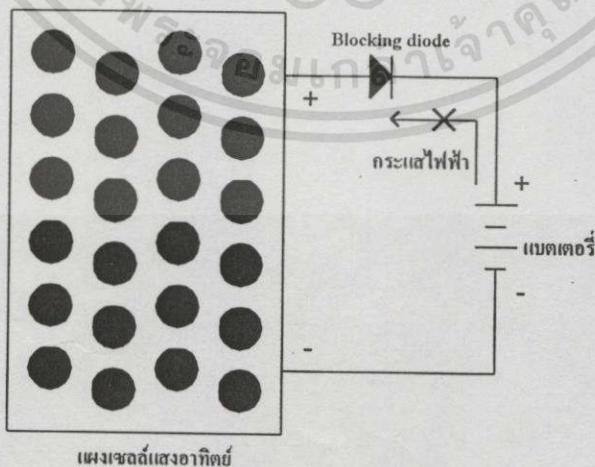
2.5.2.1 โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- 1) เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกันแบบขนานหรืออนุกรมแล้วแต่ค่าแรงดันที่ต้องใช้ ปกติจะถูกออกแบบให้ใช้กับระบบไฟฟ้า 12 โวลต์ จึงอนุกรมเซลล์เข้าด้วยกันจำนวน 32-36 ชิ้น ได้แรงดันประมาณ 16-18 โวลต์
- 2) กระจกนิรภัย แสงผ่านได้ 92% เป็นกระจก Tempered low iron, High transmission glass.

- 3) EVA : Ethylene-Vinyl Acetate เคลือบเซลล์กันความชื้นและฝุ่นละอองถูกเซลล์แสงอาทิตย์
- 4) บายพาสไดโอด (By pass diode) ต่อคร่อมระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แถวป้องกันกระแสขาดวงจร กรณีเกิดเงาบังบนเซลล์ใดเซลล์หนึ่งเซลล์นั้นจะเปลี่ยนสภาพจากแหล่งจ่ายกลายเป็นโหลดทันที กระแสไม่สามารถไหลผ่านเซลล์นั้นได้ บายพาสไดโอดช่วยให้ทิศทางกระแสเปลี่ยนมาผ่านทางไดโอดแทนโดยไม่ผ่านเซลล์นั้น ลักษณะการต่อและการทำงานแสดงในรูปที่ 2.17
- 5) บล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode) ต่อระหว่างชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ ป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสจากแบตเตอรี่ไปยังชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 การต่อบายพาสไดโอดคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์



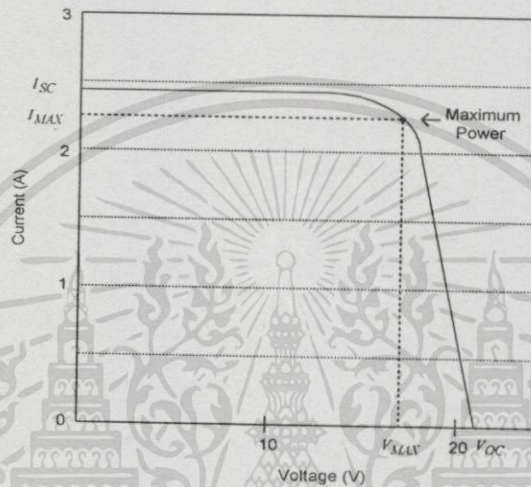
รูปที่ 2.18 การต่อบล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 ตัวแปรที่บอกคุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กับการออกแบบระบบ คือค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกราฟคุณสมบัติกระแส-แรงดันของแผงนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.19

- 1) ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) เป็นแรงดันที่วัดได้เมื่อไม่ได้ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า
- 2) ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) เป็นแรงดันที่วัดได้เมื่อต่อโหลดที่เหมาะสมที่สุด เป็นจุดที่แผงเซลล์ให้พลังงานสูงสุด



รูปที่ 2.19 คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- 3) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) เป็นค่ากระแสที่วัดได้เมื่อลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 4) ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max}) เป็นค่ากระแสที่วัดได้เมื่อต่อโหลดที่เหมาะสม เป็นจุดที่แผงเซลล์ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 5) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) เป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.5.2.3 ตัวแปรที่บอกประสิทธิภาพของแผงเซลล์

การเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถพิจารณาประสิทธิภาพของแผงเซลล์ได้จากค่าแฟกเตอร์ คือ Fill factor : FF ซึ่งคืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ต่อ $V_{oc} \cdot I_{sc}$

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.34)$$

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่า FF มากกว่า 0.7 ค่านี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโหลดที่นำมาต่อด้วย ดังนั้น FF จึงเป็นตัวแปรเพื่อทดสอบคุณภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.5.3 แบตเตอรี่

2.5.3.1 ความสม่ำเสมอในการประจุแรงดัน

การประจุแรงดันแบตเตอรี่ต้องได้รับการประจุอย่างถูกวิธีเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของแบตเตอรี่ ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้นำโมดูลควบคุมความสม่ำเสมอด้วยตนเองมาใช้ ความเสียหาย 2 ประการที่เกิดกับโมดูลควบคุมความสม่ำเสมอด้วยตนเองคือ เมื่อแบตเตอรี่ไม่สามารถประจุได้เร็วเท่าที่มันจะทำได้ และเมื่อการประจุกระแสมีปริมาณต่ำในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆทึบ ในโมดูลที่มีจำนวนเซลล์มาก ๆ จะให้แรงดันสูงพอสำหรับจ่ายกระแสสูงสุดในทุก ๆ สถานะของการประจุแบตเตอรี่ ช่วงที่การประจุเกือบเต็ม สมมติเต็มเมื่อแรงดันเทอมินัลเท่ากับ 15 V ถ้ามากกว่านี้จะทำให้ก๊าซที่เกิดในแบตเตอรี่มากเกินไป เกิดความเสียหาย จึงจำเป็นต้องใช้ชาร์จเรกูเลเตอร์มาป้องกันไม่ให้แรงดันเทอมินัลเกิน 15 V ในระหว่างการประจุ

2.5.3.2 อุปกรณ์ป้องกันแบตเตอรี่

อุปกรณ์ป้องกันแบตเตอรี่ (ECU) มีให้เลือกหลายรุ่นตามความเหมาะสมการใช้งาน ระบบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวครอบคลุมถึง

- 1) การตัดแหล่งประจุไฟออก (HI-CUT OFF) เมื่อแบตเตอรี่ได้รับการประจุไฟเข้าจนเต็มที่ เพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสียหายจากการประจุไฟเกิน ไฟตำแหน่ง HI VOLTAGE จะติด อุปกรณ์นี้จะตัดการประจุไฟจากแหล่งประจุไฟออกจนกว่าแรงดันแบตเตอรี่จะลดต่ำลงในระดับที่ต้องการ อุปกรณ์นี้จะปล่อยให้การประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ทำต่ออัตโนมัติ
- 2) การตัดโหลดออก (LO-CUT OFF) เมื่อแบตเตอรี่จ่ายแรงดันออกมามากถึงจุดที่อาจเกิดความเสียหายกับแบตเตอรี่ได้ ไฟสัญญาณ LOW VOLTAGE จะติด อุปกรณ์นี้จะตัดโหลดออก เพื่อไม่ให้โหลดดึงกระแสจากแบตเตอรี่มากเกินไปจนทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ และเมื่อแรงดันแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้ง อุปกรณ์นี้จึงจะต่อโหลดเข้ากับระบบโดยอัตโนมัติ
- 3) เป็นขุมสายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และ อุปกรณ์ไฟฟ้า

2.5.4 ส่วนควบคุมและแปลงรูปกำลังไฟฟ้า (Power conditioning and control : PCU)

การใช้งานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่เป็น โหลดไฟฟ้ากระแสสลับจำเป็นต้องมีส่วนแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับด้วย คือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) การเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์เป็นสิ่งที่กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทำงานของระบบ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อินพุตและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตจะถูกพิจารณา การนำโหนดไฟฟ้ากระแสสลับมาใช้ นอกจากการพิจารณากำลังไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้แล้ว ยังต้องคำนึงถึง ความถี่และรูปสัญญาณของแรงดันด้วย การเลือกอินเวอร์เตอร์จะส่งผลต่อการทำงาน, ความน่าเชื่อถือ และ ค่าใช้จ่ายของระบบ

ไฟฟ้าแสงอาทิตย์ สำหรับระบบแบบ Stand alone ตัวอย่างคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ที่ควรพิจารณาในการเลือกมีดังนี้

- 1) รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุต อินเวอร์เตอร์แบ่งเป็น 3 ชนิดตามรูปสัญญาณเอาต์พุตคือ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม, รูปคลื่นกึ่งไซน์ และ รูปคลื่นไซน์ แล้วแต่ความเหมาะสมกับภาระของระบบ (Load)
- 2) ประสิทธิภาพการแปลงรูปพลังงาน เป็นสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่อกำลังไฟฟ้าอินพุต คำนึงขึ้นอยู่กับภาระของระบบ
- 3) พิกัดกำลังไฟฟ้า
- 4) แรงดันไฟฟ้าอินพุต พิจารณาจากความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของภาระของระบบ ยิ่งภาระของระบบมีขนาดใหญ่ ค่าแรงดันอินพุตยิ่งสูง

2.5.5 การหาขนาดระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีขั้นตอนที่ต้องพิจารณา 4 ขั้นตอนคือ

- 1) กำหนดความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระของระบบ
- 2) กำหนดกระแสจากแผงเซลล์ที่ใช้และมุมการติดตั้งแผงเซลล์
- 3) กำหนดหาขนาดแบตเตอรี่
- 4) กำหนดหาขนาด PV array

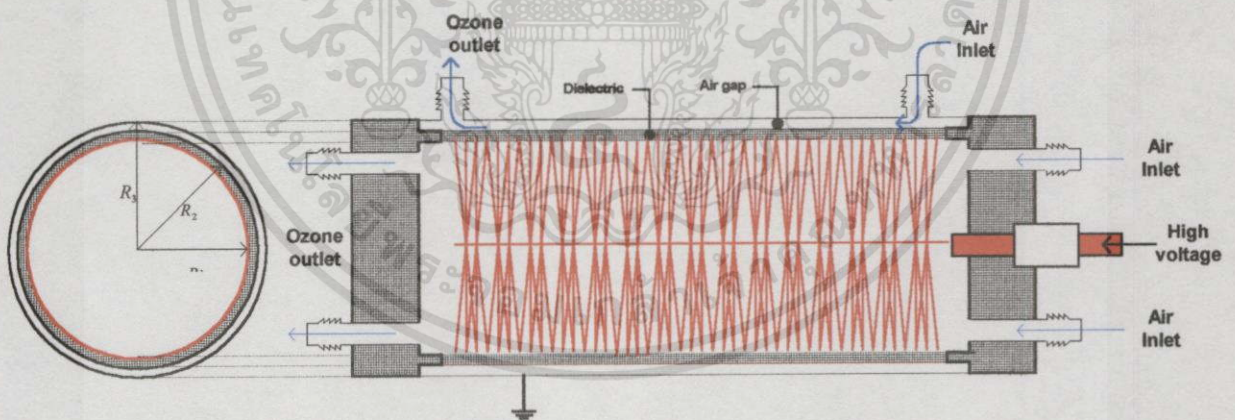
ขั้นตอนทั้ง 4 นี้ยังมีรายละเอียดในการพิจารณาในแต่ละส่วนอีกซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 3

เครื่องกำเนิดโอโซน

3.1 บทนำ

โครงสร้างหลัก ๆ ของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์ในบทที่ 1 รูปที่ 1.1 ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนที่พิจารณาเป็นอันดับที่ 1 คือส่วนของเครื่องกำเนิดโอโซน (Ozonator) เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่กำหนดขนาดและความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบที่ออกแบบ นอกจากนี้การออกแบบส่วนกำเนิดโอโซนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาหลาย ๆ ข้อ นอกจากปัจจัยที่เป็นตัวแปรทางไฟฟ้าเช่น ลักษณะสนามไฟฟ้า, แรงดันที่ใช้งาน, ผลของความถี่ และประเภทการแตกตัวของก๊าซแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยที่แวดล้อมได้แก่ อุณหภูมิ, ความชื้น และ อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องด้วย ในบทนี้จึงแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือส่วนการทดสอบเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด โดยคัดเงื่อนไขปัจจัยแวดล้อมออก แล้วจึงนำไปออกแบบในส่วนการออกแบบต่อไป จากผลการทดลองในบทนี้พบว่าลักษณะอิเล็กโตรดที่เลือกใช้คืออิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม จำนวน 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับที่มาของการออกแบบมาจากการทดลองและการเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตโอโซนซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ต่อไป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิด โอโซนที่ออกแบบ

ขั้นตอนการออกแบบเครื่องกำเนิด โอโซนเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานพันธะและความต้องการพลังงานของปฏิกิริยาเคมีในการผลิตโอโซน ส่วนการออกแบบอยู่บนพื้นฐานของการศึกษาลักษณะสนามไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการแตกตัวของก๊าซเพื่อสามารถพิสูจน์ทฤษฎีจากการคำนวณทางเคมีและสามารถผลิต โอโซน โดยควบคุมเงื่อนไขการเกิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการ

ก๊าซโอโซนคือก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม ขั้นตอนการผลิตดังกล่าวในบทที่ 2 คือต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas : $O_2(g)$) แยกพันธะ ออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมกลับกับ O_2 กลายเป็น O_3 ซึ่งพลังงานพันธะของ O_3 น้อยกว่า O_2 มาก นั่นคือกรณีที่มีการเพิ่มพลังงานให้กับระบบที่มี O_3 อยู่ พลังงานเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถทำให้ O_3 สลายตัวได้ ดังนั้นในระบบจึงไม่ควรเกิดความร้อนขึ้นภายในแก๊สอากาศมากเกินไป เช่น ความร้อนที่เกิดเนื่องจากการเบรคความดัน เป็นต้น

จากบทที่ 2 เส้นโค้งระดับพลังงานของออกซิเจนในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในการผลิตโอโซนนั้น ข่านพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ทางเคมีคือ $493.2 \text{ kJ/mol} - 682.8 \text{ kJ/mol}$ [4] กระบวนการแปลงหน่วยจาก mol เป็นปริมาตร เอกสาร [36] อธิบายพฤติกรรมของก๊าซในทางเคมี ก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) มีแบบจำลองเป็นจุดและไม่มีแรงกระทำต่อกัน 1 โมลของก๊าซในอุดมคติเขียนเป็นความสัมพันธ์เรียกว่าสมการ ก๊าซในสมการที่ 3.1 เมื่อ n คือ จำนวนโมล มีค่าเท่ากับ

$$\text{จากกฎของก๊าซ (Gas law)} \quad PV = nRT \quad (3.1)$$

แต่ก๊าซจริง (Real gas) พบว่าโมเลกุลก๊าซมีขนาดและแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเป็นแรง Van der Waals ซึ่งขนาดโมเลกุลและแรงกระทำนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของก๊าซแต่ละชนิด สมการโดยประมาณของก๊าซจริงถูกนำเสนอโดย Van der Waals คือ

$$\text{สมการแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals)} \quad \left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (3.2)$$

ในสมการที่ 3.1 และ 3.2 V คือ ปริมาตรก๊าซ m^3

P คือ ความดันบรรยากาศ $P = 101.58 \times 10^3$ Pascal

n คือ จำนวนโมล

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ $R = 8314.3 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$

ส่วน a และ b ในสมการที่ 3.2 คือค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1 ที่สภาวะวิกฤติเมื่อ ค่าอุณหภูมิวิกฤติ (T_c) และความดันวิกฤติ (P_c) ของออกซิเจนคือ $T_c = 154.6 \text{ K}$ และ $P_c = 5043 \text{ kPa}$

$$\therefore a = \frac{27 \cdot R^2 T_c^2}{64 P_c} = 138218$$

$$b = \frac{RT_c}{8 P_c} = 0.3018$$

แทนค่า a และ b ลงในสมการที่ 3.2

$$\left(101.5 \times 10^3 + \frac{138218}{V^2}\right)(V - 0.3018) = 8314.3 \times 300 = 2,494,290$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ 3.1 ที่ $n = 1$ $V = \frac{8314.3 \times 300}{101.5 \times 10^3} = 24.57 \text{ m}^3/\text{kmol}$

ใช้วิธี Trial and error เพื่อแปลงหน่วย mol เป็น ปริมาตร

ทดลองแทนค่า $V = 24.57$; $2494290 < (101728.96)(24.5382) = 2496246$

ทดลองแทนค่า $V = 24.5$; $2494290 > (101730)(24.4682) = 2489149$

ทดลองแทนค่า $V = 24.6$; $2494290 < (101728)(24.5682) = 2499273$

ทดลองแทนค่า $V = 24.55$; $2494290 \cong (101729)(24.518) = 2494212$

∴ ที่ $P = 101.5 \text{ kPa}$, $T = 300 \text{ K}$ ได้ $V = 24.55 \text{ m}^3/\text{kmol}$

นั่นคือ $1 \text{ mol} = 0.02455 \text{ m}^3$ โดยประมาณ

ดังนั้น $493.2 \text{ kJ/mol} = 20089.61 \text{ kJ/m}^3$

$682.8 \text{ kJ/mol} = 27812.63 \text{ kJ/m}^3$

เมื่อ $1 \text{ J} = 2.78 \times 10^{-4} \text{ Wh}$

ดังนั้นย่านพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ $5.58 \text{ kWh/m}^3 - 7.73 \text{ kWh/m}^3$ แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่โดยประมาณ 21% ดังนั้นคิดเทียบแล้วพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ $1.172 \text{ kWh/m}^3 - 1.62 \text{ kWh/m}^3$ จึงเพียงพอต่อการเกิดโอโซนในแถบ

ในการออกแบบอิเล็กโทรด แบ่งรูปร่างสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอที่พิจารณาออกเป็น 2 แบบคือแบบปลายแหลมกับระนาบ (Point-to-plane) กับแบบทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial-cylindrical) โดยวัตถุประสงค์ขั้นต้นคือทดลองสร้างโอโซนจากโคโรนาที่เกิดจากปลายแหลมก่อน แล้วจึงศึกษาการออกแบบอิเล็กโทรดที่สัมพันธ์กับกลไกการเกิดโดยสามารถกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรทางไฟฟ้าได้ เนื่องจากการคำนวณทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดปลายแหลมทำได้ยาก ดังนั้นขั้นตอนการวิจัยจึงเรียงลำดับจากการทดลองสร้างโอโซนจากอิเล็กโทรดปลายแหลมก่อนจึงเข้าสู่การออกแบบด้วยอิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมตามลำดับ

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณโอโซน (Ozone analysis) [ภาคผนวก ค]

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีทางเคมี หลักการคือ ใช้สารละลายที่เกิดปฏิกิริยากับโอโซน ในที่นี้ใช้สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) ทำให้ได้สารใหม่เกิดขึ้น สามารถหาปริมาณโอโซนได้ โดยทำการไตเตรตกับสารละลายที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมโซอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เป็นต้น

3.3.1 วิธีตรวจหาปริมาณโอโซน

- สารเคมี

1. สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2 % KI)

ละลาย KI 20 g ในน้ำกลั่น 1L เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

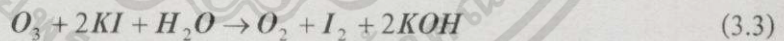
2. สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (1N $Na_2S_2O_3$)
ละลาย $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ จำนวน 25 g ในน้ำ 1 L
4. น้ำแป้ง (1% Starch)
ละลายแป้ง 1 g ทำให้มีปริมาตร 100 mL

3.3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

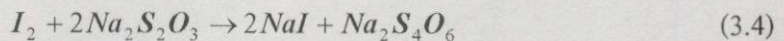
1. การดูดซึมก๊าซไอโชน (Absorption) ผ่านก๊าซจากชุดทดลองลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ที่มีสารละลาย KI บรรจุอยู่ 100 mL
2. การไตเตรด (Titration) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1 (สารละลายที่ได้จะมีสีเหลืองหรือส้ม) เติม 1N H_2SO_4 3 mL เพื่อปรับค่า pH นำมาไตเตรดกับสารละลาย 0.1 N $Na_2S_2O_3$ จนสีเหลืองค่อย ๆ จางหายไป (แสดงว่าใกล้ถึงจุดยุติ) เติมน้ำแป้ง 1 mL (เป็นอินดิเคเตอร์) สารละลายจะกลายเป็นสีน้ำเงิน ทำการไตเตรดต่อ จนสีน้ำเงินจางหายไป บันทึกค่าของ 0.1 N $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณไอโชนต่อไป

หมายเหตุ กรณีที่ใช้อากาศผ่านกระบวนการแทนออกซิเจน ควรมีการทำ Blank test เพื่อหาปริมาณไอโชนที่แท้จริงโดย การพ่นอากาศผ่านลงในสารละลาย KI 100 mL นำไปเติมกรด เติมน้ำแป้ง และไตเตรดหาปริมาณ ไอโชนที่มีอยู่ในอากาศ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือ

- การดูดซึม ไอโชนโดยใช้สารละลาย KI



- การไตเตรดโดยใช้ 0.1 N $Na_2S_2O_3$

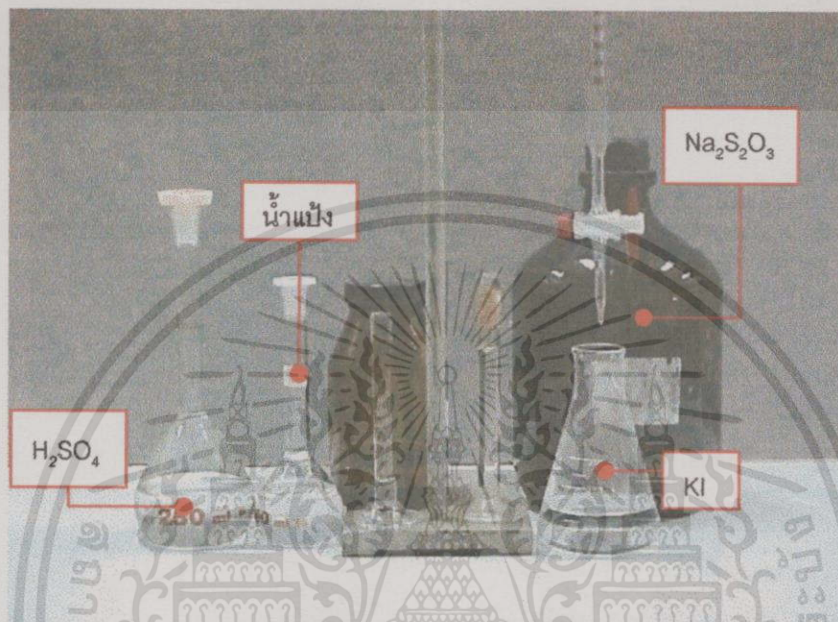


- การคำนวณหาปริมาณ ไอโชน

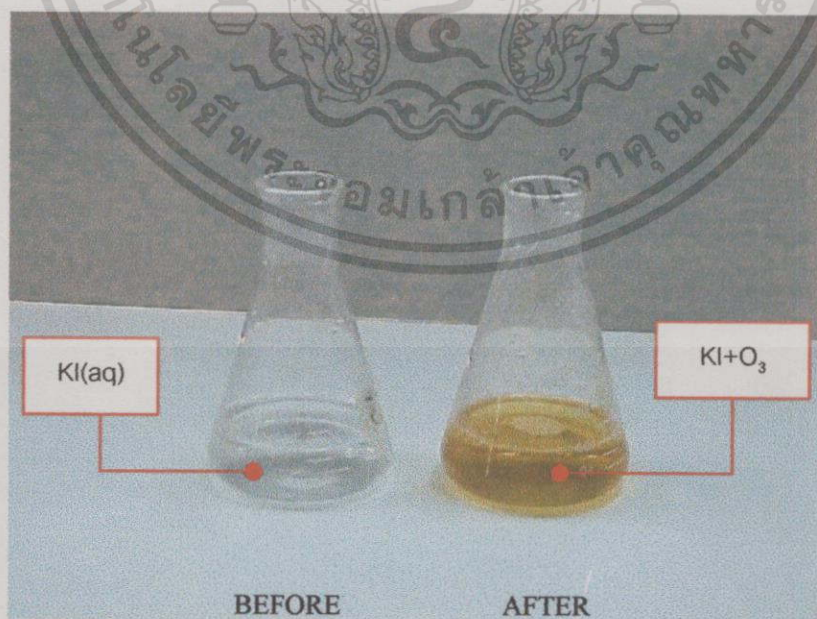
จากความสัมพันธ์ $0.1 \text{ N } Na_2S_2O_3 \text{ 1 mL} = 2.4 \text{ mg } O_3$

ตัวอย่างการคำนวณเช่นกรณีที่ใช้ 0.1 N $Na_2S_2O_3$ ในการไตเตรด 400 mL คือ ปริมาณก๊าซไอโชนที่ผลิตได้ประมาณ 0.96 g O_3 เป็นต้น หรือกรณีที่ใช้วิธีการแทนค่าในสูตรของวิธีการวัดแบบไอโอดิเมตริกก็สามารถทำได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณจาก [ภาคผนวก ค]

6. ปริมาณ โอโซนที่ได้เป็นปริมาณที่เกิดขึ้นในช่วง 5 นาที มีหน่วยเป็น $\text{mgO}_3/\text{L}/5 \text{ min}$
 นำไปคำนวณเป็น $\text{mgO}_3/5 \text{ min}$ โดยหารด้วย 10
 นำไปคำนวณเป็น mgO_3/hr โดยคูณค่า $\text{mgO}_3/5 \text{ min}$ ด้วย 12
 นำไปคำนวณเป็น $\text{mgO}_3/\text{W-h}$ โดยหาร mgO_3/hr ด้วย กำลังไฟฟ้าอินพุท



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการตรวจวัดปริมาณ โอโซนด้วยวิธี Iodometric method



รูปที่ 3.3 สีของสารละลาย KI ก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยากับ โอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองเพื่อศึกษาและออกแบบอิเล็กโตรด

การทดลองในส่วนของเครื่องกำเนิดไอโซนซึ่งนำไปสู่การออกแบบ แบ่งเงื่อนไขการพิจารณาออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

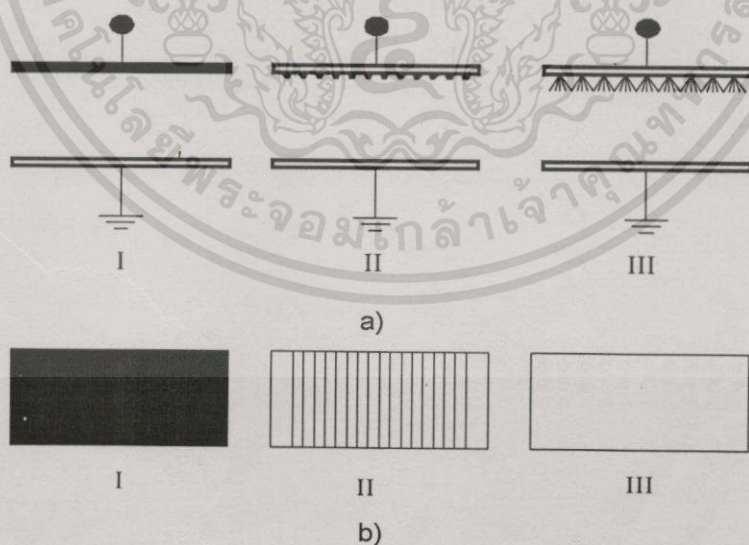
1. การเลือกประเภทสนามไฟฟ้าและรูปร่างอิเล็กโตรด
2. อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบ (Point-to-plane)
3. อิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial-cylindrical)
4. การทดสอบอิเล็กโตรด

3.4.1 การเลือกประเภทของสนามไฟฟ้าและรูปร่างอิเล็กโตรด

พลังงานจากสนามไฟฟ้าคือปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการผลิตโดยตรง ชนิดของสนามที่เลือกใช้ทางทฤษฎีจึงต้องเอื้ออำนวยต่อการเกิดโคโรนา

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อการผลิตไอโซน

จากงานวิจัยใน [8] เงื่อนไขทดสอบคือเพื่อศึกษาการเกิดไอโซนในสนามไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ โดยรูปร่างอิเล็กโตรดเป็นแผงขนาด 6×12 นิ้วเท่าๆ กันแต่ส่วนของกะโหลกมีรูปร่างแตกต่างกัน 3 แบบตามชนิดสนามไฟฟ้าที่เกิดคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (รูปที่ 3.4 (I)), สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (รูปที่ 3.4(II)) และ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (รูปที่ 3.4 (III))



รูปที่ 3.4 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ(I) , ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (II) และ ไม่สม่ำเสมอสูง (III)

a) แผงอิเล็กโตรดทั้ง 3 ชนิดในมุมมองจากด้านข้าง

b) แผงอิเล็กโตรดทั้ง 3 ชนิดในมุมมองจากด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 1 ผลของสนามไฟฟ้าต่อการผลิตโอโซน

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบการผลิตโอโซนด้วยแพ่งอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้ารูปร่างต่างกัน

รูปแบบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด	Gap (cm.)	kV	mA	W	mgO ₃ /h	mgO ₃ /W-h
อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอสูง (ระนาบ)	1.0	24.1	0.15	3.62	0.03	0.008
อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เล็กน้อย (เส้นลวด)	1.0	18.3	0.6	10.98	0.12	0.011
อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ สูง(ปลายแหลม)	1.0	13.2	1.2	15.84	2.04	0.129

หมายเหตุ แหล่งจ่ายคือเครื่องผลิตไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงดันสูง
ค่า kV และ mA คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสสูงสุดที่ปรับได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์

3.4.2 อิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ

จากการทดลองในข้อ 3.4.1 พอจะสรุปได้ว่ารูปร่างอิเล็กโตรดที่เป็นแบบระนาบขนานกัน
ลักษณะกะโศดแบบปลายแหลมให้ผลผลิตสูงสุด ดังนั้นจึงนำลักษณะกะโศดแบบนี้มาทดสอบโดย
พิจารณารูปแบบการจัดเรียงปลายแหลมและการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของปลายแหลมบน
ระนาบที่มีพื้นที่เดียวกัน พิจารณาโคโรนาของปลายแหลมกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นหลัก

3.4.2.1 การทดสอบอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบ

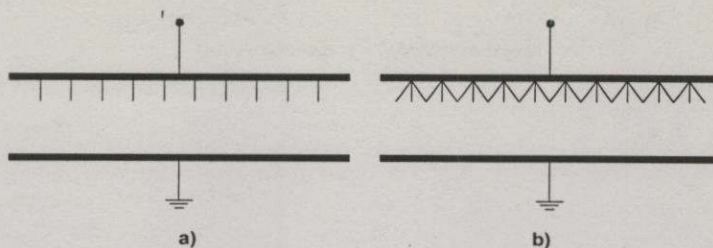
อิเล็กโตรดปลายแหลมถูกสร้างขึ้นโดยจัดวางบนระนาบขนาด 13.5×60 cm. เท่ากันทุก
แพ่ง ลักษณะการจัดเรียงปลายแหลมกับระนาบที่ศึกษาแบ่งการจัดเรียงเป็น 2 แบบคือ

- 1) แบบปลายแหลมเดียวกับระนาบ มีจำนวนแท่งปลายแหลม 210 แท่ง
- 2) แบบกลุ่มของปลายแหลมกับระนาบ
 - 2.1 ความหนาแน่นกลุ่มปลายแหลม 754 กลุ่ม
 - 2.2 ความหนาแน่นกลุ่มปลายแหลม 1508 กลุ่ม
 - 2.3 ความหนาแน่นกลุ่มปลายแหลม 3016 กลุ่ม

รูปด้านข้างของอิเล็กโตรดทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 3.5 วัตถุประสงค์ในการทดสอบคือการ
ศึกษาถึงลักษณะการจัดเรียงปลายแหลมและความหนาแน่นของปลายแหลมที่แตกต่างกันจะให้
แนวโน้มต่อการผลิตโอโซนเป็นอย่างไร เพื่อเลือกรูปแบบของอิเล็กโตรดปลายแหลมที่ใช้อย่าง

เหมาะสม ในการทดสอบลักษณะการจัดเรียงยังแบ่งเงื่อนไขการศึกษาออกเป็น 4 ข้อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ชุดอิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบ

a) แบบปลายแหลมเดี่ยว

b) แบบกลุ่มปลายแหลม

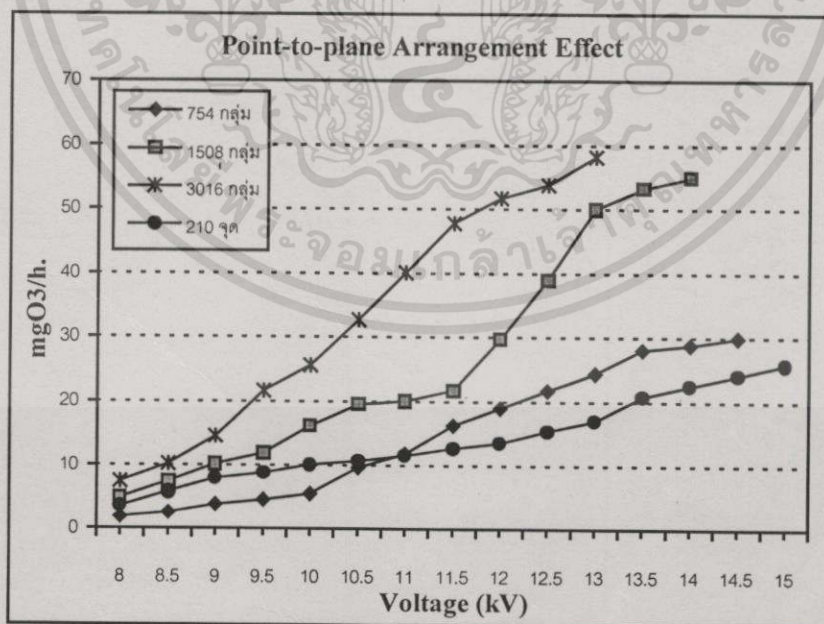
การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะการจัดเรียงอิเล็กโตรดปลายแหลม

เงื่อนไขการทดลอง 4 ข้อ

1. เปรียบเทียบลักษณะอิเล็กโตรดที่มีการจัดเรียงและความหนาแน่นจุดปลายแหลมต่างกัน
2. ความสามารถในการผลิตโอโซนต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ของอิเล็กโตรดทั้ง 4 แบบ
3. ที่ระยะแกป 0.5 cm., 1 cm. และ 1.5 cm. ปริมาณผลผลิตโอโซนแตกต่างกันอย่างไร
4. ผลกระทบของขั้วแรงดันจากแหล่งจ่าย DC⁻, DC⁺

ผลการทดลองที่ 2 ผลของลักษณะการจัดเรียงอิเล็กโตรดปลายแหลมต่อการผลิตโอโซน

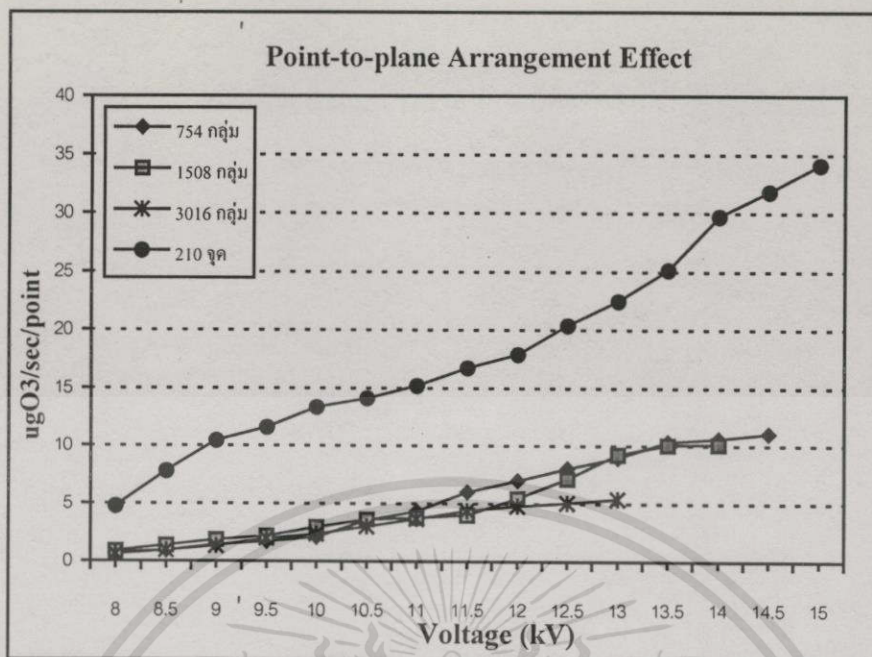
เงื่อนไขที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะการจัดเรียงและความหนาแน่นของปลายแหลม



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าผลผลิตก๊าซโอโซนของการจัดเรียงปลายแหลมต่าง ๆ

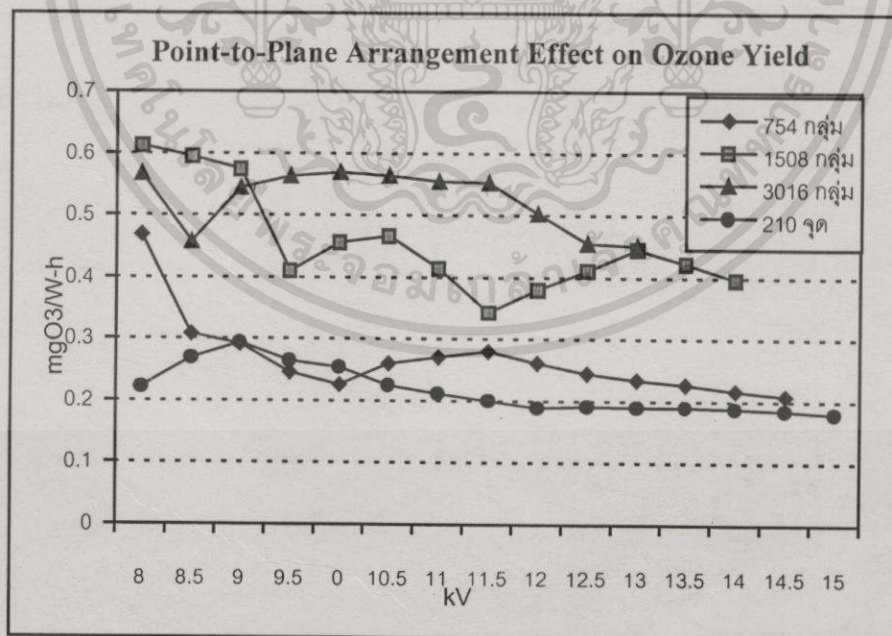
หมายเหตุ ระยะแกปอากาศกว้าง 1 cm. ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากับผลผลิตก๊าซโอโซนต่อวินาทีต่อจุดของปลายแหลม
หมายเหตุ ระยะแคบ 1 cm ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบในห้องปฏิบัติการ

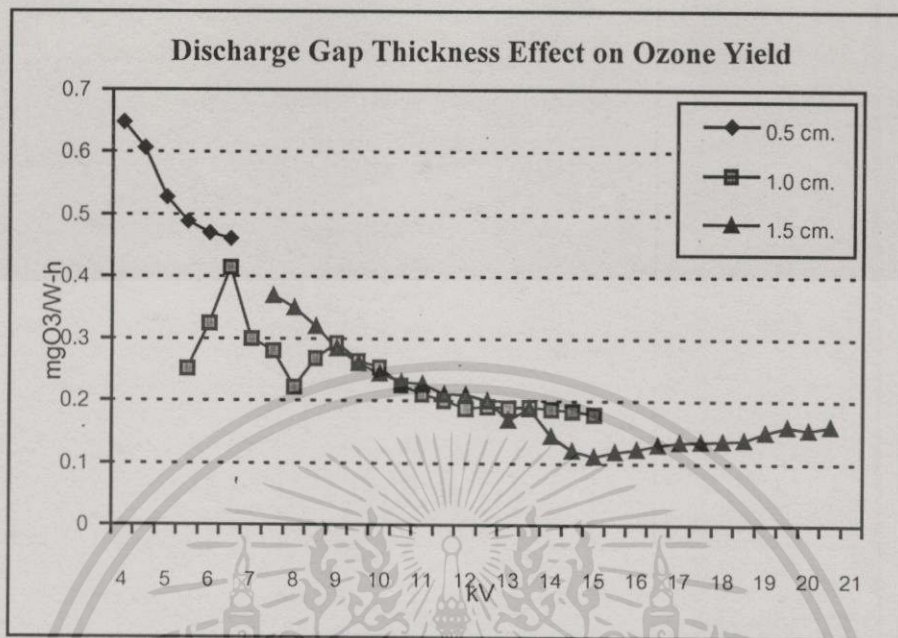
เงื่อนไขที่ 2 ความสามารถในการผลิตโอโซนต่อหนึ่งหน่วยพลังงานของอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้ากับผลผลิตก๊าซโอโซนต่อหน่วยพลังงานที่ใช้
หมายเหตุ ระยะแคบ 1 cm. ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

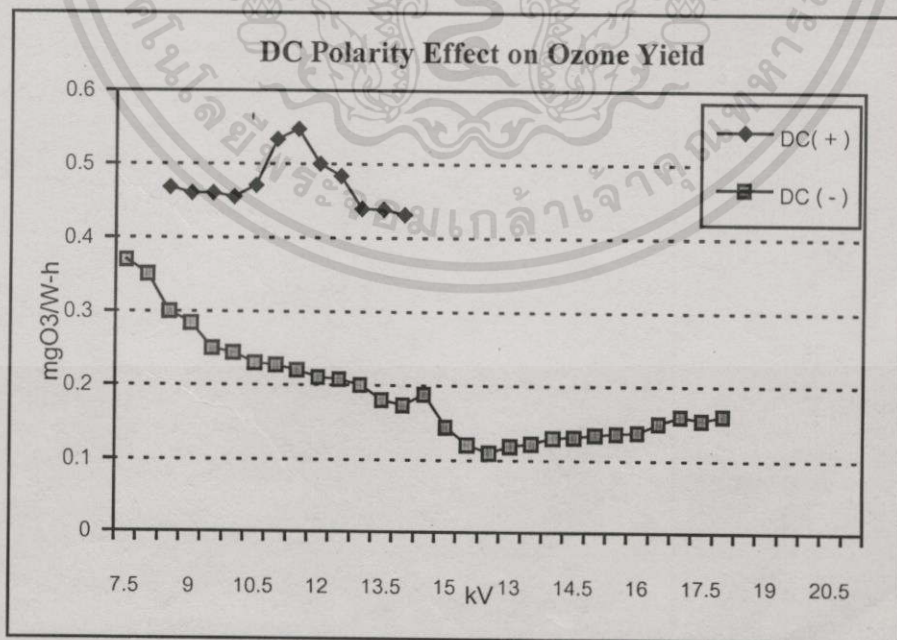
เงื่อนไขที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะแกปอากาศและผลผลิตโอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงาน



รูปที่ 3.9 ผลของความหนาแกปอากาศกับโอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงาน

หมายเหตุ จากอิเล็กโตรดแบบ 210 จุด ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบในห้องปฏิบัติการ

เงื่อนไขที่ 4 ความแตกต่างระหว่างศักดาไฟฟ้าต่างขั้วและผลผลิตโอโซนที่ได้ต่อพลังงาน



รูปที่ 3.10 ผลของขั้วแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ต่อก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ต่อหน่วยพลังงาน

หมายเหตุ จากอิเล็กโตรดแบบ 210 จุด แกปอากาศ 1.5 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 การศึกษาผลของความถี่คลื่นระลอก (Ripple frequency) ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

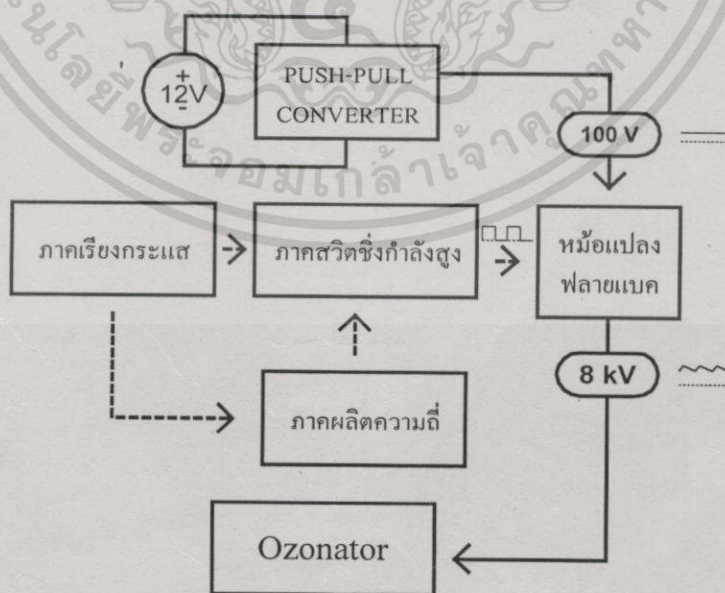
ในทางทฤษฎีดังแสดงในบทที่ 2 สำหรับสนามไฟฟ้าแบบปลายแหลมกับระนาบ โคโรนาที่ เกิดง่ายที่สุด (ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัว V_i ต่ำสุด) และเบรกควาน์ยาก (ค่า V_b สูงสุด) เกิดกับไฟ ฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบ จึงใช้เป็นแรงดันทดสอบเพื่อศึกษาผลของความถี่ของรูป สัญญาณที่มีต่อการผลิตโอโซน

การทดลองที่ 3 ผลของความถี่คลื่นระลอกต่อการผลิตโอโซน

ทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตโอโซนของอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมกับระนาบ ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง 2 ชนิด ซึ่งรูปสัญญาณมีความถี่ต่างกัน โดยขั้นต้นจะ พิจารณาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบก่อนเนื่องมาจากการทดลองที่ 1 และ 2 ดังกล่าวตอนต้น

- แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงในห้องปฏิบัติการ (ความถี่คลื่นระลอก 50 Hz)
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงที่สร้างจากวงจร ไทรอัสต์นอร์มัลโดยใช้หม้อแปลงฟลายแบค เป็นส่วนสร้างแรงดันสูง (ความถี่คลื่นระลอก 15 kHz) หลักการสร้างแสดงในรูปที่ 3.11

ชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบปลายแหลมกับระนาบ หม้อแปลงฟลายแบคที่ใช้ งานคือ หม้อแปลงสร้างแรงดันสูง TLF 14610 B14 ซึ่งสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วลบ 8 kV ความถี่คลื่นระลอก 15 kHz เทียบกับแหล่งจ่ายมาตรฐานความถี่คลื่นระลอก 50 Hz



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมเครื่องผลิตแรงดันสูงกระแสตรงแบบความถี่แรงดันระลอกสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 3 ผลของความถี่รูปสัญญาณแรงดันระลอกไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงต่อการผลิต ไอโซน

ตารางที่ 3.2 ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสร้างไอโซนของแหล่งจ่ายทั้ง 2 แบบ [8]

Power Supply	Watts	mgO ₃ /h	mgO ₃ /W-h
DC HV ripple frequency 50 Hz	248.4	16.128	0.065
DC HV ripple frequency 15 kHz	22.8	14.112	0.619

3.4.3 อิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

การออกแบบอิเล็กโตรดรูปทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมเริ่มพิจารณาจากการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Optimum dimension) ของรัศมี r_1 และ r_2 จากหลักการที่นำเสนอในบทที่ 2 ($E_{r(\min)}, V_{b(\max)}$) แต่ในการออกแบบเครื่องผลิตไอโซนหลักการจะตรงข้ามคือ ต้องการใช้แรงดันต่ำ (V_b ซึ่งคือ V_i) เพื่อสร้างความเครียดสูง (E_c) จนเพียงพอที่จะทำให้อากาศแตกตัว ดังนั้นในขั้นต้นจึงทำการคำนวณเพื่อออกแบบเบื้องต้นก่อน สิ่งที่กำหนดให้เป็นเงื่อนไขคงตัวในการออกแบบคือรัศมีทรงกระบอกนอก (r_2) เนื่องจากทรงกระบอกนอกที่เป็นกรวดทำจากท่อสเตนเลส ซึ่งมีความจำกัดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ผลิตในทางอุตสาหกรรมดังแสดงในภาคผนวก การเลือกมิติของทรงกระบอกจะคำนึงถึงการออกแบบ แบบจนวน 2 ชั้นด้วย จึงต้องเลือกทรงกระบอกนอก จนวนของแข็งและทรงกระบอกวงในที่เหมาะสมกัน ให้มีความกว้างของช่องว่างอากาศมากกว่า 1 mm. เล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันต้องให्้यानความเครียดที่ตกคร่อมบริเวณช่องว่างอากาศมีค่าสูงด้วย การนำ Optimum dimension design มาประยุกต์ใช้จึงถูกนำเสนอดังต่อไปนี้

3.4.3.1 การประยุกต์ใช้ Optimum dimension design เพื่อการออกแบบ

เงื่อนไขที่ออกแบบเลือกใช้อิเล็กโตรดวงนอกรัศมี $r_2 = 1.42$ และ 2.34 cm. [ภาคผนวกตารางที่ ก-1] จำนวนที่ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติแตกตัว $E_c = 31$ kV/cm แรงดันทดสอบที่ใช้จำนวนคือ 5 kV จากสมการที่ 2.13 ในบทที่ 2

$$\text{จาก} \quad E_{MAX} = E_c = E_{r1} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$\text{และ} \quad V_b = E_b \cdot r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}$$

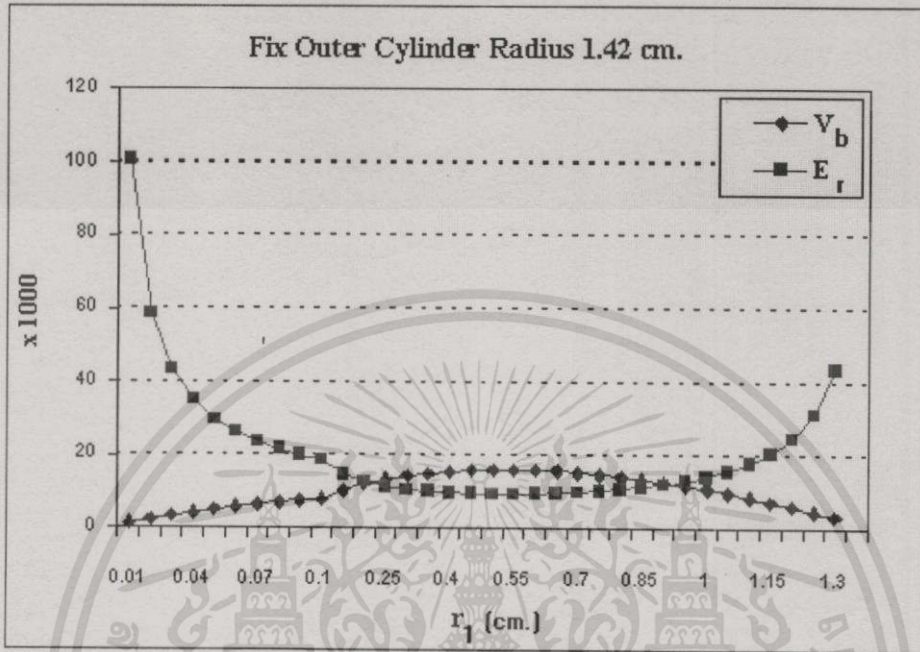
ผลการคำนวณด้วย MATLAB แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ E_r และ V_b ที่ค่าอัตราส่วนของ r_1/r_2 ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ได้ดังรูปที่ 3.12 – 3.13 โดยแกน x แทนด้วยค่า r_1

ผลการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

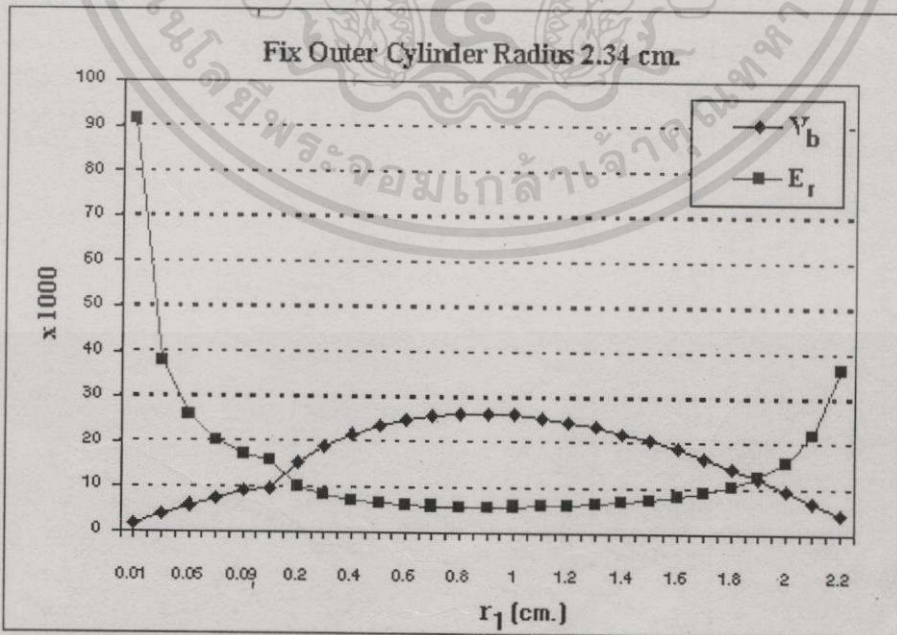
ผลการคำนวณ

1. รัศมีวงในเล็ก รัศมีวงนอก $r_2 = 1.42$ cm.



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_r และ V_b ที่รัศมี r_1 ใดๆ เมื่อ $r_2 = 1.42$ cm.

2. รัศมีวงในเล็ก รัศมีวงนอก $r_2 = 2.34$ cm.



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง E_r และ V_b ที่รัศมี r_1 ใดๆ เมื่อ $r_2 = 2.34$ cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.2 การคำนวณการกระจายของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดที่ออกแบบ

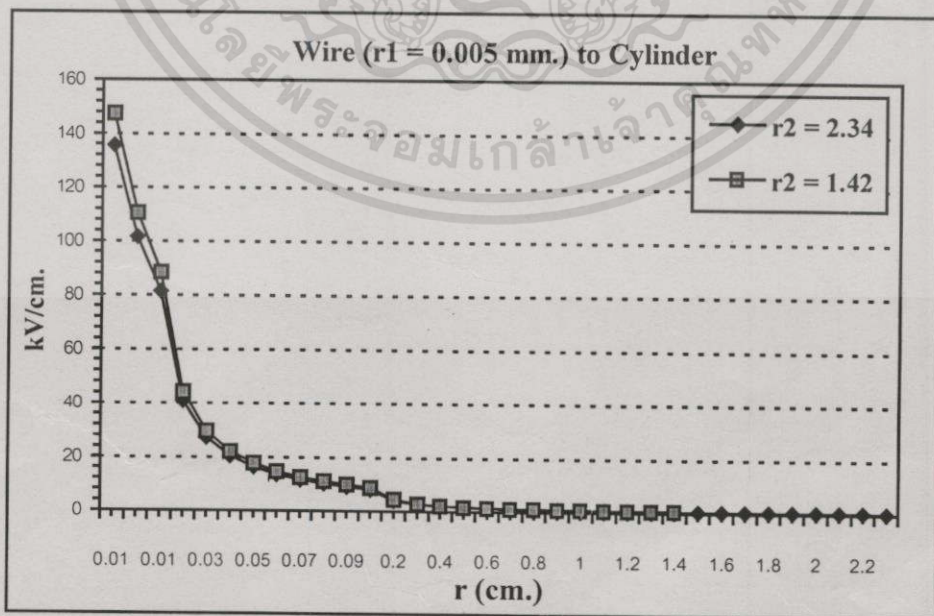
จากรูปที่ 3.12 – 3.13 ย่านที่เหมาะสมต่อการผลิตไอออน (V_0 ต่ำ ในขณะที่ E_r มีค่าสูง) คือ r_1 มีค่าน้อยมาก ๆ (เส้นลวด) คือ โครงสร้างอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดกับทรงกระบอก หรือ r_1 มีค่ามากใกล้เคียง r_2 คือ โครงสร้างอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันกรณเป็นเส้นลวด ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากเส้นลวดไปยังอิเล็กโทรดที่เป็นกรวด์แสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นผลการคำนวณจากสมการที่ 2.13 ในบทที่ 2 ดังกล่าวข้างต้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณคือ 5 kV

สำหรับโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันกรณร่วม เนื่องจากย่านที่เหมาะสมมีสัดส่วน r_1/r_2 เข้าใกล้ 1 ทำให้ความกว้างช่องว่างอากาศแคบมาก ๆ วิธีที่ใช้ในการออกแบบคือ นำจำนวน 2 ชั้นที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกันมามาใช้เพิ่มค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณฉนวนที่มีค่าคงที่ต่ำกว่าให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) สูงกว่าปกติ ดังนั้นการคำนวณจึงแบ่งพิจารณาโครงสร้างอิเล็กโทรดทรงกระบอกกรณร่วม 2 แบบคือ แบบฉนวนชั้นเดียวและแบบฉนวน 2 ชั้น การกระจายสนามไฟฟ้าภายในฉนวนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{rx} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 V}{r_x \epsilon_x \left[\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \tag{3.5}$$

ผลการคำนวณ การกระจายสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด

1. โครงสร้างอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดกับทรงกระบอก (Wire-to-cylinder)

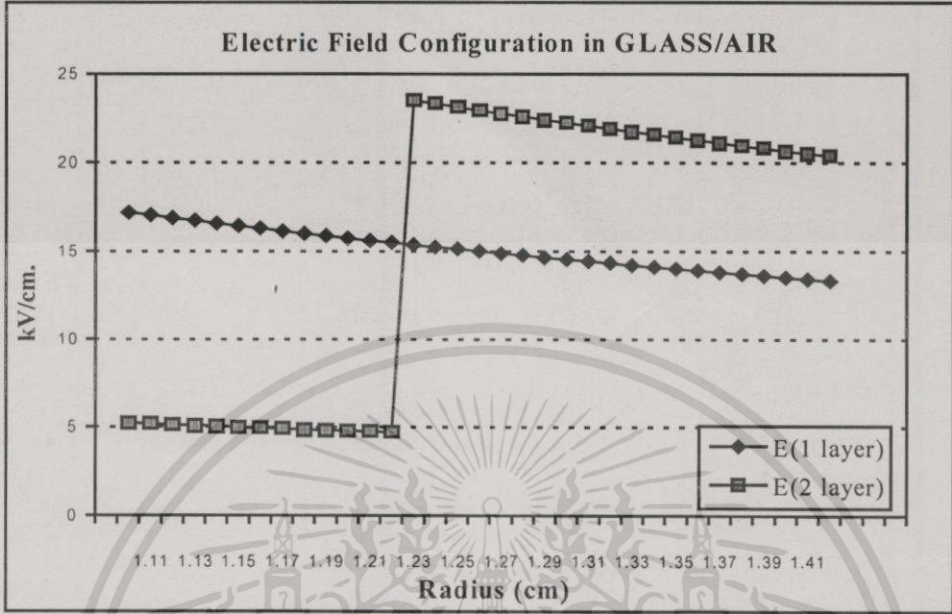


รูปที่ 3.14 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากเส้นลวดไปยังทรงกระบอกที่เป็นกรวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

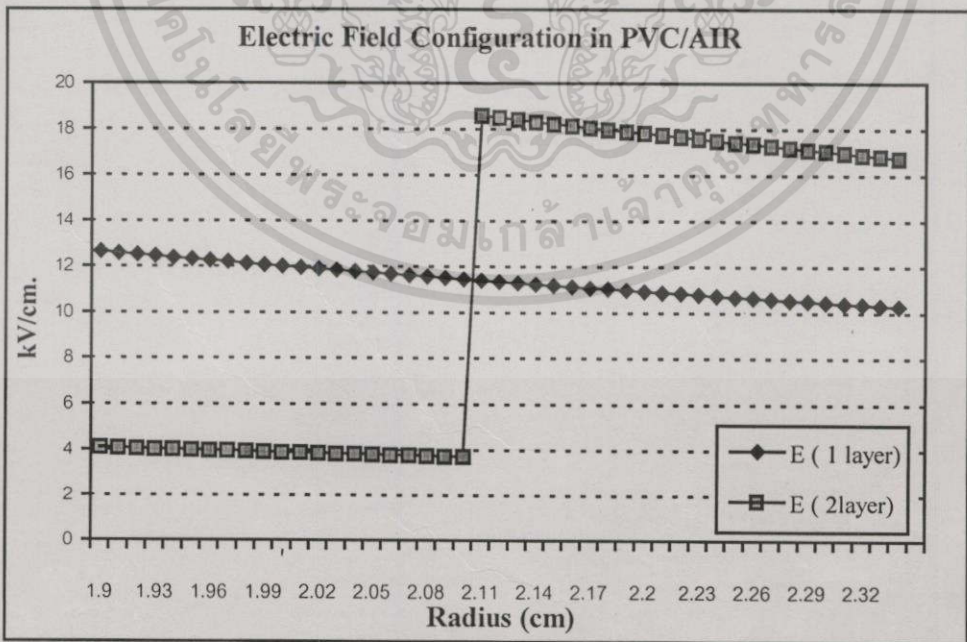
2. โครงสร้างอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม

2.1 อิเล็กโตรดวงใน $r_1 = 1.09$ cm, วงนอก $r_3 = 1.42$ cm. ฉนวนของแข็งหนา $(r_2 - r_1) = 0.13$ cm



รูปที่ 3.15 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากทรงกระบอกใน ไปยังทรงกระบอกนอกที่เป็นกราวด์ เมื่อ $r_1 = 1.09$, $r_2 = 1.22$ และ $r_3 = 1.42$ cm. ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของแข็ง $\epsilon_r = 8$

2.2 อิเล็กโตรดวงในรัศมี 1.9 cm, วงนอก 2.34 cm. ฉนวนของแข็งหนา 0.2 cm



รูปที่ 3.16 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าจากทรงกระบอกใน ไปยังทรงกระบอกนอกที่เป็นกราวด์

เมื่อ $r_1 = 1.9$, $r_2 = 2.1$ และ $r_3 = 2.34$ cm. ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ของแข็ง $\epsilon_r = 5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

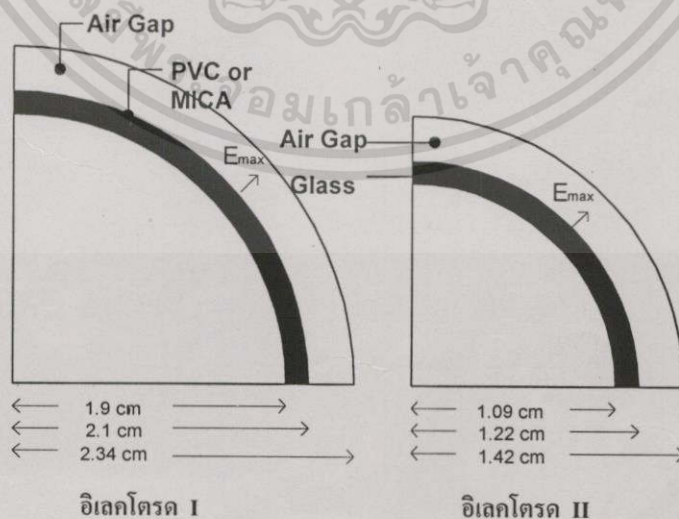
3.4.3.3 การออกแบบโครงสร้างอิเล็คโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม

จากผลการคำนวณในข้อ 3.4.3.1-3.4.3.2 ช่วยในการตัดสินใจเลือกออกแบบอิเล็คโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมเพื่อทดสอบการผลิตโอโซน โดยแนวคิดที่ใช้คือนำสนามไฟฟ้าจากโครงสร้างอิเล็คโตรดแบบฉนวน 2 ชั้นมาใช้ ฉนวนของแข็งที่สามารถเลือกนำมาทดสอบโดยมีขนาดทางอุตสาหกรรมตามต้องการมี 3 ชนิดคือ พีวีซี ไมก้า และ แก้ว พื้นฐานการออกแบบยึดหลักการของการนำวัสดุฉนวนที่มีอยู่นำมาคำนวณเพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยการไฟฟ้าแรงสูงในภายหลัง ขั้นตอนของการออกแบบจึงแบ่งวัตถุประสงค์การสร้างอิเล็คโตรดดังนี้

1. อิเล็คโตรด I รูปร่างทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม รัศมีภายใน 1.9 cm. รัศมีภายนอก 2.34 cm. ความหนาฉนวนของแข็ง 0.2 cm. ความหนาฉนวนอากาศ 0.24 cm. ฉนวนของแข็งที่ใช้คือ PVC ($\epsilon_r = 5$) และ Mica ($\epsilon_r = 7$) ออกแบบเพื่อทดสอบทฤษฎีพื้นฐานของการผลิตโอโซน
2. อิเล็คโตรด II รูปร่างทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม รัศมีภายใน 1.09 cm รัศมีภายนอก 1.42 cm. ความหนาฉนวนของแข็ง 0.13 cm. ความหนาฉนวนอากาศ 0.2 cm. ฉนวนของแข็งที่ใช้คือ Pyrex glass ($\epsilon_r = 8$) ออกแบบเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตโอโซนโดยใช้หลักการทางไฟฟ้าแรงดันสูง

3.4.3.4 ที่มาของการออกแบบอิเล็คโตรด I และ II

จากทฤษฎีเกี่ยวกับพลังงานดังกล่าวใน 3.2 ในทางเคมีย่านพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการแตกพันธะที่จับกันของก๊าซออกซิเจน ให้แตกเป็นอะตอมออกซิเจนอิสระคือค่าพลังงานตั้งแต่ 1.172 – 1.62 kWh/m³ ขึ้นไปจากโครงสร้างทรงกระบอกและฉนวนของแข็งที่มีอยู่แสดงดังนี้



รูปที่ 3.17 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็คโตรด I และ II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อิเล็กโทรด I ($r_1 = 1.9 \text{ cm.}, r_2 = 2.1 \text{ cm.}, r_3 = 2.34 \text{ cm.}$) ยาว 30 cm.

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรอากาศภายในแคปคือ } \pi (r_3^2 - r_2^2) \times l &= \pi (0.0234^2 - 0.021^2) \times 0.3 \\ &= 10.04 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 100.43 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{ย่านพลังงาน } 1.172 \times 10^3 \times 10.04 \times 10^{-5} = 0.1177 \text{ W-h}$$

$$\text{ถึง } 1.62 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-5} = 0.162 \text{ W-h โดยประมาณ}$$

พลังงานในการผลิตเกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้า \bar{E} สามารถหาได้จาก

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dV \quad (3.6)$$

∴

$$E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon V}}$$

∴

$$E = \sqrt{\frac{2(0.1177)}{(8.854 \times 10^{-12})(100.43)}} = 16.27 \text{ kV/cm}$$

$$E = \sqrt{\frac{2(0.162)}{(8.854 \times 10^{-12})(100.43)}} = 19.088 \text{ kV/cm}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } E_{MAX} = 16.27 \text{ kV/cm.} \quad V &= \frac{(16.27 \times 10^3)(2.1) \left(5 \ln \frac{2.34}{2.1} + \ln \frac{2.1}{1.9} \right)}{5} \\ &= 4.362 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } E_{MAX} = 19.088 \text{ kV/cm} \quad V &= \frac{(19.088 \times 10^3)(2.1) \left(5 \ln \frac{2.34}{2.1} + \ln \frac{2.1}{1.9} \right)}{5} \\ &= 5.135 \text{ kV} \end{aligned}$$

ดังนั้นสำหรับอิเล็กโทรด I ย่านแรงดันที่อยู่ในการผลิตคือ 4.362 – 5.135 kV ย่านสนามไฟฟ้าที่ใช้คือ 16.215 – 19.088 kV/cm ย่านพลังงานคือ 0.117 - 0.162 W-h

2. อิเล็กโทรดที่ II ($r_1 = 1.09 \text{ cm.}, r_2 = 1.22 \text{ cm.}, r_3 = 1.42 \text{ cm.}$) ยาว 12 cm.

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรอากาศภายในแคปคือ } \pi (r_3^2 - r_2^2) \times l &= \pi (0.0142^2 - 0.0122^2) \times 0.12 \\ &= 1.99 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 19.9 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{ย่านพลังงาน } 1.172 \times 10^3 \times 1.99 \times 10^{-5} = 0.023 \text{ W-h}$$

$$\text{ถึง } 1.62 \times 10^3 \times 1.99 \times 10^{-5} = 0.032 \text{ W-h โดยประมาณ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่านสนามไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้คือ $E = \sqrt{\frac{2(0.023)}{(8.854 \times 10^{-12})(19.9)}} = 16.158 \text{ kV/cm}$

ถึง $E = \sqrt{\frac{2(0.032)}{(8.854 \times 10^{-12})(19.9)}} = 19.058 \text{ kV/cm}$

ถ้า $E_{MAX} = 16.158 \text{ kV/cm}$.

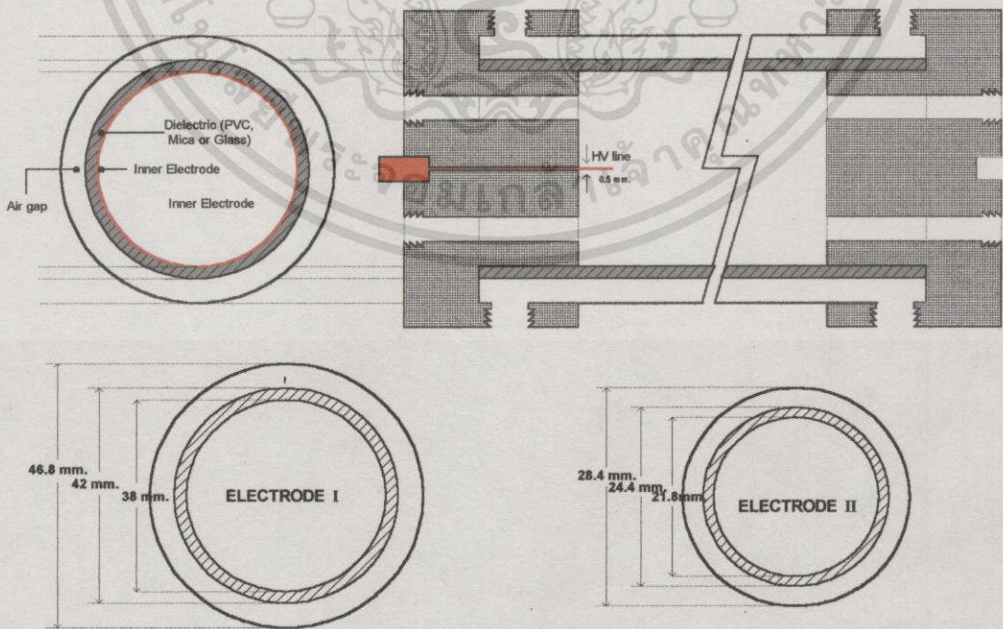
$$V = \frac{(16.158 \times 10^3)(1.22) \left(5 \ln \frac{1.42}{1.22} + \ln \frac{1.22}{1.09} \right)}{5} = 3.438 \text{ kV}$$

ถ้า $E_{MAX} = 19.058 \text{ kV/cm}$

$$V = \frac{(19.058 \times 10^3)(1.22) \left(5 \ln \frac{1.42}{1.22} + \ln \frac{1.22}{1.09} \right)}{5} = 4.055 \text{ kV}$$

ดังนั้นสำหรับอิเล็กโตรด II ย่านแรงดันที่อยู่ในย่านการผลิตคือ 3.438 – 4.055 kV ย่านสนามไฟฟ้าที่ใช้คือ 16.158 – 19.058 kV/cm ย่านพลังงานคือ 0.023 - 0.032 W-h

โครงสร้างของอิเล็กโตรดทรงซึ่งสัมผัสโดยตรงกับการไอโซนซึ่งเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างสูงและรุนแรง มีความจำกัดในเรื่องวัสดุที่นำมาใช้งานในที่นี้เลือกใช้ท่อสเตนเลส และฉนวนเป็น พีวีซี ไมก้า และ แก้ว Pyrex



รูปที่ 3.18 โครงสร้างอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมที่ออกแบบเพื่อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตโอโซน เนื่อง
ไขการทดลองที่กำหนดมีดังนี้

- การใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite element method: FEM) ช่วยในการออกแบบ
เพื่อศึกษาการกระจายของสนามไฟฟ้าและพลังงานภายในแกปอากาศ
- ศึกษาความแตกต่างระหว่างพลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในแกปฉนวนชั้นเดียวและ
ฉนวน 2 ชั้น
- ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อชนิดของฉนวนของแข็งที่ใช้เปลี่ยนแปลงไป
- ศึกษาผลของชนิดแรงดันที่ใช้ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแส
สลับที่มีต่อความสามารถในการผลิตโอโซนของอิเล็กทรอนิกส์
- ศึกษาผลของความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องผลิตโอโซน

3.5 การใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) ช่วยออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

การวิเคราะห์ฉนวนบริเวณคั่นที่อยู่ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ด้วย FEM (Finite element method) แบ่งเนื่อง
ไขการศึกษาออกเป็น 3 เงื่อนไขคือ

- ศึกษาคุณสมบัติตัวแปรทางไฟฟ้าใน โครงสร้างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม
- ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของฉนวนของแข็ง (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ) ต่อการกระจาย
ของสนามไฟฟ้า
- ผลกระทบจากความหนาของฉนวนที่เลือกใช้

ไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite element method: FEM) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อช่วยในการออกแบบ
โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม โดยแสดงการกระจายของระดับแรงดันที่ป้อน, สนาม
ไฟฟ้าที่แต่ละจุดภายในแกปอากาศ และพลังงานที่เกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้า สมการที่นำมาใช้เป็นแบบ 2
มิติและไม่คำนึงถึงผลของประจุค้าง ($\rho_s = 0$) รูปที่ 3.19 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม โดย
แบ่งพิจารณาอิเล็กทรอนิกส์ I และ อิเล็กทรอนิกส์ II ทั้ง 2 กรณีคือ กรณีฉนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น



รูปที่ 3.19 ลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ศึกษาคุณสมบัติตัวแปรทางไฟฟ้าในอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันแนวมุม

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นอิเลิเมนต์ย่อย ๆ

โครงสร้าง อิเล็กโตรด I คือ ($r_1 = 1.9\text{ cm}$, $r_2 = 2.1\text{ cm}$, $r_3 = 2.34\text{ cm}$) ทรงกระบอกวงในเป็นเสตนเลส สตีมี 1.9 cm. คั่นด้วยฉนวนของแข็ง พีวีซี หรือ ไมก้า หนา 0.2 cm. และอากาศหนา 0.24 cm. ทรงกระบอกวงนอกเป็นเสตนเลสสตีมี 2.34 cm.

โครงสร้าง อิเล็กโตรด II คือ ($r_1 = 1.09\text{ cm}$, $r_2 = 1.22\text{ cm}$, $r_3 = 1.42\text{ cm}$) ทรงกระบอกวงในเป็นเสตนเลสสตีมี 1.09 cm. คั่นด้วยฉนวนของแข็งเป็นแก้ว หนา 0.13 cm. และอากาศหนา 0.2 cm. ทรงกระบอกวงนอกเป็นเสตนเลสสตีมี 1.42 cm.

ขอบเขตปัญหาที่พิจารณาคือบริเวณจำนวนภายในแก่ระหว่างทรงกระบอกวงนอกและวงใน บริเวณของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นสามเหลี่ยมเรียกว่าอิเลิเมนต์ แต่ละอิเลิเมนต์ประกอบด้วย โหนด (Node) 3 โหนดคือที่มุมทั้ง 3 ของสามเหลี่ยมดังแสดงในรูป



a) อิเล็กโตรด I 816nodes, 1100elements

b) อิเล็กโตรด II 816 nodes, 1500 elements

รูปที่ 3.20 การแบ่งอิเลิเมนต์ภายในแก่ระหว่างอิเล็กโตรดของอิเล็กโตรด I และ II

a) อิเล็กโตรด I

b) อิเล็กโตรด II

แรงเคลื่อนไฟฟ้าทดสอบในการจำลองด้วยไฟไนท์อิเลิเมนต์จะถูกป้อนเข้าไปที่โหนดบริเวณทรงกระบอกวงใน โดยให้โหนดบริเวณทรงกระบอกวงนอกเป็นกราวด์ ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนท์อิเลิเมนต์ แสดงในรูปกราฟฟิคพร้อมค่าดังต่อไปนี้

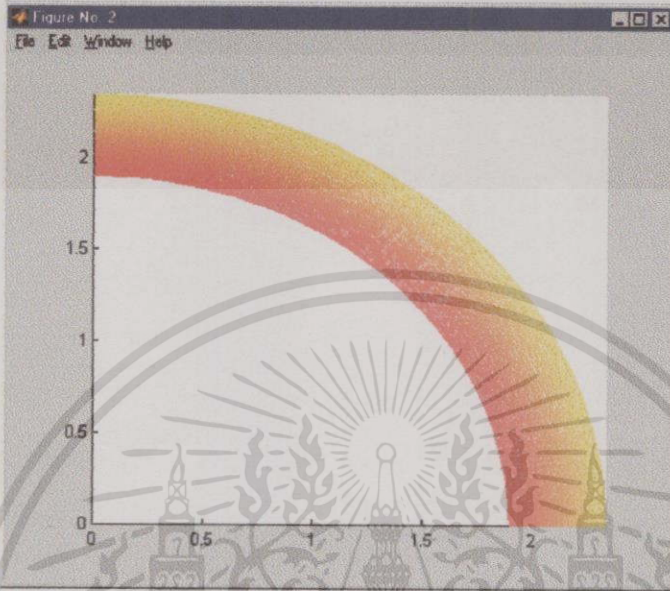
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การแสดงผลการคำนวณของ FEM

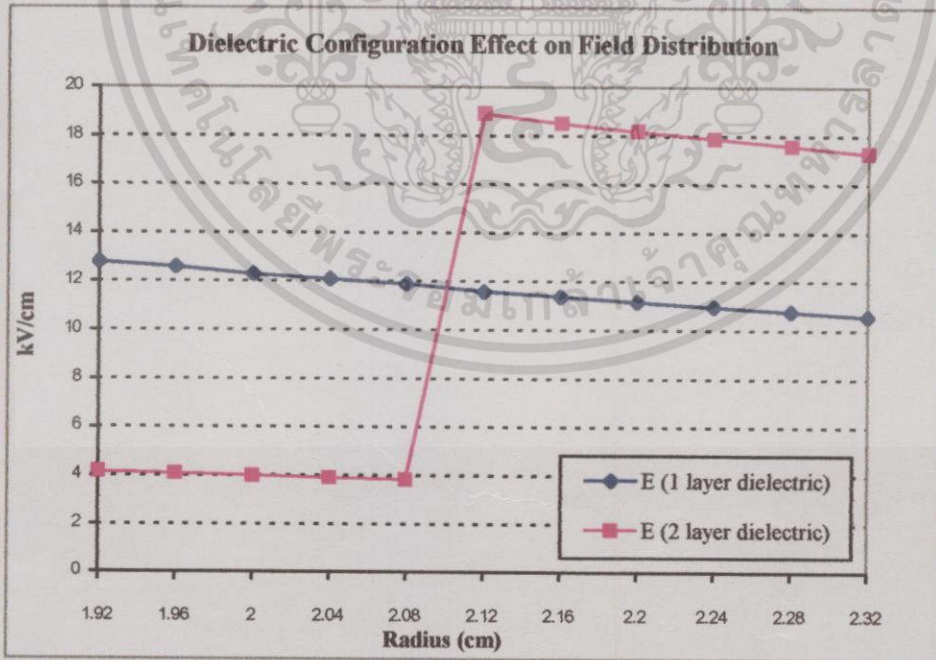
3.5.2.1 การกระจายของระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในแถบระหว่างอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรด I ($r_1 = 1.9, r_2 = 2.1$ และ $r_3 = 2.34$ cm.) แรงดันทดสอบ 5.14 kV

Voltage



a) การกระจายของระดับแรงดันภายในช่องที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรด I แบบทรงกระบอกซ้อนกัน



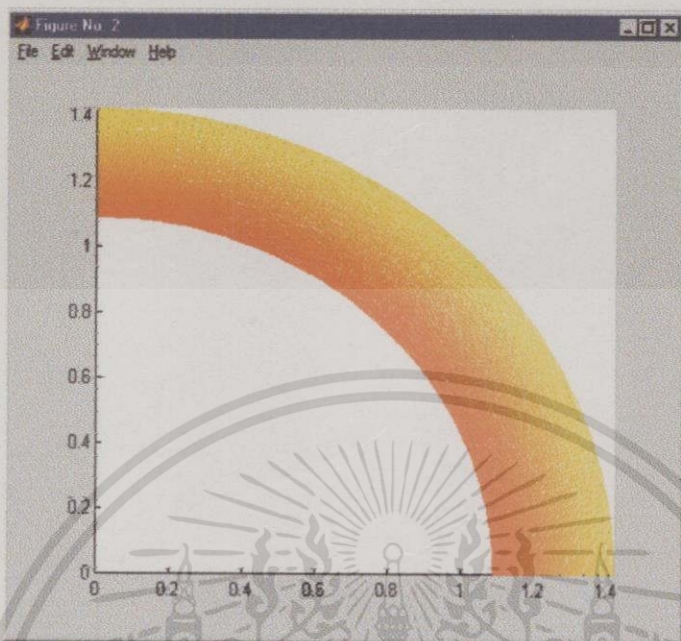
b) ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดที่มีโครงสร้างฉนวนต่างกัน

รูปที่ 3.21 ผลการคำนวณการกระจายของแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรด I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

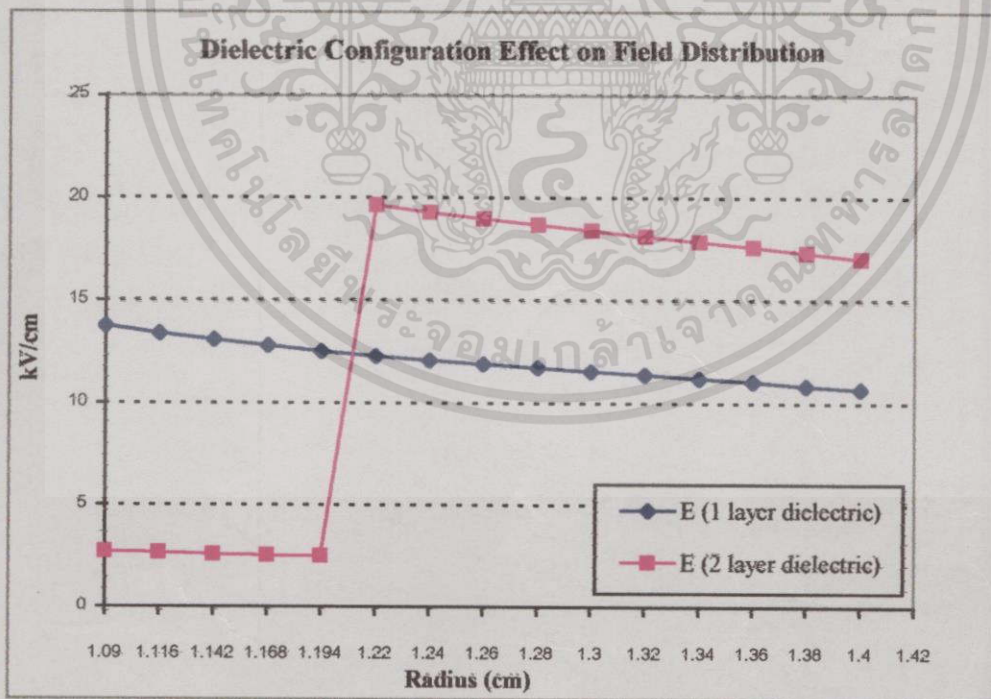
อิเล็กโตรด II ($r_1 = 1.09, r_2 = 1.22$ และ $r_3 = 1.42$ cm.) แรงดันทดสอบ 4 kV

Voltage



0 V
341 V
688 V
1040 V
1397 V
1760 V
2128 V
2502 V
2881 V
3267 V
3660 V
3725 V
3791 V
3859 V
3929 V
4000 V

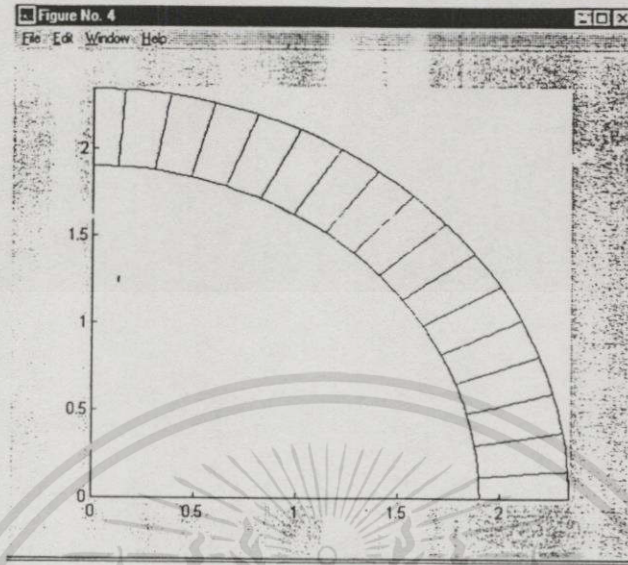
a) การกระจายของระดับแรงดันภายในช่องระหว่างอิเล็กโตรด II แบบทรงกระบอกซ้อนกัน



b) ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโตรดที่มีโครงสร้างฉนวนต่างกัน

รูปที่ 3.22 ผลการคำนวณการกระจายของแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโตรด II
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2.2. ทิศทางของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโตรด



รูปที่ 3.23 ทิศทางเส้นแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในช่องระหว่างอิเล็กโตรด

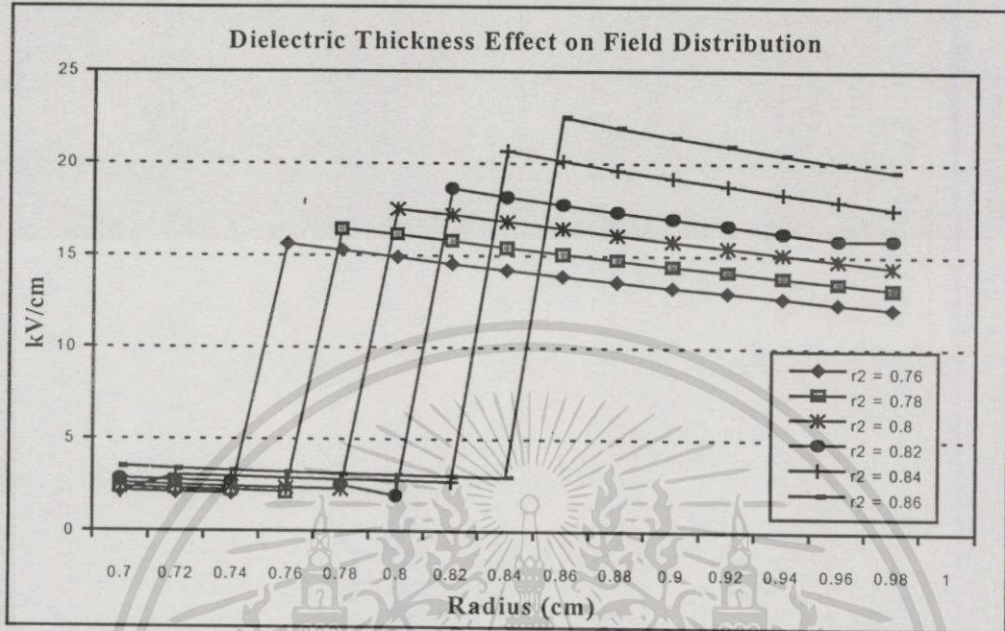
ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและพลังงานที่รัศมีต่าง ๆ ในช่องอิเล็กโตรด I

รัศมี (cm)	อิเล็กโตรด I			
	ฉนวนชั้นเดียว (อากาศ)		ฉนวนสองชั้น (อากาศ + พีวีซี)	
	E (kV/cm)	W(W-h)	E (kV/cm)	W (W-h)
1.92	12.8	0.072	4.17	0.0077
1.96	12.6	0.071	4.09	0.0074
2.00	12.3	0.067	4.00	0.0071
2.04	12.1	0.065	3.93	0.0069
2.08	11.9	0.063	3.85	0.0066
2.12	11.6	0.059	18.9	0.793
2.16	11.4	0.058	18.5	0.759
2.20	11.2	0.056	18.2	0.735
2.24	11	0.054	17.9	0.711
2.28	10.8	0.052	17.6	0.688
2.32	10.6	0.050	17.3	0.664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

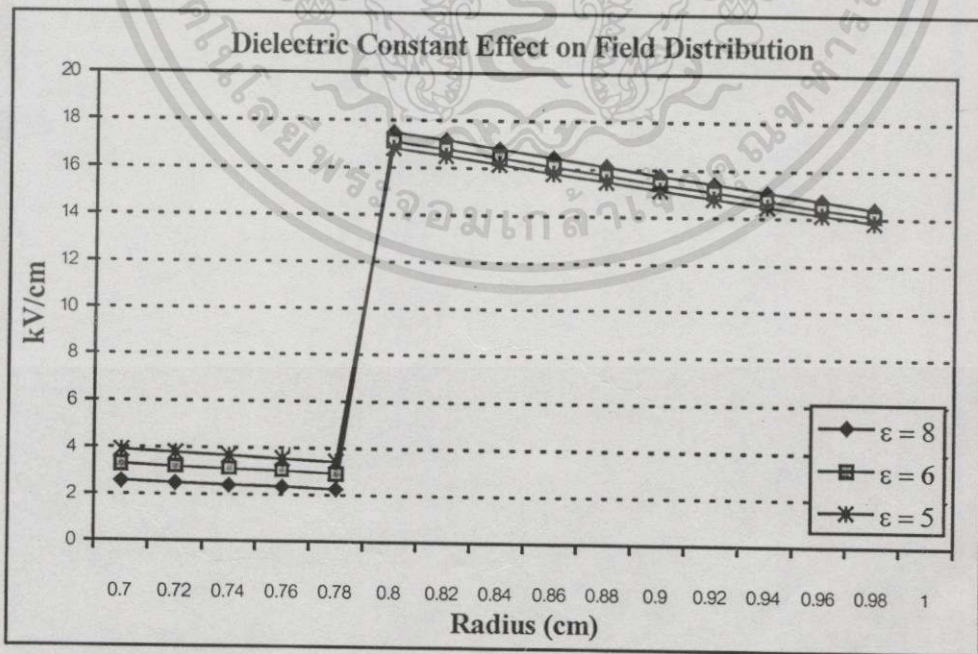
3.5.3 การศึกษาปรากฏการณ์ภายในอิเล็กทรอนิกส์ด้วยผลการคำนวณจาก FEM

1. ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของฉนวนของแข็งที่มีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.24 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อความหนาของฉนวนของแข็ง (r_2) เปลี่ยนแปลงไป หมายเหตุ ค่ารัศมีของทรงกระบอกภายใน (r_1) และรัศมีวงนอก (r_3) มีค่าคงที่

2. ผลการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ) ต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 ค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การศึกษาการแตกตัวของอากาศภายในช่อง (GAP) ฉนวนชั้นเดียวและสองชั้น

การทดลองที่ 4 ทดสอบอิเล็กโทรด I ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่ 50 Hz

อิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมที่ออกแบบสร้างขึ้น 2 ชนิดคือ แบบฉนวนอากาศชั้นเดียว กับแบบฉนวนอากาศและของแข็งถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาความแตกต่างของกลไกการคิสซาร์จที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศทั้ง 2 ชนิด โดยอิเล็กโทรดที่ใช้ทดสอบคืออิเล็กโทรด 1 ซึ่งมีรัศมีทรงกระบอกภายใน 1.9 cm. รัศมีทรงกระบอกภายนอก 2.34 cm.

ผลการทดลองที่ 4

ตารางที่ 3.4 การทดสอบอิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวนชั้นเดียว (อากาศ) เมื่อ $r_1 = 1.9$ cm และ $r_2 = 2.34$ cm โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 10 L/min

V_{rms} (kV)	V_p (kV)	E_{max} (kV/cm.)	E_{min} (kV/cm.)	Ozone Yield (mgO ₃ /hr)
4	5.657	14.29	11.606	0
5	7.07	17.8	14.4	0.72
5.38	7.61	19.2	15.6	2.88
5.8	8.2	20.7	16.8	-

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบอิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น (อากาศและพีวีซี $E_r = 5$) เมื่อ $r_1 = 1.9$ cm, $r_2 = 2.1$ cm และ $r_3 = 2.34$ cm. โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 10 L/min

V_{rms} (kV)	V_p (kV)	E_{max} (kV/cm.)	E_{min} (kV/cm.)	Ozone Yield (mgO ₃ /hr)
4	5.657	21.0071	18.8525	3.6
6	8.485	31.5106	28.2787	30.96
8	11.314	42.0141	37.7050	41.76
9	12.728	47.2659	42.4181	194.4
10	14.142	52.5176	47.1312	411.84
11	15.556	57.7694	51.8443	617.76
12	16.971	63.0212	56.5574	986.4
13	18.384	68.2729	61.2706	1758.24
14	19.799	73.5247	65.9837	1912.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของแข็งที่กระทบต่อความสามารถในการผลิตโอโซน

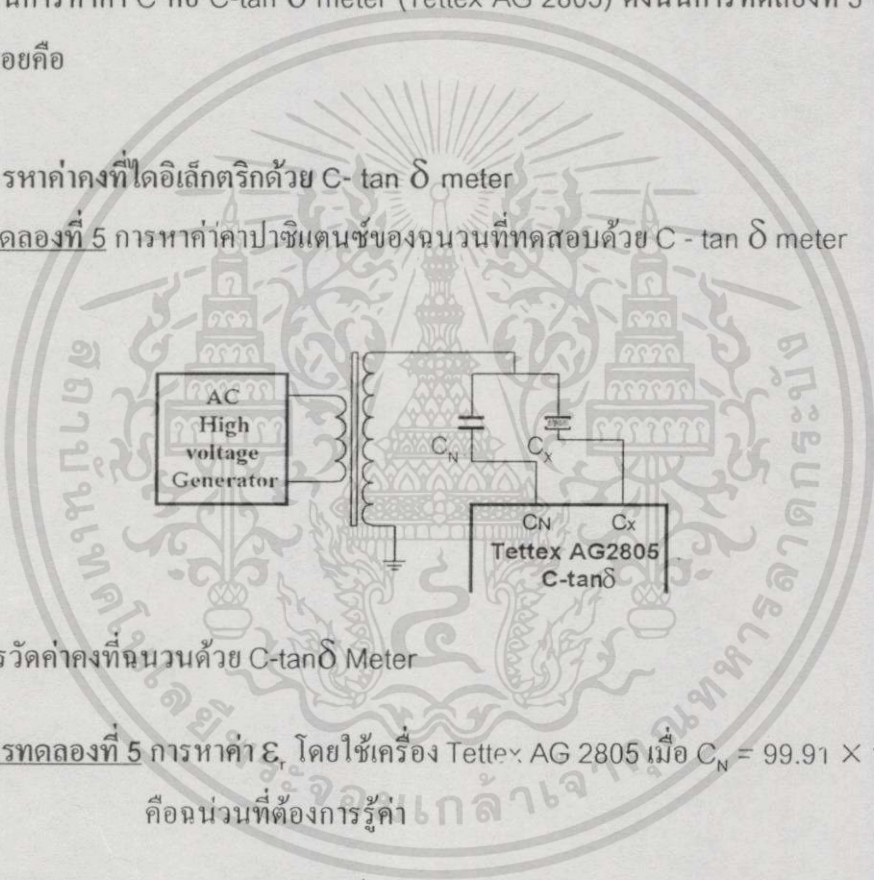
การเปลี่ยนชนิดของฉนวนของแข็งที่นำมาใช้เป็นฉนวนในช่องว่างอากาศมีปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric permittivity: ϵ) ในการนำเอาฉนวนแต่ละชนิดมาทดสอบ จึงได้ทำการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกก่อน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \tag{3.7}$$

อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่า C คือ C-tan δ meter (Tettex AG 2805) ดังนั้นการทดลองที่ 3 จึงประกอบด้วยขั้นตอนย่อยคือ

3.7.1 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วย C-tan δ meter

การทดลองที่ 5 การหาค่าค่าปาริแดนซ์ของฉนวนที่ทดสอบด้วย C-tan δ meter



รูปที่ 3.26 การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วย C-tan δ Meter

ผลการทดลองที่ 5 การหาค่า ϵ_r โดยใช้เครื่อง Tettex AG 2805 เมื่อ $C_N = 99.91 \times 10^{-12}$, C_X คือฉนวนที่ต้องการรู้ค่า

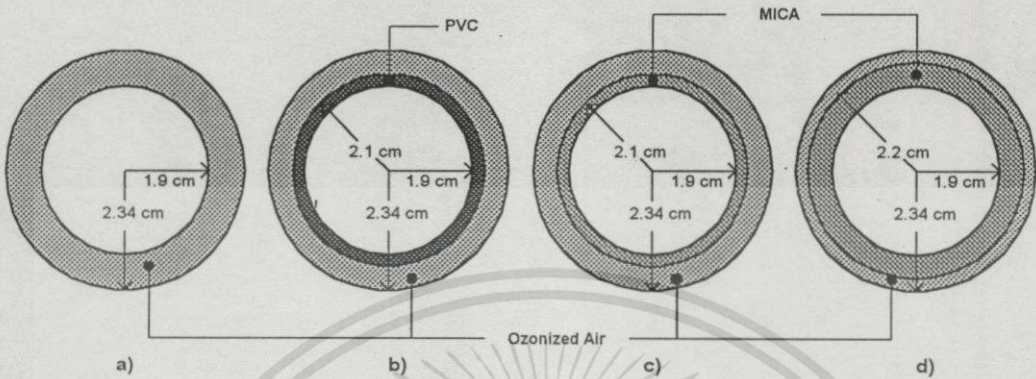
ตารางที่ 3.6 ผลการวัดค่า C ของฉนวนของแข็ง (PVC, Mica และ แก้ว)

ฉนวน PVC $r_1 = 1.9 \text{ cm}, r_2 = 2.1 \text{ cm}, l = 0.04 \text{ m}$		ฉนวน Mica $r_1 = 1.9 \text{ cm}, r_2 = 2.2 \text{ cm}, l = 0.04 \text{ m}$		ฉนวน Pyrex Glass $r_1 = 1.09 \text{ cm}, r_2 = 1.22 \text{ cm}, l = 0.03 \text{ m}$	
kV	C	kV	C_x	kV	C_x
1	1.08	1	1	1	1.25
1.5	1.15	1.5	1	2	1.26
2	1.21	2	0.95	3	1.06
2.5	1.19	2.5	1	-	-
$\epsilon_r = 5$		$\epsilon_r = 6$		$\epsilon_r = 8$	

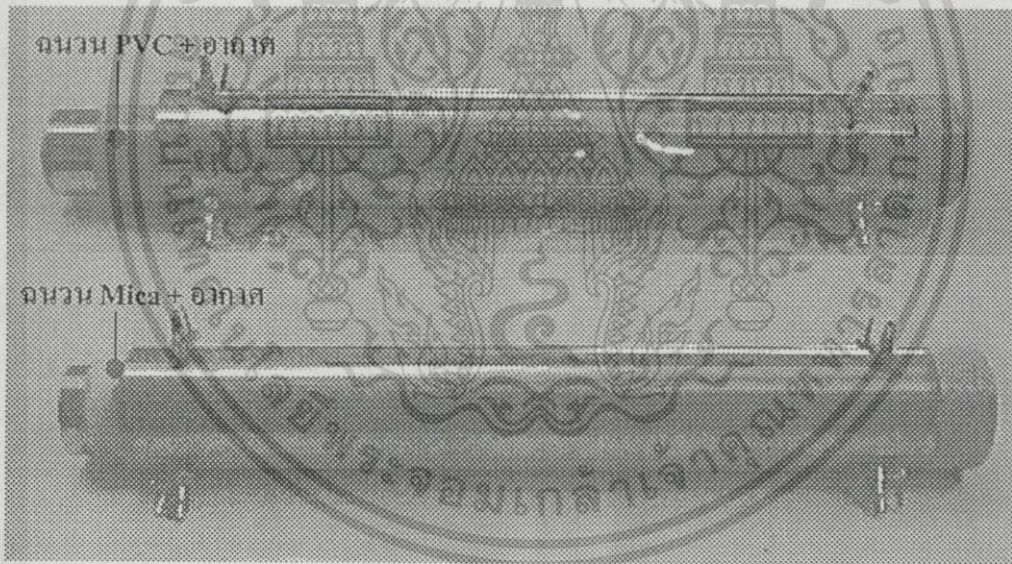
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การศึกษาผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่อการผลิตโอโซน

การทดลองที่ 6 ความสามารถในการผลิตโอโซนของอิเล็กโตรดที่มีโครงสร้างฉนวนต่างกัน



รูปที่ 3.27 ภาคตัดขวางของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการศึกษา



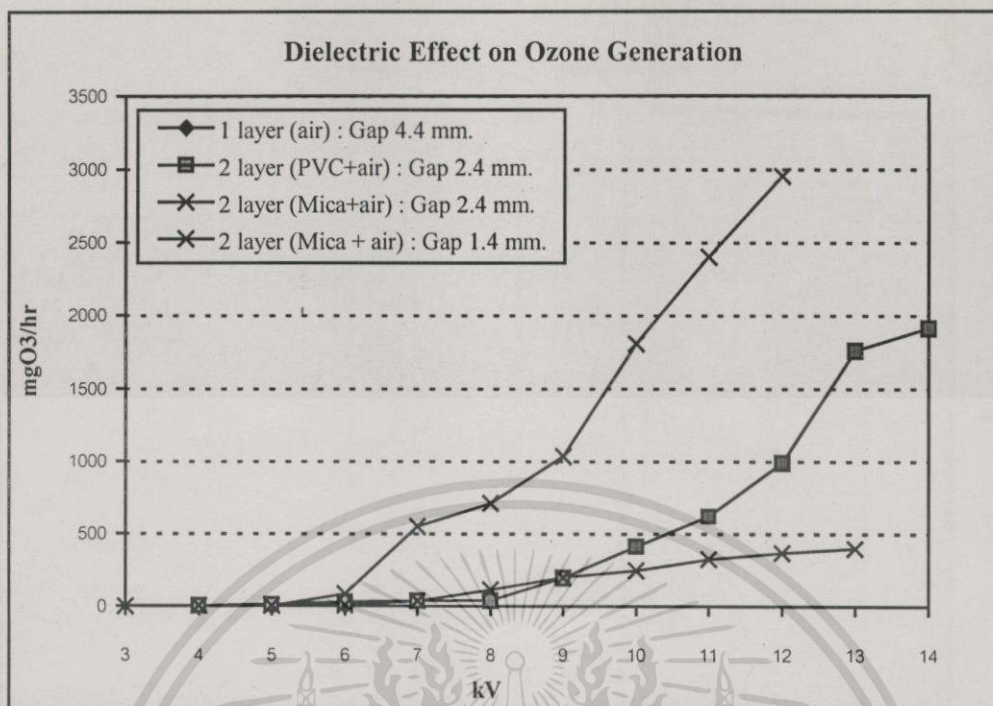
รูปที่ 3.28 อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบฉนวนต่างชนิด (PVC+ อากาศ กับ Mica + อากาศ)

ผลการทดลองที่ 6 ผลของโครงสร้างฉนวนที่แตกต่างกันต่อความสามารถในการผลิตโอโซน

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.24 โดยสัญลักษณ์ต่าง ๆ เหล่านี้คือ

- ฉนวนชั้นเดียว (อากาศ) แกปอากาศ 4.4 mm.
- ฉนวน 2 ชั้น (PVC + อากาศ) แกปอากาศ 2.4 mm.
- ฉนวน 2 ชั้น (Mica + อากาศ) แกปอากาศ 2.4 mm.
- ฉนวน 2 ชั้น (Mica + อากาศ) แกปอากาศ 1.4 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 ความสามารถในการผลิตโอโซนที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนต่าง ๆ กัน

3.8 ศึกษาผลของชนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ต่อความสามารถในการผลิตโอโซน

จากรูปที่ 2.9 ในบทที่ 2 ในทางทฤษฎี แรงดันต่างชนิดกันส่งผลต่อค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน ในการทดลองที่ 7 จึงเป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนอากาศต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับดังนี้

การทดลองที่ 7 ทดสอบผลของชนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อความสามารถในการผลิตโอโซน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบผลที่มีต่อความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนของแรงดันต่างชนิดกันคือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีดังต่อไปนี้

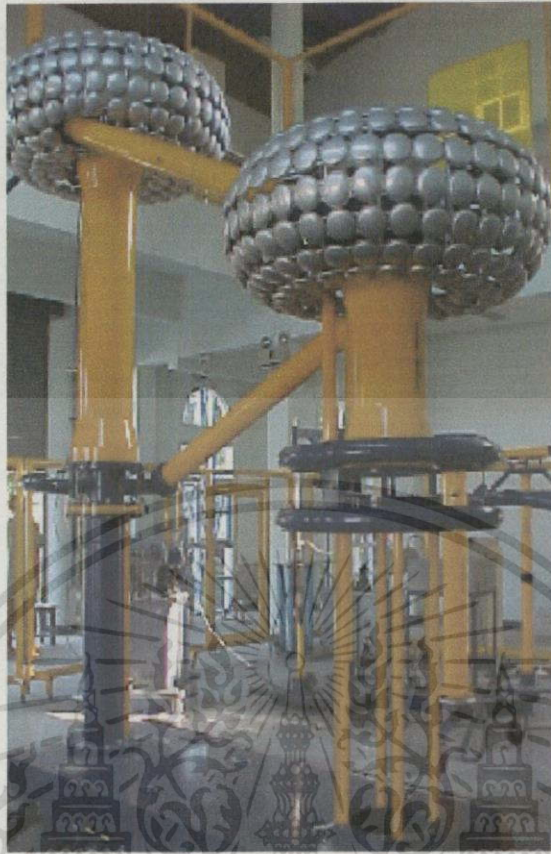
1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC High voltage generator)

อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในการทดลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบลบบและบวก ที่มีขนาดพิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 0-330 kV ที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 โวลต์ถึง 230 กิโลโวลต์ โดยมีชุดควบคุมทำหน้าที่ปรับจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า

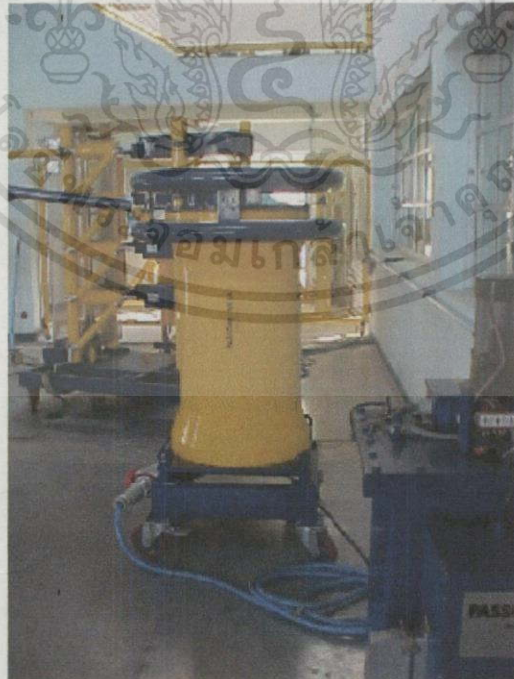
2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC High voltage generator)

อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าในการทดลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 0 – 125 kV_{rms} ที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึงค่าพิกัด 125 กิโล

โวลต์ (อาร์ เอ็ม เอส) โดยมีชุดควบคุมทำหน้าที่ในการปรับจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-330 kV_{DC}

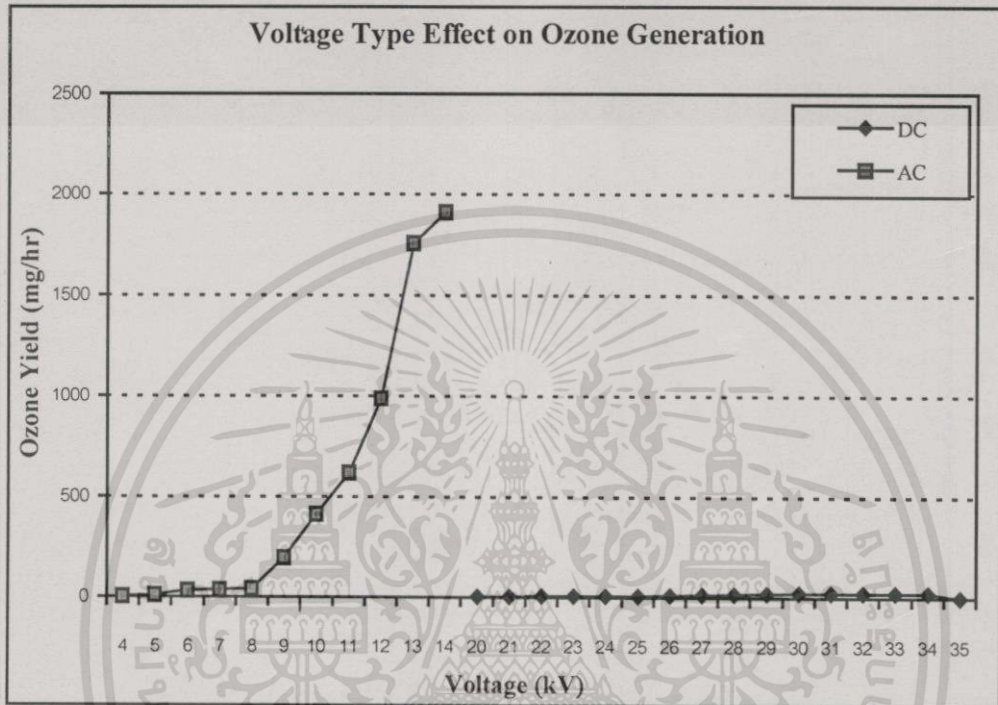


รูปที่ 3.31 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 0-125 kV_{rms}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 7 การทดสอบการผลิตโอโซนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างชนิด

ผลการทดสอบที่ความถี่ของรูปสัญญาณ 50 Hz อิเล็กโทรดที่ใช้คือ อิเล็กโทรด I ($r_1 = 1.9 \text{ cm.}$, $r_2 = 2.1 \text{ cm.}$ และ $r_3 = 2.34 \text{ cm.}$) ฉนวนที่ใช้คือ PVC และอากาศ ช่องอากาศกว้าง 2.4 mm. ผลการทดลองแสดงดังกราฟในรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.32 ปริมาณ โอโซนที่ผลิตได้เปรียบเทียบระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

3.9 การศึกษาผลของความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนต่อการผลิตโอโซน

จากผลการทดลองในข้อ 3.3.3 นำไปสู่การทดสอบผลของความถี่ที่มีต่อการผลิตโอโซนในการทดลองนี้แหล่งจ่ายที่ใช้เพื่อทดสอบคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง ดังกล่าวในการทดลองข้อ 3.3.8 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบคือ อิเล็กโทรด II ฉนวน แก้ว + อากาศ

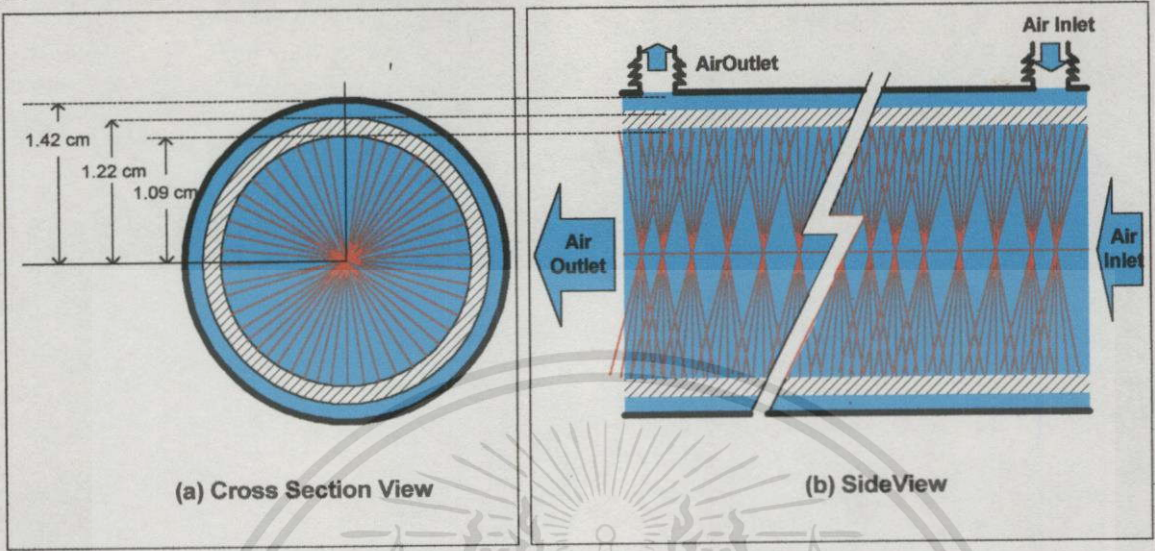
การทดลองที่ 8 ทดสอบผลของความถี่รูปสัญญาณต่อความสามารถในการผลิตโอโซน

ทดสอบชุดอิเล็กโทรดที่ออกแบบด้วยแหล่งจ่าย 2 ชนิดที่สร้างเพื่อทดสอบผลของความถี่เทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงความถี่ต่ำดังกล่าวในข้อ 3.5.6

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (AC High frequency – high voltage generator) อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในการทดลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่มีขนาดพิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า $6 \text{ kV}_{\text{peak}}$ ความถี่ 20 kHz – 100 kHz

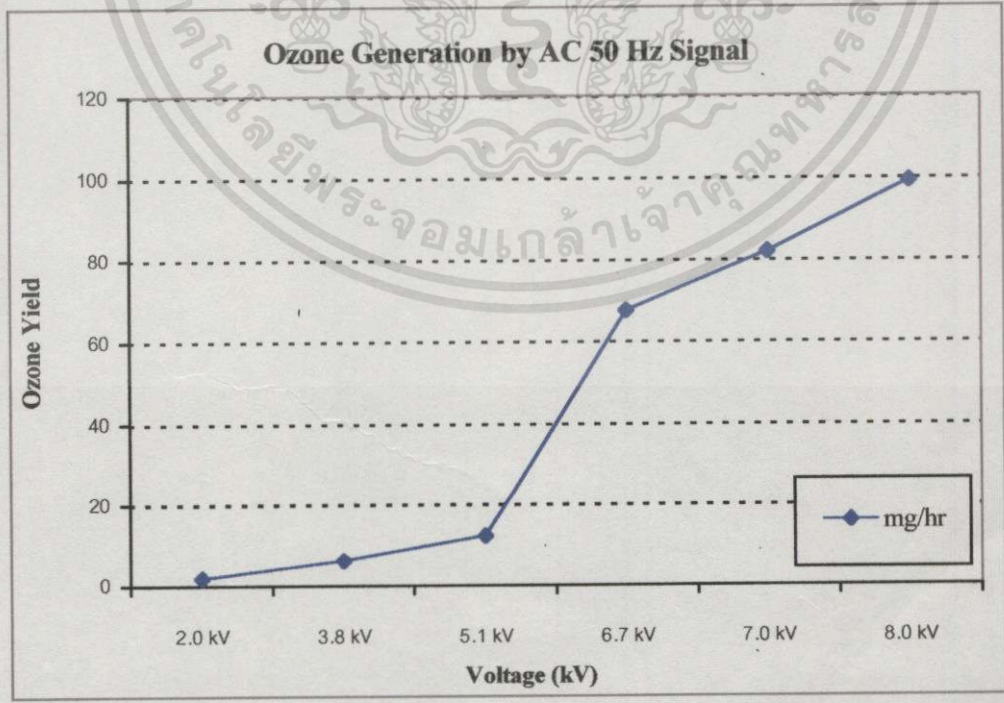
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Air
- Stainless Ground Electrode
- Glass
- Brass Brush High Voltage Electrode



รูปที่ 3.33 อิเล็กโตรด II โครงสร้างสำหรับทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโอโซน
 (a) มุมมองทางภาคตัดขวาง (b) มุมมองด้านข้าง

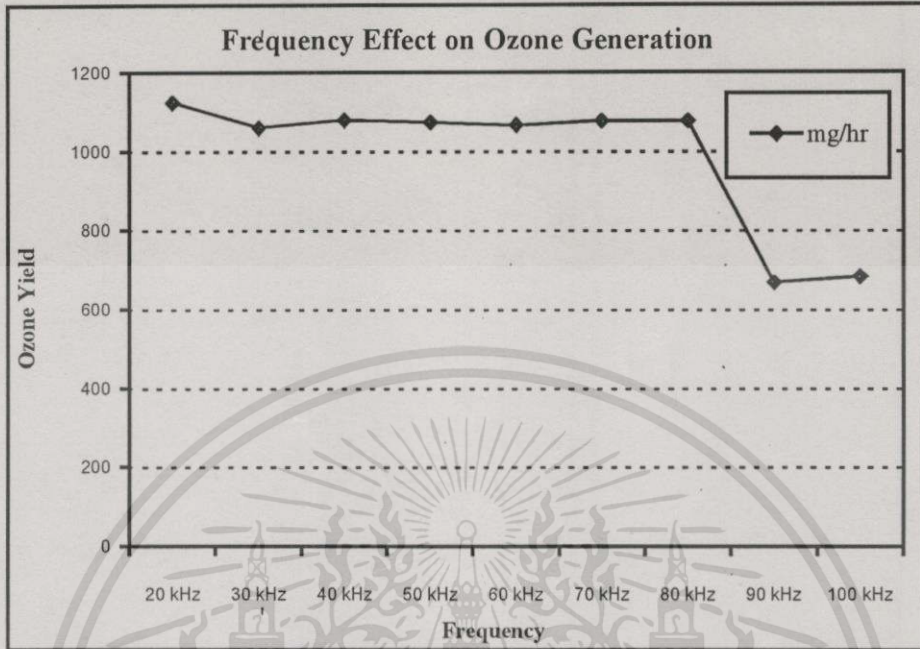
ผลการทดลองที่ 8 ผลของความถี่ของรูปสัญญาณที่ใช้งานต่อการผลิตโอโซน
 เมื่อใช้ที่ 1 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 2.0 kV – 8 kV ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 3.34 ความสามารถในการผลิตโอโซนของอิเล็กโตรด 2 ที่ความถี่ 50 Hz

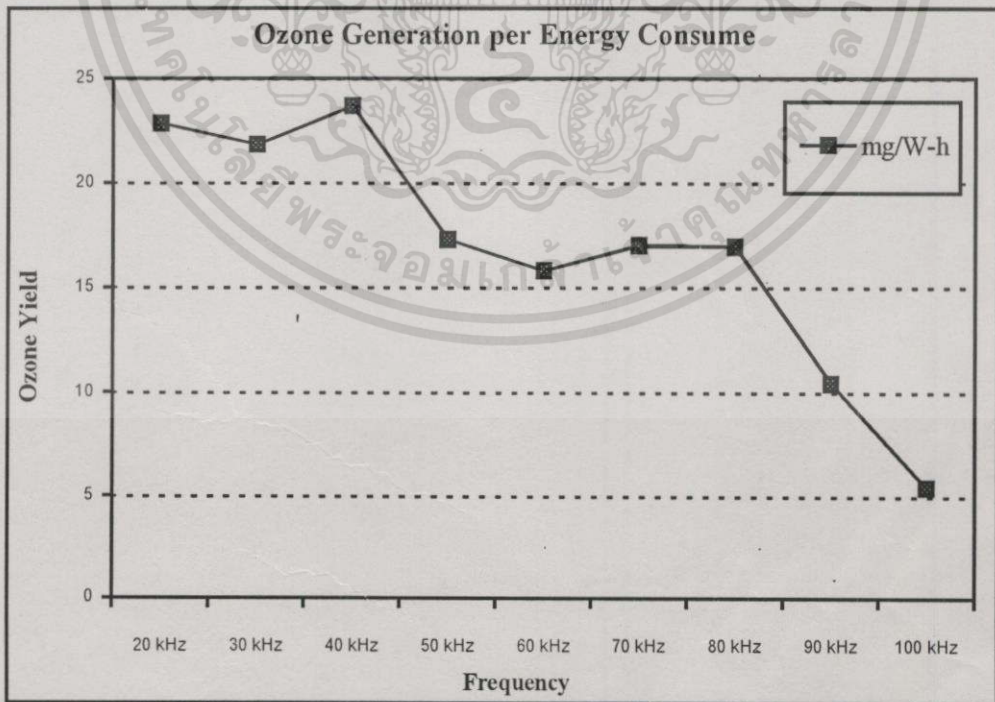
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขที่ 2 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับย่าน 6 kV_p ความถี่ 20kHz – 100 kHz



รูปที่ 3.35 ผลของความถี่ของรูปสัญญาณต่อการผลิตโอโซน

หมายเหตุ ที่ 90-100 kHz ค่าแรงดันน้อยกว่า 6 kV_p เนื่องจากความสูญเสียในวงจรทำให้แรงดันตกลง



รูปที่ 3.36 ผลของความถี่ของรูปสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้ในการผลิตโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone generator)

จากการออกแบบและทดสอบพบว่าผลการทดลองเปรียบเทียบเงื่อนไขต่าง ๆ ดังกล่าวในข้อ 3.2-3.5 ทำให้ตัดสินใจเลือกใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น ดังได้นำเสนอในรูปที่ 3.1 ข้างต้นแล้ว ข้อมูลของชุดอิเล็กโตรดที่ออกแบบมีดังนี้

ส่วนประกอบ โครงสร้างเครื่องกำเนิด โอโซน

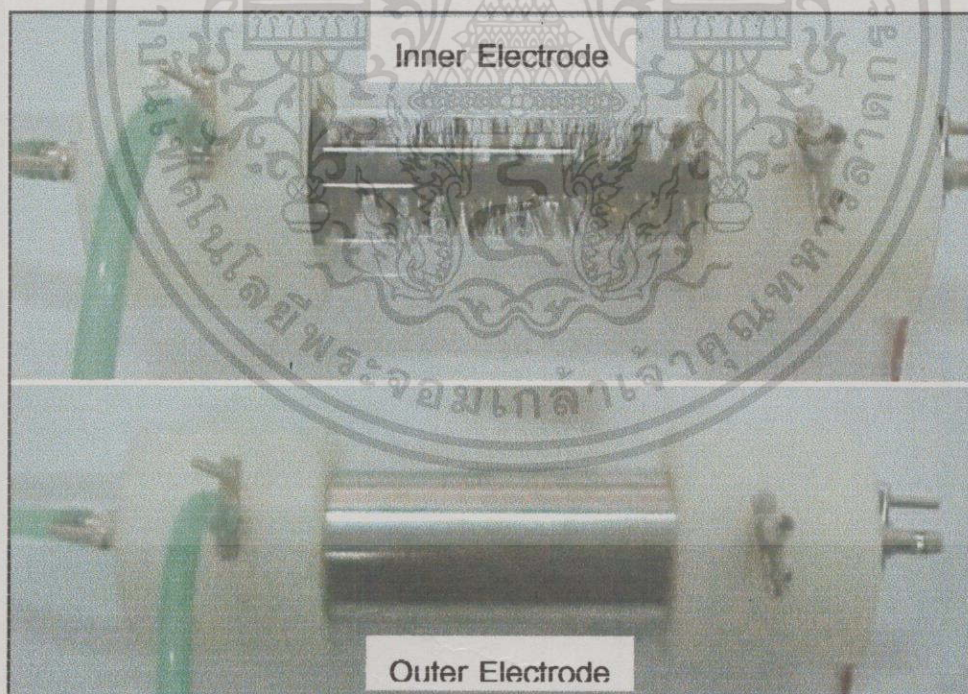
อิเล็กโตรดทรงกระบอกกรวดทำจากสแตนเลส รัศมี $r_3 = 1.42$ cm.

อิเล็กโตรดปลายแหลมพุ่มทองเหลืองรูปทรงกระบอกคะโดด

- รัศมีปลายแหลมของพุ่มทองเหลือง $r_1 = 1.09$ cm.
- รัศมีทรงกระบอกที่เป็นฉนวนแก้วหนา 0.13 cm. รัศมีวงนอก $r_2 = 1.22$ cm. รัศมีวงใน $r_1 = 1.09$ cm.
- ระยะแกปอากาศ = 0.2 cm.
- ความยาว = 12 cm.

ฉนวนของแข็งเป็น แก้ว

ท่อนำก๊าซและสายยาง



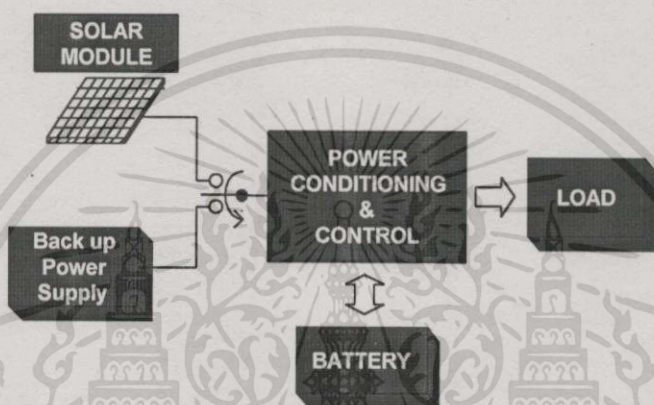
รูปที่ 3.37 โครงสร้างของเครื่องกำเนิด โอโซน (อิเล็กโตรด II)

บทที่ 4

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

4.1 บทนำ

ระบบแปลงรูปพลังงานจากดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานไฟฟ้าคือ ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system: PV) ประกอบด้วยโครงสร้าง 4 ส่วนหลัก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การออกแบบโครงสร้างแต่ละส่วนถูกกำหนดโดยขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระของระบบ ในบทนี้จะนำเสนอลำดับขั้นตอนการหาขนาดของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และการออกแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สำหรับภาระของระบบที่เป็นเครื่องผลิตก๊าซไอโซนจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับความถี่สูง เพื่อช่วยการแตกตัวของอากาศ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบจึงเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง 24 V จากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 6 kV_p ความถี่ 40 kHz แหล่งจ่ายดังกล่าวนี้ได้ถูกนำไปใช้ทดสอบความสามารถในการผลิตไอโซนกับอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบในตอนท้ายของบทที่ 3 แล้ว

4.2 หลักการ

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องผลิตไอโซนจำเป็นต้องรู้ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระของระบบก่อนเพื่อนำมาหาขนาดของโครงสร้างแต่ละส่วน ในบทที่ 3 กล่าวถึงการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทนี้เป็นแหล่งจ่ายที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไอโซน จากการทดสอบพบว่าภาระของระบบทั้งหมดต้องการกำลังไฟฟ้าประมาณ 52 วัตต์ ขั้นตอนการหาขนาดระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มี 4 ขั้นตอนคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

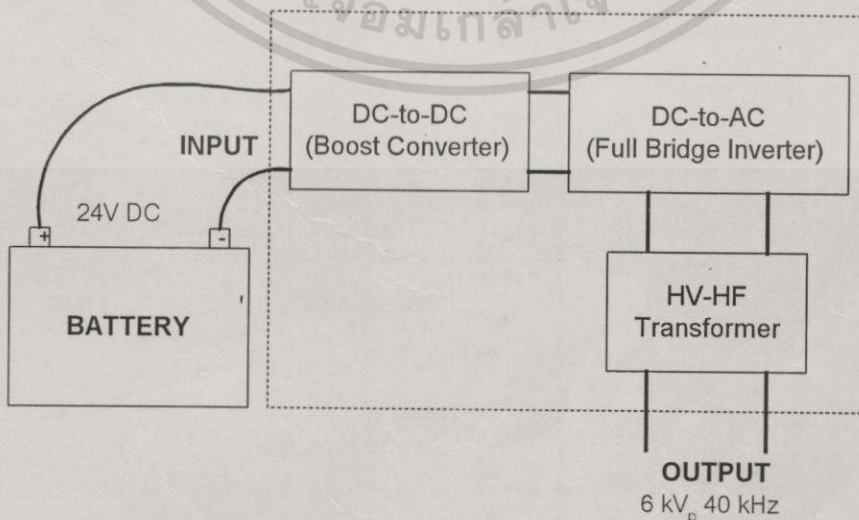
- การหาความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระของระบบ
- การออกแบบอินเวอร์เตอร์
- การหาขนาดแบตเตอรี่
- การหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ใช้งาน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ถูกนำเสนอในขั้นต้นใน [7] มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการออกแบบคือ แผง BPTS1255 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

BPTS 1255	Power (watts)
	- Nominal peak power point : 55
	Voltage (volts)
	- Peak power point : 17
	- Nominal : 12
	- Open circuit : 21.2
	Current (amps)
	- Peak power point : 3.23
	- Short circuit : 3.54

4.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน

การออกแบบอินเวอร์เตอร์คือขั้นตอนที่ดำเนินการหลังจากทราบว่าภาระของระบบเป็นแบบใด ในระบบการผลิตก๊าซไอโซนนี้ จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสความถี่สูง แรงดันสูง ดังนั้นความสามารถของอินเวอร์เตอร์ต้องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 24 V เป็นไฟฟ้ากระแสความถี่ประมาณ 6 kV_p ความถี่ 40 kHz ได้ อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบจึงมีโครงสร้างหลัก ๆ 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างหลักของอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูง

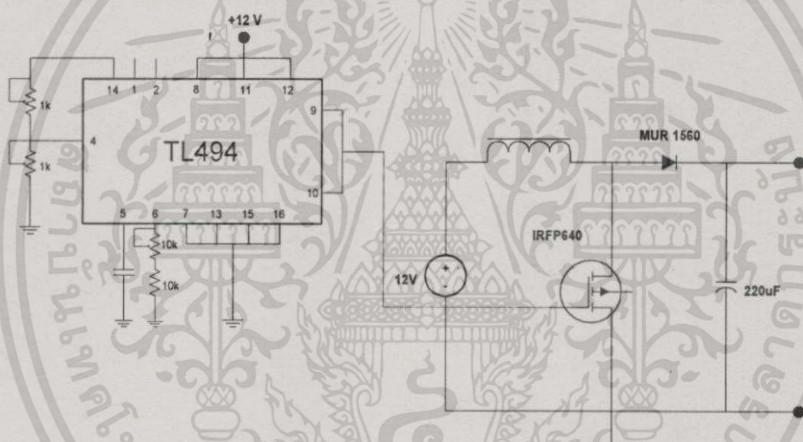
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 V จากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะถูกยกระดับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 V ก่อนในลำดับแรก วงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้นคือ วงจรบูสต์ รายการอุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

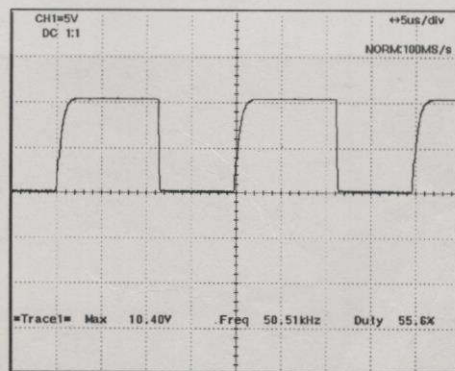
4.3.1.1 การออกแบบวงจรบูสต์ (Boost Converter)

อุปกรณ์	จำนวน	หน่วย
1. IC TL494	1	ตัว
2. ไดโอด MUR 1560	1	ตัว
3. C อิเล็กโทรไลต์ 220 μ F	1	ตัว
4. มอสเฟต IRFP640	1	ตัว
5. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 1k Ω , 10 k Ω	2	ตัว
6. ตัวต้านทาน R 10 k Ω	1	ตัว



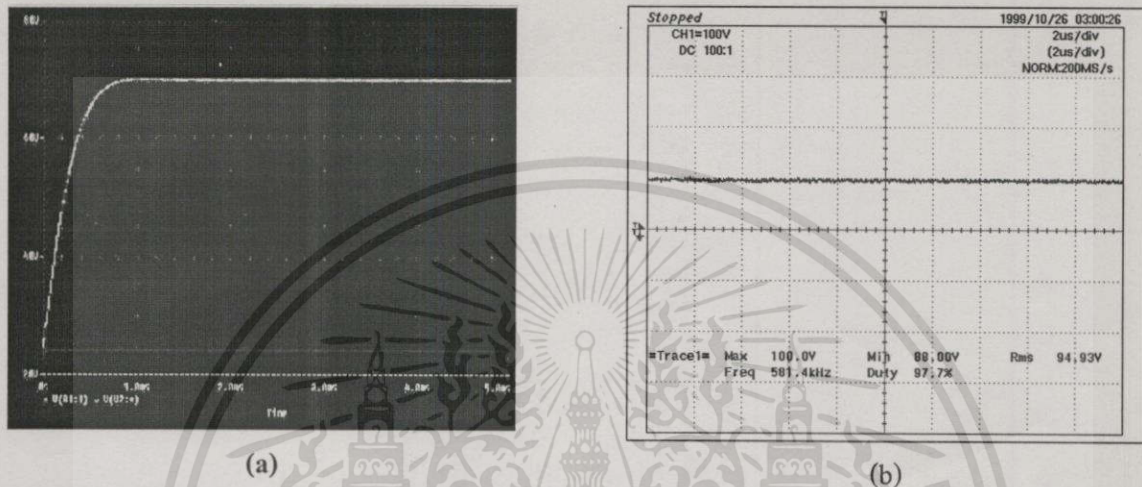
รูปที่ 4.3 วงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Boost converter)

4.3.1.2 การทดสอบวงจรที่ออกแบบ



รูปที่ 4.4 สัญญาณขาเข้าควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรบูสต์
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน 24 V DC จากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ถูกยกระดับเป็น 100 V DC ด้วยวงจรบูสต์ดังแสดง ในรูปที่ 4.3 สัญญาณจาก TL494 ที่ถูกส่งมาขับเคลื่อนขาของมอสเฟตให้ทำงาน ความถี่ในการสวิตช์ ประมาณ 50 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.4 วงจรนี้ได้ถูกนำไปจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice ก่อนทดสอบใช้งานจริง ผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าประมาณ 100 V DC แสดงผลในรูปที่ 4.5 (a) และ 4.5 (b) ตามลำดับ



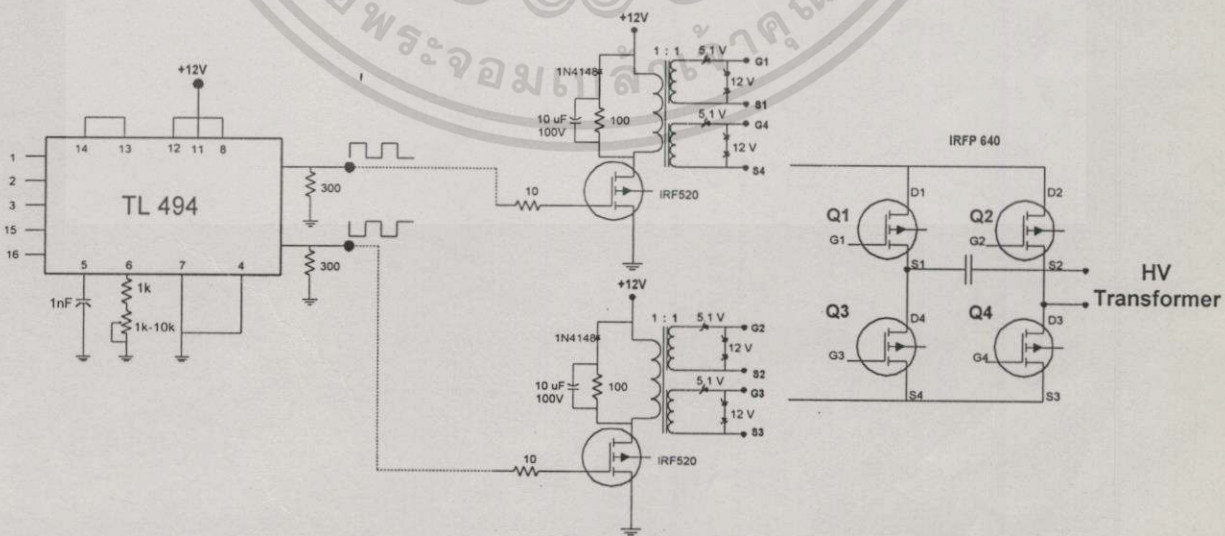
รูปที่ 4.5 (a) ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice

(b) ผลการทดสอบการทำงานของวงจรบูสต์

4.3.2 พูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full bridge inverter)

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 100 V จะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 100 V_p

4.3.2.1 การออกแบบวงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full Bridge Inverter)



รูปที่ 4.6 วงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

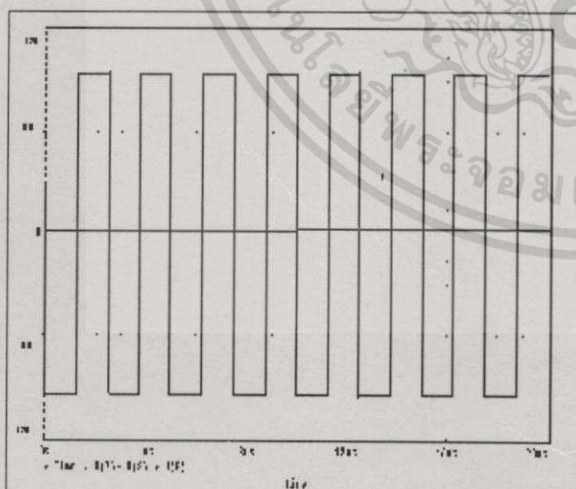
รายการอุปกรณ์ที่ต้องใช้มีดังต่อไปนี้

DC-AC Inverter (Full Bridge Inverter)

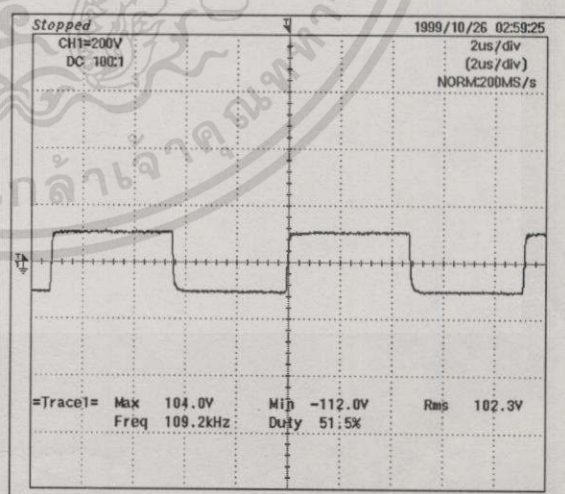
1. IC TL 494	1	ตัว
2. C ไมลาร์ 1 nF	1	ตัว
3. ตัวต้านทาน 1 k Ω , VR 10 k Ω	1	ตัว
4. ตัวต้านทาน 300 Ω , 10 Ω , 100 Ω	2	ตัว
5. C 10 μ F 100 V	2	ตัว
6. ไดโอด 1N4148	2	ตัว
7. Zener diode 12 V	8	ตัว
8. Zener diode 5.1 V	4	ตัว
9. มอสเฟต IRF520	2	ตัว
10. มอสเฟต IRFP640	4	ตัว

4.3.2.2 การทดสอบวงจรที่ออกแบบ

วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.6 สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 20 kHz ถึง 100 kHz ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice แสดงในรูปที่ 4.7 (a) ผลการทดสอบวงจรแสดงในรูปที่ 4.7 (b) และ รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ภาระ 50 วัตต์ ที่ความถี่ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 (a) – (i) ตามลำดับ ในรูปที่ 4.6 ส่วนเอาต์พุตของวงจรจะต่อกับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงซึ่งประยุกต์ใช้มาจากหม้อแปลงฟลายแบคในวงจรโทรทัศน์ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



(a)



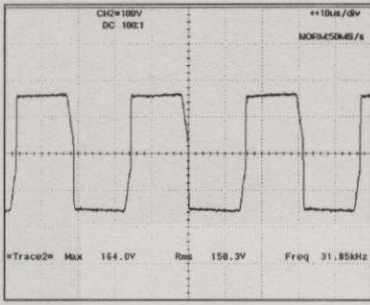
(b)

รูปที่ 4.7 (a) ผลการจำลองการทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ด้วย โปรแกรม Pspice

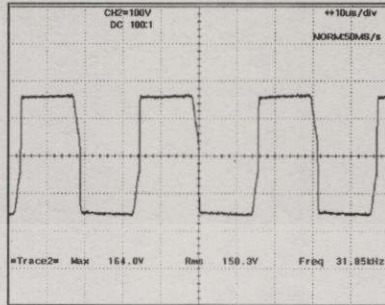
(b) ผลการทดสอบการทำงานของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

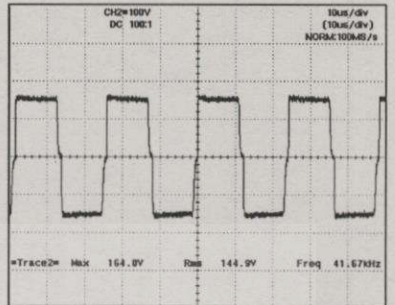
ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 – 100 kHz กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระของระบบที่ 50 วัตต์ ผลการทดสอบได้รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



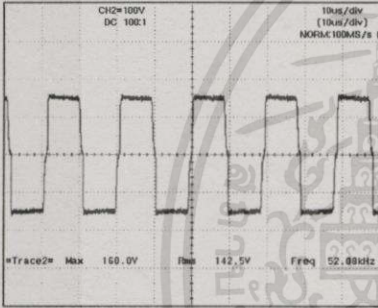
(a) แรงดันเอาต์พุตที่ 20 kHz



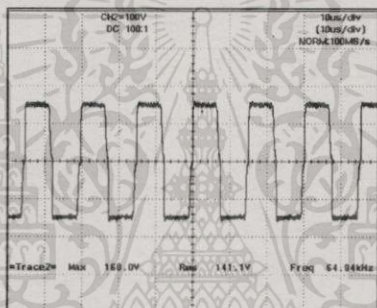
(b) แรงดันเอาต์พุตที่ 30 kHz



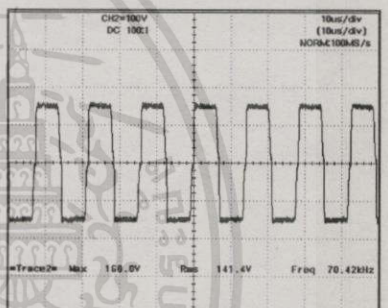
(c) แรงดันเอาต์พุตที่ 40 kHz



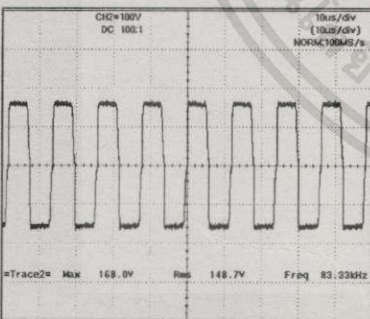
(d) แรงดันเอาต์พุตที่ 50 kHz



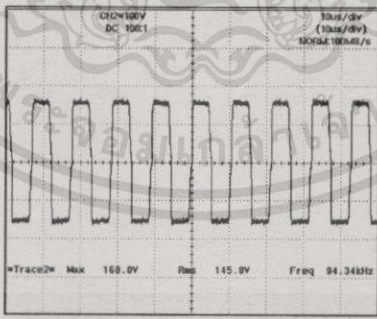
(e) แรงดันเอาต์พุตที่ 60 kHz



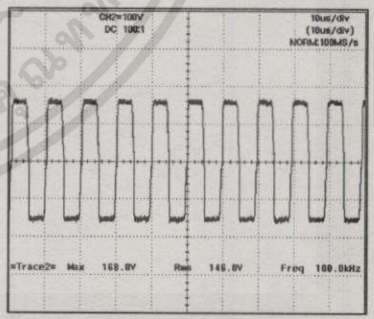
(f) แรงดันเอาต์พุตที่ 70 kHz



(g) แรงดันเอาต์พุตที่ 80 kHz



(h) แรงดันเอาต์พุตที่ 90 kHz

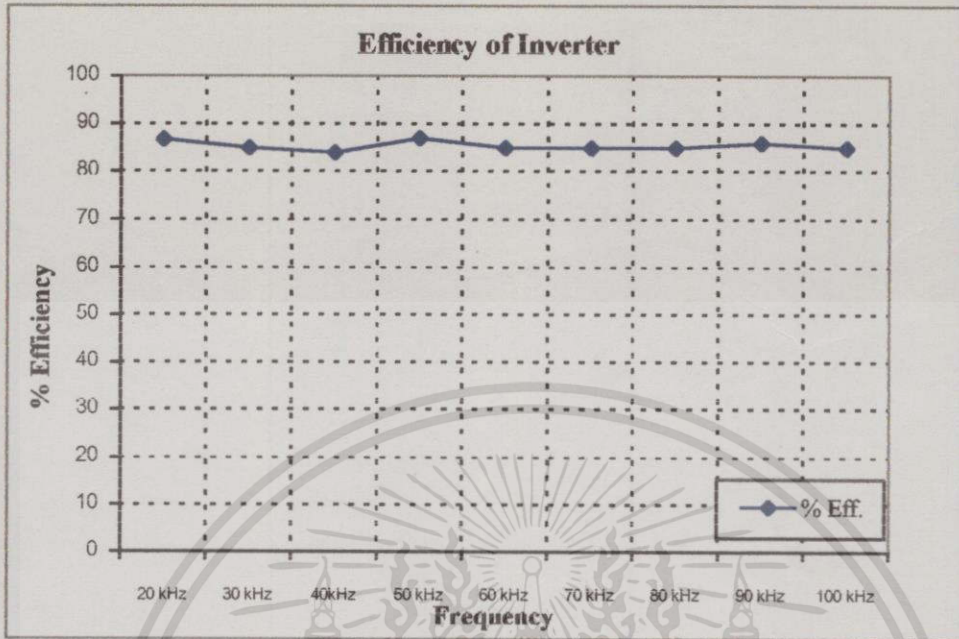


(i) แรงดันเอาต์พุตที่ 100 kHz

รูปที่ 4.8 (a)-(i) สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 – 100 kHz ที่ภาระของระบบ คือ โหลด 50 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ที่ 50 วัตต์ ความถี่ 20 – 100 kHz

4.3.3 หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

ในงานวิจัยนี้เนื่องจากคุณสมบัติแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการคือ ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูง ดังนั้นจึงเลือกนำหม้อแปลงฟลายแบคของวงจร โทรทัศน์เก่า (Nokia TFAT 1109 F 302/5) มาใช้งาน

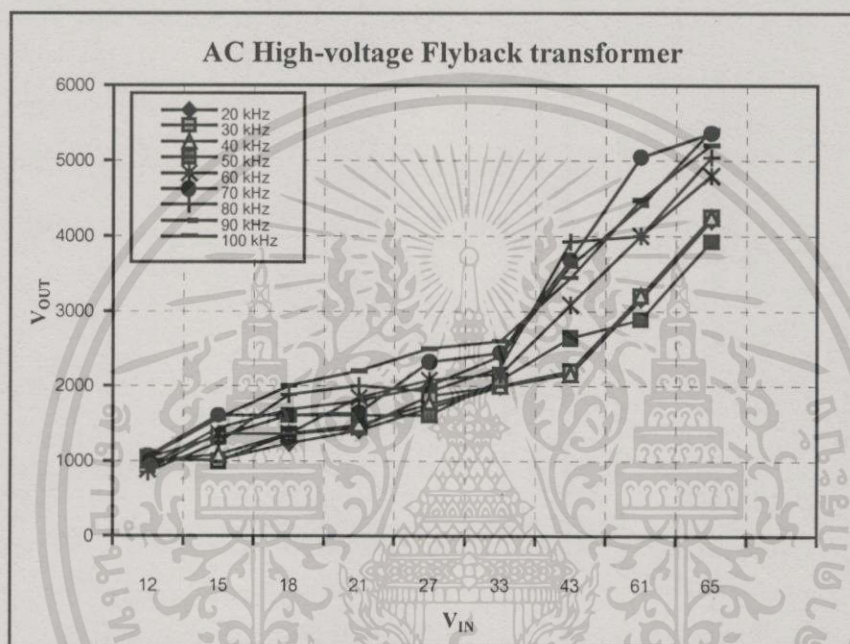


รูปที่ 4.10 หม้อแปลงฟลายแบคโทรทัศน์ (Nokia TFAT 1109 F 302/5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.1 การทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

เนื่องจากหม้อแปลงที่นำมาใช้งานเป็นหม้อแปลงโทรม์สั่นรุ่นเก่าที่ไม่มีการใช้งานในปัจจุบันแล้วดังนั้นคุณสมบัติของหม้อแปลงจึงต้องมาจากการทดสอบในเงื่อนไขที่ต้องการนำไปใช้งาน ในที่นี้คือทดสอบการยกระดับแรงดันที่ความถี่ต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาคือช่วงความถี่ 20 kHz ถึง 100 kHz ความสามารถในการยกระดับพลังงานที่ความถี่ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.11

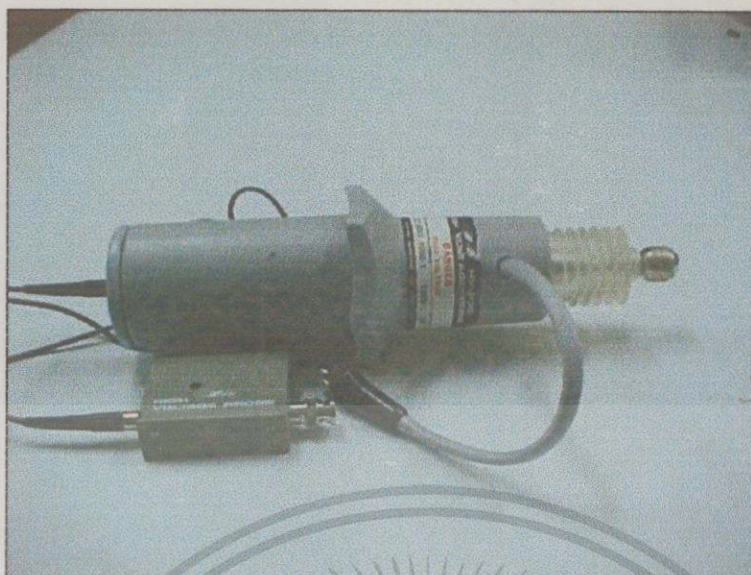


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับที่ความถี่ 20 - 100 kHz

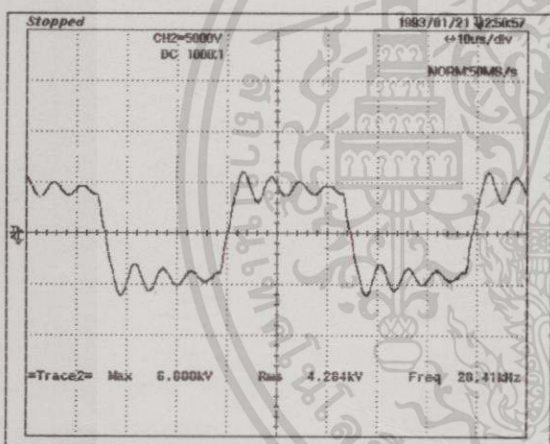
หมายเหตุ คุณสมบัติของหม้อแปลงที่นำมาใช้ในระบบคือส่วนที่เป็นขั้วบกร่องของระบบ แต่ในการทดสอบผลการทดลองยังอยู่ในย่านที่การดึงกระแสไม่สูงมากนักจึงสามารถใช้งานได้ แต่ในการขยายขนาดของระบบควรแก้ไขจุดบกพร่องในส่วนนี้

4.3.3.2 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่ 20-100 kHz

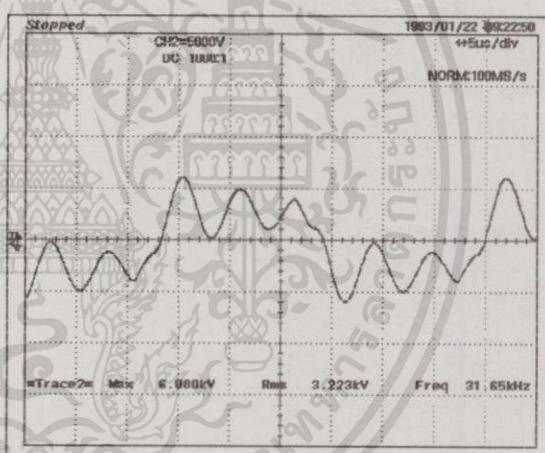
ระบบทั้งหมดที่กล่าวถึงในข้อ 4.3.1 - 4.3.3 ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อทดสอบสัญญาณที่สร้างที่เอาท์พุทที่จะนำไปทดสอบความสามารถในการผลิตโอโซนต่อไป การวัดรูปสัญญาณที่เอาท์พุทใช้โพรบแรงดันสูงความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 4.12 ตรวจสอบสัญญาณพิกัดโพรบ 30 kV ย่านความถี่ในหลักเมกะเฮิร์ต ผลของรูปสัญญาณที่ได้และค่าแรงดันค่ายอดและค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสแสดงในรูปที่ 4.13 (a) - (i) ส่วนประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูงทั้งระบบแสดงดังรูปที่ 4.14



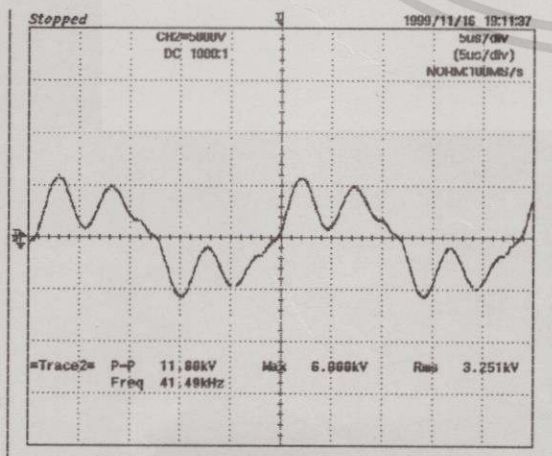
รูปที่ 4.12 โพรบแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับตรวจจับสัญญาณที่เอาท์พุทของแหล่งจ่าย



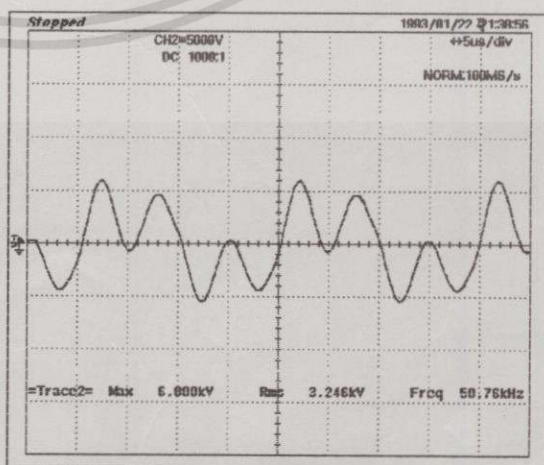
(a) แรงดันเอาท์พุทที่ 20 kHz



(b) แรงดันเอาท์พุทที่ 30 kHz

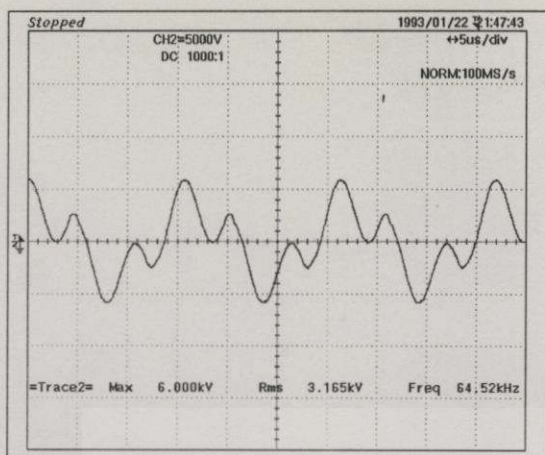


(c) แรงดันเอาท์พุทที่ 40 kHz

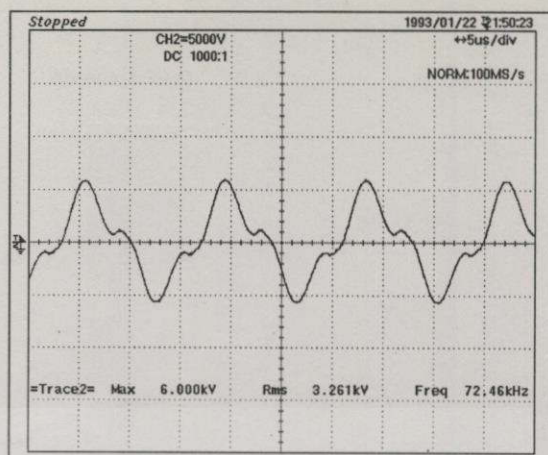


(d) แรงดันเอาท์พุทที่ 50 kHz

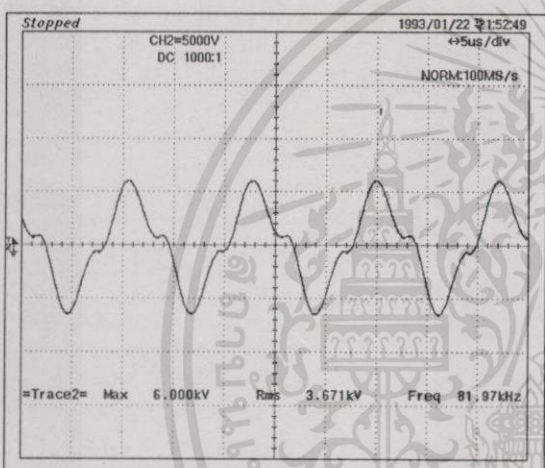
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา. และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



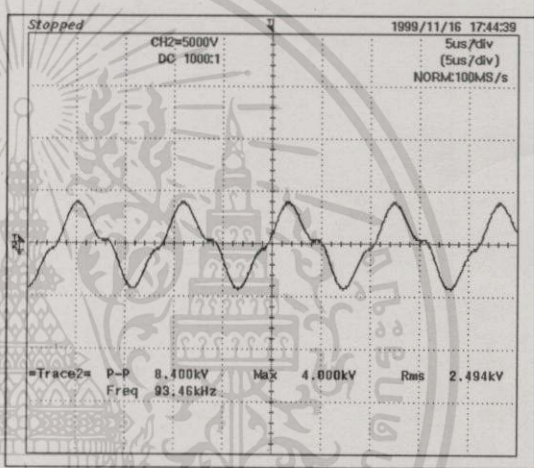
(e) แรงดันเอาต์พุตที่ 60 kHz



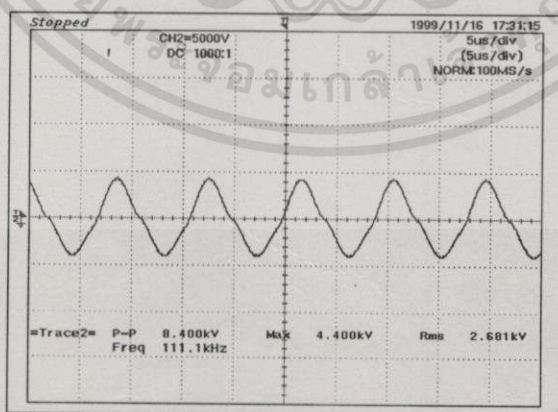
(f) แรงดันเอาต์พุตที่ 70 kHz



(g) แรงดันเอาต์พุตที่ 80 kHz



(h) แรงดันเอาต์พุตที่ 90 kHz



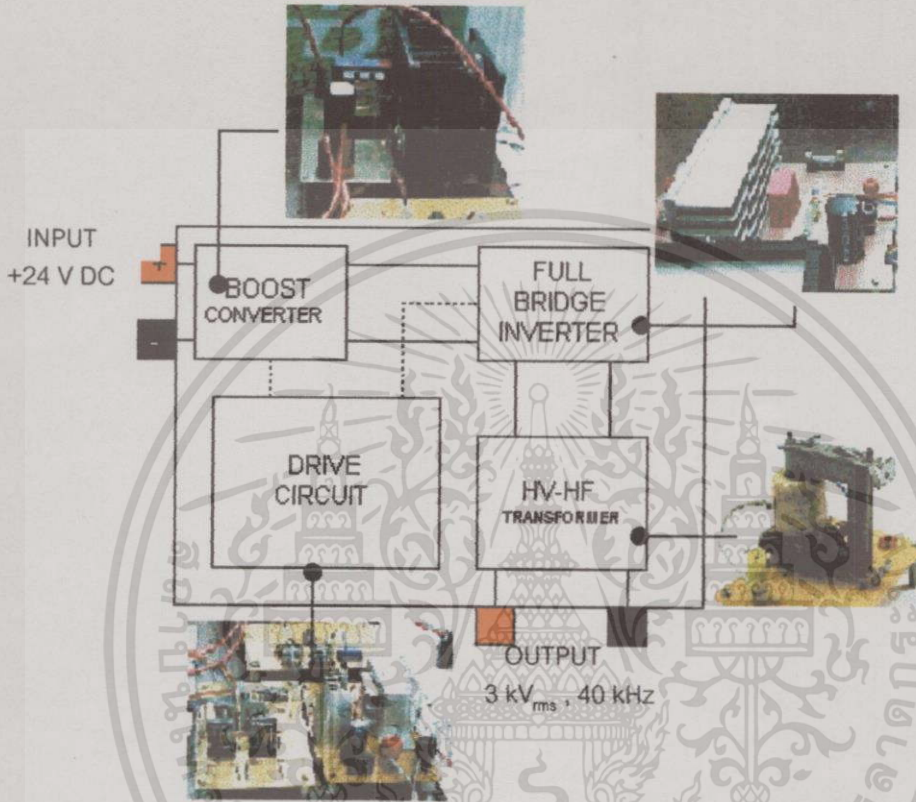
(i) แรงดันเอาต์พุตที่ 100 kHz

รูปที่ 4.13 (a)–(i) แรงดันเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับความถี่ 20 – 100 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 โครงสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับความถี่สูง

จากการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ในบทที่ 3 และการออกแบบสร้างแหล่งจ่ายที่นำเสนอในบทที่ 4 นี้ ทำให้สามารถออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงสำหรับเครื่องกำเนิดไอโซนได้ โดยส่วนประกอบของเครื่องแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับสำหรับเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

คุณสมบัติ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

แรงดันไฟฟ้าอินพุต	24 V DC
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	3 kV _{rms} AC ความถี่ 20-40 kHz
กำลังไฟฟ้า	52 วัตต์

แหล่งจ่ายที่ออกแบบนี้สามารถเลือกใช้งานกับแหล่งพลังงานได้ 2 แบบคือ

1. ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์
2. วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V

ระบบพลังงานหลัก ๆ ที่พิจารณาคือระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ซึ่งจะกล่าวถึงในข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

ส่วนประกอบสำคัญของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มี 4 ส่วน

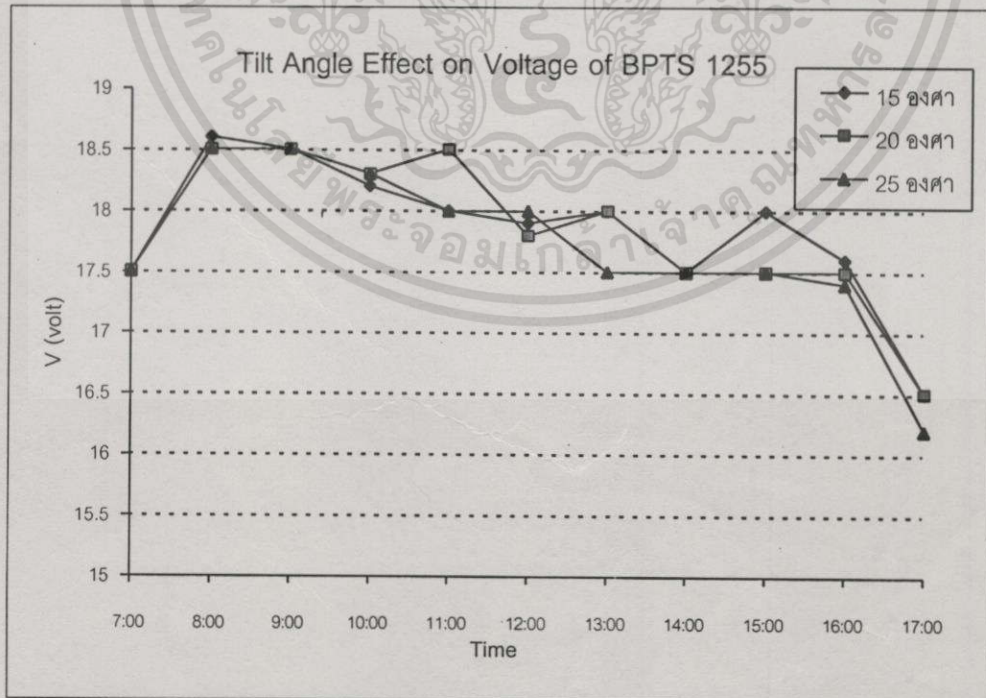
1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module)
2. แบตเตอรี่ (Battery)
3. หน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit : ECU)
4. โครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.4.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของแผงเซลล์ที่จะนำมาใช้งานเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบระบบจริง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของแผงเซลล์เพื่อออกแบบระบบโดย ข้อมูลและรายละเอียดของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบมีดังต่อไปนี้

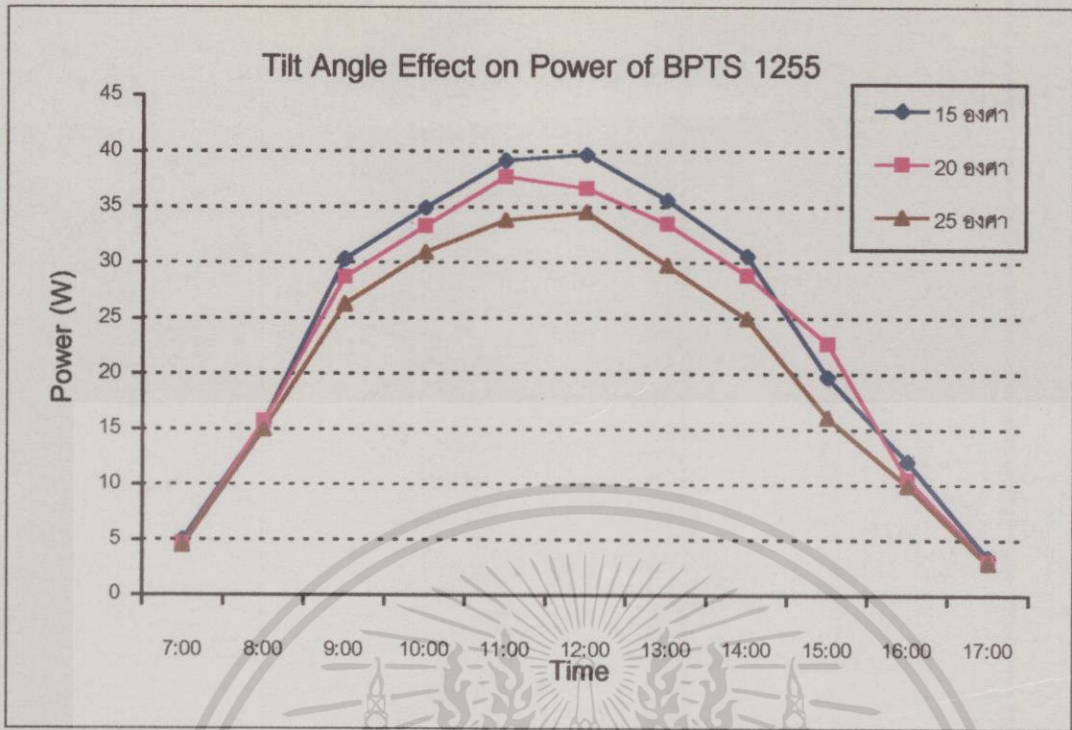
ตำแหน่งการติดตั้ง	: ลาดกระบัง Lat. 15°N Long. 100°E
ช่วงเวลาเก็บบันทึกข้อมูล	: มกราคม [Worst case]
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	: BPTS 1255 ขนาด 55 W
ภาระที่ใช้ในการทดสอบ	: ตัวต้านทานปรับค่าได้ ต่อเนื่อง

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของแผงที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ความสามารถในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มุมเอียงแผงต่าง ๆ กันใน 1 วัน

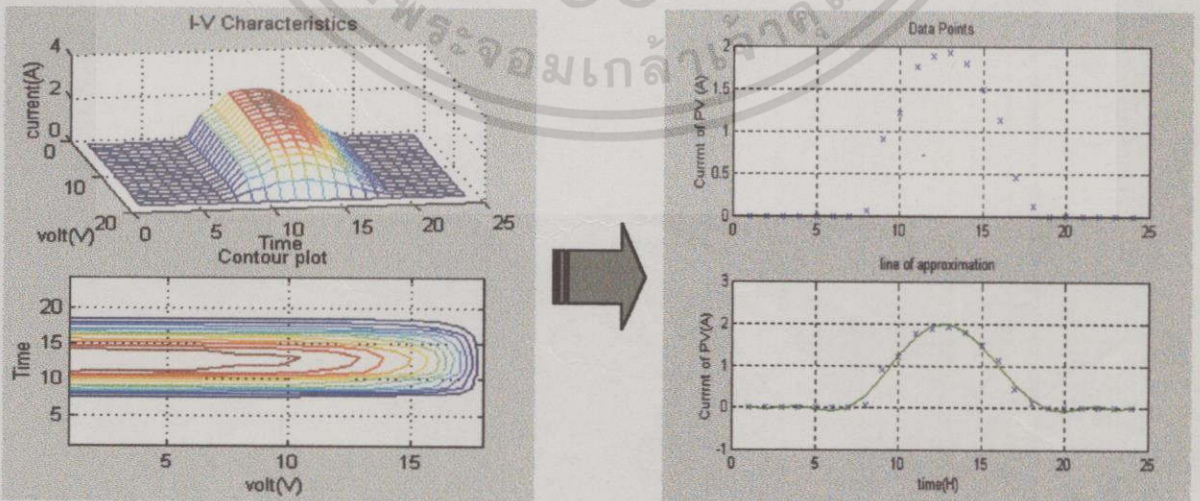
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มุมเอียงแสงต่าง ๆ กันใน 1 วัน

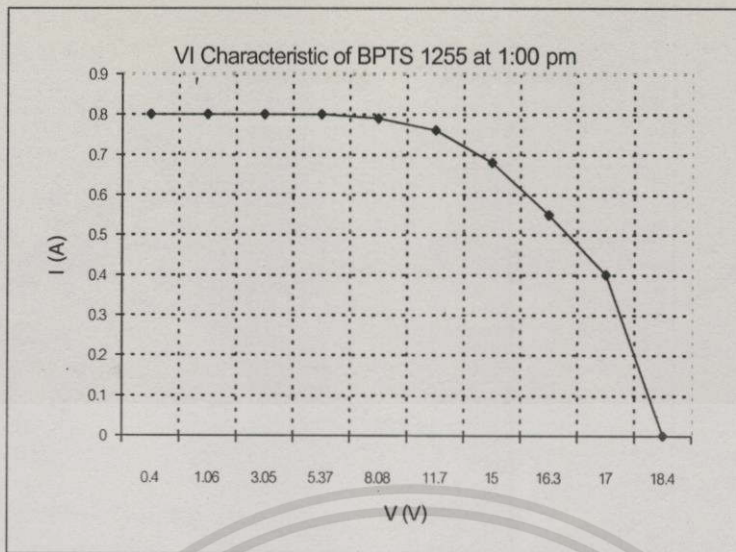
การทดสอบหา V-I Characteristic ของแผงเซลล์ BPTS 1255

ทำการทดสอบเพื่อหา V-I Characteristic ของแผงเซลล์โดยเงื่อนไขการทดสอบคือที่เวลาต่าง ๆ ใน 1 วันการเปลี่ยนแปลงของ V-I Characteristic แตกต่างกันอย่างไ้ ผลการทดลองแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.18 โดยแกน x เป็น แรงดัน (V : volts) แกน y เป็นกระแส (I : current) และ แกน z เป็นเวลาใน 1 วัน สถานที่ทดสอบตั้งระบุง้างต้น เวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบหา V-I Characteristic ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบหา V-I Characteristic ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลา 13.00 น.

จากสมการที่ 2.16 ในบทที่ 2 Fill Factor :
$$FF = \frac{V_{MAX} \cdot I_{MAX}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.19 FF ของแผงที่ทำการทดสอบเท่ากับ
$$\frac{15 \times 0.68}{18.4 \times 0.8} = 0.7$$

ค่า FF บอกถึงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้งาน โดยปกติค่า FF ควรมากกว่า 0.7 ค่านี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของโหลดที่นำมาต่อด้วย

4.4.2 แบตเตอรี่

4.4.2.1 อุปกรณ์ป้องกันและควบคุม

อุปกรณ์ป้องกันและควบคุม (ECU: Electronic control unit) ที่ใช้ได้ถูกกล่าวถึงไปบ้างแล้วในบทที่ 2 ข้อ 2.5.3.2 รุ่นที่ใช้งานในระบบนี้เป็นอุปกรณ์ประกอบที่มากับชุดของแผงเซลล์ BPTS 1255 คุณสมบัติทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ความร้อน ความชื้น ภายในเครื่องควบคุมการทำงานด้วยระบบดิจิทัล การทำงานปรับใช้กับรุ่น 12 V หรือ 24 V อัตโนมัติ ระบบการทำงานครอบคลุมขอบเขตต่อไปนี้

1. การตัดแหล่งประจุออก (HI-CUT OFF)
2. การตัดอุปกรณ์ไฟฟ้าออก (LOW-CUT OFF)
3. ปรับเปลี่ยนใช้ได้ทั้งระบบ 12 V และ 24 V มีสัญญาณแสดงให้รู้วาระบบที่ใช้เป็นแบบใด และการปรับเปลี่ยนเป็นไปโดยอัตโนมัติ
4. เป็นขุมสายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และ อุปกรณ์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 การทำงานของ ECU (Electronic Control Unit)

ECU ที่ใช้ในระบบ สายจากแบตเตอรี่จะถูกต่อเข้ากับตำแหน่งแบตเตอรี่ ไฟแสดงระบบ 12 V หรือ 24 V ติด ต่อแผงเซลล์ที่ตำแหน่ง “Solar Panel” กระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเริ่มประจุเข้าแบตเตอรี่จนแรงดันแบตเตอรี่ถึง 29.6 V ในระบบ 24 V สัญญาณไฟ ตำแหน่ง HI-VOLTAGE ติด ECU จะตัดกระแสไฟจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากการประจุแบตเตอรี่ และเมื่อมีการใช้งานจนแรงดันแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 27 V สัญญาณไฟ HI-VOLTAGE ดับ แผงเซลล์จะถูกต่อการประจุเข้าแบตเตอรี่อีกครั้งโดยอัตโนมัติ

เมื่อต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเข้าที่ตำแหน่ง “ภาระ” ของกล่อง ECU จะมีการใช้งานไปเรื่อย ๆ จนกว่าแรงดันแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 21.6 V สัญญาณไฟตำแหน่ง LO-VOLTAGE ติด ECU จะตัดอุปกรณ์ไฟฟ้าออกจากแหล่งจ่ายคือแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้าจะหยุดทำงานจนกว่าแบตเตอรี่จะได้รับการประจุแรงดันถึง 25 V สัญญาณ LO-VOLTAGE จึงจะดับ ECU จะเชื่อมต่อกับระบบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอีกครั้งโดยอัตโนมัติ

4.5 การออกแบบและการทดสอบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

คุณภาพของแผงเซลล์ที่นำมาใช้งานมีคุณภาพยอมรับได้ การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซนมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.5.1 การหาขนาดความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระของระบบ

การใช้งานนั้นจะมีภาระของเครื่องผลิตไอโซนและ PCU รวมทั้งสิ้น 52 W การใช้งานในขณะที่มีแสงแดดประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน (จากการทดสอบการจ่ายพลังงานของแผง) ดังนั้น ตอนกลางวันต้องการพลังงาน 416 W-h และกำหนดให้กลางคืนทำงานเท่ากับกลางวัน เวลากลางคืน 16 ชั่วโมงต้องการพลังงาน 416 W-h แต่คิดประสิทธิภาพการประจุแบตเตอรี่ (Charging efficiency) ประมาณ 0.85

ดังนั้นพลังงานที่ต้องการสำหรับเวลากลางคืน
$$\left[\frac{416}{0.85} \right] = 489.4 \quad \text{Wh}$$

รวมพลังงานทั้งสิ้นที่ต้องใช้ทั้งวันคือ
$$416 + 489.4 = 905.41 \quad \text{Wh}$$

4.5.2 การหาจำนวนแผงเซลล์ที่จำเป็นต้องใช้

แผงโซลาร์เซลล์ BPTS 1255 ขนาด 55 W ต่อแผง จำนวน 4 แผง ถูกนำมาใช้งาน จากทฤษฎีและการใช้งานแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับประเทศไทย ค่า Daily Insolation เท่ากับ 5 Peak-hr / day ใน 1 วันประมาณพลังงานจากแผงเป็น

$$\text{Daily Charging} = 55 \times 5 \times 4 = 1110 \text{ Wh}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 การหาขนาดแบตเตอรี่

ค่าพลังงานโดยประมาณจากแผงเซลล์ใน 1 วันคือ 1110 Wh หรือเท่ากับ

$$\left[\frac{1110}{24} \right] = 46.25 \text{ Ah}$$

สมมติให้การประจุและจ่ายไฟวันละ 46.25 Ah เป็น 20 % ของความจุแบตเตอรี่ เพื่อให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นั่นคือในแต่ละวันแบตเตอรี่จะมีการประจุและคายประจุวันละประมาณ 20 % ความจุจริงของแบตเตอรี่คือ

$$\text{Capacity of Battery} = \left[\frac{46.25}{0.2} \right] = 231.25 \text{ Ah}$$

สำหรับระบบที่ออกแบบนี้เลือกใช้แบตเตอรี่ 12 V 100 Ah 2 ลูก คือ 200 Ah เนื่องจากการออกแบบให้การจ่ายภาระมีขนาดน้อยกว่าการประจุในแต่ละวันและขนาดแบตเตอรี่จะใหญ่กว่าการประจุมากเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ คือ ในวันที่แดดน้อย แบตจะถูกประจุน้อยกว่าปกติ แต่สามารถจ่ายได้ในเวลากลางคืน โดยไม่ทำให้เกิดการคายประจุมากเกินไป และยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ และค่อย ๆ เติมประจุกลับเข้ามาในวันที่มีแสงอาทิตย์มากอีกด้วย

กรณีไม่มีแดด (เช่นฤดูหนาวที่มีเมฆมากหรือฤดูฝน) มาทำการประจุแบตเตอรี่ได้ สามารถเลือกใช้ไฟบ้าน 220 V 50 Hz ผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ได้

เนื่องจากการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์นี้เป็นการพัฒนาระบบ [8] ดังนั้น ตัวแปรที่พยายามไม่เปลี่ยนแปลงคือ จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้ออกแบบช่วงเวลาการทำงานในเวลากลางคืนเป็น 8 ชั่วโมงเท่ากับกลางวัน แต่ในกรณีพิจารณาการทำงานของระบบ 24 ชั่วโมง คือ กลางวัน 8 ชั่วโมง กลางคืน 16 ชั่วโมงก็สามารถทำได้โดยคำนวณความต้องการพลังงานจากแผงเซลล์ใหม่และคำนวณหาปริมาณแผงเซลล์ที่พอเพียงต่อไป

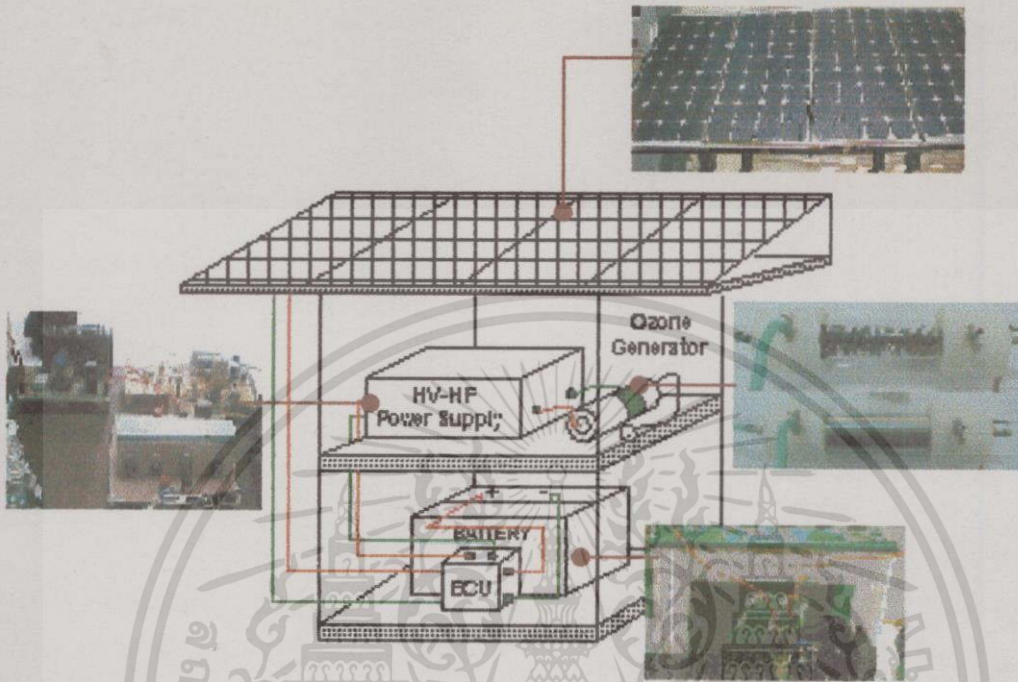
4.6 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ของเครื่องผลิตไอโซนประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วนคือ

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ BPTS 1255 55 วัตต์ 4 แผง
ติดตั้ง เอียงทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ หันไปทางทิศใต้
2. แบตเตอรี่ 12 V 100 Ah 2 ลูก ต่ออนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ภาระของระบบ คือ เครื่องกำเนิดโอโซน 52 วัตต์ 1 เครื่อง (รวมอินเวอร์เตอร์แรงดันสูง ความถี่สูง 3 kV_{พหุ} 40 kHz)



รูปที่ 4.20 ระบบผลิตก๊าซโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบการออกแบบ

5.1 บทนำ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังกล่าวในบทที่ 1 นำไปสู่การออกแบบสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วน บทที่ได้ 3 กล่าวถึงการออกแบบและทดสอบส่วนผลิตก๊าซโอโซน (Ozone generator) โดยอ้างอิงหลักการตามทฤษฎีไฟฟ้าแรงดันสูง ตัวแปรทางไฟฟ้าได้ถูกนำมาศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการแตกตัวของก๊าซเพื่อเป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้น บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและทดสอบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) ซึ่งรวมถึงแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับป้อนให้กับโคโรนาเซลล์ด้วยในการออกแบบกำหนดให้ระบบทำงาน 16 ชั่วโมง ผลการทดลองทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยทฤษฎีในบทที่ 5 นี้ โดยแบ่งส่วนของการวิเคราะห์เป็น 3 ส่วนตามส่วนประกอบโครงสร้างหลักของระบบซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ต่อไป

5.2 เครื่องกำเนิดโอโซน

สมมติฐานขั้นต้นของการผลิตโอโซนคือการพยายามทำให้ก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยใช้พลังงานจากสนามไฟฟ้าเข้าไปกระตุ้นให้พันธะทางเคมีของโมเลกุลแตกออกเพื่อจับตัวกันใหม่เป็นโอโซน โดยระดับพลังงานที่ใช้จะมีอยู่ในย่านหนึ่งซึ่งวิเคราะห์แล้วในข้อ 3.2

ตารางที่ 5.1 ช่วงของพลังงานสำหรับการแปลงอากาศเป็นโอโซน

Energy Band for OZONE Generation from Air	
Minimum	Maximum
1.172 kWh/m ³	1.62 kWh/m ³

5.2.1 การเลือกรูปรางสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.1 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ (mgO₃/hr.) เพิ่มขึ้นตามความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันเมื่อพิจารณาปริมาณโอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงานที่ใช้ (mgO₃/Wh) เมื่อพิจารณาระดับแรงดันของอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าทั้ง 3 แบบเป็นไปตามทฤษฎีคือ อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ระนาบ) สามารถทนแรงดัน (V₀) ไฟฟ้าได้สูงสุดและสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงทนได้ต่ำสุด แต่กระแสที่ไหลในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าสูงสุดเรียกว่ากระแสโคโรนา ดังนั้นปริมาณโอโซนที่เกิดในแก๊ปจึงน่าจะเกิดสัมพันธ์กับการเกิดกระแสโคโรนา (Corona current)

5.2.2 อิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ

จากข้อ 3.4.2.1 ได้ทำการทดสอบอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบโดยพิจารณาลักษณะการจัดเรียงและจำนวนปลายแหลมต่อแผงที่ใช้โดยผลการทดลองที่ได้เกิดจากการทดสอบแผงอิเล็กโตรดปลายแหลม 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมเดี่ยว 210 จุด กับระนาบ

แบบที่ 2 อิเล็กโตรดแบบกลุ่มปลายแหลมกับระนาบความหนาแน่นปลายแหลมต่าง ๆ กัน คือ

จำนวนกลุ่มปลายแหลม 754 กลุ่ม, 1508 กลุ่ม และ 3016 กลุ่ม

การทดลองแบ่งเงื่อนไขที่พิจารณาออกเป็น 4 ข้อ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองในเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 เปรียบเทียบอิเล็กโตรดที่มีการจัดเรียงและความหนาแน่นจุดปลายแหลมต่างกัน

ตารางที่ 5.2 การผลิตโอโซนของอิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบที่แรงดัน 8 kV ระยะแก๊ป 1 cm.

ชนิดอิเล็กโตรด	ปริมาณ โอโซน	ปริมาณ โอโซนต่อจุดต่อวินาที	แรงดันเบรกดาวน์
754 กลุ่มปลายแหลม	1.87 mg/hr	0.69 ug/sec/point	15 kV
1508 กลุ่มปลายแหลม	4.9 mg/hr	0.902 ug/sec/point	14.5 kV
3016 กลุ่มปลายแหลม	7.49 mg/hr	0.61 ug/sec/point	13.5 kV
210 จุดปลายแหลม	5.6 mg/hr	4.762 ug/sec/point	มากกว่า 15 kV

p

จากแนวโน้มผลผลิตโอโซนในรูปที่ 3.6 ที่ค่าเริ่มต้น 8 kV ดังยกมาแสดงในตารางที่ 6.2 พบว่าอิเล็กโตรดที่มีความหนาแน่นจุดปลายแหลมมาก (3016 กลุ่ม) ให้ผลผลิตโอโซนโดยรวมสูงสุด แต่เมื่อคิดเทียบต่อจุดต่อวินาทีในรูปที่ 3.7 แล้ว อิเล็กโตรดแบบจุดเดี่ยว (210 จุด) กลับให้ปริมาณโอโซนมากที่สุด และเมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์พบว่าแบบ 3016 กลุ่มเกิดการเบรกดาวน์ในช่องอากาศก่อน ตามมาด้วย 1508 และ 745 กลุ่ม ในขณะที่ 210 จุดยังคงทนได้ ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากกระแสที่ไหลภายในแก๊ป โอโซนเกิดเนื่องจากกระแสโคโรนาซึ่งมีค่าน้อย ๆ ทำให้โครงสร้างโมเลกุลออกซิเจน (O_2) แตกออกเป็นอะตอมอิสระแล้วรวมเป็นโอโซน (O_3) แต่การจับตัวระหว่างพันธะภายในของโอโซนไม่เสถียร มีแนวโน้มที่จะกลับสู่สภาวะปกติได้ง่าย กรณีที่เกิดการเบรกดาวน์ คือมีกระแสไหลสูงขึ้น ความร้อนที่เกิดจากกระแสที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลนี้ส่งผลให้ไอโซนที่ผลิตได้สลายตัว โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น บนพื้นที่ 13.5×60 cm เท่า ๆ กัน การเพิ่มความหนาแน่นปลายแหลมทำให้ความสม่ำเสมอของหน้าตัดบริเวณปลายแหลมเกิดความเหลื่อมล้ำ และ ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของระดับปลายแหลมส่งผลอย่างมาก ต่อสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายแหลม ดังนั้น 3016 กลุ่มจึงมีผลรวมกระแสภายในแถบสูงสุดจึงเบรกดาวน์ก่อนเพราะมีโอกาสเกิดเบรกดาวน์บางจุดมากที่สุด

เงื่อนไขที่ 2 ความสามารถในการผลิตไอโซนต่อหนึ่งหน่วยพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมกับระนาบ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.8 พบว่าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสัดส่วนจำนวนจุดปลายแหลมต่อพื้นที่มาก ๆ สามารถผลิตไอโซนได้มากแต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อแรงดันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโอกาสที่แต่ละจุดจะเกิดเบรกดาวน์นี้มีมากกว่า ที่แรงดันสูงขึ้นความร้อนเนื่องจากการเบรกดาวน์จึงสูงขึ้น ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้จึงลดลงอย่างรวดเร็ว ต่างจากแบบสัดส่วนจำนวนจุดต่อพื้นที่น้อยๆ เมื่อแรงดันเพิ่มสูงขึ้นผลผลิตไอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงานค่อนข้างสม่ำเสมอว่า

เงื่อนไขที่ 3 ความสัมพันธ์ของระยะช่องว่างอากาศและผลผลิตไอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงาน

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.9 ความสามารถในการรับแรงดันเพิ่มตามระยะห่างของช่องว่างอากาศ (Gap) ที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ช่องว่างอากาศกว้างค่าแรงดันที่ใช้ในการผลิตไอโซนก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ปริมาณไอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงานที่ใช้ลดลงตามระยะช่องว่างอากาศที่เพิ่มขึ้น ที่ช่องว่างอากาศ 0.5 cm. ปริมาณไอโซนต่อหน่วยพลังงานที่ได้ค่อนข้างสูงและลดลงเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น อิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดสูงมากและลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างออกไป การกำหนดช่องอากาศแคบ ๆ คือการกำหนดย่านของค่าสนามไฟฟ้าภายในช่องอากาศที่เพียงพอต่อการผลิตไอโซน แต่เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณปลายแหลมจะเพิ่มอย่างรวดเร็วเท่ากับเป็นการเพิ่มกระแสโคโรนาที่ไหลภายในแถบทำให้ปริมาณไอโซนที่สร้างได้ลดลงและเบรกดาวน์ทะลุผ่านแถบในที่สุด

เงื่อนไขที่ 4 ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าต่างขั้วและผลผลิตไอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงาน

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.10 ขั้วของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีผลต่อการเกิดโคโรนาดิสชาร์จและมีผลต่อการเกิดไอโซนคือ ในทางทฤษฎี กรณีอิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมเป็นกะโหลก ขั้วแรงดันที่ต่างกันมีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัว (V_p) และแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V_b) ซึ่งจากผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีคืออากาศมีค่าความคงทนต่อแรงดันขั้วลบมากกว่าแรงดันขั้วบวกที่ช่องว่างอากาศค่าเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาปริมาณไอโซนที่ผลิตได้พบว่าที่แรงดันเดียวกันขั้วบวกสามารถให้ผลผลิตไอโซนได้สูงกว่า เมื่อพิจารณาเทียบกับทฤษฎีในรูปที่ 2.10 ซึ่งเปรียบเทียบให้

เห็นลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในแกปอิเล็กโตรคปลายแหลมกับระนาบของปลายแหลมข้าววกเทียบกับข้าวลบซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าซึ่งมีผลของประจุค้าง พบว่า ปลายแหลมข้าววกให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงกว่าที่ค่าแรงดันต่ำ ๆ ดังนั้นพลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่แรงดันต่ำ ๆ จึงสูงกว่า แต่ปลายแหลมข้าววกมีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรคควาน์ต่ำกว่าปลายแหลมข้าวลบ ดังนั้นที่แรงดันสูงขึ้นปลายแหลมข้าววกจึงเกิดเบรคควาน์ก่อน

5.2.3 ผลของความถี่แรงดันคลื่นระลอก (Ripple voltage) ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากการทดสอบผลของความถี่แรงดันระลอกที่มีต่อการผลิตโอโซนพบว่าสัญญาณที่มีความถี่ให้ปริมาณโอโซนที่สูงกว่ามาก การเลือกใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการทดสอบ เนื่องจากสำหรับรูปร่างอิเล็กโตรคปลายแหลมมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงข้าวลบสูงสุด และผลของความถี่คลื่นระลอก 15 kHz ให้ปริมาณโอโซนมากกว่าความถี่คลื่นระลอกที่ 50 Hz ถึงเกือบ 10 เท่าที่ค่าพลังงานที่ใช้ 1 หน่วย ดังนั้นถ้าแรงดันทดสอบเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีผลความถี่มากกว่านี้เช่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับน่าจะให้ผลที่ชัดเจนมากขึ้นซึ่งจะกล่าวในผลการทดสอบลำดับต่อไป

แต่จากผลการทดลองในตารางที่ 3.2 พอจะให้แนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของเครื่องได้ เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.1 [8]

$$\text{Ozone Yield} \propto \frac{f\varepsilon V^2}{d} \quad (5.1)$$

เมื่อ f คือ ความถี่, V คือ แรงดัน, ε คือ ค่าคงที่ฉนวน และ d คือ ความหนาฉนวน

จากสมการที่ 5.1 พบว่าความสามารถในการผลิตโอโซนแปรค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่, ค่าคงที่ฉนวน และค่าแรงดันยกกำลังสอง แต่ในกระบวนการผลิตไม่สามารถทำนายผลผลิตจากตัวแปรเหล่านี้ได้ บอกได้เพียงแนวโน้มการเพิ่มผลผลิตเท่านั้น เพราะปริมาณผลผลิตที่ได้สัมพันธ์กับปริมาณการสลายที่จะเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากปัจจัยแวดล้อมรวมทั้งปริมาณ โอโซนที่มีความหนาแน่นสูงเกินไปด้วยดังกล่าวในบทที่ 2 สมการที่ 2.7 และ 2.8

สรุป อิเล็กโตรคปลายแหลมกับระนาบ

สำหรับโครงสร้างอิเล็กโตรคแบบระนาบที่มีกะโหลกเป็นกลุ่มปลายแหลมและระนาบเป็นกราวด์มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

- ข้อดี**
1. แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดต่ำ (V_i : Ignition voltage)
 2. ให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณปลายแหลมสูงมากที่แรงดันที่ใช้ไม่สูงนัก
 3. การเพิ่มผลผลิตโอโซนทำได้โดยการเพิ่มจำนวนจุดที่เกิดโคโรนา

ข้อเสีย 1. การสร้างอิเล็กโตรคให้ระนาบปลายแหลมมีระดับเดียวกันทำได้ยากสำหรับกรณีเริ่มศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โอกาสการเกิดเบรกดาวนั้บางจุดกรณีที่มีความหนาแน่นจำนวนจุดมาก ๆ เป็นไปได้สูง
3. การลดลงของสนามไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วมาก บริเวณปริมาตรประสิทธิผล (Effective volume) มีจำกัดเพียงบริเวณใกล้เคียงแหลมเท่านั้น
4. ลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรดไม่สามารถหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในแก๊ปที่ถูกต้องได้ง่าย ๆ การศึกษากลไกการเกิดกับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงทำได้ยาก

ข้อสังเกต

จากการทดสอบเรื่องความถี่รูปสัญญาณที่ใช้พบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมักไม่กล่าวถึงเรื่องความถี่ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปสัญญาณที่ความถี่แรงดันระลอก 50 Hz กับ 15 kHz พบว่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้แบบสัญญาณความถี่สูงกว่าเพิ่มขึ้นกว่า 10 เท่า ดังนั้น ถ้ากรณีไฟฟ้ากระแสสลับที่มีผลความถี่ชัดเจนกว่า น่าจะส่งผลต่อการผลิตโอโซนเป็นอย่างมาก สมมติฐานขั้นต่อไปของการทดสอบคือการลดระดับแรงดันที่จำเป็นต้องใช้ลง โดยใช้ผลของความถี่เข้าช่วย

5.2.4 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม

การออกแบบอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจากหลักการที่นำเสนอใน ข้อ 3.2 คือ การแปลงรูปปริมาตรทางเคมี (mol) เป็นปริมาตรในหน่วย SI คือ ลูกบาศก์เมตร (m^3) ทำให้สามารถหาพลังงานที่จำเป็นต้องใช้สำหรับปริมาตรดังกล่าวได้ ขั้นตอนการออกแบบอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีดังนี้

5.2.4.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Optimum dimension design)

จากผลการคำนวณเพื่อออกแบบมิติของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมที่ใช้ทดสอบ เริ่มพิจารณาจากทฤษฎีการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Optimum dimension) และทำการเลือกย่านรัศมีที่ค่าแรงดันเริ่มต้นแตกตัวต่ำ และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ๆ ซึ่งจะทำให้โอกาสภายในแก๊ปเปลี่ยนสภาพได้ง่ายที่สุด โดยหลบย่านของมิติที่เหมาะสมเนื่องจากเกิดโคโรนาชอก ข้อกำหนดของการออกแบบคือ รัศมีอิเล็กโทรดวงนอกมีค่าเฉพาะเป็นขนาดท่อสแตนเลสทางอุตสาหกรรม คือ 1.42 และ 2.34 cm. ดังแสดงในภาคผนวก ก-1 จากผลการคำนวณในรูปที่ 3.12 และ 3.13 พบว่าขนาดของอิเล็กโทรดวงนอกที่เพิ่มขึ้นทำให้ย่านการออกแบบที่เกิดโคโรนาเป็นไปได้ยากขึ้น นั่นคือเข้าสู่ความเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากขึ้น (V_0 มีค่าสูงขึ้น) และจากผลการคำนวณในแต่ละรูปพบว่าย่าน r_1 ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโอโซนมี 2 กรณี กรณีแรกคือ r_1 เล็กมาก ๆ ในลักษณะเส้นลวดกับทรงกระบอก (wire-to-cylinder) กรณีที่ 2 คือย่านที่ r_1 ค่อนข้างใหญ่เกือบเท่ากับ r_2 คือรูปทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (Coaxial cylindrical) ชั้นของแก๊ปอากาศบาง ๆ

5.2.4.2 ผลการเปรียบเทียบอิเล็กโทรดภายในแบบเส้นกับแบบทรงกระบอก

จากผลการคำนวณดังกล่าวในข้อ 3.4.3.1 โดยทำการเลือกเอาย่านที่เป็นอิเล็กโทรดเส้นลวดกับทรงกระบอก (Wire-to-cylinder) และย่านที่เป็นทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial cylindrical) ที่ค่า

สัดส่วน $\frac{r_1}{r_2}$ เข้าใกล้ 1 มาทดสอบดูการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในแก๊สที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เป็นทรงกระบอกแกนร่วมเพิ่มการทดสอบคุณสมบัติช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดแบบฉนวน 2 ชั้น ด้วย ผลการคำนวณในรูปที่ 3.14 เห็นได้ชัดเจนว่าสำหรับอิเล็กโทรดแบบเส้นลวดกับทรงกระบอกนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดที่ผิวมันสูงมากแล้วลดลงตามระยะทางที่ห่างออกไปแต่การลดลงเป็นไปอย่างรวดเร็วมากตามลักษณะของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 3.15 และ 3.16 เป็นอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมที่เปรียบเทียบกับช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดชนิดที่เป็นฉนวนอากาศชั้นเดียวกับชนิดที่เป็นฉนวนของแข็งและอากาศชั้นระหว่างแฉโนดกับคะโรด ฉนวนของแข็งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงกว่าอากาศประมาณ 6 เท่า พบว่ากรณีฉนวนชั้นเดียวยานความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึงต่ำสุดแตกต่างกันประมาณ 10 kV/cm. โดยแบบที่เป็นฉนวน 2 ชั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ในย่าน 3 kV/cm โดยประมาณเท่านั้น แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าส่วนที่ตกคร่อมช่องว่างอากาศสูงกว่าแบบฉนวนชั้นเดียวมาก ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตกคร่อมอากาศที่ได้จากอิเล็กโทรดทั้ง 2 ที่ออกแบบทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าค่าเดียวกันคือ

อิเล็กโทรด I	อิเล็กโทรดฉนวนชั้นเดียว ($r_1 = 1.9 \text{ cm.}, r_2 = 2.34 \text{ cm.}$)
	$E_{\max} = 13 \text{ kV/cm}$ $E_{\min} = 10 \text{ kV/cm}$
	อิเล็กโทรดฉนวนสองชั้น ($r_1 = 1.9 \text{ cm.}, r_2 = 2.1 \text{ cm.}, r_3 = 2.34 \text{ cm.}$)
	$E_{\max} = 19 \text{ kV/cm}$ $E_{\min} = 17 \text{ kV/cm}$
อิเล็กโทรด II	อิเล็กโทรดฉนวนชั้นเดียว ($r_1 = 1.09 \text{ cm.}, r_2 = 1.42 \text{ cm.}$)
	$E_{\max} = 17 \text{ kV/cm}$ $E_{\min} = 13 \text{ kV/cm}$
	อิเล็กโทรดฉนวนสองชั้น ($r_1 = 1.09 \text{ cm.}, r_2 = 1.22 \text{ cm.}, r_3 = 1.42 \text{ cm.}$)
	$E_{\max} = 24 \text{ kV/cm}$ $E_{\min} = 20 \text{ kV/cm}$

ผลของการเพิ่มขึ้นของฉนวนของแข็งกันเข้าไปภายในช่องว่างอากาศทำให้ปริมาตรอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าลดลง แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมสูงขึ้นมาก

5.2.4.3 วิเคราะห์ที่มาของการออกแบบและการออกแบบกับการผลิตไอโซน

จากรูปที่ 3.17 และ 3.18 ซึ่งเป็นมิติของอิเล็กโทรดที่ออกแบบในเงื่อนไขการทดสอบที่เป็นแบบอิเล็กโทรดรูปทรงกระบอกแกนร่วมโดยอ้างอิงที่มาของการออกแบบจากเรื่องของพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอโซน ซึ่งเป็นพลังงานในการสลายพันธะเคมีของโมเลกุลออกซิเจนคือ 493.2-682.8 kJ/mol หรือ 1.172-1.62 kWh/m³ และเป็นพลังงานที่ใช้ต่อปริมาตรอากาศ 1 m³ อิเล็กโทรดที่ออกแบบมี 2 ตัวอย่างโดยทั้ง 2 ตัวอย่างถูกออกแบบให้รับพลังงานในย่านพลังงานที่กำหนดดังกล่าวโดยคิดต่อปริมาตรอากาศที่อยู่ภายในแก๊เปลโคโรด จากพลังงานทางเคมีจะถูกแปลงเป็นพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าเพื่อออกแบบมิติของรูปร่างอิเล็กโทรดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโตรด I ปริมาตรอากาศที่ใช้ในการผลิตโอโซน 40.17 cm^3

ย่านพลังงานในการผลิตโอโซนต่อปริมาตร $0.047 - 0.065 \text{ W-h}$

ย่านสนามไฟฟ้า $16.257 - 19.118 \text{ kV/cm}$

ออกแบบ รัศมีอิเล็กโตรดวงใน 1.9 cm.

รัศมีวงนอกของฉนวนแข็ง 2.1 cm.

รัศมีอิเล็กโตรดวงนอก (ขนาดอุตสาหกรรม) 2.34 cm.

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเริ่มเกิด 4.376 kV ย่านแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามทฤษฎีคำนวณ

จากพลังงานคือ $4.376 - 5.13 \text{ kV}$

อิเล็กโตรด II ปริมาตรอากาศที่ใช้ในการผลิตโอโซน 19.9 cm^3

ย่านพลังงานในการผลิตโอโซนต่อปริมาตร $0.023 - 0.032 \text{ W-h}$

ย่านสนามไฟฟ้า $16.158 - 19.058 \text{ kV/cm}$

ออกแบบ รัศมีอิเล็กโตรดวงใน 1.09 cm.

รัศมีวงนอกของฉนวนแข็ง 1.22 cm.

รัศมีอิเล็กโตรดวงนอก (ขนาดอุตสาหกรรม) 1.42 cm.

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเริ่มเกิด 3.438 kV ย่านแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามทฤษฎีคำนวณ

ตามพลังงานคือ $3.438 - 4.005 \text{ kV}$

หมายเหตุ วัตถุประสงค์การออกแบบอิเล็กโตรด I และ II แตกต่างกันเนื่องจากความจำกัดของฉนวนของแข็งที่จะนำมาใช้ อิเล็กโตรด I ออกแบบเพื่อศึกษาปรากฏการณ์พื้นฐานของพลังงานกับการเกิดโอโซน ฉนวนที่ใช้คือ PVC ใช้งานทดสอบที่ความถี่แรงดันทดสอบ 50 Hz ส่วน อิเล็กโตรด II ฉนวนเป็นแก้ว ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูงใช้งานที่ความถี่สูงได้จะนำมาทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

5.2.5 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างภายในอิเล็กโตรดด้วย Finite element method :FEM

FEM (Finite element method) ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดโดยการป้อนข้อมูลเพื่อกำหนดขอบเขตปัญหาที่พิจารณาและทำการแบ่งขอบเขตออกเป็นอิลิเมนต์สามเหลี่ยมดังแสดงในรูป 3.20 ผลการคำนวณจะถูกแสดงให้เห็นภาพพจน์ในรูปของกราฟฟิคดังแสดงในรูปที่ 3.21-3.23 และแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (V), เส้นสมศักย์ และ ค่าสนามไฟฟ้า (E) เพื่อ ช่วยบอกแนวโน้มของค่าตัวแปรเหล่านี้ภายในบริเวณฉนวนที่พิจารณา FEM ช่วยในการออกแบบชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการคำนวณและแสดงผลพัทธ์ของการออกแบบในกรณีที่มีการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหุ่นเวลาในการทดสอบ ผลการทำงานของโปรแกรมตามเงื่อนไขต่าง ๆ

มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ในอเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 1 และ 2 ชั้น

1. การกระจายของระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอเล็กโตรด

FEM ช่วยแสดงให้เห็นความแตกต่างของการกระจายแรงดันภายในช่องว่างระหว่างอเล็กโตรดอย่างชัดเจน รูปที่ 3.21 และ 3.22 เป็นการวิเคราะห์การกระจายระดับแรงดันภายในช่องว่างระหว่างอเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมโดย รูปที่ 3.21 เป็นโครงสร้างของอเล็กโตรด I ($r_{in} = 1.9, r_{out} = 2.34$ cm) ส่วนในรูปที่ 3.22 แสดงโครงสร้างอเล็กโตรด II ($r_{in} = 1.09, r_{out} = 1.42$ cm)

อเล็กโตรด I แรงดันทดสอบ 5.14 kV (ค่าแรงดันขอบบนที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตไอโซน)

อเล็กโตรด II แรงดันทดสอบ 4.00 kV (ค่าแรงดันขอบบนที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตไอโซน)

ผลการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 3.21 – 3.22 สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การวิเคราะห์ระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอเล็กโตรด

อเล็กโตรด I ($r_{in} = 1.9$ cm $r_{out} = 2.34$ cm)				อเล็กโตรด II ($r_{in} = 1.09$ cm $r_{out} = 1.42$ cm)			
ฉนวนชั้นเดียว (อากาศหนา 0.44 cm)		ฉนวน 2 ชั้น (พีวีซี 0.2 + อากาศ 0.24 cm)		ฉนวนชั้นเดียว (อากาศหนา 0.13 cm)		ฉนวน 2 ชั้น (แก้ว 0.2 + อากาศ 0.2 cm)	
V (kV)	E (kV/cm)	V (kV)	E (kV/cm)	V (kV)	E (kV/cm)	V (kV)	E (kV/cm)
5.14 – 0	12.8 – 10.6	5.14 – 0	(S) 4.17 – 3.85 (G) 18.9 – 17.3	4 – 0	13.77 – 10.7	4 – 0	(S) 2.745 – 2.504 (G) 19.65 – 17.05

หมายเหตุ

* คือ ลักษณะการกระจายของเส้นสมศักย์แตกต่างจากปกติ

** คือ สนามไฟฟ้าแบ่งย่านการกระจายตามแนวรัศมีออกเป็น 2 ย่าน (S) คือ ฉนวนของแข็ง (G) คือ ฉนวนก๊าซ

จากตารางที่ 5.3 ลักษณะโครงสร้างแบบฉนวนชั้นเดียวให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าขีดความต้องการสำหรับการสร้างไอโซน แต่เมื่อแทรกฉนวนของแข็งเข้าไปคั่นโดยให้อากาศอยู่ชิดทางด้านกรวดพบว่าสามารถยกระดับค่า E ให้สูงขึ้นได้ จากสมการที่ 3.3 คือ

$$E_{rx} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 V}{r_x \epsilon_x \left[\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ฉนวนชั้นที่ 1 คือของแข็ง (ϵ_1) ถ้า r_x ที่พิจารณาอยู่ในย่านของแข็ง แฟกเตอร์ตัวคูณสมการจะคือค่า ϵ_2 ซึ่งเป็นอากาศ ยิ่ง $\epsilon_2 \ll \epsilon_1$ ค่า E ที่ตกคร่อมอากาศก็จะยิ่งสูงมากเมื่อเทียบกับ E ที่ตกคร่อมในฉนวนของแข็ง สังเกตได้จากค่า E^* ของอิเล็กโตรดทั้ง I และ II สัญลักษณ์ (S) คือส่วนฉนวนของแข็ง และ (G) คือส่วนอากาศตามลำดับ สนามไฟฟ้าในแถบอากาศสูงพอสำหรับการผลิตโอโซน

5.2.6 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดด้วย FEM

FEM ช่วยทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดภายในแถบเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางตัวไปเช่นผลการทดลองรูปที่ 3.24 การเปลี่ยนความหนาฉนวนของแข็งทำให้ค่าความเครียดสนามที่ตกคร่อมส่วนอากาศเพิ่มขึ้น หรือรูปที่ 3.25 การเปลี่ยนชนิดของฉนวนของแข็งซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงไป ถ้าฉนวนของแข็งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ) สูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมอากาศเพิ่มขึ้นส่วนที่ตกคร่อมฉนวนของแข็งจะลดลง แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงไม่มากเท่าใดนัก

5.2.7 การดิสชาร์จภายในช่องว่างที่คั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบฉนวนชั้นเดียวและฉนวน 2 ชั้น

จากการทดสอบเพื่อศึกษากลไกเบื้องต้นของการเกิดโอโซน ได้ทำการทดสอบโดยใช้อิเล็กโตรด I รัศมีทรงกระบอกวงใน 1.9 cm รัศมีทรงกระบอกวงนอก 2.34 cm ฉนวนของแข็งที่ใช้คือ PVC ผลการทดลองในตารางที่ 3.4 คือผลการดิสชาร์จของฉนวนอากาศชั้นเดียว

ในทางทฤษฎี การคำนวณพลังงานทางเคมีในข้อ 3.2

ย่านพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ 493.2 kJ/mol – 682.8 kJ/mol หรือคือ 1,172 kWh/m³ - 1.62 kWh/m³

และเมื่อนำมาออกแบบในข้อ 3.4.3.4 อิเล็กโตรด I

ย่านแรงดันที่อยู่ในย่านการผลิตคือ 4.362 kV-5.135 kV

ซึ่งคือย่านสนามไฟฟ้าขอบล่าง 16.215 kV/cm ถึงขอบบน 19.088 kV/cm

ในทางปฏิบัติ ผลการทดลองในตารางที่ 3.4

1. ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 4 kV จำนวนย่านสนามไฟฟ้าได้ 14.29 – 11.606 kV/cm ไม่ถึงขอบล่างของแถบพลังงานการผลิตโอโซนดังนั้นไม่ควรตรวจพบโอโซน และจากผลการทดลองก็ไม่พบว่ามีโอโซนเกิดขึ้น
2. ที่แรงดัน 5 kV จำนวนย่านสนามไฟฟ้าได้ 17.8 – 14.4 kV/cm ค่า E_{max} ที่ผิวอิเล็กโตรดวงในสูงกว่าขอบล่างของแถบพลังงานในทางทฤษฎีแต่ไม่ถึงขอบบน แต่อย่างไรก็ตามต้องมีอากาศบางส่วนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าและกลายเป็นโอโซนบ้างแล้ว และจากผลการทดลองตรวจพบว่ามีโอโซนเกิดขึ้น 0.72 mgO₃/hr และผลิตได้เพิ่มขึ้นที่ 5.38 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่แรงดัน 5.8 kV การทดลองพบว่าอากาศในช่องเกิดการเบรกดาวนั้ เมื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้าภายในแกปคือสูงสุด 20.7 kV/cm ต่ำสุด 16.8 kV/cm ความกว้างแกป 4.4 mm. จากสมการของพีค (Peek's formula) ใน [1]

$$E_i = E_b = E_C \left[1 + \frac{C'}{\sqrt{r_1}} \right] \quad (5.2)$$

เมื่อ r_1 เป็น cm, $E_C = 31$ kV/cm และ $C' = 0.308$ cm^{1/2}

ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 5.8 kV นี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเกิดการตัดเนื่องจากการทำงานของรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน นั่นคือมีกระแสไหลภายในช่องว่างอากาศสูงมาก

กรณีจนวน 2 ชั้นผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5 ช่องว่างอากาศบางลงแต่ทนแรงดันได้สูงขึ้นคือทนได้ถึง 14 kV และยังสามารถทนต่อไปได้อีก ทั้งนี้เนื่องจากจนวนของแข็งที่ซ้อนกันระหว่างอากาศกับกะโหลกช่วยให้การเบรกดาวนั้เกิดได้ยากขึ้น จนวนอากาศมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตกคร่อมสูงมากเมื่อเทียบกับแบบจนวนชั้นเดียว อากาศได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเต็มที่ได้จากปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ พบว่าผลผลิตโอโซนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเต็มขีดความสามารถการวัด แต่แนวโน้มน้อตราส่วนการเพิ่มผลผลิตเริ่มลดลงลดลงสังเกตได้จากที่ 13 kV ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้เพิ่มจากเดิมที่ 12 kV ถึง 771.84 mg/hr แต่ที่ 14 kV สัดส่วนการเพิ่มขึ้นจาก 13 kV ลดลงเหลือ 154.08 mg/hr คาดว่าถ้าทดสอบต่อไปจะลดลงกว่านี้เนื่องจากความร้อนภายในช่องว่างอากาศเพิ่มสูงขึ้นมากเกินไป

5.2.8 ผลการทดสอบการเปลี่ยนจนวนของแข็ง

จากการวัดค่า C ของจนวนของแข็งทั้ง 3 ด้วย Tettex AG2805 CtanO meter สามารถหาค่า E_r ของจนวนทั้ง 3 ได้ อยู่ในย่านที่กำหนดในทางทฤษฎีคือ PVC = 5, Mica = 6 และ แก้ว = 8 จนวนทั้ง 3 มีขีดจำกัดการทดสอบที่ขนาด ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายนักแต่สามารถออกแบบให้พอเหมาะกับอิเล็กทรอนิกส์ให้อยู่ในย่านที่ต้องการได้ การทดสอบทำโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่ 50 Hz ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.29 พบว่า

อิเล็กทรอนิกส์ a) เบรกดาวนั้ก่อนเนื่องจากเป็นจนวนอากาศชั้นเดียว

อิเล็กทรอนิกส์ b) ให้ปริมาณโอโซนมาก แต่ที่แรงดันค่าเดียวกันสนามไฟฟ้าเนื่องจากค่า E_r ของ PVC ทำให้เกิดโอโซนน้อยกว่า ไม่น่ามาก

อิเล็กทรอนิกส์ c) ให้ปริมาณโอโซนสูงสุดเนื่องจาก E_r ของจนวนไมก้ามีค่ามากที่สุด

อิเล็กทรอนิกส์ d) ให้ปริมาณโอโซนไม่มากนักแม้จะเป็นจนวนไมก้า + อากาศ ก็ตาม แต่เมื่อเทียบกับอิเล็กทรอนิกส์ c) ซึ่งให้ปริมาณโอโซนสูงสุดและสูงจนเกินขีดความสามารถการวัด ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของความกว้างแกปแคบเกินไป

ถึงแม้ว่าจาก FEM ผลการคำนวณในรูปที่ 3.25 ϵ_r จะมีผลต่อสนามไฟฟ้าน้อยมาก แต่สนามที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยนี้มีผลอย่างมากต่อการผลิตโอโซนที่แรงดันค่าเดียวกันเมื่อเทียบกับ PVC หรือ ฉนวนของแข็งชนิดอื่นที่มีค่า ϵ_r ต่ำกว่า

5.2.9 ผลการทดสอบผลของชนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ต่อความสามารถในการผลิตโอโซน

ชนิดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้งานมีผลอย่างมากต่อการผลิตดังแสดงในผลการทดลองในรูปที่ 3.32 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับเริ่มเกิดโอโซนที่ 4 kV และให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงที่ประมาณ 14 kV ผลผลิตที่ได้ก็มากเกินขีดความสามารถการวัดคือเกือบ 2 g/hr ในขณะที่ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มตรวจพบโอโซนที่ 20 kV แต่เมื่อเพิ่มจนถึง 35 kV ปริมาณโอโซนที่วัดได้ก็ยังคงน้อยมาก

สรุป อิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม จากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดสอบสอดคล้องกันในเรื่องการเกิดโอโซนเนื่องจากพลังงานในสนามไฟฟ้าถึงย่านพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ ซึ่งย่านพลังงานดังกล่าวคำนวณมาจากพลังงานพันธะทางเคมี ย่านพลังงานทางเคมีที่จำเป็นสำหรับการผลิตโอโซน คือ 493.2 kJ/mol - 682.8 kJ/mol หรือย่านพลังงานทางไฟฟ้าคือ 1.172 - 1.62 kWh/m³ การนำชั้นฉนวนของแข็งมาใช้ช่วยเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศให้สูงขึ้น ทำให้พลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศสูง การเกิดโอโซนเพิ่มขึ้นและนอกจากนี้ ช่องว่างอากาศยังทนต่อแรงดันเบรกดาวน์มากขึ้นด้วย แต่นอกจากเรื่องของสนามไฟฟ้าแล้ว สำหรับอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วมเรื่องชนิดสัญญาณก็มีผลด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับเริ่มเกิดโอโซนที่ 4 kV ในขณะที่ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงเริ่มเกิดโอโซนที่ 20 kV ดังนั้น นอกจากพลังงานจากสนามไฟฟ้าจะต้องสูงเพียงพอแล้วผลของความถี่รูปสัญญาณยังเป็นแฟกเตอร์สำคัญทำให้โมเลกุลของเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างด้วยซึ่งสนับสนุนผลการทดลองที่ 3 ตารางที่ 3.2 คือผลของความถี่รูปสัญญาณต่อความสามารถในการผลิตโอโซนของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง ในทางทฤษฎีความถี่ของแรงเคลื่อนที่ใช้มีผลทำให้ความคงทนของฉนวนลดลง

5.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโอโซน

จากข้อ 5.2 ได้ศึกษาผลของปลายแหลมกับระนาบพบว่าข้อดีของอิเล็กโตรดปลายแหลมคือมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณปลายแหลมสูงมากทำให้ค่าแรงดันเริ่มต้นในการแตกตัวของอากาศต่ำ แต่การลดลงของสนามไฟฟ้าเป็นไปอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างออกไปจนถึงกราวด์ นอกจากนี้ การควบคุมให้ความยาวของปลายแหลมเท่า ๆ กันทำได้ยาก ส่วนอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกที่มีฉนวนของแข็งคั่นระหว่างอากาศกับคะโธดให้ผลการผลิตที่น่าพอใจ แต่ถ้าสามารถนำฉนวนที่มีค่า ϵ_r สูงกว่า

Mica มาใช้งานประกอบกับศึกษาผลของความถี่สูงร่วมด้วยก็จะทำให้การเพิ่มผลผลิตโอโซนมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น อิเล็กโตรด II จึงถูกนำมาทดสอบในการเพิ่มประสิทธิภาพนี้

“อิเล็กโตรด II” เป็นการออกแบบร่วมกันระหว่างอิเล็กโตรดปลายแหลมกับอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น วัตถุประสงค์การทำงานต้องการทดสอบการผลิตที่ความถี่สูง ฉนวนที่เลือกใช้จึงเลือกนำแก้วมาใช้งาน โดยประยุกต์ใช้หลอดแก้วที่ใช้ในการทดลองทางวิทยาศาสตร์มาตัดทำยอกให้มีความยาว 14 cm โดยประมาณ เนื้อฉนวนเป็นแก้ว Pyrex ค่า ϵ_r วัดจาก C-tan δ meter ได้ 8 (สูงกว่า Mica และ PVC) ะโหดเป็นแปลงทองเหลืองรัศมี 1.09 cm (ทองเหลืองไม่ทำปฏิกิริยากับโอโซน) แอนโอดเป็นสแตนเลส โครงสร้างที่ออกแบบแสดงในรูป 3.1 และรูปถ่ายแสดงในรูปที่ 3.37 ปลายทองเหลืองจะถูกบังคับให้ยาว 1.09 cm ด้วยรัศมีวงในของแก้วไปโดยปริยาย แก้วหนา 0.13 cm ช่องว่างอากาศกว้าง 0.2 cm

5.3.1 การทดสอบผลของความถี่ของรูปสัญญาณต่อการผลิตโอโซน

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.34 ก็ทดสอบความสามารถการผลิตโอโซนที่ความถี่ 50 Hz แรงดันที่ 2 kV (หรือ 2.8 kV_p) ตรวจพบโอโซน 1.82 mg/hr สาเหตุเพราะปลายแหลมของคะโหดทำให้ค่าแรงดันเริ่มแตกตัวของอากาศต่ำลง เนื่องจากในตอนต้นข้อ 3.4.3.4 ได้ทำการคำนวณหาค่าแรงดันเริ่มต้นที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตโอโซนของอิเล็กโตรดทรงกระบอก (อิเล็กโตรด II) ไว้ที่ 3.4 kV_p นอกจากนี้ที่ความถี่ 50 Hz ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ค่อนข้างสูงกว่าผลผลิตของอิเล็กโตรด I มาก ที่แรงดันใกล้เคียงกันผลผลิตของอิเล็กโตรด II สูงกว่าอิเล็กโตรด I ประมาณ 2 เท่า

เมื่อทดสอบเทียบผลความถี่ต่อการผลิตโอโซน โดยอิเล็กโตรด II นี้ถูกนำไปทดสอบกับแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูงปรับค่าได้ 20 kHz – 100 kHz พบว่าผลการผลิตโอโซนดังแสดงในรูปที่ 3.35 ให้ปริมาณสูงมากที่แรงดันต่ำกว่าปกติ จิตจำกัดของแหล่งจ่ายคือหม้อแปลงแรงดันสูงที่ใช้งาน แรงดันสูงสุดเกิดที่ 20-40 kHz คือ ประมาณ 6 kV_p ส่วนแรงดันต่ำสุดเกิดที่ 90-100 kHz ดังนั้นการเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตจึงพิจารณาเป็นผลผลิตต่อหน่วยพลังงานที่ใช้ แต่จากรูปที่ 3.37 พอบอกได้ว่า ปริมาณผลผลิตสูงสุดที่เกิดที่ 40 kHz นั้น เกิดเนื่องจากแรงดันที่ใช้สูงสุดในขณะที่กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าที่ระดับแรงดันค่าเดียวกันที่ความถี่อื่น ๆ และปริมาณผลผลิตต่ำสุดเกิดที่ 100 kHz เกิดเนื่องจากแรงดันที่ใช้ต่ำสุดและกำลังไฟฟ้าที่ใช้สูงมาก

เมื่อพิจารณาคูสมบัติส่วนสร้างแรงดันสูงคือหม้อแปลงปลายแบนที่นำมาใช้งานเป็นการประยุกต์ใช้จากวงจรโทรทัศน์ ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการทำงานของโทรทัศน์คือ 20 kHz โดยประมาณ การนำมาประยุกต์ใช้พบว่าแนวโน้มการเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น แรงดันทางเอาต์พุตตกลง ย่านที่ให้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดคือ 20-40 kHz จึงให้ปริมาณโอโซนที่เกิดจากพลังงานในสนามไฟฟ้าสูงด้วย หลังจากนั้นการคงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ 6 kV ทำได้โดยการเพิ่มควิตซ์ไจเกลเพื่อเพิ่มแรงดันอินพุตหม้อแปลง ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ด้านอินพุตค่อนข้างสูง จนถึง 90 kHz ค่าควิตซ์ไจเกลของสัญญาณไดรฟ์

วงจรบวสต์เป็น 70 % การเพิ่มขึ้นมากกว่านี้จะเป็นอันตรายต่อวงจรได้ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 90 kHz และ 100 kHz จึงต่ำกว่า 6 kV_p ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้น้อย

เมื่อทดสอบความสามารถการผลิตโอโซนต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ใช้พบว่าปริมาณสูงสุดเกิดที่ 40 kHz คือ 23 mgO₃/Wh โดยประมาณ

สรุป ผลของความถี่รูปสัญญาณต่อการผลิตโอโซน

จากผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าความถี่รูปสัญญาณมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการผลิตโอโซนของเครื่อง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความถี่ที่ทำให้ความคงทนของฉนวนอากาศลดลง ดังกล่าวในสมการที่ 5.1 แล้ว แต่ในการเปลี่ยนแปลงย่านความถี่เพียงเล็กน้อยเช่นย่าน 20-40 kHz ผลการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นไม่มากแทบไม่เปลี่ยนแปลง แต่ที่ความถี่สูงขึ้นผลผลิตโอโซนต่อหน่วยพลังงานลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจร ซึ่งเป็นข้อบกพร่องของวงจร วงจรที่ออกแบบนี้จึงเหมาะจะทำงานที่ 20-40 kHz เท่านั้น

5.4 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์, แบตเตอรี่ และ อินเวอร์เตอร์ กรณีการออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องผลิตโอโซนเป็นอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูง

5.4.1 แหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูง

ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงถูกออกแบบเพื่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ดังนั้นแรงดันอินพุตจึงเป็น 24 V เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้าแรงดันสูงต่อไป ส่วนแหล่งจ่ายสำรองคือ ดีซีคอนเวอร์เตอร์แปลงไฟบ้าน 220 V 50 Hz เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V แหล่งจ่ายแรงดันสูงประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อินเวอร์เตอร์ กับ หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ซึ่งประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคของ โทรทัศน์ Nokia TFAT 1109 F 302/5 ในส่วนอินเวอร์เตอร์ปรับความถี่ได้ 20 kHz – 100 kHz

อินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย บวสต์คอนเวอร์เตอร์แปลงแรงดัน 24 โวลต์เป็น 100 โวลต์ และฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ การทดลองที่ 1 ในข้อ 4.3.2.1 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยทดสอบกับภาระ 50 วัตต์โดยประมาณพบว่าประสิทธิภาพอยู่ในย่าน 80 %

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง หม้อแปลงฟลายแบคถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นข้อจำกัดที่สำคัญของระบบที่ออกแบบเนื่องจากความถี่ใช้งานของฟลายแบคกับความถี่ของแหล่งจ่ายที่ต้องการค่อนข้างแตกต่างกันมาก

จากรูปที่ 3.35 และ 3.36 พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตโอโซนสูงสุด (mgO_3/Wh) เกิดที่ความถี่ 40 kHz เนื่องจากให้ปริมาณโอโซนที่ผลิตสูงสุดและยังให้ปริมาณโอโซนต่อหน่วยพลังงานสูงสุดอีกด้วย แรงดันที่ใช้ 6 kV_p เทียบกับแรงดัน 6.7 kV ที่ความถี่ 50 Hz แล้ว สัญญาณความถี่สูง 40 kHz ให้ผลผลิตโอโซนสูงกว่ามาก ๆ สำหรับการผลิตโอโซนที่ความถี่สูง ๆ ผลผลิตโอโซนที่ได้เพิ่มสูงกว่าการผลิตที่ความถี่ 50 Hz มาก แต่ข้อจำกัดของแหล่งจ่ายคือหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงคือ ความสูญเสียเนื่องจากการใช้หม้อแปลงที่ความถี่สูงเกินความถี่ใช้งานปกติ (ประมาณ 20 kHz) ทำให้แรงดันด้านเอาต์พุตตก ต้องทำการเพิ่มแรงดันป้อนเข้าโดยเพิ่มควิตีไซเคิลของวงจรบูสต์ ผลคือเกิดการคั้งกระแสจากแหล่งจ่ายค่อนข้างสูงมาก และที่ 60 kHz หม้อแปลงฟลายแบคเกิดเรโซแนนซ์ขึ้น จากกราฟรูป 3.36 พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตตกลงที่ 60 kHz และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึง 80 kHz หลังจากนั้นปริมาณผลผลิตต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้มีค่าต่ำมากทั้งนี้เนื่องจากหม้อแปลงเกิดการคั้งกระแสสูง

5.4.2 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์คำนวณจากความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดคือเครื่องกำเนิดโอโซน 52 วัตต์ โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ประกอบด้วย

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองที่ 1 การหามุมเอียงการติดตั้งแผงทำมุม 15 องศาให้กำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อเทียบกับ 20 และ 25 องศา แต่ความแตกต่างไม่มากนัก ตำแหน่งที่ติดตั้งคือลาดกระบัง Lat. 15°N Long. 100° East แผงที่ใช้คือ BPTS 1255 ขนาด 55 วัตต์ 4 แผง จ่ายแรงดัน 24 โวลท์

การทดสอบ V-I Characteristic ในการทดลองที่ 2 พบว่าคุณสมบัติแผงที่ใช้งานมีค่า Fill Factor : $FF = 0.7$ ใช้งานในเวลากลางวันได้ 8 ชั่วโมง

2. แบตเตอรี่ ขนาด 12 V 100 Ah 2 ตัวต่ออนุกรม

3. ECU : Electronic Control Unit

ECU เป็นขุมสายของระบบ ตัดต่อระบบอัตโนมัติป้องกันการเสียหายของแบตเตอรี่ที่อาจเกิดเนื่องจากความผิดพลาดในการประจุแรงดัน

4. ภาระของระบบ

เครื่องกำเนิดโอโซนและหน่วยแปลงรูปพลังงาน (PCU : Power Conditioning Unit) ขนาด 52 W

5.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์

การวิจัยเรื่องกระบวนการผลิตก๊าซโอโซนเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรมนี้ มีเงื่อนไขในการออกแบบที่เป็นปัจจัยแวดล้อมที่ไม่ได้คำนึงถึงในงานวิจัยนี้อีกหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิของโคโรนาเซลล์ ความดัน ความชื้น ระบบเตรียมก๊าซที่สะอาด เป็นต้น เครื่องที่เคยทำการวิจัยมาในปี พ.ศ 2536 และ 2538 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องต้นแบบ จากการพัฒนาเป็นลำดับมา เมื่อเปรียบเทียบแล้วสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 5.4 ซึ่งเป็นข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปต่อปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ พบว่า

ตารางที่ 5.4 การพัฒนาการออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์

ข้อมูล	เครื่องปี 2536	เครื่องปี 2538	เครื่องที่นำเสนอ ปี 2542
1. อัตราการเกิดโอโซน สูงสุด	5.8 mgO ₃ /h	18.43 mgO ₃ /h	1080 mgO ₃ /h
2. กำลังไฟฟ้าที่รวมใช้ (ไม่รวมส่วนผลิตแรงดันสูง)	291 W	42.4 W	52 W
3. อัตราการเกิดโอโซน ต่อพลังงานที่ใช้	0.0199 mgO ₃ /Wh	0.435 mgO ₃ /Wh	23.68 mgO ₃ /Wh
4. ค่าใช้จ่ายต้นทุน	< 2000 บาท	ประมาณ 40000 บาท	ประมาณ 40000 บาท

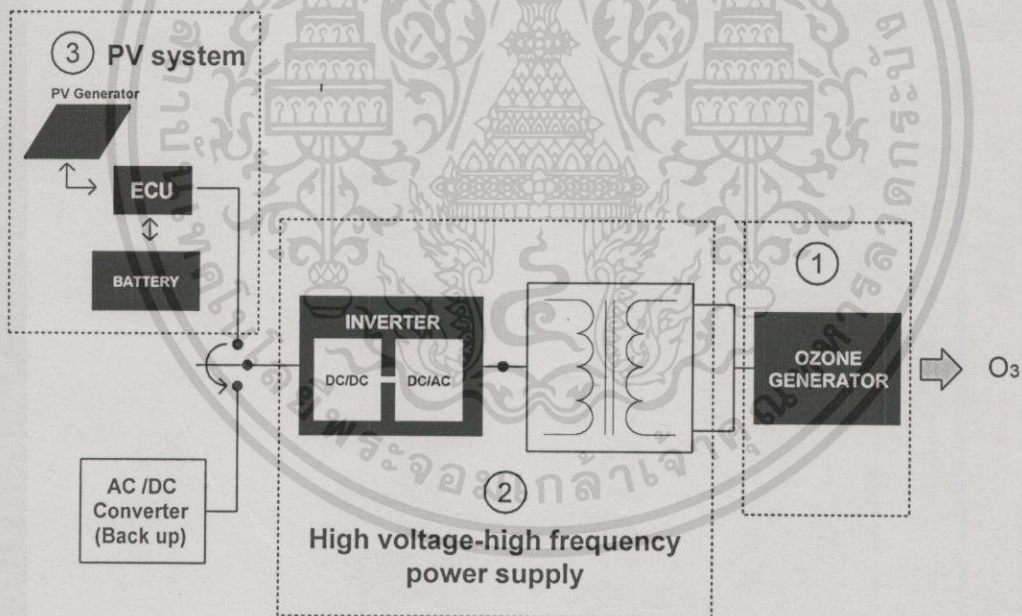
หมายเหตุ การศึกษากระบวนการผลิตก๊าซโอโซนที่ได้นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ ไม่ได้คำนึงถึงผลของ อุณหภูมิ, ความชื้น, ระบบการเตรียมก๊าซที่มีคุณภาพ และ เรื่องอัตราการไหลของก๊าซผ่านกระบวนการ โดยในการศึกษา ควบคุมให้อัตราการไหลของก๊าซคงที่ที่ 10 L/hr. ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาถึงระบบการศึกษาทั่วไป แฟลคเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมาก ซึ่งในการพัฒนางานวิจัยนี้ ควร มีการศึกษาเงื่อนไขเหล่านี้ด้วย เนื่องจากสิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้เป็นส่วนพัฒนาชุดอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น

บทที่ 6

สรุป

การศึกษาและออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนจากปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึงพื้นฐานการแปรเปลี่ยนโมเลกุลก๊าซออกซิเจนที่มีในอากาศเป็นก๊าซโอโซน โดยเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในทางเคมีกับพลังงานทางไฟฟ้า และทำการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างพลังงานที่ต้องการจากสนามไฟฟ้าดังกล่าวป้อนให้อากาศ ปริมาณ โอโซนที่ผลิตได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ในทางเคมีพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ $493.2-682.8 \text{ kJ/mol}$ พลังงานทางไฟฟ้าในการเปลี่ยนก๊าซออกซิเจน (20%ของอากาศ)เป็น โอโซน คือ $1.172-1.62 \text{ kWh/m}^3$

โครงสร้างของระบบที่ออกแบบประกอบด้วย ส่วนหลัก 3 ส่วน คือ ส่วนเครื่องผลิตก๊าซโอโซน ส่วนสร้างแรงดันสูงความถี่สูง และส่วนระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ รายละเอียดของแต่ละส่วนจากรูปที่ 2.1 ยกมากล่าวได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 ระบบการผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

1. เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone generator) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.37 ประกอบด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนประกอบด้วยทรงกระบอก 2 อันซ้อนกันรวมกันกะโถด คือ แปรงพุ่มทองเหลืองลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกรัศมี 1.09 เซนติเมตร แอนโอด คือ ท่อสแตนเลสรัศมีวงใน 1.42 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างระหว่างแอโนดกับคะโทด ถูกคั่นด้วยหลอดแก้ววิทยาศาสตร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนของแข็งที่มีค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ประมาณ 8 แก้วรัศมีวงใน 1.09 เซนติเมตร สัมผัสโดยตรงกับปลายแหลมของคะโทด รัศมีวงนอก 1.22 เซนติเมตร และช่องว่างที่ให้อากาศไหลผ่านกระบวนการช่องว่างที่อากาศไหลผ่านเพื่อผ่านกระบวนการเป็นไอโซนหนา 0.2 เซนติเมตร ปริมาตรอากาศภายในแคปคือ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยประมาณ

วาล์วลมให้อากาศไหลผ่าน 2 แนวคือ แนวแคประหว่างอิเล็กโตรดที่ออกแบบและแนวกึ่งกลางของแปรงพุ่มทองเหลือง

ท่อซิลิโคน ท่อยงนำก๊าซซึ่งทำจากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ ไอโซน

2. ส่วนสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (High voltage high frequency power supply)

แรงดันอินพุท แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์จากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

แรงดันเอาต์พุท แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 กิโลโวลต์ (อาร์.เอ็ม.เอส)

ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต

อินเวอร์เตอร์ ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้หม้อแปลงพลาซแมคเป็นส่วนสร้างแรงดันสูงความถี่สูง

3. ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (PV System)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ BPTS 1255 ขนาด 55 วัตต์ จำนวน 4 แผง

แบตเตอรี่ขนาด 200 Ah

ส่วนควบคุมและป้องกันระบบ ECU : Electronic Control Unit

จากวัตถุประสงค์ดังกล่าวในบทที่ 1 สามารถสรุปผลการออกแบบและทดสอบได้ดังต่อไปนี้

1. จากการศึกษาการประยุกต์ใช้งานทฤษฎีไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อการผลิตไอโซนพบว่ากระบวนการเกิดก๊าซไอโซนจากปฏิกิริยาเคมี สามารถเชื่อมโยงกับหลักการทางไฟฟ้าได้ และพลังงานจากภายนอกที่ป้อนให้กับระบบมีความสำคัญเท่ากันกับความสามารถในการรับพลังงานของแคปอากาศที่ออกแบบ นั่นคือ ในทางไฟฟ้าแรงดันสูง อากาศมีความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่ง การเสถียรภาพของอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลเป็นไอโซน แต่ขีดจำกัดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศซึ่งนำไปสู่การเบรคดาวนั้นทำให้ไอโซนที่ผลิตได้สลายไปเพราะความร้อนที่เกิดเนื่องจากการเบรคดาว ในกระบวนการผลิตการเกิดไอโซนและการสลายของไอโซนจึงเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กัน

2. พลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบคือพลังงานที่เข้าไปทำให้โมเลกุลก๊าซออกซิเจนแตกตัว พลังงานนี้มาจากสนามไฟฟ้าที่ป้อน จากผลการทดลองพบว่าถ้าความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ถึงย่านที่ให้พลังงานเพียงพอ จะไม่มีก๊าซไอโซนเกิดขึ้นในระบบ และปริมาณ ไอโซนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในที่นี้ขึ้นอยู่กับความร้อนภายในแก๊สอากาศด้วย ตัวแปรทางไฟฟ้าที่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการผลิตคือค่าแรงดันที่ใช้ แต่การใช้แรงดันสูงมาก ๆ ย่อมไม่เหมาะสมด้วยเหตุผลหลายประการ ในที่นี้จึงทำการลดระดับแรงดันที่ใช้ลงโดยนำผลของความถี่มาใช้แทน โดยความถี่ของรูปสัญญาณที่ใช้มีผลทำให้ความคงทนของอากาศลดลง จากผลการทดลองก็สนับสนุนหลักการนี้ ที่ความถี่แตกต่างกันมาก ๆ คือ 50 เฮิร์ต กับ 40 กิโลเฮิร์ต ผลผลิตโอโซนที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องที่ออกแบบสามารถผลิตโอโซนได้ปริมาณสูงขึ้นมาโดยใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สูงนัก ซึ่งปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน

3. การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ ได้นำข้อดีของอิเล็กทรอนิกส์หลายแหล่มาใช้ร่วมกับข้อดีของอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกแกนร่วมซึ่งออกแบบให้โครงสร้างเป็นแบบฉนวน 2 ชั้น ผลคือ อิเล็กทรอนิกส์หลายแหล่ที่เป็นแปรงพุ่มทองเหลืองช่วยลดระดับแรงดันเริ่มต้นของการเกิดโอโซนลงได้ต่ำกว่าแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมปกติ และฉนวนแก้วทำให้ความเครียดที่ตกคร่อมแก๊สอากาศสูงขึ้น ปริมาณโอโซนที่ได้ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ต มีค่าประมาณ 1 กรัม
4. ระบบที่ออกแบบใช้แหล่งจ่ายหลักเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์จากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ออกแบบให้ทำงานกลางวัน 8 ชั่วโมง กลางคืน 8 ชั่วโมง และในกรณีไม่สามารถใช้งานระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้ระบบนี้มีแหล่งจ่ายสำรองเป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ ด้วย

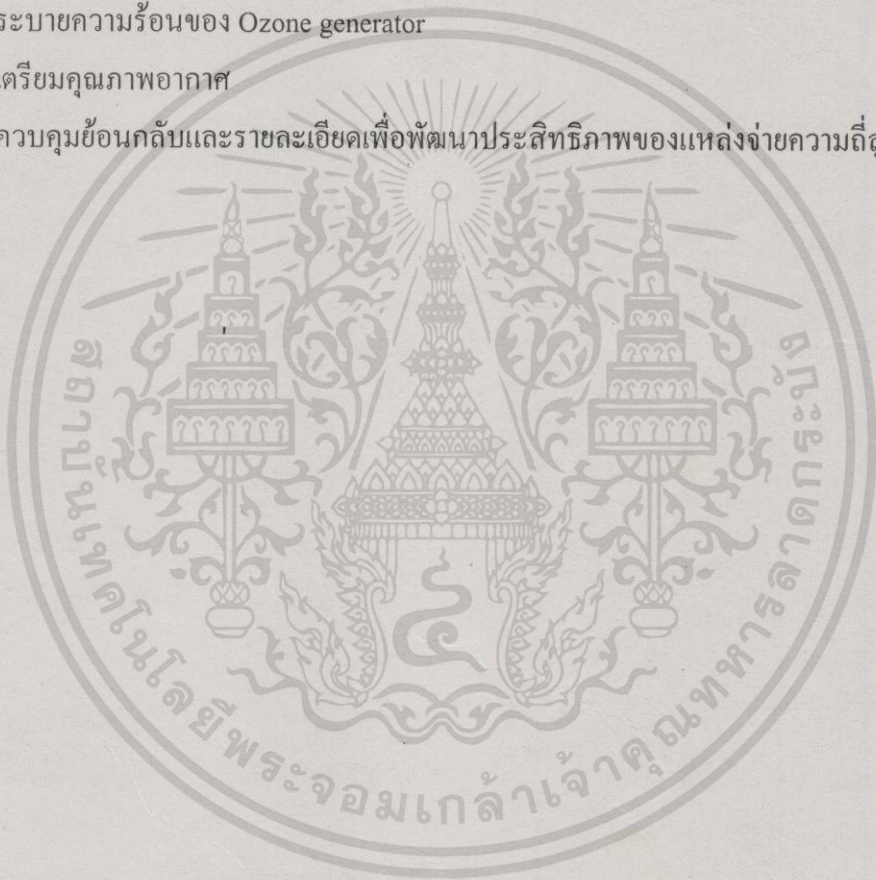
ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้ดีขึ้นจะช่วยให้ความสามารถในการผลิตเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปส่วนหนึ่งมาจากการดิ่งกระแสของหม้อแปลงที่ค่อนข้างสูง
2. ระบบการผลิตโอโซนในทางอุตสาหกรรมประกอบด้วยระบบเตรียมก๊าซและระบบระบายความร้อนซึ่งไม่ได้กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ระบบเหล่านี้ช่วยให้อากาศที่ป้อนสู่เครื่องมีสภาพที่เหมาะสมยิ่งขึ้นเป็นการช่วยเพิ่มผลผลิตได้อีกทางหนึ่ง
3. โอโซนเป็นก๊าซอันตราย การทดสอบและวิจัยควรมีความรู้และการป้องกันระดับหนึ่ง นอกจากนี้เครื่องมือวัดก๊าซโอโซน (Ozone Monitor) อาจช่วยให้การวัดปริมาณโอโซนที่ผลิตได้สะดวกขึ้น แต่ในแง่ของความถูกต้อง วิธีวัดแบบ Iodometric method จะให้ความถูกต้องมากกว่า แต่ผู้วัดต้องมีทักษะทางเคมีพอสมควร
4. ระบบที่ออกแบบน่าจะมีประโยชน์สำหรับการแก้ปัญหาหมอกควันในที่ห่างไกลเนื่องจากระบบนี้ใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน และด้วยคุณสมบัติทางเคมีของโอโซนที่สามารถบำบัดมลภาวะทางน้ำและอากาศได้เป็นอย่างดี แต่การนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการควบคุมการผลิตและระดับความปลอดภัยจากอันตรายของก๊าซโอโซนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความถูกต้องในการวัดโอโซนในกระบวนการวัดแบบไอโอโดเมตริกนั้น ระบุขีดจำกัดของอัตราการไหลของอากาศไว้ที่ 1 L/min ซึ่งในงานวิจัยนี้มีส่วนบกพร่องคือเรื่องอัตราการไหลของอากาศ ทำให้ขณะตรวจวัดปริมาณโอโซน จึงมีกลิ่นโอโซนฟุ้งกระจายในบริเวณวัด ดังนั้นในการพัฒนาขั้นต่อไปควรคำนึงถึงปัจจัยเรื่องอัตราการไหลของก๊าซให้มากด้วย ผลผลิตก๊าซโอโซนที่วัดได้ในงานวิจัยนี้ นำเสนอในแง่ของกระบวนการศึกษาและแนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งเน้นหนักในเรื่องของการศึกษาและออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นหลักเท่านั้น
 6. ในการพัฒนา ยังมีตัวแปรที่น่าศึกษาและควบคุมเพิ่มเติมดังต่อไปนี้
 - 6.1 อัตราการไหลของอากาศ
 - 6.2 ส่วนระบายความร้อนของ Ozone generator
 - 6.3 ส่วนเตรียมคุณภาพอากาศ
 - 6.4 ส่วนควบคุมย้อนกลับและรายละเอียดเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายความถี่สูง
- เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำราวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [2] E.Kuffel, M.Abdulah. **High-Voltage Engineering**. Oxford : Pergamon Press. 1977.
- [3] W.H.Hayt. **Engineering Electromagnetics**. New York : Mc Graw Hill. 1981.
- [4] Bruno Langlias, et. al. **Ozone in Water Treatment**. 2nd Ed. Lewis Publishers. 1991.
- [5] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ พรพิมล รัตนวิเชียร. “เครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.” การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2540.
- [6] S.Potivejkul, V.Kinnares and P.Rattanavichien “Design of Ozone Generator using Solar Energy.” APCCAS IEEE Conference on Circuit and System, Thailand. Nov 24-27, 1998, pp. WP2-10
- [7] P.Rattanavichien, S.Potivejkul and W.Khan-ngern. “PV System Sizing for Ozone Generator.” IPEC'99 Proceeding of the International Power Engineering Conference, Singapore. May 24-26, 1999, pp. 319-324.
- [8] เขมรัฐ วงศ์ทิมารัตน์ และคณะ. “เครื่องผลิตโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [9] พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก. “เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- [10] France Lasnier. And Tony Gang Ang. **Photovoltaic Engineering Handbook** IOP Publishing Ltd. 1990.
- [11] Leonard B. Loeb. **Electrical Coronas**. California: University of California Press. 1965.
- [12] Tomas Markvart. **Solar Electricity**. 4th Ed. John Wiley & Sons Ltd. UNESCO. 1994.
- [13] George Chryssis. **High-Frequency Switching Power Supply: Theory and Design**. 2nd Ed. McGraw-Hill Publishing Company. 1989.
- [14] Gabe Ergler. “Successful Treatment Using Ozone in Residential Potable Systems.” [Online]. Available : <http://o3water.com/Articles/guideto.htm>. 1999.
- [15] Hankin Atlas Ozone Systems Limited. “Material Safety Information.” [Online]. Available : <http://www.hankinozone.com/MSDS.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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] Yukihiro Kamase, et. al. "Pulse High Voltage Source for Ozone Generator." IEEE Industry Applications, Society Annual Meeting, vol.1 1991. pp. 693-697.
- [22] Andrew S. Viner, et. al. "Ozone Generation in dc-Energized Electrostatic Precipitators." IEEE Trans on Industry Applications, vol. 28. 1992. pp. 504-512.
- [23] Jae-Duk Moon, et. al. "Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Ferroelectric-Ball/Mica-Sheet Barrier." IEEE Trans on Industry Applications, Society Annual Meeting. 1998. pp. 1206-1211.
- [24] Cesar Gutierrez-Tapia. "Dynamics of Ozone Generation in a Silent Oxygen Discharge." IEEE Trans on Plasma Science, vol. 26. 1998. pp. 1357-1362.
- [25] Baldur Eliasson, et.al. "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing." IEEE Trans on Plasma Science, vol. 19, 1991, pp. 1063-1077.
- [26] 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.
- [27] Yukiharu Nomoto, et.al. "Improvement of Ozone Yield by a Silent - Surface Hybrid Discharge Ozonizer." IEEE Trans on Industry Applications, vol. 31. 1995. pp. 1458-1462.
- [28] ID Chalmers, et.al. "Ozone Generation by Pulsed Corona Discharge in a Wire Cylinder Arrangement." IEE, Savoy Place, London. 1994. pp. 6/1-6/4.
- [29] Baldur Eliasson and Ulrich Kogelschatz. "Modeling and Applications of Silent Discharge Plasmas." IEEE Trans on Plasma Science, vol. 19. 1991. pp. 309-323.
- [30] ID Chalmers. and L Zanella. "Wire/Cylinder Device with Space Charge Distortion : Ozone Production." IEE, Savoy Place, London. 1996. pp. 8/1-8/3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] Cesar Gutierrez-Tapia. "Dynamics of Ozone Generation in a Silent Oxygen Discharge." IEEE Trans on Plasma Science, vol. 26. 1998. pp. 1357-1362.
- [32] C. Gutierrez-Tapia and et.al. "Purturbative Method for Ozone Synthesis From Oxygen in a Single Discharge." IEEE Trans on Plasma Science, vol. 22. 1994. pp. 979-985.
- [33] Judy A. Dosey and Jane H. Davidson. "Ozone Production in Electrostatic Air Cleaner with Contaminated Electrodes." IEEE Trans.on Industry Applications, vol. 30. 1994. pp. 370-376.
- [34] James A. Robinson, et.al. "A New Type of Ozone Generator Using Taylor Cones on Water Surfaces." IEEE Trans. on Industry Applications. 1998. pp. 1218-1224.
- [35] David Lidgate. "Silvanus P. Thompson Lecture : Green energy?", Energy & environment, Engineering Science and Education Journal, October, 1992, pp. 221-227.
- [36] Portable Capacitance and Dissipation Factor ($\tan \delta$) Measuerment Bridge Type 2805 Instruction manual.
- [37] กัทรพรรณ ประสานนัสารกิจ. Thermodynamic. สนพ. จุฬา 2538
- [38] S. Dee-on, S.Potivejkul and W.Khan-ngern. "Simulation of Battery Sizing for Continuous Load in PV System" IPEC'99, Singapore. 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลผลการทดสอบเพื่อออกแบบเครื่องผลิตโอโซนในส่วนชุดอิเล็กโตรด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้ากับความสามารถในการผลิตโอโซนของเครื่องที่ออกแบบ โครงสร้างที่ทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ อิเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ และอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วม

ตารางที่ ผ.3.6 อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระนาบที่มีการจัดเรียงปลายแหลมต่างกัน 2 แบบคือแบบกลุ่มปลายแหลมซึ่งประกอบด้วยกลุ่มปลายแหลมที่มีความหนาแน่นต่างกัน 3 แบบคือ 754 กลุ่ม, 1508 กลุ่ม และ 3016 กลุ่ม กับแบบปลายแหลมเดี่ยว ๆ 210 จุด ระยะแกระหว่างปลายแหลมกับระนาบเท่ากันที่ 1 cm. ทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูง

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตโอโซน (mgO ₃ /hr)			
	754 กลุ่ม	1508 กลุ่ม	3016กลุ่ม	210 จุด
8.0	1.87	4.9	7.49	5.6
8.5	2.59	7.49	10.22	5.9
9.0	3.89	10.22	14.54	7.92
9.5	4.61	11.95	21.6	8.78
10.0	5.62	16.15	25.65	10.08
10.5	9.65	19.58	52.69	10.66
11.0	11.81	20.16	40.05	11.52
11.5	16.27	21.74	47.66	12.67
12.0	19.01	29.66	51.7	15.54
12.5	21.74	58.88	55.71	15.41
13.0	24.54	49.97	58.18	16.99
13.5	28.08	55.14	-	20.74
14.0	28.8	54.86	-	22.46
14.5	29.95	-	-	24.05
15.0	-	-	-	25.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.7 อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระยะห่างที่มีการจัดเรียงปลายแหลมต่างกัน 4 แบบคือแบบกลุ่มปลายแหลม 754 กลุ่ม 1508 กลุ่ม 3016 กลุ่ม และแบบปลายแหลมเดี่ยว 210 จุด ถูกนำมาทดสอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วเวลาในห้องปฏิบัติการ โดยให้ระยะแกปกว้าง 1 เซนติเมตร เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตโอโซนคิดเทียบต่อจุดปลายแหลมต่อวินาที

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตโอโซน ($\mu\text{gO}_3/\text{sec}/\text{point}$)			
	754 กลุ่ม	1508 กลุ่ม	3016กลุ่ม	210 จุด
8.0	0.69	0.902	0.61	4.762
8.5	0.955	1.379	0.942	7.81
9.0	1.432	1.883	1.34	10.467
9.5	1.698	2.202	1.989	11.619
10.0	2.069	2.971	2.361	13.333
10.5	3.554	3.607	3.011	14.095
11.0	4.35	3.793	3.678	15.238
11.5	5.995	4.005	4.39	16.762
12.0	7.003	5.464	4.761	17.905
12.5	8.011	7.162	5.066	20.381
13.0	8.966	9.204	5.358	22.476
13.5	10.345	10.28	-	25.143
14.0	10.61	10.106	-	29.714
14.5	11.034	-	-	31.81
15.0	-	-	-	34.095

ตารางที่ ผ.3.8 อิเล็กโตรดแบบปลายแหลมกับระยะนำที่มีการจัดเรียงปลายแหลมต่างกัน 4 แบบคือแบบกลุ่มปลายแหลม 754 กลุ่ม 1508 กลุ่ม 5016 กลุ่ม และแบบปลายแหลมเดี่ยว 210 จุด ถูกนำมาทดสอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขั้วลบในห้องปฏิบัติการ โดยให้ระยะแคบกว้าง 1 เซนติเมตร เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตโอโซนคิดเทียบต่อหน่วยพลังงานที่ใช้ในการผลิต

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตโอโซน (mgO ₃ /W-hr.)			
	754 กลุ่ม	1508 กลุ่ม	3016กลุ่ม	210 จุด
8.0	0.468	0.612	0.566	0.222
8.5	0.308	0.594	0.457	0.268
9.0	0.291	0.574	0.544	0.293
9.5	0.245	0.41	0.562	0.264
10.0	0.226	0.456	0.569	0.254
10.5	0.26	0.466	0.563	0.225
11.0	0.27	0.414	0.554	0.211
11.5	0.28	0.343	0.552	0.2
12.0	0.261	0.38	0.502	0.188
12.5	0.244	0.411	0.455	0.191
13.0	0.234	0.445	0.45	0.189
13.5	0.227	0.423	-	0.19
14.0	0.216	0.397	-	0.187
14.5	0.208	-	-	0.184
15.0	-	-	-	0.179

ตารางที่ ผ.3.9 ทดสอบความสามารถในการผลิตโอโซนต่อ 1 หน่วยพลังงานที่ใช้ของอิเล็กโตรดแบบ
ปลายแหลมกับระนาบที่มีการจัดเรียงปลายแหลมแบบ 210 จุด โดยเงื่อนไขที่พิจารณาคือ
ที่ระยะแกปอากาศต่างกัน คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 cm.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตโอโซน (mgO ₃ /W-hr.)		
	0.5 cm.	1.0 cm	1.5 cm
4.0	0.648	-	-
4.5	0.606	-	-
5.0	0.527	-	-
5.5	0.488	0.252	-
6.0	0.47	0.301	-
6.5	0.461	0.414	-
7.0	-	0.315	-
7.5	-	0.281	0.369
8.0	-	0.222	0.341
8.5	-	0.268	0.248
9.0	-	0.293	0.284
9.5	-	0.264	0.256
10.0	-	0.254	0.244
10.5	-	0.225	0.232
11.0	-	0.211	0.227
11.5	-	0.2	0.215
12.0	-	0.188	0.211
12.5	-	0.191	0.214
13.0	-	0.189	0.2
13.5	-	0.19	0.173
14.0	-	0.187	0.188
14.5	-	0.184	0.144
15.0	-	0.179	0.125
15.5	-	-	0.111
16.0	-	-	0.118
16.5	-	-	0.122
17.0	-	-	0.13
17.5	-	-	0.134
18.0	-	-	0.134
18.5	-	-	0.136
19.0	-	-	0.138
19.5	-	-	0.15
20.0	-	-	0.159
20.5	-	-	0.154
21.0	-	-	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.10 ทดสอบความสามารถในการผลิตโอโซนต่อ 1 หน่วยพลังงานที่ใช้ของอิเล็กโทรดแบบ
 ปลายแหลมกับระนาบที่มีการจัดเรียงปลายแหลมแบบ 210 จุด โดยเงื่อนไขที่พิจารณา
 คือที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วต่างกัน (+,-)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตโอโซน (mgO ₃ /W-hr.)	
	DC (+)	DC (-)
7.5	-	0.369
8.0	-	0.346
8.5	0.468	0.297
9.0	0.460	0.284
9.5	0.460	0.275
10.0	0.455	0.244
10.5	0.478	0.217
11.0	0.533	0.227
11.5	0.547	0.245
12.0	0.502	0.211
12.5	0.483	0.209
13.0	0.439	0.2
13.5	0.438	0.198
14.0	0.431	0.173
14.5	-	0.188
15.0	-	0.144
15.5	-	0.154
16.0	-	0.11
16.5	-	0.118
17.0	-	0.122
17.5	-	0.13
18.0	-	0.138
18.5	-	0.134
19.0	-	0.136
19.5	-	0.138
20.0	-	0.15
20.5	-	0.159
21.0	-	0.154
21.5	-	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.12-13 ทดสอบหามิติที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกที่มีรัศมี
ทรงกระบอกวงนอกที่เป็นกราวด์คงที่ 1.42 และ 2.34 cm.

รัศมีทรงกระบอกวงใน r_1 (cm.)	รัศมีทรงกระบอกวงนอก $r_2 = 1.42$ cm		รัศมีทรงกระบอกวงนอก $r_2 = 2.34$ cm	
	V (kV)	E (kV/cm)	V (kV)	E (kV/cm)
0.01	1.5363	100.8913	1.6911	91.6536
0.03	3.5872	43.2091	4.0517	38.2552
0.05	5.1869	29.883	5.9611	26.0081
0.07	6.5315	23.7311	7.6154	20.3534
0.09	7.6965	20.139	9.0901	17.0515
0.1	8.2251	18.8449	9.7735	15.8592
0.2	12.1526	12.7545	15.2495	10.1643
0.3	14.4581	10.7207	19.1034	8.1138
0.4	15.7102	9.8662	21.9039	7.0764
0.5	16.179	9.5803	23.9211	6.4796
0.6	16.0236	9.6732	25.3142	6.1231
0.7	15.3491	10.0983	26.1881	5.9187
0.8	14.2303	10.8923	26.6177	5.8232
0.9	12.7229	12.1828	26.6588	5.8142
1.0	10.8704	14.259	26.3547	5.8813
1.1	9.8258	15.7749	25.7401	6.0217
1.2	8.7073	17.8011	24.8433	6.2391
1.3	7.5184	20.6161	23.6878	6.5435
1.4	6.2621	24.7522	22.2937	6.9527
1.5	-	-	20.6779	7.4959
1.6	-	-	18.8553	8.2205
1.7	-	-	16.8388	9.2049
1.8	-	-	14.6399	10.5875
1.9	-	-	12.2687	12.6338
2.0	-	-	9.7342	15.9232
2.1	-	-	7.0447	22.0023
2.2	-	-	4.2075	36.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.14 อิเล็กโตรดเส้นลวดกับทรงกระบอก รัศมีเส้นลวดตัวนำ 0.025 mm. รัศมีทรงกระบอก 2.34 เซนติเมตร ถูกนำมาคำนวณเพื่อหาการกระจายของสนามไฟฟ้าจากเส้นลวดไปยังอิเล็กโตรดทรงกระบอกซึ่งเป็นกราวด์ ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ ณ รัศมี r ใด ๆ แสดงดังนี้

ระยะห่างจากลวด r (cm)	สนามไฟฟ้า E (kV/cm)
0.06	548.4815
0.07	297.2013
0.08	212.7643
0.09	170.1298
0.1	144.2695
0.2	72.1348
0.3	55.8111
0.4	48.0898
0.5	43.4294
0.6	40.243
0.7	37.8923
0.8	36.0674
0.9	34.5976
1.0	33.3808
1.1	32.3515
1.2	31.4658
1.3	30.6928
1.4	30.0102
1.5	29.4014
1.6	28.8539
1.7	28.3578
1.8	27.9055
1.9	27.4908
2.0	27.1085
2.1	26.7546
2.2	26.4257
2.3	26.1189
2.34	26.0018

ตารางที่ผ.3.15 ผลการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายในแก๊ปอากาศของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อน แกนร่วมแบบที่ 1 (Electrode I) ซึ่งมีรัศมีทรงกระบอกวงใน 1.09 เซนติเมตร รัศมีทรงกระบอกวงนอก 1.42 เซนติเมตร 2 กรณีคือ ฉนวนชั้นเดียว (อากาศ) และฉนวน 2 ชั้น (อากาศ + ของแข็ง)

ระยะห่างใด ๆ r(cm.)	สนามไฟฟ้า E (kV/cm)	
	ฉนวนชั้นเดียว ' ($r_1 = 1.09, r_2 = 1.42$ cm.)	ฉนวน 2 ชั้น ($r_1 = 1.09, r_2 = 1.22, r_3 = 1.42$ cm.)
1.1	17.1864	5.2145
1.11	17.0316	5.1675
1.12	16.8759	5.1213
1.13	16.7302	5.0760
1.14	16.5834	5.0315
1.15	16.4392	4.9877
1.16	16.2975	4.9447
1.17	16.1582	4.9025
1.18	16.0213	4.8609
1.19	15.8866	4.8201
1.2	15.7542	4.7799
1.21	15.624	4.7404
1.22	15.496	4.7016
1.23	15.370	23.5078
1.24	15.246	23.3167
1.25	15.1241	23.1286
1.26	15.004	22.9436
1.27	14.8859	22.7615
...
1.36	13.9008	21.2441
1.37	13.7993	21.0879
1.38	13.6993	20.9339
1.39	13.6008	20.7822
1.40	13.5036	20.6327
1.41	13.4079	20.4853
1.42	13.3134	20.3401

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.16 ผลการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายในแถบอากาศของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน
รวมแบบที่ 2 (Electrode II) ซึ่งมีรัศมีทรงกระบอกภายใน 1.9 เซนติเมตร รัศมีทรง
กระบอกวงนอก 2.34 เซนติเมตร 2 กรณีคือ ฉนวนชั้นเดียว (อากาศ) และฉนวน 2 ชั้น
(อากาศ + ของแข็ง)

ระยะห่างใด ๆ r(cm.)	สนามไฟฟ้า E (kV/cm)	
	ฉนวนชั้นเดียว ($r_1 = 1.9, r_2 = 2.34$ cm.)	ฉนวน 2 ชั้น ($r_1 = 1.9, r_2 = 2.1, r_3 = 2.34$ cm.)
1.9	12.6338	4.1045
1.92	12.5022	4.0617
1.94	12.3733	4.0198
1.96	12.2470	3.9788
1.98	12.1233	3.9586
2.0	12.0021	3.9188
2.02	11.8833	3.8798
2.04	11.7668	3.8416
2.06	11.6525	3.8041
2.08	11.5405	3.7674
2.1	11.4306	3.7313
2.12	11.3227	18.5678
2.14	11.2169	18.3926
2.16	11.1130	18.2207
2.18	11.0111	18.052
2.2	10.9110	17.8864
2.22	10.8127	17.7238
2.24	10.7162	17.5641
2.26	10.6213	17.4073
2.28	10.5281	17.2533
2.3	10.4366	17.1019
2.32	10.3466	16.9532
2.34	10.2582	16.8070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.21-22 ผลการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการกระจายของแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในแก๊วอากาศขนาด 2 ชั้น (แก้ว-อากาศ) รัศมี r_1 0.7 เซนติเมตร r_2 0.8 เซนติเมตร และ r_3 1 เซนติเมตร

r (cm)	Input voltage (kV)															
	3.438		4.055		5.000		6.000		7.000		8.000		9.000		10.000	
	V	E	V	E	V	E	V	E	V	E	V	E	V	E	V	E
0.7	3.4	2.5	4.1	3.0	5.0	3.7	6.0	5.2	7.0	5.2	8.0	5.9	9.0	6.6	10	7.4
0.72	3.4	2.5	4.0	2.9	4.9	3.6	5.9	5.0	6.8	5.0	7.9	5.7	8.8	6.4	9.8	7.1
0.74	3.3	2.4	3.9	2.8	4.8	3.5	5.8	4.9	6.8	4.8	7.8	5.5	8.7	6.2	9.7	7.0
0.76	2.2	2.3	3.8	2.7	4.7	3.4	5.7	4.7	6.6	4.7	7.5	5.4	8.5	6.1	9.4	6.7
0.78	3.2	2.2	3.8	2.6	4.7	3.2	5.6	4.6	6.5	4.6	7.4	5.2	8.4	5.9	9.3	6.5
0.8	2.8	17	3.3	21	4.1	25	4.9	36	5.8	36	6.6	41	7.4	46	8.2	51
0.82	2.5	17	2.9	20	3.6	25	4.3	35	5.1	35	5.8	40	6.5	45	7.2	50
0.84	2.1	17	2.5	20	3.1	25	3.7	34	4.4	34	5.0	39	5.6	44	6.3	49
0.86	1.8	16	2.1	19	2.7	24	3.2	34	3.7	34	4.2	38	4.8	43	5.3	48
0.88	1.5	16	1.7	19	2.2	23	2.6	28	3.1	33	3.5	37	3.9	42	4.4	47
0.9	1.2	16	1.4	18	1.7	23	2.0	27	2.4	32	2.7	37	3.1	41	3.5	46
0.92	0.9	15	1.0	18	1.3	22	1.5	27	1.8	31	2.0	36	2.3	40	2.6	45
0.94	0.6	15	0.7	18	0.8	22	1.0	26	1.1	31	1.3	35	1.5	40	1.6	44
0.96	0.3	15	0.3	17	0.4	21	0.5	26	0.6	30	0.7	34	0.7	39	8.3	43
0.98	0	14	0	17	0	21	0	25	0	29	0	34	0	38	0	42
1.00	0	14	0	17	0	21	0	25	0	29	0	34	0	38	0	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.21-22 ผลการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใน
 แกปอากาศนวน 2 ชั้น (แก้ว+อากาศ) เมื่อความหนาแก้วต่าง ๆ กัน ($r_2 = 0.76 - 0.86$
 เซนติเมตร)

r (cm)	ความหนาของแก้ว (cm.)					
	$r_2 = 0.76$	$r_2 = 0.78$	$r_2 = 0.8$	$r_2 = 0.82$	$r_2 = 0.84$	$r_2 = 0.86$
	E (kV/cm)	(kV/cm)	E(kV/cm)	E(kV/cm)	E(kV/cm)	E(kV/cm)
0.7	2.383	2.588	2.411	2.655	2.935	3.276
0.72	2.301	2.5	2.330	2.567	2.838	3.168
0.74	2.227	2.424	2.262	2.496	2.759	3.079
0.76	17.34	2.343	2.196	2.433	2.688	2.998
0.78	16.99	18.27	2.125	2.376	2.623	2.923
0.8	16.57	17.94	16.57	2.327	2.561	2.851
0.82	16.16	17.54	16.27	18.15	2.509	2.784
0.84	15.79	17.15	15.94	17.65	19.61	2.730
0.86	15.43	16.77	15.6	17.21	19.07	21.34
0.88	15.08	16.40	15.26	16.81	18.61	20.79
0.9	14.76	16.04	14.93	16.44	18.19	20.31
0.92	14.44	15.7	14.60	16.09	17.79	19.86
0.94	14.12	15.36	14.29	15.73	17.40	19.42
0.96	13.81	15.01	13.97	15.38	17.01	18.98
0.98	13.49	14.67	13.65	15.03	16.62	18.55

ตารางที่ ผ.3.25 ผลการคำนวณด้วยไฟไนต์อิเลเมนต์เพื่อศึกษาการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในแถบอากาศนวน 2 ชั้น ที่ใช้ฉนวนต่างชนิดกัน 3 แบบคือ แก้ว ($\epsilon_r = 8$) ไมกา ($\epsilon_r = 6$) และ พีวีซี ($\epsilon_r = 5$)

r (cm)	ค่าคงที่ฉนวนสัมพัทธ์ ϵ_r		
	แก้ว ($\epsilon_r = 8$)	ไมกา ($\epsilon_r = 6$)	พีวีซี ($\epsilon_r = 5$)
	E(kV/cm)	E(kV/cm)	E(kV/cm)
0.7	2.543	3.312	3.905
0.72	2.457	3.202	3.775
0.74	2.386	3.109	3.666
0.76	2.317	3.02	3.561
0.78	2.241	2.924	3.449
0.8	17.48	17.1	16.81
0.82	17.17	16.78	16.49
0.84	16.82	16.44	16.15
0.86	16.45	16.08	15.8
0.88	16.10	15.73	15.45
0.9	15.75	15.39	15.12
0.92	15.42	15.07	14.80
0.94	15.08	14.74	14.48
0.96	14.74	14.41	14.15
0.98	14.41	14.08	13.83

ตารางที่ ผ.3.34 อิเล็กโทรดแบบที่ 2 (Electrode II) รัศมีทรงกระบอกวงในของแก้ว 1.09 เซนติเมตร รัศมีทรงกระบอกวงนอกของแก้ว 1.22 เซนติเมตร และรัศมีทรงกระบอกวงในของท่อสแตนเลสที่เป็นกราวด์ 1.42 เซนติเมตร โดยให้กะโหลกเป็นแปรงฟุ่มทองเหลืองรูปทรงกระบอกรัศมีเท่ากับรัศมีวงในแก้ว ถูกนำไปทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสสลับในห้องปฏิบัติการความถี่ 50 เฮิร์ต ทดสอบวัดค่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ได้ดังนี้

แรงดัน (kV)	MgO ₃ /hr
2.0	2.3
3.8	6.1
5.1	12.24
6.7	67.68
7.0	82.08
8.0	99.36

ตารางที่ ผ.3.35 อิเล็กโทรดแบบที่ 2 (Electrode II) รัศมีทรงกระบอกวงในของแก้ว 1.09 เซนติเมตร รัศมีทรงกระบอกวงนอกของแก้ว 1.22 เซนติเมตร และรัศมีทรงกระบอกวงในของท่อสแตนเลสที่เป็นกราวด์ 1.42 เซนติเมตร โดยให้กะโหลกเป็นแปรงฟุ่มทองเหลืองรูปทรงกระบอกรัศมีเท่ากับรัศมีวงในแก้ว ถูกนำไปทดสอบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสสลับความถี่ตั้งแต่ 20 – 100 กิโลเฮิร์ต ทดสอบวัดค่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ได้ดังนี้

ความถี่	Power Input	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /W-h
20 kHz	48.19	1175.0	24.38
30 kHz	48.58	1076.0	22.15
40 kHz	45.6	1080.0	23.68
50 kHz	62.14	1073.5	17.28
60 kHz	94	1065.6	11.34
70 kHz	59.25	864.00	14.58
80 kHz	50.19	864.00	17.21
90 kHz	64.2	670.00	10.4
100 kHz	126.14	684.00	5.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูง

ข้อมูลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนสร้างแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับเครื่องผลิตไอโซน โครงสร้างของแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ อินเวอร์เตอร์ กับตัวหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงกระแสตรงและกระแสสลับ

ตารางที่ ผ.4.10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์

Frequency (kHz)	INPUT		P_{IN} (watts)	OUTPUT		P_{OUT} (watts)	% Efficiency
	V (volts)	I (A)		V (volts)	I (A)		
20	24	2.3	55.2	150.3	0.33	47.75	89.8
30	24	2.3	55.2	150.3	0.32	46.92	85.0
40	24	2.3	55.2	144.9	0.32	46.368	84.0
50	24	2.3	55.2	142.5	0.31	44.17	80.0
60	24	2.2	52.8	141.1	0.32	45.152	85.5
70	24	2.2	52.8	141.4	0.32	45.25	85.7
80	24	2.4	57.6	148.7	0.33	49.07	85.1
90	24	2.4	57.6	145.8	0.34	49.57	86.0
100	24	2.3	55.2	146.0	0.32	46.72	84.6

ตารางที่ ผ.4.15 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟลยแบคแรงดันสูงกระแสสลับ

F = 40 kHz		f = 50 kHz		f = 60 kHz		f = 70 kHz		f = 80 kHz		f = 90 kHz		f = 100 kHz	
V_{IN}	V_{OUT}	V_{IN}	V_{OUT}	V_{IN}	V_{OUT}	V_{IN}	V_{OUT}	V_{IN}	V_{OUT}	V_{IN}	V_{OUT}	V_{IN}	V_{OUT}
12	1000	12	1040	12	880	12	1060	12	848	12	920	12	1040
15	1080	15	1320	15	1360	15	1600	15	1240	15	1440	15	1560
18	1360	18	1600	18	1360	18	1600	18	1880	18	1680	18	2000
21	1480	21	1600	21	1840	21	1640	21	2000	21	1800	21	2200
27	1760	27	1600	27	2080	27	2320	27	1920	27	2000	27	2500
33	2000	33	2080	33	2160	33	2440	33	2240	33	2400	33	2600
43	2160	43	2640	43	3080	43	3680	43	3920	43	3600	43	3440
61	3200	61	2880	61	4000	61	5040	61	4000	61	4400	61	4480
65	4240	65	3920	65	4800	65	5360	65	5040	65	5400	65	5200

ตารางที่ ผ.4.15 ผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ

ความถี่	V_{in}	I_{in}	P_{in}	$V_{out(P)}$	mgO ₂ /hr	mgO ₂ /W-h
20	24	2.05	49.2	6000	1123.5	22.83
30	23.9	2.03	48.52	6000	1060.0	21.85
40	24	1.9	45.6	6000	1080.0	23.68
50	23.9	2.6	62.14	6000	1073.5	17.27
60	23.5	2.7	63.45	6000	1002.5	15.8
70	23.7	2.67	63.32	6000	1076.4	17.00
80	23.9	2.66	63.57	6000	1076.4	16.93
90	23.78	2.7	64.206	4000	670	10.43
100	23.8	5.3	126.14	4400	684	5.42

PV System

การทดลองเพื่อหา V-I Characteristic ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.00	18.4	0	13.7	0.45	11.1	0.45	7.78	0.5	5.3	0.55	3.7	0.51	2.68	0.51	1.67	0.51	0.68	0.51	0.31	0.51
9.00	18.4	0	16.7	0.56	16.2	0.73	14.5	0.96	10.8	1.1	7.8	1.16	5.34	1.18	3.22	1.18	0.99	1.18	0.31	1.18
10.00	18.2	0	16.7	0.58	16.3	0.78	15.4	1.04	13.1	1.34	9.7	1.42	6.81	1.44	3.9	1.46	1.15	1.46	0.33	1.46
11.00	18.0	0	16.6	0.4	16.3	0.5	15.6	0.7	14.1	0.96	10.6	1.1	7.88	1.12	4.21	1.14	1.55	1.14	0.58	1.14
12.00	17.8	0	16.1	0.38	15.6	0.5	14.4	0.66	14.4	0.78	8.5	0.8	5.84	0.84	3.66	0.84	0.91	0.87	0.48	0.82
13.00	18.4	0	17.0	0.4	16.3	0.52	15.0	0.68	11.7	0.82	8.08	0.83	5.37	0.8	3.05	0.8	1.06	0.8	0.4	0.8
14.00	17.8	0	15.4	0.36	14.3	0.4	11.1	0.5	7.4	0.5	5.01	0.5	3.33	0.5	1.96	0.5	0.48	0.48	0.2	0.48
15.00	17.9	0	13.1	0.3	10.3	0.32	7.41	0.32	4.84	0.33	3.32	0.33	2.26	0.33	1.27	0.33	0.47	0.33	0.19	0.33
16.00	17	0	5.86	0.18	4.3	0.18	2.96	0.18	1.98	0.18	1.39	0.18	1.00	0.18	0.73	0.18	0.34	0.18	0.28	0.18
17.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารกำกับการเลือกซื้อท่อสแตนเลสที่ผลิตในทางอุตสาหกรรม

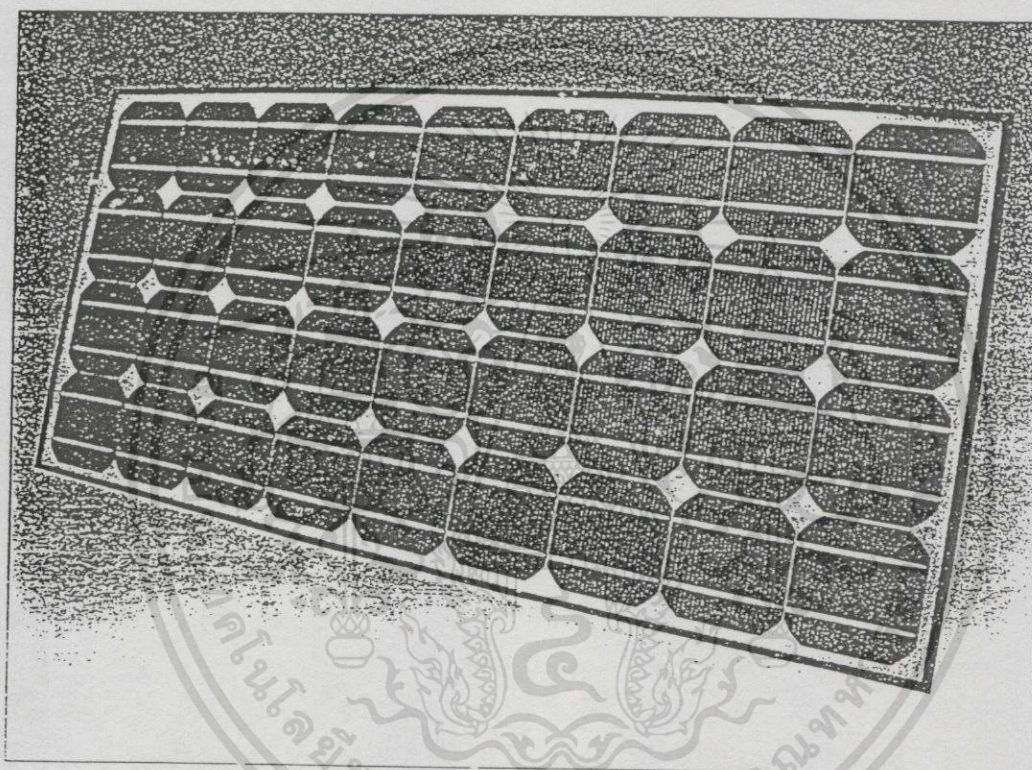
STEEL FURNITURE ROUND PIPE	Outside Diameter	: $\pm 1/64$ inch (0.4 mm)
AND GENERAL STRUCTURAL		For the $1\frac{1}{2}$ inch and small sizes
PURPOSE		$\pm 1\%$ for the 2 inch and over
	Wall Thickness	: $\pm 12\%$
	Length	: $\pm 1\%$

Outside Diameter		Wall Thickness (mm)	Calculated Weight per meter	Calculated Weight per pc (6m)
ϕ inch	ϕ mm			
3/8	9.5	0.9	0.18	1.1
1/2	12.7	0.9, 1.2	0.27, 0.35	1.6, 2.1
5/8	15.9	0.9, 1.2, 1.6	0.35, 0.43	2.1, 2.6
3/4	19.1	0.9, 1.2, 1.6	0.40, 0.53, 0.77	2.4, 3.2, 4.6
7/8	22.2	0.9, 1.2, 1.6, 2.0	0.48, 0.63, 0.85	2.9, 3.8, 5.1
1	25.4	0.9, 1.2, 1.6, 2.0	0.57, 0.72, 0.93	3.4, 4.3, 5.6
1 1/8	28.6	1.2, 1.6, 2.0	0.82, 1.07	4.9, 6.4
1 1/4	31.8	1.2, 1.6, 2.0	0.88, 1.12, 1.45	5.3, 6.7, 8.8
1 3/8	34.9	1.2, 1.6, 2.0	1.02, 1.34, 1.66	6.1, 8.0, 10.0
1 1/2	38.1	1.2, 1.6, 2.0	1.08, 1.35, 1.68	6.5, 8.1, 10.1
1 5/8	41.3	1.2, 1.6, 2.0	1.18, 1.43, 1.97	7.1, 8.6, 11.8
1 3/4	44.5	1.2, 1.6, 2.0	1.25, 1.57, 2.15	7.5, 9.4, 12.9
1 7/8	47.6	1.2, 1.6, 2.0	1.35, 1.67, 2.23	8.1, 10.0, 13.4
2	50.8	1.6, 2.0, 3.0	1.8, 2.38	10.8, 14.3
2 1/4	57.2	1.6, 2.0, 3.0	2.03, 2.78	12.2, 16.7
2 3/8	60.4	1.6, 2.0, 3.0	2.22, 2.93	13.3, 17.6
2 1/2	63.5	1.6, 2.0, 3.0	2.43, 3.12	14.6, 18.7
3	76.2	1.6, 2.0, 3.0	2.867, 4.33, 5.8	17.2, 26.0, 34.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BP THAI SOLAR

BPTS 1255 HP, BPTS 1270 HP


**HIGH POWER SOLAR MODULES
MONOCRYSTALLINE TYPE BPTS 1255 HP, BPTS 1270 HP**
**PRODUCT FEATURES**

- A high performance solar module with maximum power of 55 watts/70watts
- High efficiency monocrystalline square silicon cells.
- Designed for maximum reliability and minimum maintenance.
- Produced using in-house technology in cell manufacturing and encapsulation.
- Highly resistant to water, abrasion, hail impact and other environmental factors.
- Lightweight anodised aluminium frame with silicone edge sealant around the laminate.
- All proven products, only materials with extensive field experienced used.
- Designed and manufactured to comply with European, American and Australian standards.

TYPICAL APPLICATIONS INCLUDE

- Telecommunications
- Radio Networks
- Navigational Aids
- Telemetry
- Cathodic Protection
- Obstruction Lighting
- Water Pumping
- Domestic Lighting
- Domestic Power
- Rural Electrification
- Medical Refrigeration
- Railway Signalling

TECHNICAL SPECIFICATIONS

BPTS 1255 BPTS 1270

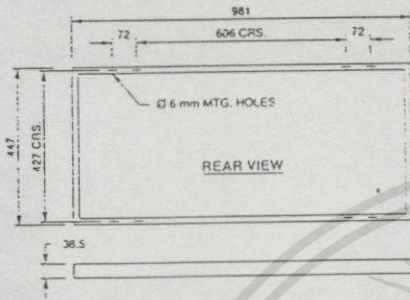
	BPTS 1255	BPTS 1270
Power (Watts)		
- Nominal Peak Power Point	55	70
Voltage (Volts)		
- Peak Power Point	17	17
- Nominal	12	12
- Open Circuit	21.2	21.2
Current (Amps.)		
- Peak Power Point	3.23	4.16
- Short Circuit	3.54	4.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้า ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

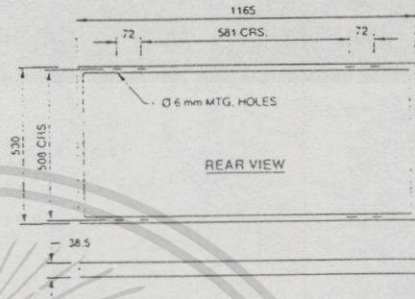
BPTS 1255 HP

DIMENSIONS



BPTS 1270 HP

DIMENSIONS



COMPONENTS

36 series connected, 104mm monocrystalline silicon pseudo square cells.

Toughened high transmission (92%) glass, 3mm thick.

Encapsulant: Ethylene Vinyl Acetate (EVA).

Back surface: Polyester/Tedlar triaminale.

Frame: Anodised aluminium.

Frame seal: Silicone.

Junction box: For external connections, and by-pass diode incorporation.

Weight: 5.9 kg.

Dimensions:

- Length: 981 mm.
- Width: 447 mm.
- Depth: 38.5 mm.

Module power measurements are specified using sun simulators referenced to International Standards.

Figures specified are at standard conditions of 100m W/cm² of light intensity (AM 1.5) at 25°C cell temperature.

COMPONENTS

36 series connected, 125mm monocrystalline silicon pseudo square cells.

Toughened high transmission (92%) glass, 3mm thick.

Encapsulant: Ethylene Vinyl Acetate (EVA).

Back surface: Polyester/Tedlar triaminale.

Frame: Anodised aluminium.

Frame seal: Silicone.

Junction box: For external screw terminal connections, with by-pass diode and blocking diode options. The box has a hinged weatherproof lid and three cable gland entry points.

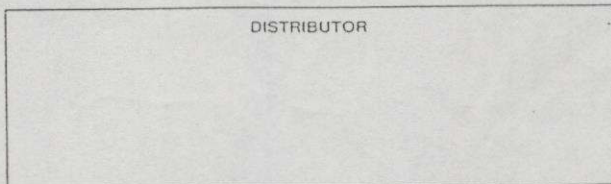
Weight: 7.5 kg.

Dimensions:

- Length: 1165 mm.
- Width: 530 mm.
- Depth: 38.5 mm.



BP THAI SOLAR



BP Thai Solar Corp., Ltd.
101/479 Nava Nakorn Industrial Estate
Phaholyothin Road, Klong 1
Klongluang, Pathumthani
Thailand
Tel: +66-2-529-1105-6
Fax: +66-2-529-4542

BP Solar International Ltd.
Solar House
Singe Street, Leatherhead
Surrey, KT22 8BZ
United Kingdom
Tel: +44-372-377899
Tlx: 8358657
Fax: +44-372-377750

BP Solar Ltd.
Credsec House, Oxford Road,
Stone, Aylesbury
Bucks HP 17 8PL
United Kingdom
Tel: +44-296-747-222
Tlx: 838867 BPSOL G
Fax: +44-296-748-111

BP Solar Australia Pty. Ltd.
P.O. Box 519
Brookvale
N.S.W. 2100
Australia
Tel: +61-2-938-5111
Tlx: AA 70605 BPSOL A
Fax: +61-2-939-1566

BP Solar España S.A.
Calle Prmera No. 5
Poligono Industrial de Valportillo
Alcobendas, Madrid
España
Tel: +34-1-661-1614
Tlx: 48496 BPSE E
Fax: +34-1-661-4713

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**MC14049UB
MC14050B**

HEX BUFFERS

The MC14049UB hex inverter/buffer and MC14050B non-inverting hex buffer are constructed with MOS P-channel and N-channel enhancement mode devices in a single monolithic structure. These complementary MOS devices find primary use where low power dissipation and/or high noise immunity is desired. These devices provide logic-level conversion using only one supply voltage, V_{DD} . The input-signal high level (V_{IH}) can exceed the V_{DD} supply voltage for logic-level conversions. Two TTL/DTL Loads can be driven when the devices are used as CMOS-to-TTL/DTL converters ($V_{DD} = 5.0\text{ V}$, $V_{OL} \leq 0.4\text{ V}$, $I_{OL} \geq 3.2\text{ mA}$). Note that pins 13 and 16 are not connected internally on these devices; consequently connections to these terminals will not affect circuit operation.

- High Source and Sink Currents
- High-to-Low Level Converter
- Supply Voltage Range = 3.0 V to 18 V
- Meets JEDEC UB Specifications—MC14049UB
- Meets JEDEC B Specification—MC14050B
- V_{IN} can exceed V_{DD}

**L SUFFIX
CERAMIC
CASE 620**

**P SUFFIX
PLASTIC
CASE 648**

**D SUFFIX
SOIC
CASE 751B**

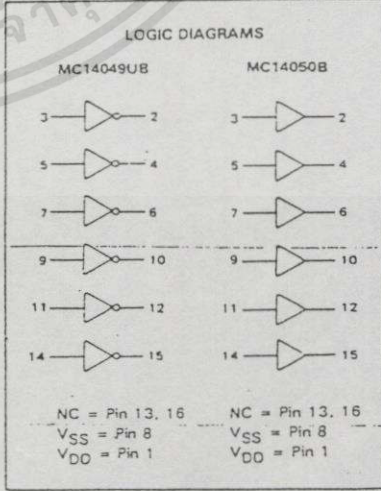
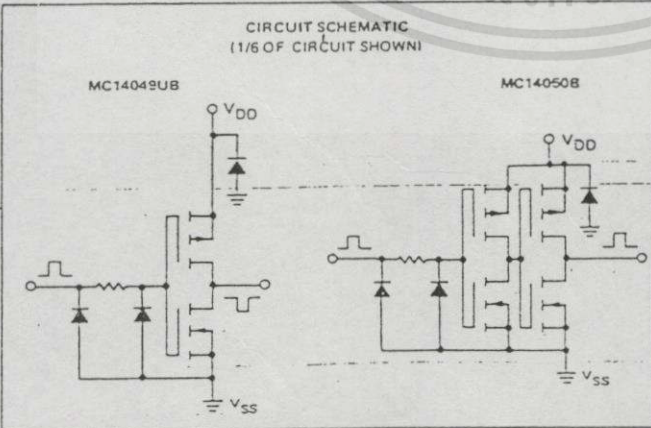
ORDERING INFORMATION
 MC14XXXBCP Plastic
 MC14XXXBCL Ceramic
 MC14XXXBD SOIC

$T_A = -55^\circ$ to 125°C for all packages.

MAXIMUM RATINGS* (Voltages referenced to V_{SS})

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V_{DD}	-0.5 to +18	V
Input Voltage (DC or Transient)	V_{in}	-0.5 to +18	V
Output Voltage (DC or Transient)	V_{out}	-0.5 to $V_{DD} + 0.5$	V
Input Current (DC or Transient), per Pin	I_{in}	≈ 10	mA
Output Current (DC or Transient), per Pin	I_{out}	+45	mA
Power Dissipation, per Package†	P_D	500	mW
Storage Temperature	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
Lead Temperature (8-Second Soldering)	T_L	260	$^\circ\text{C}$

*Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur.
 †Temperature Derating: All Packages: -7.0 mW/ $^\circ\text{C}$ from 65°C to 125°C .



MC14049UB•MC14050B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Voltages Referenced to V_{SS})

Characteristic	Symbol	V _{DD} V _{dC}	-55°C		25°C		125°C		Unit	
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min		Max
Output Voltage V _{in} = V _{DD} or 0	"0" Level V _{OL}	5.0	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	V _{dC}
		10	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	
		15	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	
	"1" Level V _{OH}	5.0	4.95	—	4.95	5.0	—	4.95	—	
		10	9.95	—	9.95	10	—	9.95	—	
		15	14.95	—	14.95	15	—	14.95	—	
Input Voltage MC14049UB "0" Level (V _O = 4.5 V _{dC}) (V _O = 9.0 V _{dC}) (V _O = 13.5 V _{dC})	V _{IL}	5.0	—	1.0	—	2.25	1.0	—	1.0	V _{dC}
		10	—	2.0	—	4.50	2.0	—	2.0	
		15	—	2.5	—	6.75	2.5	—	2.5	
	"1" Level	5.0	4.0	—	4.0	2.75	—	4.0	—	
		10	8.0	—	8.0	5.50	—	8.0	—	
		15	12.5	—	12.5	8.25	—	12.5	—	
Input Voltage MC14050B "0" Level (V _O = 0.5 V _{dC}) (V _O = 1.0 V _{dC}) (V _O = 1.5 V _{dC})	V _{IL}	5.0	—	1.5	—	2.25	1.5	—	1.5	V _{dC}
		10	—	3.0	—	4.50	3.0	—	3.0	
		15	—	4.0	—	6.75	4.0	—	4.0	
	"1" Level	5.0	3.5	—	3.5	2.75	—	3.5	—	
		10	7.0	—	7.0	5.50	—	7.0	—	
		15	11	—	11	8.25	—	11	—	
Output Drive Current (V _{OH} = 2.5 V _{dC}) (V _{OH} = 9.5 V _{dC}) (V _{OH} = 13.5 V _{dC})	Source I _{OH}	5.0	-1.6	—	-1.25	-2.5	—	-0.9	—	mA _{dC}
		10	-1.8	—	-1.3	-2.6	—	-0.9	—	
		15	-4.7	—	-3.75	-10	—	-2.7	—	
	Sink I _{OL}	5.0	3.75	—	3.2	6.0	—	2.2	—	
		10	10	—	8.0	16	—	5.6	—	
		15	30	—	24	40	—	17	—	
Input Current	I _{iq}	15	—	0.1	—	0.00001	0.1	—	1.0	μA _{dC}
Input Capacitance (V _{in} = 0)	C _{in}	—	—	—	—	10	20	—	—	pF
Quiescent Current (Per Package)	I _{DD}	5.0	—	1.0	—	0.002	1.0	—	30	μA _{dC}
		10	—	2.0	—	0.004	2.0	—	60	
		15	—	4.0	—	0.006	4.0	—	120	
Total Supply Current**† (Dynamic plus Quiescent, Per Package) (C _L = 50 pF on all outputs, all buffers switching)	I _T	5.0	I _T = (1.8 μA/kHz) f + I _{DD}							μA _{dC}
		10	I _T = (3.5 μA/kHz) f + I _{DD}							
		15	I _T = (5.3 μA/kHz) f + I _{DD}							

Data labelled "Typ" is not to be used for design purposes but is intended as an indication of the IC's potential performance.

**The formulas given are for the typical characteristics only at 25°C.

†To calculate total supply current at loads other than 50 pF:

$$I_T(C_L) = I_T(50 \text{ pF}) + (C_L - 50) \text{ V/k}$$

where: I_T is in μA (per package), C_L in pF, V = (V_{DD} - V_{SS}) in volts, f in kHz is input frequency, and k = 0.002.

422 OZONE (RESIDUAL)*

Ozone, O_3 , a potent germicide, also is used as an oxidizing agent for the destruction of organic compounds producing taste and odor in water, for the destruction of organic coloring matter, and for the oxidation of reduced iron or manganese salts to insoluble oxides, which can be precipitated or filtered from the water.

1. General Discussion

The iodometric method described is quantitative, subject to few interferences except for most volatile oxidants, and capable of good precision. The method also can be used for the determination of ozone in air by absorption of the ozone in iodide solution.

*Approved by Standard Methods Committee, 1981.

If iodometric titration is considered undesirable, any method for measuring residual chlorine (see Section 408) may be applied after ozone stripping into the adsorber has been completed. These methods determine iodine with acceptable accuracy.

The ozone concentration in water, air, or oxygen also can be determined continuously by photometric instruments, which measure the strong absorption ozone exerts at the wavelength of 253.7 nm.

a. Principle: Ozone liberates iodine from a potassium iodide (KI) solution. For accurate results make the solution alkaline during absorption of ozone. In practice, KI solutions quickly become alkaline during the process, so buffering is not required. After immediate acidification, the liberated iodine is titrated with standard 0.005M sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) with starch indicator.

b. Interference: Because ozonated water may contain manganese dioxide, ferric ion, chlorine, possibly peroxide, and other oxidation products, avoid these interferences by passing the ozone through the gaseous phase into a KI solution for titration. Titrating a sample added directly to the KI solution (without first passing ozone through the gaseous phase), as compared with titrating after ozone stripping, will indicate whether interfering oxidants are present. If such interferences are absent or negligible, ozone transfer through inert gas stripping may be eliminated.

The stability of ozone solutions decreases progressively at each increment in temperature above freezing and with each increment in pH above 3.0.

c. Sampling and storage: Determine ozone immediately; samples cannot be preserved or stored because of instability of the residual. The stability of residual ozone is markedly improved at low temperatures and low pH. Minimize aeration during sample collection.

d. Minimum detectable concentration: Approximately 30 $\mu g O_3/L$.

2. Apparatus

The following are required for sample collection:

a. Gas-washing bottles and absorbers, 1-L and 500-mL capacities. To prevent loss of ozone on glass frits found on standard wash bottles, cut off glass diffusers and draw tube into a 1-mm tip extending to approximately 5 mm from bubbler bottom.

b. Pure air or pure nitrogen gas supply, 0.2- to 1.0-L/min capacity.

c. Glass, stainless steel, or aluminum piping, for carrying ozonized air. Good-quality polyvinyl† tubing also may be used for short runs, but do not use rubber.

3. Reagents

a. Potassium iodide solution: Dissolve 20 g KI, free from iodine, iodate, and reducing agents, in 1 L freshly boiled and cooled distilled water. Store in a brown bottle in a refrigerator. Store at least 1 d before using.

b. Sulfuric acid, H_2SO_4 , 1N.

c. Standard sodium thiosulfate, 0.1M: Dissolve 25 g $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ in 1 L freshly boiled distilled water. Standardize against potassium bi-iodate (also called potassium hydrogen iodate) or potassium dichromate according to the procedure described in Section 408A.2c.

d. Standard sodium thiosulfate titrant, 0.005M: Dilute proper volume (approximately 50 mL) of 0.1M $Na_2S_2O_3$ to 1000 mL. For accurate work, standardize this solution daily, using either 0.005M potassium bi-iodate or potassium dichromate solution. Standardize as described in ¶ 4c below; 1.00 mL standard $Na_2S_2O_3$ titrant, 0.005M = 120 $\mu g O_3$.

e. Starch indicator solution: Use either an aqueous solution or soluble starch powder mixtures.

To prepare aqueous solution, add a cold water suspension of 5 g arrowroot or soluble starch to approximately 800 mL boiling water, with stirring. Dilute to 1 L, boil a few minutes, and let settle overnight. Use clear supernate. Preserve with 1.25 g salicylic acid/L or by adding a few drops of toluene.

f. Standard iodine, 0.1M: Dissolve 40 g KI in 25 mL distilled water. Add 13 g resublimed iodine and stir until dissolved. Dilute to 1 L and standardize as described in Section 408B.3g.

g. Standard iodine, 0.005M: Dissolve 16 g KI in a little distilled water in a 1-L volumetric flask, add proper volume (approximately 50 mL) of 0.1M iodine solution, and dilute to mark. For accurate work, standardize daily. Store solution in a brown bottle or in the dark. Protect from

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งหน่วยงานต้นฉบับก่อน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

direct sunlight at all times and keep from all contact with rubber.

4. Procedure

a. *Sample collection:* Collect an 800-ml. sample in a 1-L gas washing bottle.

b. *Ozone absorption:* Pass a stream of pure air or N_2 through sample and then through an absorber containing 400 mL KI solution. Continue for 5 to 10 min at a rate of 0.2 to 1.0 L/min to insure that all ozone is swept from sample and absorbed in KI solution.

c. *Titration:* Transfer KI solution to a 1-L beaker, rinse absorber, and add 20 mL 1*N* H_2SO_4 to reduce pH below 2.0. Titrate with 0.005*M* $Na_2S_2O_3$ titrant until yellow color of liberated iodine almost is discharged. Add 4 mL starch indicator solution and continue titrating carefully but rapidly to the end point, at which the blue color just disappears. Long contact of iodine and starch develops a blue compound that is difficult to decolorize. The end point may be determined amperometrically as described in Section 408C.4b except that $Na_2S_2O_3$ can be used as the titrant. Other procedures given in Section 408 for measuring iodine may be used.

d. *Blank test:* Correct sample titration result by determining blank contributed by such reagent impurities as free iodine or iodate in KI, or traces of reducing agents that might reduce liberated iodine.

Take 400 mL KI solution, 20 mL 1*N* H_2SO_4 , and 4 mL starch indicator solution. Perform whichever blank titration below applies:

1) If a blue color appears, titrate with 0.005*M* $Na_2S_2O_3$ to disappearance of blue and record result.

2) If no blue color appears, titrate with 0.005*M* iodine solution until a blue color appears. Back-titrate with 0.005*M* $Na_2S_2O_3$ to disappearance and record difference.

Before calculating ozone concentration subtract blank titration in ¶ 4d1) from sample titration, or add result of ¶ 4d2) above.

5. Calculation

$$\text{mg } O_3/L = \frac{(A \pm B) \times M \times 24,000}{\text{ml. sample}}$$

where:

A = ml. titrant for sample,

B = ml. titrant for blank (positive or negative), and

M = molarity of $Na_2S_2O_3$.

6. Interpretation of Results

The precision of the test is within $\pm 1\%$ for concentrations of 3 mg O_3/L or greater. However, rapid decrease of the residual occurs in the time elapsing between sampling and testing. Temperature also is an important factor in the decrease.

7. Bibliography

- HIRSALL, C.M., A.C. JENKINS & E. SPADINGER. 1952. The iodometric determination of ozone. *Anal. Chem.* 24:662.
- ZEMENDER, F. & W. STUMM. 1953. Determination of ozone in drinking water. *Mitt. Gebiete Lebensm.-Hyg.* 44:206.
- INGOLS, R.S., R.H. FETNER & W.H. EBERHARDT. 1956. Determination of ozone in solution. Proc. Int. Ozone Conf., American Chemical Soc., Advan. Chem. Ser. No. 21.
- RYERS, F.H. & B.E. SALTZMAN. 1958. Determination of ozone and air by neutral and alkaline iodide procedures. *J. Ind. Hyg. Ass.* 19:251.
- SALTZMAN, B.E. & N. GILBERT. 1959. Iodometric microdetermination of organic oxidants and ozone. *Anal. Chem.* 31:1914.
- ALTSHULLER, A.P., C.M. SCHWAB & M. BARE. 1959. Reactivity of oxidizing agents with potassium iodide reagent. *Anal. Chem.* 31:1987.
- U.S. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE. 1965. Selected Methods for the Measurement of Air Pollutants. Publ. No. 999-AP-11, U.S. Public Health Serv., Washington, D.C.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 1972. Method of Air Sampling and Analysis. Intersociety Comm., American Public Health Ass., Washington, D.C.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



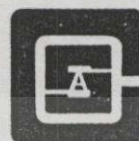
IEEE



NECTEC

IEEE
APCCAS

1998



The 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems

Theme : Microelectronics and Integrating Systems

PROCEEDINGS

November 24-27, 1998

Chiangmai, Thailand

IEEE Catalog Number: 98EX042

Design of Ozone Generator using Solar Energy

S. Potivejkul, V. Kinnares, P. Rattanavichien,
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.
Tel (662) 3266052-6101 Ext 2619, 2623, e-mail: siriwat@mut.ac.th

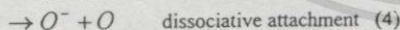
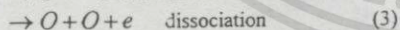
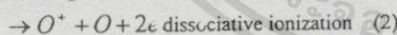
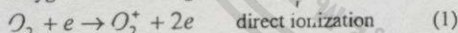
Abstract

This paper presents design of an ozone generator by using solar cells as energy source. 12 V dc from solar panels is transferred and converted to dc voltage -8 kV with ripple frequency of 15 kHz. It was tested and compared with normally negative dc in terms of the capability of ozone production. Air is passed through electrode sets to split and recombine to form ozone by corona discharge. For electrode design, concept is based on gas ionization in highly non-uniform field [3]. Point-to-plane electrodes are selected, are tested to find out the appropriate one. The prototype system can generate ozone gas from air approximately $20\text{ mgO}_3/\text{hr}$.

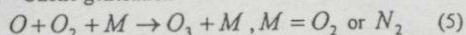
1. Introduction

Ozone has been widely used for water and air treatment due to its strong oxidation [1]. The process of generation deals with corona discharge of gas in high voltage. As regards to energy source, in tropical countries, solar energy is unlimited. The attempts to use clean energy, the study and design of a power supply which converts solar energy into high voltage have been performed. 12V dc from solar module is used as source. This paper is concerned with the conversion of 12V dc (ripple frequency of 100 Hz approximately) into dc high voltage (ripple frequency 15 kHz approximately). Such voltages are fed to electrodes for ionizing gas. For electrodes design, concept is based on gas ionization in highly non-uniform field. The reaction of ozone generation composes of 2-mechanism [1];

1. Oxygen free radical generation.



2. Ozone generation



The reaction of formation occurs in air passing through the high electric field discharge gap as shown in Figure 1. There is many factors correlating ozone generation, besides the main parts concerned in this work such as the temperature, dryness and contaminants in the fed air. Ozone is the strong oxidant, which is well known for various water treatment procedures. The capability of oxidizing is better than other oxidants such as Chlorine.

With this property and many outstanding advantages, there are many studied concerning with ozone generation.

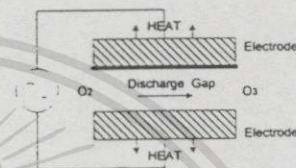


Figure 1 Basic ozone generator configuration.

2. Basic considerations for system design

The experimental system designed as a prototype ozone generator consists of 3 main parts as shown in Figure 2. The considerations of design each part is referred to the effective yield of ozone produced at output. Highly non-uniform electric field is used as the energy source for electron to ionize oxygen atom in air, splitting into free atom and then recombining to form ozone. In order to specify the parameters used in each part, basic concept of ozone generation must be understood. Apart from the factor of air inlet preparation and temperature control which are not considered in this paper, the following three main parts are observed.

2.1 Solar energy system. This system provides 12 V dc as input for the ozonator. Four panels of solar cell module 75 watts are used. The junction among solar cell array, power supply and battery are connected and controlled with ECU (Electronic Control Unit). ECU is a device responsible for battery protection. The function is included with "Hi-cut off" to disconnect charger from battery when over charging occurs, "Low-cut off" to disconnect load from battery. ECU is the coordination device in solar system.

2.2 Power supply. Although this system is designed for using with solar energy system 12 V dc, back up in case of emergency can be supplied from line voltage 220 V, 50 Hz as well. The principal of power supply design is based on corona phenomena generation. It is well known that negative dc has lower ignition voltage (V_i) and higher breakdown voltage (V_b) for highly non-uniform electric field. On the other hand the effect of frequency is outstanding to enhance corona phenomena. In this experiment, dc power supply with high ripple frequency has been built.

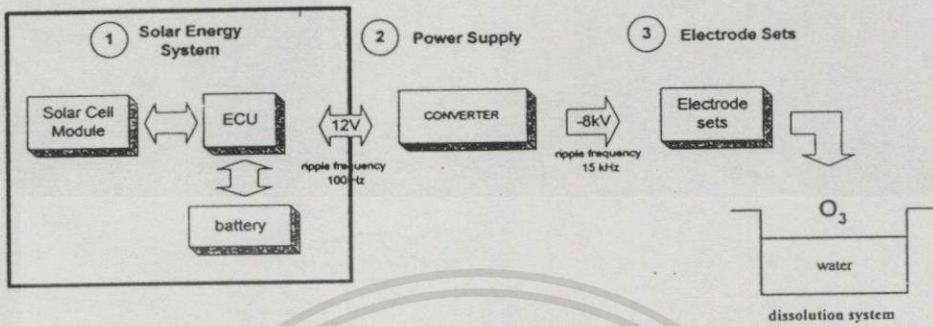


Figure 2 Prototype system for ozone generation

2.3 Electrode sets Electrode is designed for highly non-uniform electric field generation. Point-to-plane configuration are selected. Two types of point arrangements have been built. One is the arrangement of bundles of points, 754 bundles, 1508 bundles and 3016 bundles and another is the arrangement of 210 points. All electrodes are the same size and arranged on the same surface. The test and comparison have been performed.

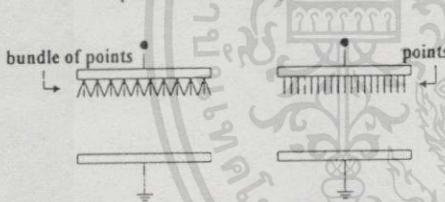


Figure 3 Front view of electrode arrangement

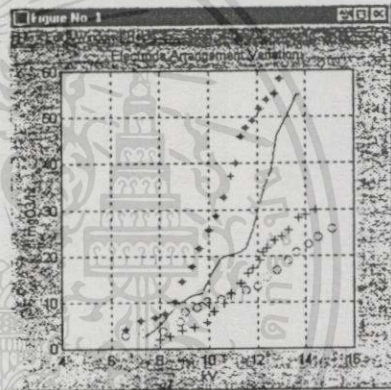


Figure 4 Ozone production in different type of points arrangement.

3. Design and experimental results

3.1 Electrode Sets

As shown in figure 3, electrodes with highly non-uniform electric field configuration was built to supply energy for ionizing oxygen molecules. They are different in 4 arrangement of points. All of them are tested with a standard dc, high voltage in a laboratory. The results of ozone production have been collected and compared as shown in Figure 4. According to the force of electric field, oxygen gas is ionized and recombined to form ozone. The yield of ozone is measured in mgO_3 per hour by chemical reaction called "Iodometric Method". The symbols in Figures 4 and 5 represent for each arrangement of points are as follows.

- + : 754 bundles of points
- : 1508 bundles of points
- * : 3016 bundles of points
- o : 210 points

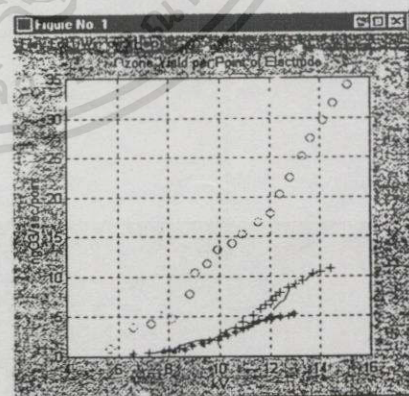


Figure 5 Ozone yield per point of electrode in different arrangement.

of ozone when comparing with the yield from standard dc source in laboratory.

Table 1 Comparison of ripple frequency effect on energy consumed and ozone yield between 2 types of DC supplies.

Power Supply	W	mgO ₃ /hr	mgO ₃ /Whr
Standard dc	248.4	16.128	0.065
High ripple frequency dc	22.8	14.112	0.619

3.3 Solar System

The method for sizing solar system in this paper is not intensive design for maximum efficiency. This is the prototype for testing. In order to meet energy requirement, the components in Figure 6 are considered in terms of watt utilization. The steps are as follows:

1). Total load of this system is as follows.

- | | |
|--------------------|------|
| 1. Ozone Generator | 24 W |
| 2. Air inlet fan | 16 W |
| Total | 40 W |

Increasing 20 % due to switching loss in dc power supply , total load becomes 50 W.

2). The evaluation of energy requirement per day is divided into day and night estimation.

From 1), daily approximation for sunshine is 8 hours.

Energy requires in day is $50 \times 8 = 400$ W-hr.

The 16 hours remained in each day requires energy from battery for operating $50 \times 16 = 800$ W-hr

If the charging efficiency of battery is about 85%, in the

night energy required is $\frac{800}{0.85} = 941.18$ W-hr.

So, total energy required per day is

$$400 + 941.18 = 1341.18 \text{ W-hr.}$$

3). 4 Modules of 75 W solar cells are used. The value of 'Daily Insolation' in Thailand is 5 peak-hr per day. So in each day, total energy receiving from solar panel is

$$\text{Daily Charging} = 75 \times 5 \times 4 = 1500 \text{ W-hr}$$

Battery selection for this system (1,500 W-hr) is

$$\frac{1500}{12} = 125 \text{ Ah.}$$

Assuming that 125 Ah. is 20% of battery capacity for long life cycle.

$$\text{Capacity of battery} = \frac{125}{0.2} = 625 \text{ Ah.}$$

In case of cloudy, rainy or winter, this system has 220 V. 50 Hz ac line voltage as a system back up. Power supply is designed for 2 types of input selection both from solar system and rectifying ac voltage to 12 V dc.

4. Conclusion

The main finding of this work could be drawn as follows:

- Ozone generator by solar energy can operate as a stand-alone system for this instance. The output yield has tendency to increase easily by considering more factors such as temperature, air preparation or chamber shielding. This is not the most effective system, the prototype can produce ozone 20 mgO₃/hr approximately.
- A dc power supply for converting 12 V from solar system into high voltage was built and tested. Rated output voltage is approximately 8kV negative dc with 15 kHz ripple frequency. A fly-back transformer is used as high voltage generator.
- Frequency of voltage has strongly effect on ozone production. The comparison between dc voltage with high ripple frequency (15kHz) and dc with low ripple frequency (100Hz) is conducted. It can be found that ozone production per energy consumed is outstanding increase with frequency effect. It is shown that when the frequency of voltage increase, the lower magnitude of voltages are required for gas ionization.
- For point-to-plane electrode arrangements, point electrodes give the better results. Although the bundles of points yield higher rate of ozone production per hour, the rate of ozone/point/second is minimum. The reason is that when shorter pin-point in bundle cause corona, the longer one cause breakdown. Heat dissipation from breakdown destroyed ozone.

5. References

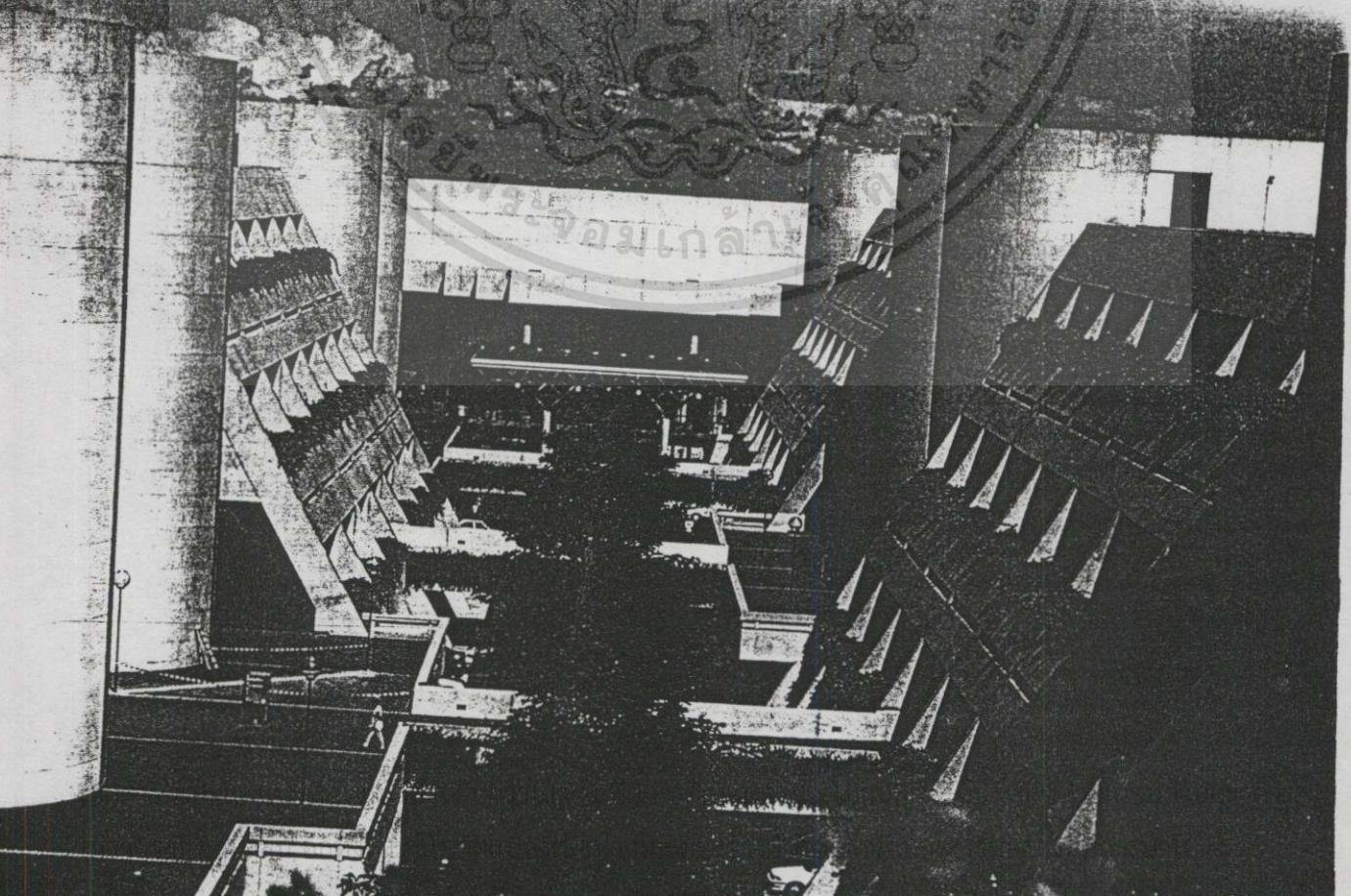
- Bruno Langlais, David A. Reckhow, Deboran R. Brink, "Ozone in Water Treatment: Application and Engineering", Cooperative Research Report, Lewis Publishing, Michigan, 1991, USA.
- France Lasnier, Tony Gan Ang, " Photovoltaic Engineering Handbook", Adam Hilger imprint by IOP Publishing Ltd., England.
- E.Kuffel, M.Abdullah, "High-voltage Engineering", Pergamont Press, Oxford, 1997, U.K.
- M.Th.El-Mohandes, S. Ushiroda, S. Kajita, Y. Kondo, K. Horii, "Ozone production in corona discharges in air in a multi-needle to plane configuration", IEEE Trans. on Industry Application, pp. 1567-1569.

IPEC '99

24 - 26 May 1999
Mandarin Hotel Singapore

Proceedings of the International Power Engineering Conference

Volume I



PV SYSTEM SIZING FOR OZONE GENERATION

P. Rattanavichien

S. Potivejkul

W. Khan-ngern

Faculty of Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Thailand

Abstract

This paper presents the ozonation system emphasized on PV (PhotoVoltaic) system sizing for the generation procedure. DC voltage is converted to dc high voltage to enhance ionization in gas. The proposed method attempts to improve the efficiency of ozone generation by using frequency effect in corona discharge in gas. High voltage switching power supply with high frequency of ripple voltage is built and tested. Total power required for daily operation is examined and indicated the size of PV system components. An AC 220 volt, 50-hertz is used as a back up system. Finally, PV system sizing for ozone generation is achieved, where ozone is used as the reagent for de-pollution, while the generating process is not increasing more pollution.

Keywords

PV, ozone generator, ionization, corona discharge.

1 INTRODUCTION

Ozone is the commercial gas for air and water treatment. The process of generation must operate on site because of its characteristic. High voltage technology is applied to ionize oxygen molecule in air. The basic concept is shown in Figure 1.

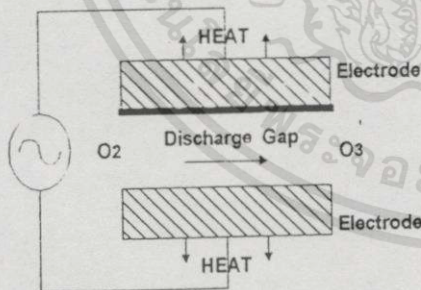
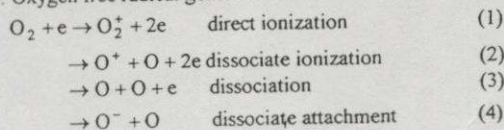


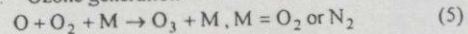
Figure 1: Basic ozone generator configuration

Two steps of ozone formation reactions are as follows:

1. Oxygen free radical generation.



2. Ozone generation



The energy sources can make this action possible by electron collision emitted from high voltage source in corona discharge. The system of ozone generation composed of three main parts: energy source (PV system), electrodes set (corona cells) and dissolution system. Components and total energy for daily are the primary stages of requirement to be determined.

2 PHOTOVOLTAIC SYSTEM

The photovoltaic system (PV) consists of a number of parts as shown in Figure 2.

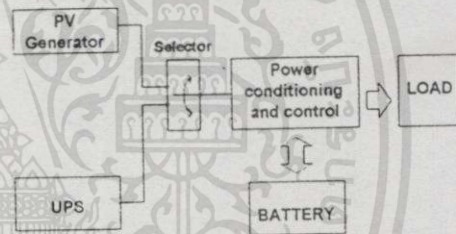


Figure 2: Photovoltaic system compartments

There are two energy sources, normally PV generator and UPS for system back up, in case of winter or cloudy day. Energy from PV generator is selected to flow to load. The conversion is performed by power conditioning and the control of battery charging. This proposed method is categorized as stand-alone system.

2.1 PV Generator

Solar cells are used for converting solar energy to electrical energy, where the main part of the system is the photovoltaic generator. The number of cells in module is governed by the voltage of the module. The value of voltage operating has to match to the voltage of the storage sub-system. The three most important electrical characteristic of the module are the short circuit current, open circuit voltage and maximum power points as function of the temperature and irradiance. These characteristics resemble the I-V curve of solar cell. For this study, the PV generator is observed and tested these characteristics correspond to the intensity of light and the angle reference to earth plane.

2.2 Energy Storage

PV supply is variable in time and usually stand-alone system, has energy storage subsystem. Battery is well known for PV system energy storage. Their specific features are differed from nominal property in other utilization. It is operated under specific conditions, which must be allowed for in the system design. As they affect both life and efficiency of battery operation. The specifications are as follows:

- 1) Daily shadow cycle, and
- 2) Deep cycle in winter or cloudy day

For battery charging, many conditions are in considered as mention as follow.

2.1.1 Charging Voltage Stability

To avoid the damage, battery must be charged correctly. For PV system, charging procedure is controlled by self-stabilized module. When it is full from charged, charging current will decrease automatically for protecting the damage due to over-charging trickle current.

2.2.2 Dark Current Leakage

In night time, there is leakage current flow back to PV module. Total electrical loss due to dark current leakage to PV module is too much to accept. A blocking diode is the solution by blocking reverse direction of current flow

2.2.3 Charging Regulator

According to self-stabilized control module, two damages may be occurred, for example insufficient rate of charging battery and low charging current in cloudy day. In case of battery with 15 V terminal voltage is used, more cells in solar module will rise this voltage up. Excess voltages cause gas emitting in battery. It can damage battery. Charging regulator is used to limit the voltage under terminal values during charging process for battery protection.

2.2.4 Protection Device

ECU (Electronic Control Unit) is connected to automatically co-operate, cut-off source and load from battery. The operations are as follows:

- 1) HI-CUT OFF for over charging protection. PV generator is cut off from the battery charging. When battery voltage decrease to the determined level. It is connected automatically again to the system to charge battery.
- 2) LO-CUT OFF for over discharging protection. Battery voltages decrease to the level of the battery damage. Load is cut off until the level of voltage rise up to nominal level then it is auto connected to system again.

2.3 Power Conditioning and Control

For supplying appropriate voltage to load, the condition of power transfer is considered. The proposed method converted 12V dc from PV system to dc -8kV. The required specific characteristic for designing is the high frequency of ripple output. So, fly-back transformer from TV monitor is adapted to use as the part of high voltage generation.

3 OZONATION SYSTEM

Ozonation system is investigated and the prototype is built. High voltage technology is applied by using solar energy as source. The system is divided into three parts. The first part is component of PV system but it is the last consideration for sizing. The second consideration is total energy required for each day indicated by the demand of ozone for water treatment. The last parts, electrodes set and dissolution system is considered as load. In designing and sizing the complete system, load has been design for treatment goal. Figure 3 shows the proposed ozonation system. Each part is indicated as follows:

3.1 Dissolution System

The target dissolution system of this study is swimming pool. The attempt to use ozone instead of chlorine has been performed. Swimming pool water needed two goals from treatment: disinfecting and clarifying. Ozone demand for disinfecting is the maximum dose comparing among all contaminants in water. At the contactor the concentration of ozone is approximately 0.4 mg/Litre with more than 4 minutes of contact time. Some disadvantages of chlorine in conventional system are indicated as follows:

- 1) Trihalomethane (THM) resulting from chlorine reactivity is dangerous. This toxic residual is stored in human for 10-30 years shown the symptom of cancer.
- 2) Chlorofenol resulting from chlorine reactivity is waste. Although at least 1 ppb (1 part in 1000 million parts) of it can cause bad smell like iodoform.
- 3) The pH of water has strongly effect on the efficiency of reaction. The effective range for disinfection is only in pH 3-7.
- 4) Chlorine stability is not long enough for disinfecting.
- 5) The temperature of water affect to the ability of chlorine for water treatment.

Ozone has overcome all of these disadvantages as mentioned above. Therefore the residual of ozone treatment, oxygen, is useful for water under treatment. Although ozone is not widely use in swimming pool treatment in Thailand, the tendency to used ozone instead of chlorine is possible.

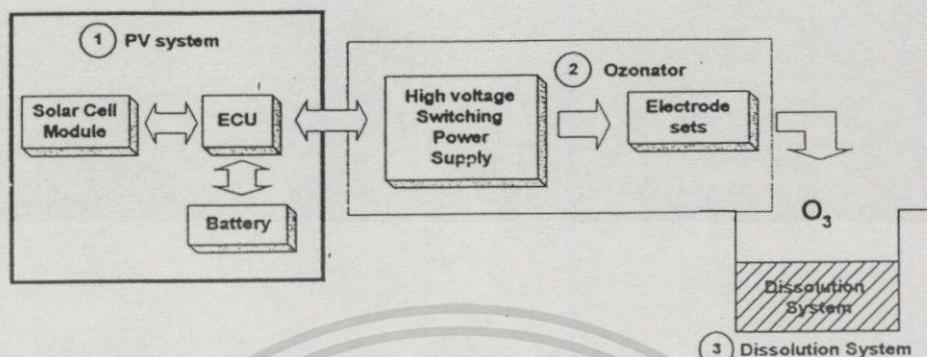


Figure 3: Ozone generation by PV system

In this study, the target pool is faced with the problems of highly chlorine residual and the uncertain demand for daily treatment. Some bacteria are found and indicated that the ability of chlorine for disinfecting is not satisfied. In designing, PV size is indicated by total energy required. Load consideration is based on the ozone demand to reach the goal of treatment. The priority of concerning is dissolution system. Electrodes set and PV sizing are lower priority respectively. The capability of ozone for disinfecting comparing with chlorine is shown in Table 1 [1]. Ct values represent for contact time in reaction between water and disinfectant reagent. The dissolution system is indicated as shown in Figure 4.

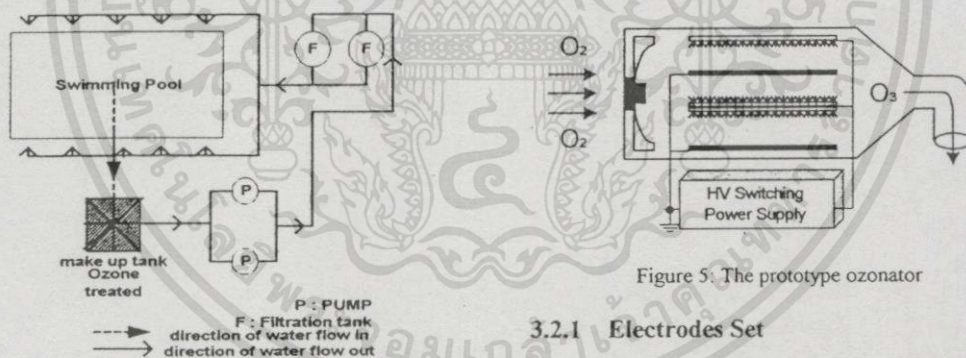


Figure 4: Dissolution system plan

Table 1: Ct value (mg/min/L) for disinfecting comparing between chlorine and ozone.

Microorganism	Disinfectant	
	Chlorine	Ozone
E. Coli	0.034-0.05	0.02
Polio I	1.1-2.5	0.1-0.2
Rotavirus	0.01-0.05	0.006-0.06
Phage f2	0.08-0.18	-
G. lamblia cysts	47->150	0.5-0.6
G. muris cysts	30-630	1.8-2.0

3.2 Ozone Generator

High voltage technology is applied in ozone generation to convert oxygen in air to ozone by ionization process. Highly non-uniform electric field is concerned dealing with corona phenomena. Energy receiving from electron in corona effect split oxygen to be free atom and then recombined to form ozone. Ozone is unstable, improper environment such as temperature, humidity and dust can destroyed or decrease the product output. The ozone generator composes of two major parts: electrodes set and power supply as shown in Figure 5.

Figure 5: The prototype ozonator

3.2.1 Electrodes Set

Point-to-plane configuration electrodes are built and tested. Two pattern of pins arrangement, single pin and bundle of pins are observed. The pins are supplied with negative dc, while plane is connected to ground. It is proved that negative corona increasing the product of ozone generation [3].

3.2.2 High-voltage Switching Power Supply

The principle of power supply designing is based on frequency effect observation on corona discharge. According to the strength of electrical break down in gas, negative dc is interested because of the characteristic of lower ignition voltage [5] and higher

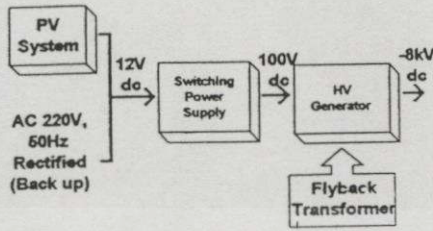


Figure 6: High voltage switching power supply

breakdown voltage. Block diagram of power supply designing shows in Figure 6. Output voltage dc -8kV with ripple frequency 15 kHz has fed to electrode set to ionize gas. The result of ozone production shows that frequency has strongly effect on the product yield. The comparison between standard dc high voltage (50Hz ripple frequency) and the proposed method (15kHz, ripple frequency) are shown in Table 2. It can be revealed that more than 9 times of ozone yield from the effect of higher ripple frequency.

3.3 PV System

For this proposed method, PV system composed of PV generator, ECU and battery. Total energy required indicates their size. The design and sizing for ozone generation is stand-alone category where the back up system is provided with ac 220V 50Hz.

4 RESULTS AND SIZING PROCEDURE

The design is divided into three parts as shown in Figure 3. This article is emphasized on PV sizing for system operation, so energy requirement is the first consideration.

4.1 Ozone Generator Design

The ozone generator is designed to energize oxygen molecule in air to form ozone as mentioned in equation (1)-(5). Two Patterns of point-to-plane electrode arrangement are built and tested [6]. From the collected data [4], it is concluded that:

1. Increasing number of pins increase ionization area. Ozone yield from bundle of pins is higher.
2. The smoothness of all tips over plane is very important. It should be kept in mind that ozone gas is unstable, heat dissipated from breakdown destroyed ozone. The prototype ozone generator is shown in figure 3. It can produce 20 mgO₃/hr approximately.

The design of high voltage switching power supply is based on the negative corona generation. The results comparing between two types of power supply, the standard dc high voltage source (50 Hz ripple frequency) and the proposed (15 kHz ripple frequency) are shown in Table 2.

Table 2: The comparison of ozone production between two types of power supply.

Power Supply	W	MgO ₃ / hr	mgO ₃ /Whr
Standard dc	248.4	16.128	0.065
High ripple frequency dc	22.8	14.112	0.619

Total loads of ozone generator are:

1. Air inlet fan	16	Watts
2. Heat transfer fan	1.32	Watts
3. Electrodes set	24	Watts
Total	41.32	Watts

4.2 Photovoltaics System

PV system compartments are shown in Figure 7. The system co-operation is performed by ECU. Total energy from load requirement indicates the size of battery and PV modules. The evaluations of these values are mentioned as follows.

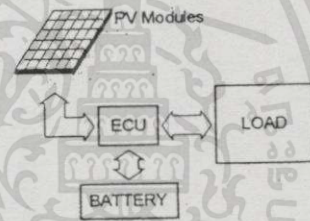


Figure 7: PV system for ozone generation

The sizing procedure is based on the evaluation of total energy requirement. It is the summary of load requirement and battery charging. Each part as shown in Figure 7 is sized as followed.

4.2.1 PV Module Observation

Solar Cell Characteristic

Solar Cell specifications: BPTS 1255

Power (Watts)	
- Nominal Peak Power Point	55
Voltage (Volts)a	
- Peak Power Point	17
- Nominal	12
- Open Circuit	21.2
Current (Amps)	
- Peak Power Point	3.23
- Short Circuit	3.54

Two solar panels are connected in parallel and tested. Figure 8 shows I-V characteristic of this experiment.

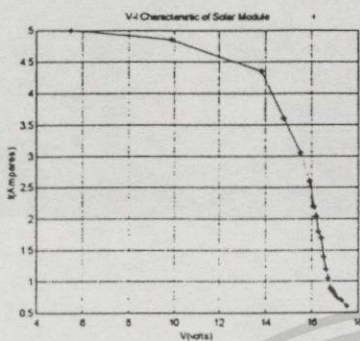


Figure 8: V-I Characteristic of solar module

In sizing PV system, the primary consideration is energy requirement. To determine total energy consumption, multiply the wattage of the appliance by the number of hours it is used in a day. In ozonation system, daily operation is about 8 hours.

4.2.2 Load

Total loads of this system are in considered. From section 4.1, the ozone generator required approximately 50 Watts. Time for operation by using PV directly is 8 hours. The energy requirement from PV is 400 W-hr approximately. In out of daylight, for 10 hours operation, energy required per day is 500 W-hr. For inefficiency battery, divided by 0.85 will give energy required from battery.

PV required	400	W-hr
Battery required	588	W-hr
Total energy required per day	988	W-hr
Solar modules must supply approximately	1000	W-hr

4.2.3 Solar module sizing

Obviously, different location receives varying amounts of sunlight. In Thailand, "Daily Insolation" constant is 5 peak-hr per day. Daily Insolation is the value for estimate solar cells output, which concerning with the angle between the sun and global terrestrial. For daily charging 1000 W-hr, the energy receive from solar module can evaluate from $1000/5 = 200$ Watts. BPTS1255, 55W is used. 4 Panels of solar modules is supply adequately for this system requirement.

4.2.4 Battery

From energy requirement 1000 W-hr, battery amp-hour can be evaluated from $1000/12 = 83.3$ or 85 Ah approximately. Battery selection is assumed to supply 85 Ah per day. For long life, this value is 20% of the real capacity.

$$\text{Capacity of battery} = \frac{85}{0.2} = 425 \text{ Ah}$$

4.2.5 ECU

For system protection, ECU is used as the co-operation device. The arrows in Figure 5 shows the direction of operation, which is controlled by ECU. It is divided into three modes of operation as follows:

- Solar Modules cut-off (HI-CUT OFF)

To protect the overcharging of battery, when reached 14.8V in 12V system, the high voltage lamp is shown (29.6V for 24V system). ECU will cut the sources off. Battery is discharged to lower until to 13.5V in 12V system (or 27V in 24V system), the high voltage lamp is off. Solar panels are connected to charge again automatically.

- Load cut-off (LOW-CUT OFF)

To cut-off load for battery over-discharge protection. The low voltage lamp is shown when 10.8V is reached in 12V system (or 21.6V in 24V system). ECU will cut the load off. The operation of load is stopped. Battery is charged until to 12.5V for 12V system (or 25V for 24V system), the low voltage lamp is off. Loads are connected again and then operate automatically.

- System co-operation

ECU is used as system co-operation. It is the device using for energy flow controlled. From two modes as mention above, the work is done automatically by controlled ECU.

In case of winter or cloudy, system back up energy supply from ac lines voltage. AC 220 V, 50 Hz is rectified to 12 V dc to the input part.

5 COMPARISON OF CONVENTIONAL AND PROPOSED SYSTEM

There are two conventional types of power supply, the first is commercial type BO10/50A the other one is constructed in 1993. The comparisons between two methods with the proposed method are shown in Table 3. This proposed system is invented for pollution reduction by using clean energy source. The attempt to use solar energy, the proper energy source for Thailand is performed.

Table 3: The comparison between conventional system and the proposed.

Data	Conventional Type	BO10/50A series (commercial)	Proposed PV system
Max. ozone Yield	5.8 mgO ₃ /W-h	1000mgO ₃ /W-h	20mgO ₃ /W-h
Power	291 watts *excluded of HV generator	3000watts *excluded of motor for dissolution system	50 watts
mgO ₃ /W-hr	0.0199	3.33	0.435
Cost	< 50 \$	> 25,000\$	1,000 \$

6 CONCLUSION

The ozonation system in the proposed method can produce approximation 20 mgO₃/hr. The principles of design and sizing procedure can conclude as follows.

1. PV system for this proposed method composed of:
 - Solar Module 55 watts BPTS 1255 × 4 panels,
 - Battery 12 V, 425 Ah,
 - AC 220V, 50Hz rectified as back up energy, and
 - ECU.
2. The principles of electrode design are based on corona discharge generation. The highly non-uniform field electrodes are constructed and tested. The results indicated that electrical break down due to the longer tip of pins destroyed ozone.
3. Frequency of voltage supply has strongly affected on ozone generation. The results of more than 9 times of yield increasing due to higher frequency.

REFERENCES

- [1] B. Langlais, D. A. Reckhow, D. R. Brink, *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering, Cooperative Research Report*, Lewis Publishing, Michigan, USA, pp. 100-103, 221.
- [2] F. Lasnier, T. G. Ang, *Photovoltaic Engineering Handbook*, Adam Hilger imprint by IOP Publishing Ltd., England.
- [3] A. S. Viner, P. A. Lawless, D. S. Ensor, and L. E. Sparks, *Ozone Generation in dc-Energized Electrostatic Precipitators*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, No. 3, May/June 1992.
- [4] S.Potivejkul, V.Kinnares, P.Rattanavichien, *Design of Ozone Generator using Solar Energy*, APCCAS IEEE Conference on Circuit and System, Thailand, Nov 24-27, 1998, pp. WP2-10
- [5] E.Kuffel, M.Abdullah, *High-voltage Engineering*, Pergamont Press, Oxford, 1997.
- [6] M.Th.El-Mohandes, S. Ushiroda, S. Kajita, Y. Kondo, K. Horii, *Ozone production in corona discharges in air in a multi-needle to plane configuration*, IEEE Trans. on Industry Application, pp. 1567-1569.

ประวัติผู้เขียน

น.ส พรพิมล รัตนวิเชียร เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2516 ที่จังหวัด กาญจนบุรี สำเร็จการศึกษา
ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย จังหวัด ลำปาง หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อ
ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จบการศึกษาในปีการ
ศึกษา 2538 และได้เข้าศึกษาต่อในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลังจนถึงปัจจุบัน

