

การศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ

A STUDY OF OZONE GENERATOR WITH ELECTRIC FIELDS
DISTRIBUTION ON WATER SURFACES

สุภาวดี เนตรโพธิ์แก้ว
SUPAVUD NEDPOBRAW

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาทางหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2620-2

การศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ

A STUDY OF OZONE GENERATOR WITH ELECTRIC FIELDS
DISTRIBUTION ON WATER SURFACES



สุภาวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

SUPAWUD NAEDPOGRAW

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61656
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2620-2

**A STUDY OF OZONE GENERATOR WITH ELECTRIC FIELDS
DISTRIBUTION ON WATER SURFACES**

SUPAWUD NEDPHOGRAW

**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**

2006

ISBN 974-15-2620-2

COPYRIGHT2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซ โอโซน ด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ
A STUDY OF OZONE GENERATOR WITH ELECTRIC FIELDS
DISTRIBUTION ON WATER SURFACES





นักศึกษานายสุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

รหัสประจำตัว 44061055

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิ์เวชกุล	
รศ.นันทน์	กฤษณจินดา	
รศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ประภาส	ไพรรสุวรรณ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 พฤษภาคม 2549 เวลา 9.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2549

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ
นักศึกษา	นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว
รหัสนักศึกษา	44061055
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ประภาส ไพรสุวรรณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอเพื่อศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน (O_3) โดยศึกษาหลักการออกแบบอิเล็กโตรดที่มีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าในแบบสม่ำเสมอ (Uniform field) ผสมผสานกับหลักการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non uniform field) โดยลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเป็นลักษณะเชิงเรขาคณิต ซึ่งลักษณะของอิเล็กโตรดจะเลือกเป็นแบบระนาบทำจากแผ่นทองแดงการออกแบบให้มีปลายแหลมจำนวนมากอยู่บนแผ่นระนาบทองแดงทำหน้าที่เป็นศักย์บวก (+) โดยการศึกษาไดอิเล็กตริกของชุดอิเล็กโตรดจะศึกษาจากเนื้อฉนวนจำนวน 3 ชั้น อันประกอบไปด้วย ฉนวนเหลวที่เป็นน้ำมัน และฉนวนแข็งที่เป็นแผ่นพลาสติกอะคริลิก และฉนวนก๊าซที่เป็นอากาศ โดยเป้าหมายหลักในการทดสอบเพื่อศึกษาคูประสิทธิภาพในการเกิดสนามไฟฟ้าที่เนื้อฉนวนต่างชนิดกันที่ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดก๊าซโอโซน สำหรับอิเล็กโตรดแผ่นล่างเป็นเนื้อวัสดุแผ่นทองแดงที่เป็นแผ่นเรียบโดยมีน้ำหล่อหุ้มกับแผ่นทองแดงเรียบร่วมทำหน้าที่เป็นตัวทำให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ (-) เพื่อศึกษาดูถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าหากสนามไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับช่องว่างอากาศแล้วก่อให้เกิดก๊าซโอโซนค่าๆ หนึ่งซึ่งจะเป็นแนวทางในการศึกษาว่าสนามไฟฟ้าและก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดที่มีเนื้อฉนวนไดอิเล็กตริกต่างชนิดกัน สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำที่ทำหน้าที่เป็นกรวดได้โดยตรง โดยถือเป็นหลักการที่นำไปสู่การบำบัดน้ำได้อีกวิธีซึ่งเป็นวิธีใหม่ในการกรณีศึกษาของงานวิจัย

Thesis Title	A Study of Ozone Generator With Electric Fields Distribution on Water Surfaces
Student	Mr.Supawud Nedphograw
Student ID.	44061055
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prapas Prisuwana

ABSTRACT

This research proposes a study of ozone (O_3) generator by using the uniform and highly non-uniform emission of electric field for electrode designing. The emission of electric field is analyzed by using mathematical models. The electrode is selected by using horizontal copper core and is designed as a plate-sharp point. This electrode inside a tube is positive potential. This research also studies the dielectric of electrode set by selecting 3-layer insulator, namely oil, alcalic and air. The main objective of this testing is to observe the electric field appearing at each insulators that has relationship to ozone generation. The negative electrode is made by copper, which installed at the base of ozone generator. The behavior of ozone generation will be observe and analyze in this works. The experimental results are verify and enough for water treatment in industrial factories.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่ง จากท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ประภาส ไพรสุวรรณ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ท่านอาจารย์รองศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง รวมถึงคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะต่างๆ ในการทำ วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งการช่วยเหลือต่างๆ เป็นอย่างดีจาก คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล เพื่อนรัก ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมถึงกำลังใจ และอีกหลายๆ ท่านที่ผู้วิจัยไม่อาจกล่าวได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็น อย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่เคารพ และรุ่นน้องๆ ที่คอยให้ ความหวังและสนับสนุนด้านกำลังใจ อีกทั้งเพื่อนร่วมงานทุกคน และขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นหน่วยงาน ที่ผู้วิจัยทำงานอยู่ในปัจจุบัน ได้สนับสนุนเครื่องมือทำการวิจัย อีกทั้ง ท่านอธิการบดี ผู้บริหารทุกท่าน ที่ให้โอกาสและเวลาเรียนแก่ผู้วิจัยได้มี โอกาสศึกษาต่อซึ่งคุณค่าและประโยชน์ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาทั้งสิ้น

ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความปัญหาของปัญหา.....	1
1.2 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการนำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 สรุปและวิเคราะห์ผล.....	4
บทที่ 2 การกำเนิดก๊าซโอโซน (Ozone Generation).....	5
2.1 การกำเนิดโอโซน.....	5
2.2 อุณหภูมิกับการเกิดโอโซน.....	8
2.3 การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย.....	8
2.4 คุณสมบัติของโอโซน.....	9
2.5 ข้อดีของการนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแทนคลอรีน.....	10
2.6 ระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซน.....	12
2.7 บทนำทั่วไปเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า.....	14
2.8 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength).....	15
2.8.1 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	16
2.8.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II , III).....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน.....	22
2.9.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน.....	22
2.9.2 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	24
2.9.3 ชั้นฉนวนที่เป็นก๊าซกับของแข็ง.....	26
2.9.4 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง.....	28
2.10 ผลของขั้วแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น (U_i และ U_p).....	32
2.11 รูปลักษณะอิเล็กโทรด (Electrode configuration).....	33
2.12 ผลของสภาวะบรรยากาศ.....	35
2.12.1 ผลของความหนาแน่นของอากาศ.....	35
2.12.2 ผลของความชื้นในอากาศ.....	36
2.13 ลักษณะคิซซาร์จในก๊าซ.....	36
2.13.1 คิซซาร์จบางส่วน (Partial discharges).....	36
2.13.2 คิซซาร์จตามผิว (surface discharge).....	36
2.14 การวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ $\tan \delta$	37
2.14.1 Schering bridge.....	38
บทที่ 3 เครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน.....	42
3.1 บทนำ.....	42
3.2 หลักการออกแบบสร้างชุดอิเล็กโทรด.....	43
3.3 การทดลองเพื่อการศึกษาและออกแบบอิเล็กโทรด.....	44
3.3.1 การเลือกประเภทของสนามไฟฟ้าและรูปร่างในการออกแบบอิเล็กโทรด.....	44
3.3.2 อิเล็กโทรดที่เป็นแผ่นระนาบที่มีปลายแหลม.....	46
3.4 การคำนวณตัวอย่างเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าในการออกแบบ.....	65
3.4.1 การคำนวณตัวอย่างการหาค่าสนามไฟฟ้าเนื้อฉนวนเพื่อเป็นการศึกษา การเลือกใช้ฉนวน.....	65
3.5 การใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์ (FEM) ช่วยในการออกแบบอิเล็กโทรดแบบแผ่น ระนาบ.....	68
3.5.1 ศึกษาคุณสมบัติตัวแปรทางไฟฟ้าในอิเล็กโทรดแบบระนาบ.....	69
3.5.2 การแสดงผลการคำนวณของ FEM.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 การศึกษาผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่อการผลิตก๊าซไอโซน.....	80
3.6 การศึกษาการแตกตัวของอากาศภายในช่องว่างอากาศ (GAP) ในชั้นฉนวนต่าง ๆ.....	82
3.7 การศึกษาความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน.....	83
3.8 โครงสร้างของชุดอิเล็กโตรดในการศึกษาสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน.....	86
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลองและการออกแบบ.....	89
4.1 บทนำ.....	89
4.2 เครื่องผลิตก๊าซไอโซนและรูปร่างอิเล็กโตรดที่มีความแตกต่าง.....	89
4.2.1 การพิจารณาวิเคราะห์รูปร่างสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรด.....	90
4.2.2 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาและกับระนาบที่ปลายแหลม.....	90
4.3 เหตุผลในการเลือกใช้ฉนวนเป็นไดอิเล็กตริกชั้นระหว่างอิเล็กโตรด.....	94
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างภายในอิเล็กโตรดด้วย Finite element.....	94
4.3.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดด้วย FEM.....	96
4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไอโซน.....	97
4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเร็วลมในการป้อนอากาศเข้าสู่ชุดอิเล็กโตรด.....	96
4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ทำหน้าที่เป็นกรวดทางไฟฟ้า.....	100
4.6.1 การวิเคราะห์น้ำที่มีส่วนผสมของสีหมึกปากกา.....	102
4.7 การสรุปผลการเลือกใช้ฉนวนทางไฟฟ้าสถานะต่าง ๆ	104
4.8 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดอิเล็กโตรดกำเนิดก๊าซไอโซน.....	105
บทที่ 5 บทสรุป.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลองเพื่อออกแบบชุดอิเล็กโตรด.....	112
ภาคผนวก ข. การออกแบบชิ้นส่วนของชุดอิเล็กโตรด.....	123
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	143
ประวัติผู้เขียน.....	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่า $C \cdot t$ ($\text{mg} \cdot \text{min}/\text{L}$) ของตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ เมื่อใช้กำจัดจุลินทรีย์ ได้ 99% ที่ 5°C	9
2.2 สรุปประเภทของเสียที่ใช้โอโซนบำบัดได้ผลดี.....	10
2.3 แสดงปริมาณก๊าซโอโซนในน้ำสำหรับใช้ในครัวเรือน.....	13
2.4 การฆ่าเชื้อโรคของก๊าซโอโซน.....	14
2.5 การฆ่าเชื้อโรคของสารคลอรีน.....	14
2.6 ความคงทนต่อความเครียดไฟฟ้าของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ.....	20
2.7 คุณสมบัติของวัสดุฉนวน.....	30
3.1 ผลการทดสอบการผลิตโอโซนด้วยลักษณะของอิเล็กโทรด 2 ชนิดที่มีสนามไฟฟ้า ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน.....	45
3.2 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กโทรด ความชื้นสัมบูรณ์ ที่ $38 \text{ g}/\text{m}^3$ อุณหภูมิห้อง 33°C ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่าง ของช่องว่างอากาศ 2 cm และไม่มีฉนวนใดคั่นเป็นไดอิเล็กตริก.....	61
3.3 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กโทรด ความชื้นสัมบูรณ์ ที่ $38 \text{ g}/\text{m}^3$ อุณหภูมิห้อง 33°C ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่าง ของช่องว่างอากาศ 1 cm คั่นเป็นไดอิเล็กตริก.....	61
3.4 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กโทรด ความชื้นสัมบูรณ์ ที่ $38 \text{ g}/\text{m}^3$ อุณหภูมิห้อง 33°C ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่าง ของช่องว่างอากาศ 2 cm และมีฉนวนอะซิติก 1 cm คั่นเป็นไดอิเล็กตริก.....	62
3.5 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กโทรด ความชื้นสัมบูรณ์ที่ $38 \text{ g}/\text{m}^3$ อุณหภูมิห้อง 33°C ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่างของช่องว่างอากาศ 2 cm และมีฉนวนอะซิติก 1 cm คั่น กับฉนวนหม้อแปลง 1 cm คั่น.....	62
3.6 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กโทรด ความชื้นสัมบูรณ์ ที่ $38 \text{ g}/\text{m}^3$ อุณหภูมิห้อง 33°C ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่าง ของช่องว่างอากาศ 2 cm มีฉนวนอะซิติก 1 cm คั่นกับฉนวนหม้อแปลง 1 cm คั่น.....	63
3.7 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เนื่องมาจากที่เลือกใช้ในการศึกษาทั้ง 3 ชนิด โดยมีการศึกษา ในกรณีนี้ฉนวนกันต่างชนิดกัน.....	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.8 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เนื้อฉนวนที่เลือกใช้ในการศึกษาทั้ง 3 ชนิด โดยมีการศึกษาในกรณีเนื้อฉนวนที่คั่นต่างชนิดกัน.....	78
3.9 ผลการทดสอบการเกิดก๊าซโอโซนที่โครงสร้างฉนวนแตกต่างชนิดกันทดสอบที่อุณหภูมิ ที่ทดสอบ 38 องศาเซลเซียส (C°) ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg (ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด).....	81
3.10 การทดสอบวัดค่าการเกิดก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโตรดแบบระนาบธรรมดา มีปลายแหลมบนแผ่นระนาบโดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 20 L/min ที่ฉนวน 3 ชั้น ชั้นฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm ฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm และช่องว่างอากาศ 2 cm.....	82
3.11 การทดสอบวัดค่าการเกิดก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโตรดแบบระนาบมีปลายแหลม จำนวนที่เกิดสนามไฟฟ้ามากที่สุดจำนวน 211 จุด บนแผ่นระนาบโดยใช้อัตราการไหลของ อากาศ 20 L/min ที่ฉนวน 3 ชั้น ชั้นฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm ฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm และ ช่องว่างอากาศ 2 cm.....	83
3.12 แสดงค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับอิเล็กโตรดตัวอย่างทั้ง 4 แบบ (แบบระนาบไม่มีปลายแหลมและแบบระนาบมีปลายแหลม 140,190,211 จุด) โดยทดสอบที่ค่าแรงดันสูงกระแสสลับ โดยมีฉนวนคั่นทั้ง 3 ชั้น (น้ำมันหม้อแปลง 1 cm, อะคริลิก 1 cm, อากาศ 2 cm).....	84
3.13 แสดงค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับอิเล็กโตรดตัวอย่างทั้ง 4 แบบ (แบบระนาบไม่มีปลายแหลมและแบบระนาบมีปลายแหลม 140,190,211 จุด) โดยทดสอบที่ค่าแรงดันสูงกระแสตรง เป็นไฟบวก (+) โดยมีฉนวนคั่นทั้ง 3 ชั้น (น้ำมันหม้อแปลง 1 cm, อะคริลิก 1 cm, อากาศ 2 cm).....	84
3.14 แสดงค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับอิเล็กโตรดตัวอย่างทั้ง 4 แบบ (แบบระนาบไม่มีปลายแหลมและแบบระนาบมีปลายแหลม 140,190,211 จุด) โดยทดสอบที่ค่าแรงดันสูงกระแสตรง เป็นไฟลบ (-) โดยมีฉนวนคั่นทั้ง 3 ชั้น (น้ำมันหม้อแปลง 1 cm, อะคริลิก 1 cm, อากาศ 2 cm).....	86
4.1 ช่วงของพลังงานสำหรับการแปลงอากาศเป็นโอโซน.....	89
4.2 การผลิตก๊าซโอโซนของอิเล็กโตรดแบบระนาบและที่มีความหนาแน่นของกลุ่มปลายแหลม แรงดันป้อนที่ระยะห่างของอิเล็กโตรดเทียบกับน้ำที่เป็นกราวด์ โดยมีไดอิเล็กตริกคั่น จำนวน 3 ชนิด น้ำมัน 1 cm อากาศ 2 cm รวมระยะห่างอิเล็กโตรด 4 cm.....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 การวิเคราะห์ระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด.....	95
4.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเร็วลมที่เข้าในชุดอิเล็กโทรดต่อปัจจัยในการ เกิดก๊าซโอโซน (O ₃) ทดสอบกับอิเล็กโทรดระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม.....	99
4.5 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเร็วลมที่เข้าในชุดอิเล็กโทรดต่อปัจจัยในการ เกิดก๊าซโอโซน (O ₃) ทดสอบกับอิเล็กโทรดแบบระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด.....	99
ก.1 อิเล็กโทรดระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสสลับ AC test).....	113
ก.2 อิเล็กโทรดระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง(แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วบวก).....	114
ก.3 อิเล็กโทรดระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วลบ).....	115
ก.4 อิเล็กโทรดระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น จำนวน 1 ชั้นอะกลีลิกหนา 1 cm และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสสลับ AC test).....	116
ก.5 อิเล็กโทรดระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น จำนวน 1 ชั้นอะกลีลิกหนา 1 cm และแรงดันที่ป้อนเท่ากัน ดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วบวก).....	117
ก.6 อิเล็กโทรดระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น จำนวน 1 ชั้นอะกลีลิกหนา 1 cm และแรงดันที่ป้อนเท่ากัน ดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วลบ).....	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.7 อิเล็กโตรกระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น จำนวน 2 ชั้นเป็นฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคิลิกแรงดันที่ป้อนเท่ากัน ดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสสลับ AC test).....	119
ก.8 อิเล็กโตรกระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น จำนวน 2 ชั้นเป็นฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคิลิกแรงดันที่ป้อนเท่ากัน ดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วบวก).....	120
ก.9 อิเล็กโตรกระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม) 140, 190 และ 211 จุด ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วลบ).....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	รูปลักษณะการอิเล็กทรอนิกส์ทรอดที่มีการวิจัยผ่านมาแล้ว.....2
1.2	รูปลักษณะการเกิด โอ โชนในชุดอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นที่มีการออกแบบ.....3
2.1	การรวมตัวของก๊าซโอ โชน6
2.2	หลักการกำเนิด โอ โชนในทฤษฎี.....6
2.3	รูปแบบของเครื่องกำเนิดโอ โชนแบบท่อ.....7
2.4	แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ โรนาดิซซาร์จ.....12
2.5	อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ กัน.....15
2.6	เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในไดโอดเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า.....17
2.7	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์.....18
2.8	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดลักษณะต่าง ๆ19
2.9	การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน.....23
2.10	ฉนวนต่างชนิดกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....24
2.11	ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....24
2.12	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย.....26
2.13	แรงดันโค โรนาเริ่มเกิดและแรงดันเบรกดาวน.....33
2.14	แรงดันเบรกดาวนเฉลี่ยค่าขอดกระแสสลับ 50/60 Hz ในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน IEC ในเทอมระยะแกป d ของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดรูปแบบต่าง ๆ กัน.....34
2.15	แผ่นฉนวนแข็งกันระหว่างร็อดอิเล็กทรอนิกส์ทรอดกับระนาบ.....37
2.16	วงจร Schering bridge.....38
2.17	เวกเตอร์ไดอาแกรมของวงจร Schering bridge40
3.1	ระบบการกำเนิดของก๊าซโอ โชนที่ใช้ในหลักการ.....42
3.2	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดก๊าซโอ โชนที่ทำการออกแบบ.....43
3.3	อิเล็กทรอนิกส์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (I) และไม่สม่ำเสมอสูง (II)45
3.4	ตัวอย่างลักษณะการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรอดแบบระนาบที่มีปลายเปลม.....46
3.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรอด ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคีลิกกัน โอ โชน.....48
3.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซ โอ โชนโดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรอด ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคีลิก.....49

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะลิติก.....	49
3.8 หม้อแปลงกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 0-100 kV.....	50
3.9 ไดอะแกรมการวัดไอโซนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC test).....	50
3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะลิติกคั่นโดยป้อนแรงดันไฟบวก (+).....	53
3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะลิติกคั่นโดยป้อนแรงดันไฟบวก (+).....	51
3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟบวก (+).....	52
3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟลบ (-).....	53
3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟลบ (-).....	53
3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซไอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟลบ (-).....	54
3.16 แสดงวงจรการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC test).....	54
3.17 แสดงวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) แบบ Single-stage และตารางแสดงค่าของวงจร.....	55
3.18 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนที่เป็นไดอิเล็กตริกด้วย C-tan δ meter.....	57
3.19 แสดงวงจรสมมูลย์ของ Capacitance ที่เกิดในชั้นฉนวนต่าง ๆ.....	63
3.20 แสดงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กตริก Tettex AG 2805 จากบริษัท Haefely Trench.....	63
3.21 แสดงวงจรการทดสอบค่าไดอิเล็กตริกของชั้นฉนวนในชุดอิเล็กทรอนิกส์.....	64
3.22 ลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ FEM.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยมีฉนวนน้ำมันทั้ง 3 ชั้น (ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงระยะ 1 cm, ฉนวนอะคีลิกหนา 1 cm, ฉนวนอากาศระยะ 2 cm) (ระนาบมีปลายแหลม)	70
3.24 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนจำนวน 2 ชั้น คือ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงระยะ 1 cm และฉนวนอะคีลิกหนา 1 cm มีอากาศอย่างเดียวระยะ 4 cm (ระนาบมีปลายแหลม).....	71
3.25 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนน้ำมัน มีฉนวนอะคีลิกหนา 1cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมระยะห่างของอิเล็กโตรด 3 cm (ระนาบมีปลายแหลม).....	72
3.26 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนอะคีลิก มีฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโตรด 4 cm (ระนาบมีปลายแหลม)	73
3.27 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยมีฉนวนอะคีลิก 1 cm มีฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโตรด 4 cm (ระนาบไม่มีปลายแหลม)	74
3.28 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยมีฉนวนอะคีลิก 1 cm ไม่มีฉนวนน้ำมัน กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโตรด 3 cm (ระนาบไม่มีปลายแหลม)มี.....	75
3.29 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนอะคีลิกมีฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโตรด 3 cm (ระนาบไม่มีปลายแหลม)	76
3.30 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนอะคีลิก มีฉนวนน้ำมันระยะมีแต่อากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโตรด 2 cm (ระนาบไม่มีปลายแหลม)	77
3.31 แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในชั้นฉนวนต่างชนิดกันที่อิเล็กโตรดแบบระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม.....	79
3.32 แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในชั้นฉนวนต่างชนิดกันที่อิเล็กโตรดแบบระนาบมีปลายแหลม.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ภาคตัดขวางและโมเดลของชุดคิเล็กโตรดที่ใช้ในการศึกษาของวิจัย.....	80
3.34 ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนแตกต่างกัน.....	81
3.35 โครงสร้างและขนาดชิ้นส่วนของชุดคิเล็กโตรดกำเนิดก๊าซโอโซนแบบกระจาย สนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำ.....	87
3.36 ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของชุดคิเล็กโตรด.....	88
4.1 แสดงการทดสอบป้อนแรงดันเข้าที่ชุดคิเล็กโตรดในขณะที่มีฉนวนอากาศ เพียงอย่างเดียว.....	95
4.2 แสดงการทดสอบป้อนแรงดันเข้าที่ชุดคิเล็กโตรดในขณะที่มีฉนวนอากาศ เพียงอย่างเดียว.....	96
4.3 แสดงตำแหน่งของชั้นฉนวนในชุดคิเล็กโตรดในการวิเคราะห์การเกิดสนามไฟฟ้า ในชั้นฉนวนต่าง ๆ.....	97
4.4 แสดงของสีน้ำผสมกับน้ำที่เป็นสัคย์กราวด์โดยทิ้งไว้ที่เวลาเท่ากันกับการทดลอง ในรูปที่ 4.4.....	100
4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงในขณะทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้สนามไฟฟ้ากระจาย บนผิวน้ำโดยใช้น้ำที่มีส่วนผสมของสีน้ำ.....	101
4.6 แสดงรูป (ก) ก่อนผ่านสนามไฟฟ้า (ข) หลังผ่านสนามไฟฟ้า.....	102
4.7 แสดงรูป (ก) ก่อนทดสอบ (ข) หลังทดสอบ.....	103
4.8 แสดงของสีหมึกปากกาไวท์บอร์ดผสมกับน้ำที่เป็นสัคย์กราวด์โดยทิ้งไว้ที่เวลาเท่ากัน กับการทดลองในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ก,ข.....	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

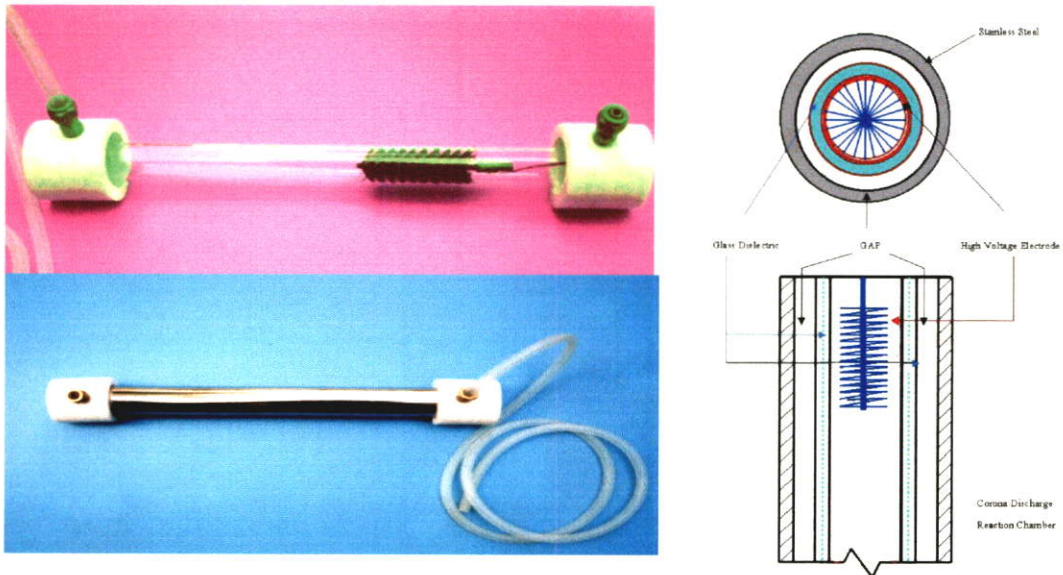
สิ่งต่างๆ ที่อยู่บนโลกใบนี้เริ่มเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นเรื่อยๆ อันเป็นผลเนื่องมาจากมนุษย์เป็นผู้กระทำเป็นส่วนใหญ่ที่ทำลายสิ่งแวดล้อม ดังนั้นมนุษย์ก็ควรจะเป็นผู้ที่ต้องช่วยกันรักษา เนื่องจากปัจจุบันนี้สิ่งต่างๆ ที่อยู่บนโลกใบนี้มีความเสี่ยงที่จะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ถ้ามองกันแล้วก็เป็นเรื่องที่ยากลำบากที่จะช่วยกัน โดยเฉพาะเรื่องของธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมนั้นเป็นเรื่องที่กว้างขวางมากโดยมุมมองของที่มาในงานวิจัยนี้จะช่วยทำให้ลดความเสี่ยงที่จะทำลายสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการแก้ไขและรักษาสิ่งแวดล้อมให้กับประโยชน์ส่วนรวมได้ในอนาคตต่อไป

โดยสังเกตเห็นถึงงานวิจัยที่จะช่วยรักษาสีสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อสร้างงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ในการแก้ไขและรักษาสีสิ่งแวดล้อม จึงมองเห็นประโยชน์อย่างมากมายของก๊าซโอโซนที่จะช่วยในการรักษาสีสิ่งแวดล้อม โดยที่ก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและสิ่งต่างๆ ได้ จึงได้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำและอากาศ โดยมีการเพิ่มก๊าซโอโซนเข้าไปในน้ำหรืออากาศซึ่งจะช่วยทำให้คุณภาพของน้ำและอากาศมีสภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยอาศัยหลักการของการสร้างแรงดันสูง แล้วทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าขึ้นที่ตัวอิเล็กโทรดจะเกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จกระทำกับอากาศ (O₂) ทำให้อะตอมของอากาศเกิดการแตกตัวออกมานั้น แล้วมีการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นเกิดการจับตัวของก๊าซออกซิเจนขึ้นใหม่จนกลายเป็นก๊าซโอโซน (O₃) ซึ่งมีการแยกตัวของธาตุสูง มีคุณสมบัติในการกำจัดสารพิษบางอย่าง และฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำและอากาศได้

1.2 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ซึ่งในงานวิจัยที่ได้มีการออกแบบสร้างมาแล้วเป็นการออกแบบจากทฤษฎีทางไฟฟ้าแรงสูง คือ การทำให้เกิดการแตกตัวเป็นก๊าซโอโซนโดยการสร้างความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยหลักการป้อนแรงดันเข้าที่ชุดอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน โดยมีแท่งปลายแหลมลักษณะคล้ายขนแปรงทองเหลืองหรือลวดเหล็กอยู่ในแก้วทรงกระบอกที่ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริก โดยมีกระบอกสเตนเลสทรงกระบอกสวมเข้าอีกชั้น เพื่อต่อเป็นกราวด์ โดยมีช่องว่างอากาศชั้นระหว่างแก้วกับสเตนเลสทรงกระบอกนั้น เพื่อให้เกิดการแตกตัวของก๊าซออกซิเจนในช่องว่างอากาศกลายเป็นก๊าซโอโซน ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ได้ทำการทดสอบวิจัยมาแล้ว

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนโดยศึกษาหลักการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง ลักษณะการออกแบบสร้างเป็นลักษณะอิเล็กโทรดแบบแผ่นระนาบสองแผ่นโดยมีไดอิเล็กตริกฉนวนจำนวน 3 ชั้นคั่นทั้งนี้ฉนวนชั้นที่ 3 เป็นฉนวนอากาศซึ่งเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยมีการทำปฏิกิริยากันขึ้นระหว่างน้ำกับก๊าซโอโซน โดยก๊าซโอโซนจะมีการเข้าไปผสมผสานกับโมเลกุลของน้ำจัดการกับสิ่งต่างๆในน้ำ อย่างเช่นการฆ่าเชื้อแบคทีเรียในน้ำและช่วยเพิ่มคุณภาพน้ำให้มีสภาพที่ดีกว่าปกติ



รูปที่ 1.1 รูปลักษณะอิเล็กโทรดที่มีการวิจัยผ่านมาแล้ว

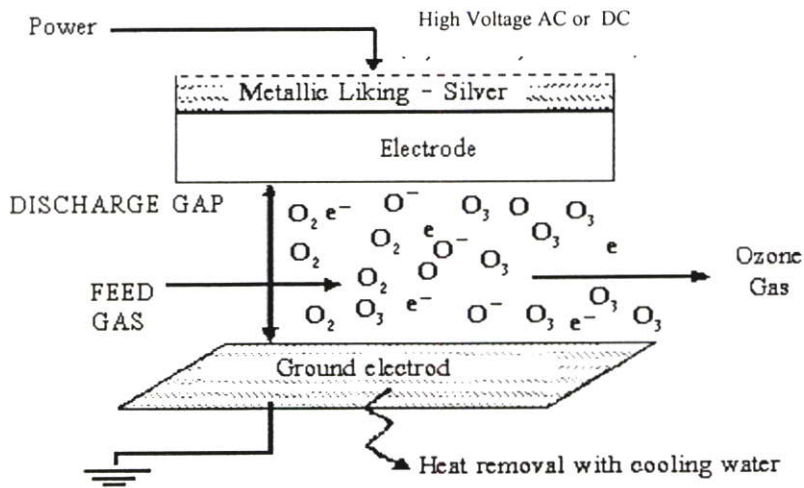
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สืบเนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อมนุษย์มากมายดังที่ได้ทราบกันดี และในปัจจุบันได้มีการค้นคว้าหาแนวทางที่จะมีการพัฒนา และหาวิธีการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะมากระทบต่อมนุษย์ให้ได้มากที่สุด ซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะสามารถมีผลกระทบนั้นมาจากปัญหาอากาศเป็นพิษและปัญหาน้ำเน่าเสีย ผู้วิจัยจึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นเพื่อศึกษาวิจัยในการที่จะสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยหลักการใหม่ขึ้น ซึ่งเป็นหลักการวิธีหนึ่งที่ประยุกต์มาจากหลักการสร้างก๊าซโอโซนด้วยหลักการโคโรนาดีสชาร์จ ดังนั้นเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยต้องการให้เป็นผลแห่งวิทยานิพนธ์นี้จึงมี ดังนี้

1.3.1 เพื่อศึกษาและประยุกต์หลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมาเพื่อทดสอบในงานวิจัย

1.3.2 เพื่อศึกษาหลักการผลิตก๊าซโอโซนด้วยการใช้หลักการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำ

1.3.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลการวัดค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ โอโซนที่เกิดขึ้น จากหลักการใหม่นี้ โดยเทียบกับปัจจัยต่างๆ



รูปที่ 1.2 รูปลักษณะการเกิดโอโซนในชุดอิเล็กโตรดซึ่งเป็นที่มาในการออกแบบ

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีและแนวคิดได้มาจากการประยุกต์และพัฒนาหลักการกำเนิดก๊าซโอโซนแบบต่างๆ มาศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเอาก๊าซโอโซนที่ได้จากชุดกำเนิดมาให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยตรงกับน้ำที่ต้องการบำบัดจากโอโซนสืบเนื่องจากกรรมวิธีต่างๆ ที่ได้ทำการวิจัยมาแล้วนั้นจะใช้หลักการที่ผลิตก๊าซที่ได้แล้วจะนำมาทำการผสมผสานเข้ากับน้ำจึงเปรียบได้ว่าการบำบัดในลักษณะที่ได้วิจัยมาแล้วจะแยกการผลิตก๊าซโอโซนออกจากการนำไปใช้งาน แต่แนวคิดของงานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะให้เกิดการไอออไนเซชันเข้ากับน้ำที่บำบัดด้วยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าแรงสูงลงบนผิวน้ำนั้นๆ โดยตรง ทั้งนี้งานวิจัยนี้จึงจะได้สรุปผลจากการวิเคราะห์ผลมาเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาแนวทางในการผลิตก๊าซโอโซนมาในรูปแบบใหม่ๆ ในอนาคตต่อไป

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาออกแบบสร้างชุดอิเล็กโตรดในการประยุกต์ด้วยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ

1.5.2 ทดสอบการเกิดก๊าซโอโซนในชุดอิเล็กโตรดที่ศึกษาออกแบบสร้าง

1.5.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโทรด ซึ่งประกอบด้วยเนื้อฉนวนไฟฟ้าแรงสูงชนิดต่างๆ ด้วยการการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าในช่องว่างอากาศที่เกิดการปฏิกิริยาแตกตัวเป็นก๊าซไอโซนที่ระยะห่างของระดับเนื้อฉนวนชนิดต่างๆ

1.5.4 เปรียบเทียบผลการป้อนแรงดันสูงกระแสสลับและกระแสตรงในชุดอิเล็กโทรดมีผลต่อการเกิดก๊าซไอโซนเช่นไร

1.5.5 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีผลต่อการเกิดก๊าซไอโซนในชุดอิเล็กโทรด

1.5.6 วิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อฉนวน

1.5.7 วิเคราะห์ปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษาประโยชน์ของก๊าซไอโซนในลักษณะต่างๆ

1.6.2 ศึกษาคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อก๊าซไอโซน

1.6.3 ศึกษาอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.6.4 ออกแบบและสร้างชุดอิเล็กโทรดกำเนิดก๊าซไอโซน

1.6.5 ทดสอบการทำงานตามขอบเขตและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.6.6 สรุปผลการทดลอง

1.7 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากข้อมูลที่ผลการวิเคราะห์ทดลองที่ได้เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบเงื่อนไขต่างๆ แล้วผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่า ผลที่ได้จากการทดลองออกแบบลักษณะของอิเล็กโทรดในรูปแบบของขอบเขตในงานวิจัยแล้วจะพบว่า การออกแบบลักษณะการสร้างก๊าซไอโซนนี้สามารถได้ผลออกมาในระดับหนึ่งแต่ผลที่ได้สามารถชี้ชัดได้ว่าการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำนั้น สามารถทำให้เกิดก๊าซไอโซนได้และผลที่ได้ก็สามารถทำให้สนามไฟฟ้าแรงสูงที่กำเนิดก๊าซไอโซนนั้น มีปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรง ตามสมมุติฐานที่เป็นไปตามหลักการแห่งการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

การกำเนิดโอโซน (Ozone Generation)

2.1 การกำเนิดโอโซน

ขบวนการผลิตก๊าซโอโซน

ขบวนการผลิตก๊าซโอโซนอาจแบ่งออกได้ 3 วิธี คือ

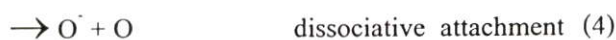
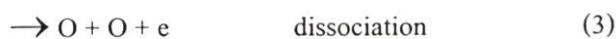
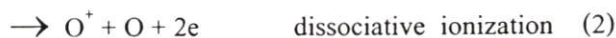
1. วิธีการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet irradiation) เป็นการฉายรังสียูวีที่ได้จากหลอดยูวี ที่บรรจุด้วยไอปรอทที่มีความยาวคลื่น 190-250 นาโนเมตร วิธีนี้สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ค่อนข้างต่ำ ก็มีความเข้มข้น 0.1 – 20 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

2. วิธีโคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge method) ซึ่งเป็นการฉายด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความต่างศักย์สูง (5,000-20,000 โวลต์) ลงบนก๊าซออกซิเจนซึ่งผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่ง ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด และสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ตั้งแต่ 2.5 มิลลิกรัมถึง 200 กรัมต่อชั่วโมง

3. วิธีการฉายด้วยพลาสมา (glod plasma method) เป็นการฉายด้วยรังสีพลาสมาที่ได้จากแท่งแก้ว 2 แท่ง ที่บรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน และมีกระแสไฟฟ้าแรงสูงไหลผ่าน ทำให้เกิดสนามพลาสมาที่มีพลังงานสูง ซึ่งใช้ในขบวนการอุตสาหกรรมที่ต้องการปริมาณก๊าซโอโซนสูง วิธีนี้ให้ผลผลิตได้มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

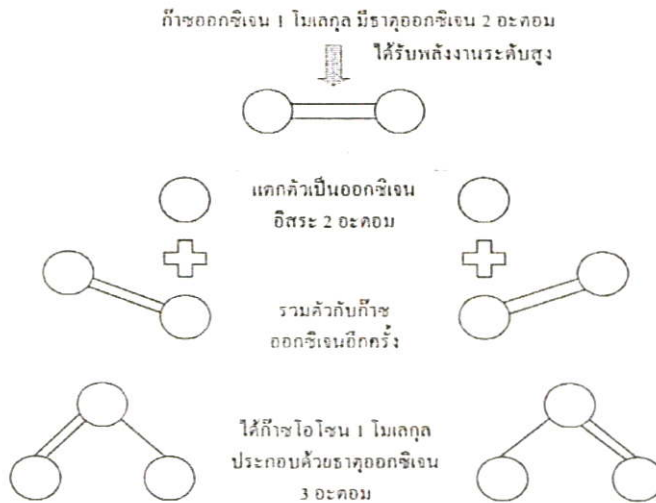
ผังรูปแสดงตัวสร้างโอโซนแบบพื้นฐาน แรงดันไฟฟ้าจะถูกป้อนให้อิเล็กโทรดทั้งสองขั้วที่มีไดอิเล็กตริกและช่องอากาศคั่นอิเล็กโทรดทั้งสองอยู่ อากาศจะถูกดูดผ่านช่องอากาศนี้และจะเกิดการแตกตัวของอากาศเนื่องจากเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจนอิเล็กโทรดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ออกซิเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นโอโซนตามขั้นตอนดังนี้

1. Oxygen-free radicals are generated by ionic process :

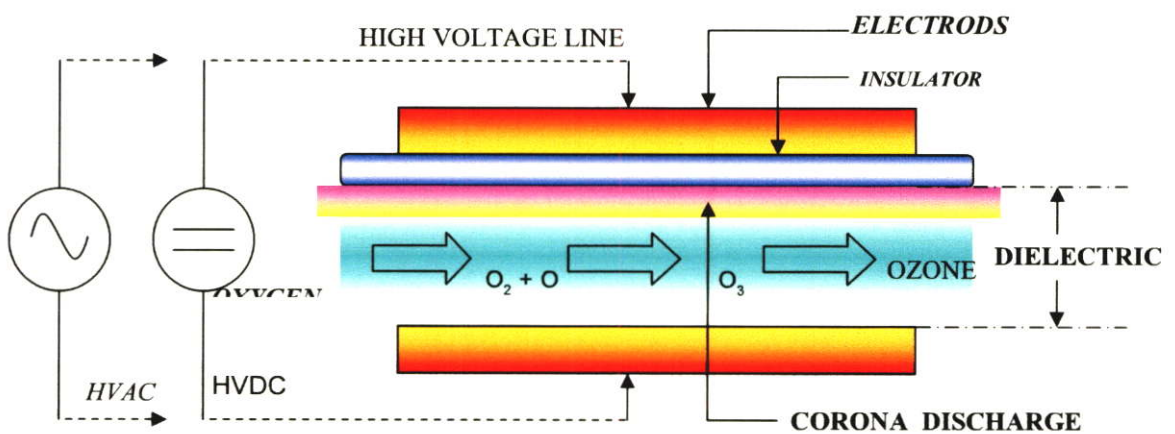


2. Ozone is generated by free radical reaction :





รูปที่ 2.1 การรวมตัวของก๊าซโอโซน



รูปที่ 2.2 หลักการกำเนิดก๊าซโอโซนในทฤษฎี

แรงดันไฟฟ้ามีความสำคัญในการกำเนิดโอโซน ที่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างขั้วของอิเล็กโทรดและความดัน

$$V = k_1 p g$$

เมื่อ V : แรงดันที่จำเป็น

p : ความดันที่ช่องว่างอากาศ

g : ระยะแกป

ในทำนองเดียวกัน ความสามารถในการกำเนิดโอโซนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและแรงดันกำลังสองและผกผันกับความหนาของไดอิเล็กตริก

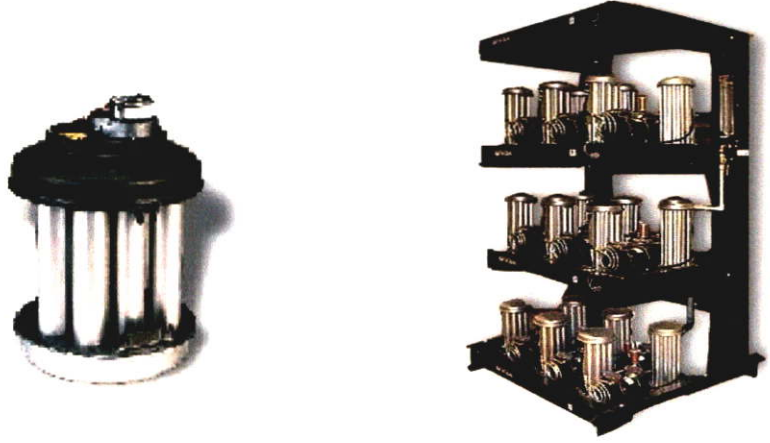
Yield : $k_2(feV^2)/d$

- เมื่อ f : ความถี่
- V : แรงดัน
- e : ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
- d : ความหนาของไดอิเล็กตริก

จากสมการนี้พบว่าจะมีปัญหาในการออกแบบเครื่องกำเนิดไอโซน คือ เราต้องพยายามทำไดอิเล็กตริกให้บางที่สุดเท่าที่จะทำได้และทนแรงดันเบรกดาวนได้สูง ขณะเดียวกันเพื่อให้ไอโซนมาก ๆ เราก็ต้องเพิ่มแรงดันให้สูง ๆ ด้วย เพราะแรงดันยิ่งสูงยิ่งดี ($O_2 \propto V^2$) ในอีกทางหนึ่งขณะที่แรงดันสูง ๆ ถูกนำมาใช้ สารไดอิเล็กตริกก็จะเสียหายได้ง่ายขึ้น ในปัจจุบันมีวิธีที่นิยมในการเพิ่มปริมาณไอโซนที่ต้องการโดยเพิ่มปริมาณไอโซนที่ต้องการโดยเพิ่มความถี่ของกระแสที่ใช้ นอกจากนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไอโซนก็ยังมีการพัฒนาคุณภาพไดอิเล็กตริกให้ดียิ่งขึ้น และการระบายความร้อนออกจากเซลล์ที่กำเนิดไอโซน ในปัจจุบันมีวิธีการที่จะผลิตไอโซน 3 ชนิดพื้นฐานที่ใช้คือ แบบออกโตเพลต (Otto plate) แบบท่อ (Tube type) และแบบโลเธอร์เพลต (Lowther plate) แต่ละวิธีก็ได้แสดงไว้ดังรูปข้างล่าง

แบบออกโตเพลตถูกออกแบบขึ้นในปี 1905 แบบนี้มีประสิทธิภาพไม่ดี แต่ก็ยังมีใช้กันอยู่ในบางส่วนของยุโรปตะวันตก

แบบท่อนั้นประกอบด้วยจำนวนหลอดหลายหลอดที่มีรูปแสดงในรูปที่ 2.3 อิเล็กโตรดตัวข้างนอกจะเป็นท่อสแตนเลสและรอบ ๆ จะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ ท่อแก้วที่อยู่ตรงกลางที่มีการเคลือบด้วยตัวนำอยู่



รูปที่ 2.3 รูปแบบของเครื่องกำเนิดไอโซนแบบท่อ

ภายในท่อสามารถแทนด้วยท่อสแตนเลส แรงดันไฟฟ้าแรงสูงจะถูกป้อนเข้าระหว่างตัวนำที่เคลือบอยู่ในหลอดแก้วกับท่อเหล็กที่อยู่ด้านนอก และอากาศหรือออกซิเจนจะถูกทำให้ผ่านระหว่างช่องว่างนั้น รูปแบบที่หลากหลายของการออกแบบวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

รูปแบบที่พัฒนาปรับปรุงขึ้นใหม่เร็ว ๆ นี้คือ แบบโลเธอร์เพลต วิธีนี้จะใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ (2 แบบข้างต้นใช้น้ำในการระบายความร้อน) ถูกทำขึ้นจาก a gas tight arrangement of an aluminum heat dissipator, อิเล็กโตรดเหล็กเคลือบด้วยเซรามิกส์, Silicone-rubber spacer, และเคลือบเซรามิกส์ชั้นสองที่อิเล็กโตรดเหล็กที่ด้านนอกและด้านในในรูปแบบนี้ให้ประสิทธิภาพสูง

การระบายความร้อนที่เซลล์กำเนิดไอโซน [tube or plates] จะเพิ่มประสิทธิภาพการกำเนิดไอโซน เครื่องกำเนิดไอโซนจะถูกป้อนด้วยออกซิเจน, ออกซิเจนปนอากาศ หรือ อากาศผ่านเข้าไประหว่างอิเล็กโตรดของเครื่องกำเนิดไอโซนที่มีสนามไฟฟ้าแรงสูงคร่อมอยู่ถ้าเป็นออกซิเจนควรจะได้ไอโซน 5-7 % โดยน้ำหนักถึงจะคุ้มทุน

วัสดุที่ใช้ในระบบสร้างไอโซนนั้นจะต้องระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากไอโซนมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูง (oxidized) วัสดุจำพวกยางหรือพลาสติกทุกชนิด นีโอพรีน EPDM และอลูมิเนียม ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ สิ่งที่เหมาะสมนำมาใช้คือ สแตนเลส แก้ว ไฮพาลอน เทฟลอน และคอนกรีต

2.2 อุณหภูมิกับการเกิดไอโซน

ถ้าเพิ่มอุณหภูมิก๊าซที่ป้อนเข้าเซลล์สร้างไอโซน จะทำให้อัตราการเกิดไอโซนลดลง ขณะที่อัตราการสลายตัวของไอโซนเพิ่มขึ้น นั่นคือ ว่าการระบายความร้อนให้เซลล์ไอโซนเป็นสิ่งจำเป็นในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไอโซน

2.3 การใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำเสีย

ก๊าซไอโซน (O_3) คือ ก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปรับปรุงโครงสร้างให้มีพลังงานมากขึ้น เมื่อถูกอัดให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น จะเป็นก๊าซที่มีสีน้ำเงินสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ก๊าซไอโซนมีแนวโน้มที่จะสลายตัวเองกลายเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน ทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซไอโซนให้มีความหนาแน่นสูง ๆ และเก็บไว้ได้นาน ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผลิตก๊าซไอโซน ณ แหล่งที่จะใช้งานนั้นเลย คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของก๊าซไอโซน คือมันเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ไอโซนจะทำการออกซิไดซ์หรือเติมออกซิเจนให้กับสารประกอบทางเคมีได้หลายชนิด ซึ่งคุณสมบัติพิเศษนี้เองมีส่วนในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย บำบัดน้ำสำหรับคืม น้ำที่จะใช้ในกรรมวิธีการผลิตต่าง ๆ น้ำในสระ โดยสารที่ไม่ต้องการจะถูกออกซิไดซ์และสามารถ

กำจัดออกไปได้ ประโยชน์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ สิ่งที่หลงเหลือในน้ำ หลังการบำบัดด้วยโอโซนแล้วนั้นจะมีเพียงก๊าซออกซิเจนเท่านั้น นอกจากนี้โอโซนยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้และช่วยทำให้น้ำที่บำบัดมีรสดี ไม่มีกลิ่นและไม่มีสีหลงเหลืออยู่

2.4 คุณสมบัติของโอโซน

- เป็นก๊าซที่เกิดจากออกซิเจนที่ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) หรือรังสีอัลตราไวโอเลต
- เป็นก๊าซที่มีกลิ่นฉุน
- พบมากที่ชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์
- มีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation Potential) สูงถึง 2.07 V แต่คลอรีนมีค่าศักย์ออกซิเดชันเพียง 1.36 V
- การละลายน้ำของโอโซนเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- สามารถคงตัวได้นานที่ pH ต่ำ
- สามารถฆ่าไวรัส, แบคทีเรียได้
- สามารถออกซิไดซ์กับสารอื่นได้เป็นอย่างดี
- มีน้ำหนักโมเลกุล 48.00 ความสามารถในการละลายน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ 25°C คือ 6 mg/l จุดเดือด -122.0 °C จุดหลอมเหลว 192 °C

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า $C \cdot t$ (mg · min/L) ของตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ เมื่อใช้กำจัดจุลินทรีย์ได้ 99% ที่ 5°C Table III-40 $C \cdot t$ Values (mg · min/L) for 99 Percent Inactivation of Microorganisma with Disinfectants at 5°C

Microorganism	Disinfectant			
	Free Chlorine (pH 6 to 7)	Prefirmed Chloramine (pH 8 to 9)	Chloride Dioxide (pH 6 to 7)	Ozone (pH 6 to 7)
E. coli	0.034-0.05	95-180	0.4-0.75	0.02
Polio 1	1.1-2.5	770-3740	0.2-6.7	0.1-0.2
Rocavirus	0.01-0.05	3810-6480	0.2-2.1	0.006-0.06
Phage f2	0.08-0.18	-	-	-
G. lamblia cysts	47->150	-	-	0.5-0.6
G. muris cysts	30-630	1400	7.2-18.5	1.8-2.0

Sorce :Hoff(1987)

ตารางที่ 2.2 สรุปประเภทของเสียที่ใช้โอโซนบำบัดได้ผลดี

Table III – 1 Summary of Ozone Applications

Control of:	Point of Application	Ozone Dose	Best Pathway*	Notes
Fe/Mn	Pre, Inter	Med	Molec.	Inter may be best with high-DOC waters.
Color	Inter	Med-High	Molec.	Two-step stoichiometry.
Taste and odor	Inter	High	Rad,	T&O may be produced by low ozone doses.
SOCs	Inter	Med-High	Rad.	Moler. may be best for some compounds.
Particles	Pre	Low	Unknown	May require high calcium concentration.
Algae	Pre, Inter	Low-Med	Unknown	Can be used with flotation.
Pathogens	Pre, Post	Med-High	Molec.	Pre in U.S.; post in Europe.
Cl ₂ by-products	Inter, Pre	Low-Med	Molec.	High levels of removal require Rad.
Biodegradables	Inter	Med	Unknown	Design of downstream filtration process is important.

2.5 ข้อดีของการนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแทนคลอรีน

1) ประหยัดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา โอโซนในเข้้น (Ozoneization)

โดยทั่วไปโอโซนสามารถละลายได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35°C ดังนั้นปฏิกิริยาโอโซนในเข้้นของโอโซนในน้ำเสียจึงเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ระบบจึงไม่ต้องเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิเลย

2) ง่ายและสะดวกต่อการสลายโอโซนที่เหลือจากการใช้งาน

เนื่องจากโอโซนมีวงจรชีวิตสั้น จึงทำให้โอโซนสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย

3) โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์ดีกว่าคลอรีน

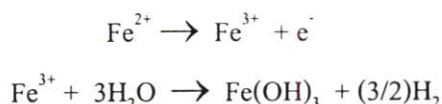
เนื่องจากโอโซนมีค่าศักย์ออกซิเดชั่นสูงกว่าคลอรีนถึง 1.52 เท่า ดังนั้นโอโซนจึงสามารถออกซิไดซ์สารประกอบเคมีที่มีพิษในน้ำได้ดีกว่าคลอรีน โดยโอโซนจะสามารถออกซิไดซ์ได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์

ออกซิเดชั่นของสารประกอบอินทรีย์ (Oxidation of organic) McGrice ได้ทำการทดลองโดยนำสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษ 16 ตัวมาทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ 3 ตัว คือ คลอรีน โปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต โอโซน ในสภาวะเดียวกัน แล้วทำการวัดเวลาที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นไปได้ 50% ของความเข้มข้นเริ่มต้น (Half Life)

ออกซิเดชันของสารประกอบอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganic)

โอโซนสามารถออกซิไดส์สารประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ โดยโอโซนจะไปออกซิไดส์ ไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น แล้วเกิดเป็นสารประกอบตัวอื่นที่ไม่ละลายน้ำแล้วตกตะกอนออกจากสารละลาย

เช่นการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียที่ ประกอบด้วย Fe^{2+} ที่ละลายน้ำได้ โอโซนจะไปออกซิไดส์ Fe^{2+} จากนั้น Fe^{3+} จะถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolysed) กลายเป็น $Fe(OH)_3$ ตกตะกอนออกมา ดังสมการ



4) สามารถกำจัดสีได้ดี

ในสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นโพลีไซคลิก (Polycyclic) บางตัวที่มีหมู่โคโมรฟอร์ คือเป็นหมู่ฟังก์ชันกรุป (function group) ที่ไม่อิ่มตัวซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (UV Visible) ได้ ทำให้สารประกอบที่มีหมู่โคโมรฟอร์นี้ให้สีได้

เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดส์หมู่โคโมรฟอร์ได้ คือไปทำลายพันธะคู่ของมันทำให้สารประกอบที่มีหมู่โคโมรฟอร์ให้สีไม่ได้ต่อไปอีก ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้

5) สามารถกำจัดกลิ่นได้ดี

ในสารประกอบอนินทรีย์และอนินทรีย์บางตัวจะมีกำมะถันและไนโตรเจน ซึ่งเป็นสารที่มีกลิ่นเหม็น ทำให้สามารถกำจัดกลิ่นในน้ำเสียได้ เช่น H_2S เมื่อถูกโอโซนออกซิไดส์จะกลายเป็น H_2SO_4 ดังสมการ



6) ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (Algae) ได้

พืชน้ำที่มีอยู่ในน้ำเสียนี้เป็นตัวกำเนิดกลิ่น ชอบอยู่ที่อุณหภูมิอุ่นประมาณ $35-40^\circ C$ และอาหารของมันคือสารประกอบอนินทรีย์ โอโซนไม่สามารถกำจัดพวกพืชน้ำได้โดยตรง เนื่องจากพืชน้ำสามารถสร้างภูมิคุ้มกันตัวมันเองตลอดเวลา แต่โอโซนสามารถกำจัดได้โดยทางอ้อม คือ โอโซนสามารถออกซิไดส์สารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นอาหารของพวกมัน ทำให้พืชน้ำหยุดการเจริญเติบโตและตายไปในที่สุด

7) สามารถแยกของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) ออกได้

ในน้ำเสียนี้อุณหภูมิคอลลอยด์ ที่มีขนาดเล็กประจูดูตามผิว เมื่อที่ผิวน้ำมีประจุเป็นกลางอนุภาคพวกนี้จะจับตัวเป็นกลุ่มลอยขึ้นมา ซึ่งโอโซนจะทำหน้าที่เป็นตัวทำให้ผิวของน้ำ มีประจุ

เป็นกลาง อนุภาคต่าง ๆ ก็ลอยขึ้นมารวมกันเป็นกลุ่มและสามารถแยกออกมาได้โดยการตกตะกอน กรองหรือช้อนออก

8) มีความปลอดภัยกว่าคลอรีน

เนื่องจากเมื่อคลอรีนไปออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์บางตัวแล้ว ทำให้เกิดสารประกอบคลอรีเนต (Chlorinate) ที่เป็นพิษ แต่เมื่อใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์แล้วจะไม่เกิดสารประกอบที่เป็นพิษแบบสารประกอบคลอรีเนตขึ้นเลย

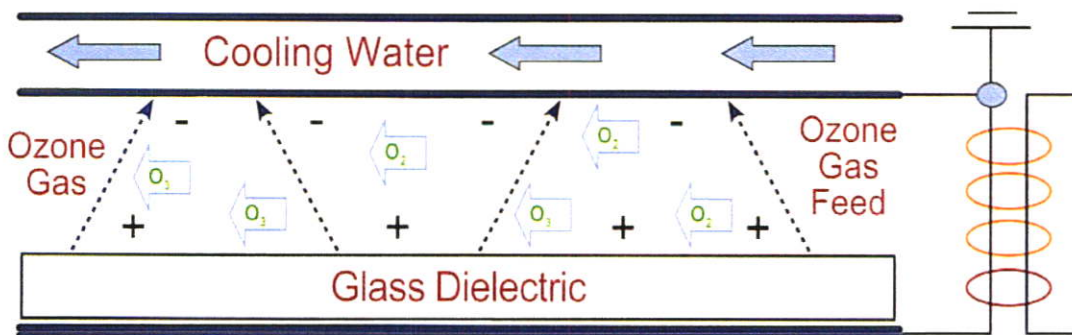
2.6 ระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โอโซน แบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้

1) ส่วนบำบัดอากาศ (Feed gas treatment)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่จำหน่ายอากาศ หรือ ก๊าซออกซิเจนไปยังหน่วยสร้างซึ่งจะมีการกำจัดอนุภาคแปลกปลอม ละอองในอากาศ ความชื้นและสารไฮโดรคาร์บอนก่อนที่จะไปถึงหน่วยสร้างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.3 ไมครอน จะถูกกำจัดออกมาโดยการป้อนก๊าซเข้าไปที่ความดัน 2 บรรยากาศ จากนั้นทำการกรอง และนำไปอบแห้ง แล้วนำแยกออกมา ก๊าซออกซิเจนที่ผ่านส่วนนี้จะมีสารปนเปื้อนน้อยกว่าก๊าซออกซิเจนในอากาศปกติ แต่ถ้าจะให้สะอาดจริง ๆ เครื่องมือที่ใช้ควรจะสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อนด้วย

2) ส่วนสร้างโอโซน (Ozone generation)

เป็นหน่วยสร้างโอโซน (O_3) จากก๊าซออกซิเจน (O_2) โดยเครื่องมือที่ใช้คือ เครื่องกำเนิดโอโซนแบบโคโรนาดิสชาร์จ (Corona-discharge ozone generator) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องกำเนิดโอโซนแบบโคโรนาดิสชาร์จ

โดยทำการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด 2 ตัว ที่ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าสูง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงระหว่างช่องว่างของอิเล็กโทรด ไปกระตุ้นโมเลกุลของ O_2 ให้สลายกลายเป็น O จากนั้น O จะไปรวมตัวกับ O_2 กลายเป็น O_3 ดังสมการ

ข้อควรระวังคือ 80% ของพลังงานที่ให้กับเซลล์จะกลายเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งถ้าร้อนมาก ๆ จะไปสลายโอโซนได้ ดังนั้นในหน่วยสร้างนี้จึงควรมีเครื่องทำความเย็นอยู่ด้วยโดยขนาดและชนิดของเครื่องนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับขนาดของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

3) ส่วนผสมโอโซนกับน้ำ (Ozone contact)

หน่วยนี้จะกลายเป็นที่เกิดปฏิกิริยาโอโซนในเซชันขึ้น ซึ่งโอโซนและน้ำเสียจะผสมกันโดยวิธีทางเชิงกลหลายวิธี เช่น เทอร์ไบน์ (Turbine) ดิฟฟิวเซอร์ (Diffusers) และอินเจกชัน (Injection) เป็นต้น

การผสมแบบดิฟฟิวเซอร์เป็นวิธีที่การส่งผ่านก๊าซโอโซนอย่างรวดเร็วและใช้พลังงานต่ำ โดยใช้เครื่องมือ

ตารางแสดงปริมาณของก๊าซโอโซนในน้ำสำหรับการใช้ในครัวเรือน

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณของก๊าซโอโซนในน้ำสำหรับการใช้ในครัวเรือน

ประโยชน์ที่ใช้	ปริมาณน้ำที่ใช้	ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ระยะเวลา (นาที)
1. ทำน้ำดื่ม	50 ลิตร	150-200	30 นาที
2. ใช้อาบน้ำ	20-30 ลิตร	150-200	10 นาที
3. ล้างผักและผลไม้	5 ลิตร	150	20 นาที
4. ล้างอาหารทะเล	5 ลิตร	150	15 นาที
5. ล้างเนื้อสัตว์	2 ลิตร	150	10 นาที
6. ล้างแผลสด	1 ลิตร	100	1 นาที
7. ล้างเท้า	10 ลิตร	150	15 นาที
8. ล้างมือ	2 ลิตร	150	5 นาที
9. ตู้เลี้ยงปลา	150 ลิตร	150	10 นาทีทุก ๆ ชั่วโมง
10. การซักผ้า	20 ลิตร	200-250	15 นาที
11. รดน้ำต้นไม้	30 ลิตร	100-150	10 นาที
12. ล้างหน้า	5 ลิตร	150	5 นาที
13. ล้างจาน	10 ลิตร	150-200	10 นาที
14. สระผม	10 ลิตร	100-150	10 นาที
15. การฟอกสี	10 ลิตร	150-200	15 นาที
16. อาบน้ำสัตว์	20 ลิตร	150-200	15 นาที
17. บ้วนปาก	250 ลิตร	100	1 นาที
18. ล้างขวดนม	5 ลิตร	150-200	5 นาที

หมายเหตุ : สำหรับน้ำ 1g/m³ เท่ากับ 1 ppm , สำหรับอากาศ 2.14 mg/m³ เท่ากับ 1 ppm

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของก๊าซโอโซนและสารคลอรีนต่อเชื้อจุลินทรีย์

ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 การฆ่าเชื้อโรคของก๊าซโอโซน

เชื้อจุลินทรีย์ (microorganism)	ความเข้มข้นของ โอโซนที่ใช้ (mg/l)	ระยะเวลาที่ใช้	เปอร์เซ็นต์ของการ กำจัด
Escherichia coli	0.01	1 นาที	100%
Fecal coliforms	1.5	10 นาที	98%
Clostridium perfringens	0.25	15 นาที	100%
Staphylococcus feacalis	0.1	20 นาที	100%
Bacillus subtilis	0.1	1 นาที	100%
Pseudomonas aeruginosa	2.0	1 นาที	100%
Endamoeba histolytica	0.5-1.0	3 นาที	99%
Poliomyelitis virus	0.45	2 นาที	100%

ตารางที่ 2.5 การฆ่าเชื้อโรคของสารคลอรีน

เชื้อจุลินทรีย์ (micro organism)	ความเข้มข้นของ คลอรีนที่ใช้ (mg/l)	ระยะเวลาที่ใช้	เปอร์เซ็นต์ของการ กำจัด
Escherichia colu	0.01	4 ชั่วโมง	99%
Bacillus subtilis	1.0	30 นาที	99%
Endamoeba histolytica	0.05-1.0	1 ชั่วโมง	0%
Poliomyelitis virus	1.0	1 ชั่วโมง	0%

2.7 บทบาททั่วไปเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างและใช้ประโยชน์ของไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแรงดันสูงที่ใดมีไฟฟ้าที่นั่นก็ต้องการฉนวนเพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้า หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟกับสายไฟ หรือ สายไฟกับสายดิน การฉนวนแก่ส่วนที่มีไฟฟ้าย่อมทำได้ง่ายถ้าหากมีที่ว่างมากพอ หรือแรงดันนั้นต่ำ เช่น ต่ำกว่า 100 โวลท์ แต่ในกรณีแรงดันสูงและมีที่ว่างจำกัด การออกแบบการฉนวนให้ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้า และลักษณะสมบัติของฉนวน

พิทช์ขีดชั้นความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ค หรือวาวไฟ หรือเบรกควานผ่านฉนวน

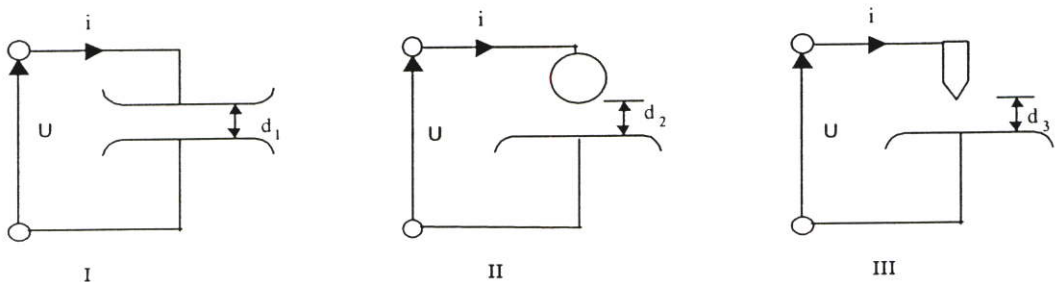
โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างค่านั้นจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรกดาวน์ ถ้าฉนวนนั้นเป็น ก๊าซ ฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าไปและคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอที่ทำให้เกิดกระแส ไหลผ่านฉนวนสูงพอจนเป็นอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสียดสภาพการฉนวนของก๊าซนั้นไม่เป็น แบบถาวร คือ เสียดสภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็น ของแข็งหลังจากเกิดเบรกดาวน์แล้ว สภาพการฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็น ของเหลว การเสียดสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากการเบรกดาวน์ หรือ สปราร์คได้ผ่านพ้น ไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

2.8 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือ ทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อ หน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่า ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (plate-to-plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่ง พอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

$E_b = f$ (ลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริกและ เวลา)



รูปที่ 2.5 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- II) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
- III) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (High nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูป 2.5 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1 , d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกดาว์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ

2.8.1 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

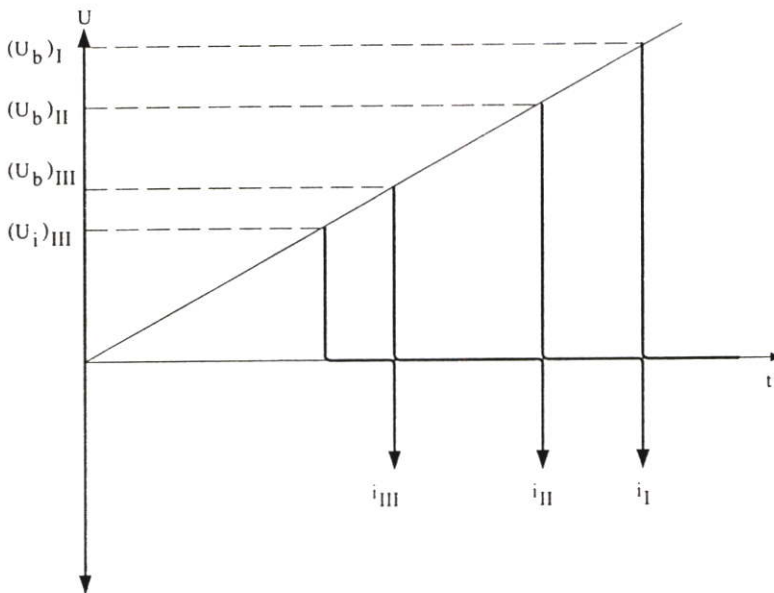
- เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด
 E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ. จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด
 E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

นั่นหมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาว์หรือสปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้น อย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาว์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรกดาว์นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ดังในรูป 2.5 (แบบ I) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกดาว์นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้า หรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \tag{2.2}$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกควานด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
 E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกควาน ซึ่งเรียกว่าความ
 คงทนทาง ไฟฟ้าของการฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า E_b นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับ
 กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง d ที่ไม่เท่ากัน ค่า E_b ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้น
 ในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริก
 ไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกควานในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

2.8.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II , III)

อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ
 จุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของ
 อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโตรดในรูป 2.6 II ถ้าเขียน
 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า จะได้ดังในรูป 2.6 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะ
 เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่านิยามว่า

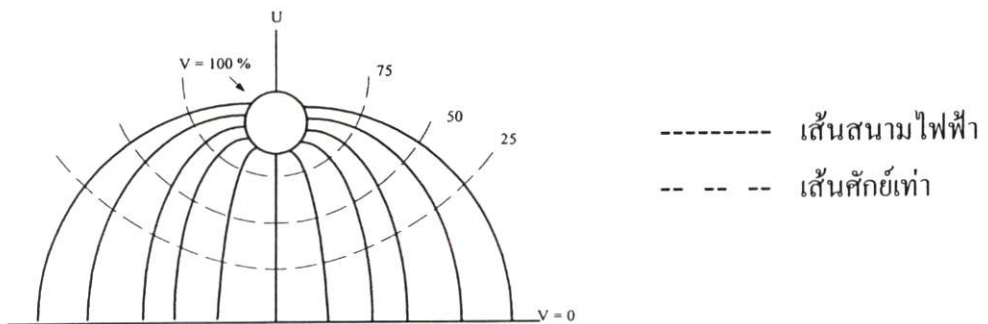
$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $\frac{U}{d}$

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ครรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้น η มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \quad (2.4)$$

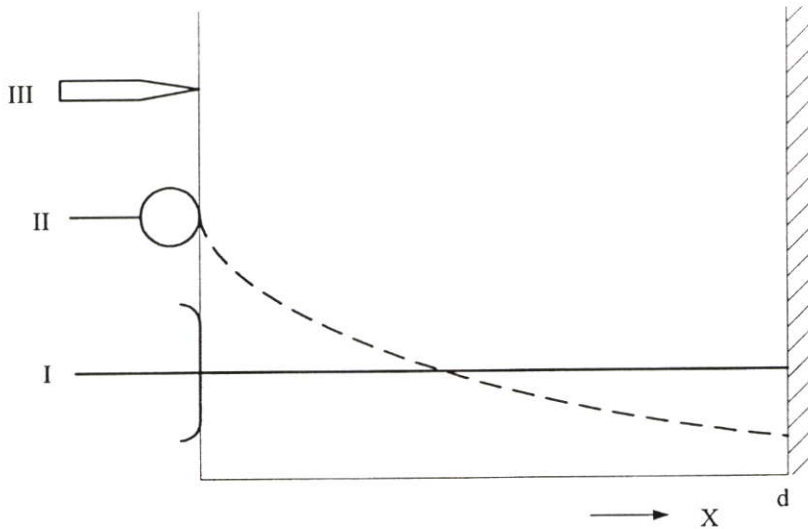
สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มี โครนาหรือพรีดิสชาร์จ (predischage) เกิดก่อนเบรกดาวน์ ดังอิเล็กโตรดในรูป 2-6 II กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

ในกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลม

ดังในรูป 2.8 III เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโทรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูป 2.8 อิเล็กโทรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรกคาวน์แต่จะเกิดโคโรนา



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

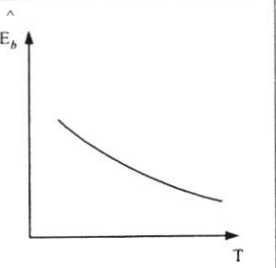
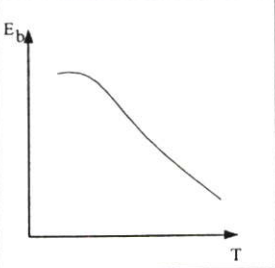
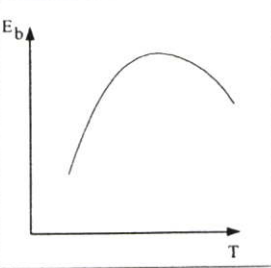
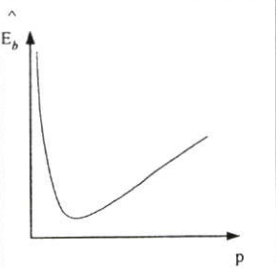
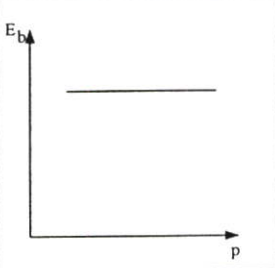
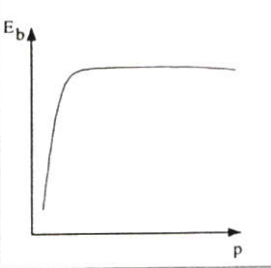
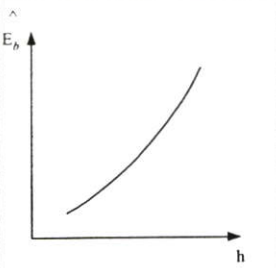
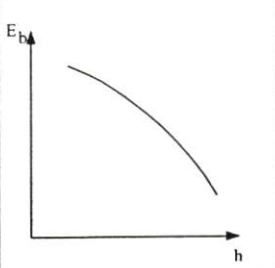
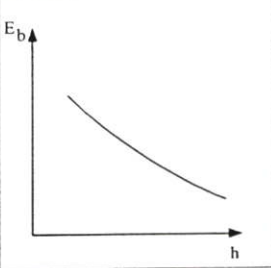
ในบริเวณใกล้ๆ ผิวอิเล็กโทรด คือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิซชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด) เรียกว่าดิซชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกคาวน์เรียกว่ากระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสพรีดิซชาร์จดังในรูป 2.8 III การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกคาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการนี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (2.5)$$

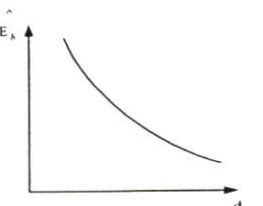
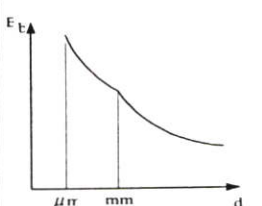
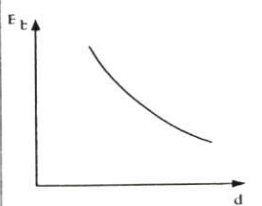
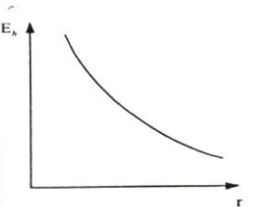
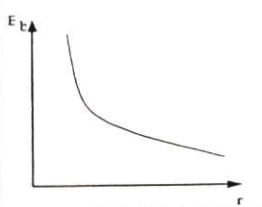
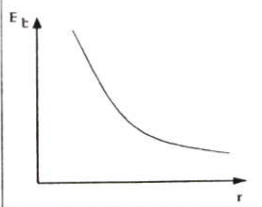
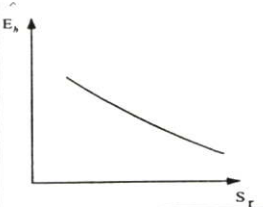
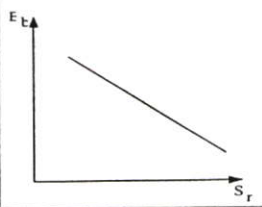
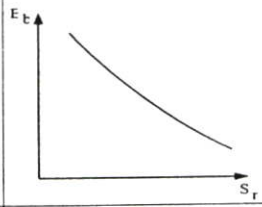
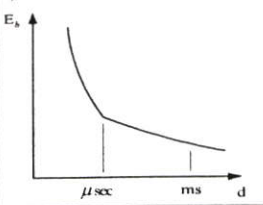
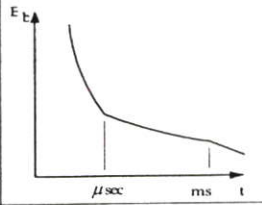
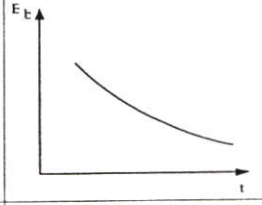
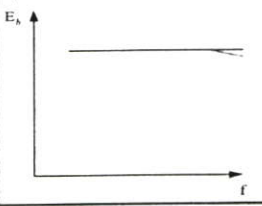
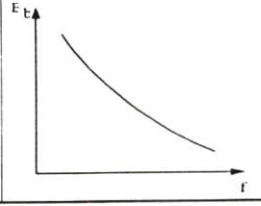
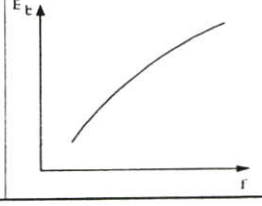
เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด
 U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่ E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (2.5) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้าง ระหว่างอิเล็กโตรด (free of space charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ สมการ (2.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage* threshold voltage inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.6 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ

รูปคลื่นแรงดัน	ค่ายอด	ค่า อาร์ เอ็ม เอส	ค่ายอด หรือ ค่า อาร์ เอ็ม เอส แล้วแต่ส่วนผสมของอากาศ
อุณหภูมิ T			
ความอัดอากาศ p			
ความชื้น h			

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

ขึ้นอยู่กับผลกระทบของ	ก๊าซ	ของเหลว	ของแข็ง
ระยะช่องห่าง d			
รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด r			
ความขรุขระของผิว			
เวลา t ที่ป้อนแรงดัน			
ความถี่ f $0 > f > 1$ kHz			

ในช่วงระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นเบรกควาน์ (ในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกควาน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.6)$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น
 E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_0 และ E_i คือ E_0 ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_0 > U_i$ ค่าแรงดันเบรกควานนี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้าง ว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด , รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรด , ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรด แล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ ดังที่ได้แสดงรวบรวมไว้โดยสังเขปในตารางที่ 2.6

2.9 ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

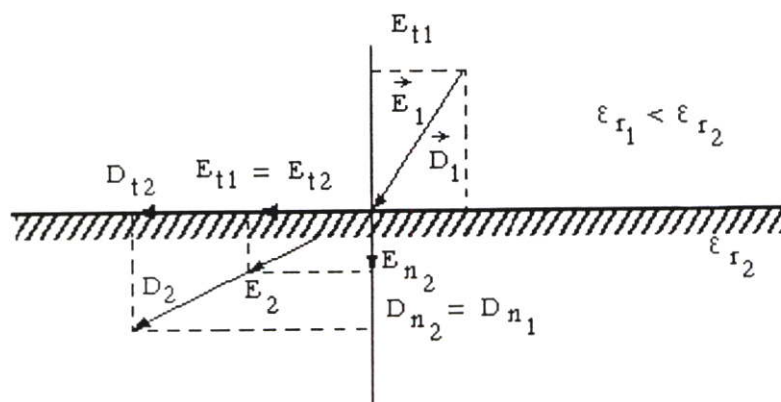
การฉนวนในทางปฏิบัติส่วนมากนอกเหนือจากหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวยึด หรือ รองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่า โครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับการฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างชนิดกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็สนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง

2.9.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน

โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวแทนเจนต์ E_t ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกัน มีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ

$$E_{t1} = E_{t2} \quad \text{และ} \quad D_{n1} = D_{n2}$$

ดังในรูปที่ 2.9



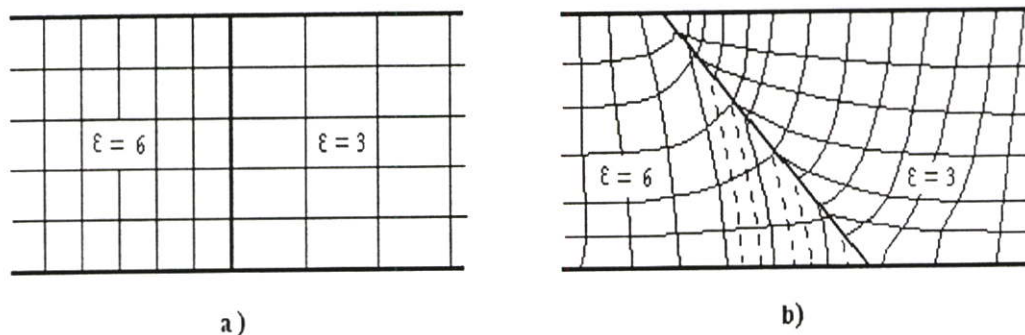
รูปที่ 2.9 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ และความจริงที่กล่าวไว้ในรูป 2.10 จึงวิเคราะห์และเขียนความสัมพันธ์
ได้ว่า

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

ซึ่งสรุปกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้า \vec{D} และ \vec{E} ในเนื้อสารที่มีค่า ϵ_r ที่มีค่ามากกว่า จะหัก
เห่างออกจากแนวตั้งฉากหรือหักเหเข้าหารอยต่อตนเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี ϵ_r
สูง จะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก

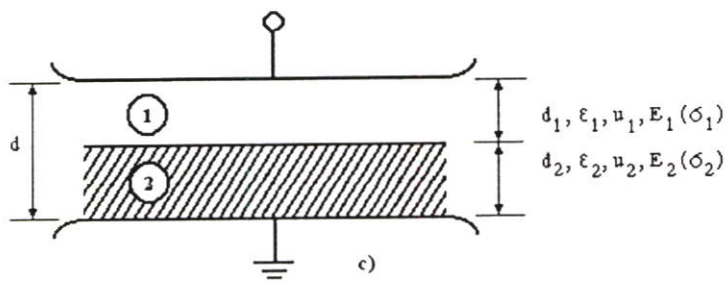
ตัวอย่างแสดงเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนาน ซึ่งมีฉนวนที่มีค่า
เปอร์มิตติวิตีต่างกันดังรูปที่ 2.10 รูป a) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนตั้งฉากกับระนาบของอิเล็กโตรด
ส่วนในรูป b) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนทำมุมเฉียง กับผิวระนาบของอิเล็กโตรด และจะเห็นว่า
ที่ปากฉลามของฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำจะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่ง
หมายถึงว่าบริเวณนั้นจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะจุดตัดระหว่างผิวระนาบของ
อิเล็กโตรดกับแนวรอยต่อของฉนวนจะมีค่าสูงมาก จะเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า
 E_0 ก่อน และทำให้เกิดคิซซาร์จขึ้นได้



รูปที่ 2.10 ฉนวนต่างชนิดกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

2.9.2 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ตามทฤษฎีแล้ว การวางชั้นฉนวนระหว่างผิวอิเล็กโทรดที่ดีที่สุด ก็คือ การวางไม่ให้มีการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้าหรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า นั่นคือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า และหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวแทนเจนต์ ค่าสมบูรณ์ ของความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ $E = \frac{U}{d}$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและใช้ความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ ฉะนั้น D จะมีค่าคงตัว และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้าเสมือนว่ามีเคปซิเตอร์ต่ออับดับกัน ฉะนั้นประจุในเคปซิเตอร์แต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าประจุแทนซ์ของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \text{แต่เนื่องจาก} \quad C_1 &\sim \frac{\epsilon_1}{d_1} \\ C_2 &\sim \frac{\epsilon_2}{d_2} \end{aligned}$$

ฉะนั้นอัตราส่วนของแรงดัน

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2} \\ U_2 &= \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แต่} \quad U &= U_1 + U_2 \\ &= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \\ &= U_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น} \quad U_1 &= \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \\ &= \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_2 \cdot d_1 + \epsilon_1 \cdot d_2} U \\ \text{แทนค่า } U_1 \text{ จะได้} \quad U_2 &= \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \end{aligned}$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองก็คือ

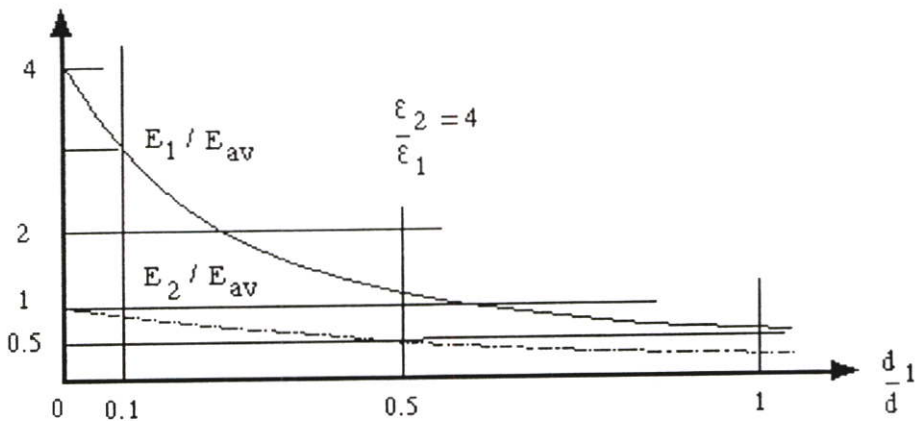
$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (2.7) \\ E_1 &= \frac{U}{d} \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \end{aligned}$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}{d_1 \left(1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{\epsilon_2 d_1} \right)}$$

$$E_2 = \frac{U}{d} \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad (2.8)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนแต่ละชั้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่า ถ้าในส่วนฉนวนที่มีค่า ϵ ต่ำ ยิ่งบาง สนามไฟฟ้าจะสูงมากยิ่งขึ้น ดังในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

2.9.3 ชั้นฉนวนที่เป็นก๊าซกับของแข็ง

เปอร์มิตติวิตีของก๊าซ $\epsilon_r \simeq 1$

เปอร์มิตติวิตีของของแข็ง $\epsilon_r \geq 2$

2.9.3.1 ชั้นอากาศบาง ๆ กับฉนวนแข็ง

ชั้นอากาศบาง ๆ มักจะมีเกิดขึ้นในระบบอิเล็กโตรด ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ด้วยเหตุผลทางเทคนิคที่ทำให้ต้องมีโครงสร้างในลักษณะเช่นนั้น และเป็นเหตุให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นชั้นอากาศบาง ๆ มีค่าสูงเกินค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ โครโรนาหรือทาสีเคลือบผิวจึงเกิดขึ้น

ตัวอย่างเช่นอากาศซึ่ง $\epsilon_{r1} = 1$ และ $d = 0$ (รอยต่อ) อยู่ระหว่างชั้นของฉนวนของแข็งที่มี $\epsilon_{r2} = 4$

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1 d_2} \rightarrow 0 \\ U_1 &= 0 \quad U_2 \approx U \end{aligned}$$

แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่ฉนวนชั้นที่เป็นของแข็ง

$$\text{แต่} \quad E_1 \approx \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} E_2 = 4 E_2 \quad \text{โดยที่} \quad E_2 \approx \frac{U}{d}$$

ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนของแข็งปกติจะมีค่าสูงกว่าส่วนที่เป็นก๊าซ โดยเฉพาะอากาศที่ความดันบรรยากาศ จึงไม่อาจใช้ฉนวนแข็งที่ทนความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้เต็มที่ถ้าหากต้องการหลีกเลี่ยงมิให้เกิดดิสชาร์จ

ฟองอากาศหรือช่องอากาศในของแข็งทำให้เกิดการเบี่ยงเบน หรือหักเหของสนามไฟฟ้า ฉะนั้นการออกแบบสร้างจึงควรหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศหรือชั้นบางของอากาศ

2.9.3.2 ชั้นฉนวนของแข็งบาง ๆ กับอากาศ

ในกรณีที่มีก๊าซเป็นฉนวนคั่นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แล้วใส่ฉนวนของแข็งบาง ๆ คั่นเข้าไป นั่นคือ

$$\begin{aligned} \epsilon_{r1} &= 1 \quad (\text{อากาศ}) \quad d_1 \rightarrow d \\ \epsilon_{r2} &= 4 \quad (\text{ของแข็ง}) \quad d_2 \rightarrow 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น} \quad \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1 d_2} \quad \text{มีค่าเข้าสู่อนันต์} \\ U_1 &= U \\ U_2 &= 0 \end{aligned}$$

แรงดันที่ป้อนเข้าไปส่วนใหญ่จะตกคร่อม ในฉนวนส่วนเป็นก๊าซ ความเครียดสนามไฟฟ้าในของแข็งจึงมีค่าต่ำ

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon} E_1$$

$$\frac{1}{4} E_1 \quad \text{เมื่อ} \quad E_1 \approx \frac{U}{d}$$

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนจึงกำหนดด้วยก๊าซ

2.9.4 ชั้นฉนวนของเหลวกับของแข็ง

มักจะพบในทางภาคปฏิบัติอยู่เสมอ ที่ต้องใช้ฉนวนเหลวร่วมกับฉนวนแข็ง และอยู่ในลักษณะแทรกผสมของเหลวช่วยระบายความร้อน ส่วนของแข็งช่วยยึด เช่น เคเบิลแรงสูงแบบกระดาษบรรจุน้ำมัน หรือหม้อแปลงที่มีทั้งกระดาษอัดและน้ำมันเป็นฉนวนหลัก กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนแข็งเหล่านี้มีคุณสมบัติความพรุนที่ดูดซึมของเหลวได้ สนามไฟฟ้าในฉนวนผสมเหล่านี้เป็นคอมเพล็กซ์ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจึงเป็นค่าของฉนวนผสม เพื่อให้ง่ายต่อการคิดคำนวณ จึงสมมติว่าไดอิเล็กตริกผสมกันอย่างสม่ำเสมอ คือ คิดเป็นความเครียดสนามไฟฟ้าค่าเฉลี่ย โดยคิดจากค่าเปอร์มิตติวิตีรวม ϵ_{res} คือ คิดเสมือนหนึ่งว่าไดอิเล็กตริกซ้อนกัน ในทำนองเดียวกับในรูปที่ 2.12 ความหนาของชั้นฉนวนแต่ละชนิดเท่ากับ d_1 และ d_2 ฉะนั้นความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าเฉลี่ยของฉนวนแต่ละชั้นเท่ากันจะมีค่า

$$D_m = \epsilon_{res} E_m = \epsilon_1 E_{1m} = \epsilon_2 E_{2m}$$

จากสมการฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ

$$E_1 = \frac{U}{d} \cdot \frac{\epsilon_2 / \epsilon_1}{\frac{d_1}{d_2} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad \text{และ}$$

$$E_2 = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$

แทนค่า E_1 หรือ E_2 จากสมการ

$$\text{จะได้} \quad \epsilon_{res} E_m = \epsilon_1 \frac{U}{d} \frac{\epsilon_2 / \epsilon_1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{res} E_m = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d\epsilon_1} + \frac{d_2}{d\epsilon_2}}$$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $E_m = \frac{U}{d}$ จะได้เปอร์เซ็นต์ความชื้นผสมเป็น

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{\frac{d_1}{d\epsilon_1} + \frac{d_2}{d\epsilon_2}} \quad (2.10)$$

เมื่อให้อัตราส่วนของความหนาของฉนวนแต่ละชนิด คือ $\frac{d_1}{d}$ และ $\frac{d_2}{d}$ แทนด้วย

สัดส่วนปริมาตรสัมพัทธ์ $\frac{d_1}{d} = v_1$ และ $\frac{d_2}{d} = v_2$ จะได้

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{v_1/\epsilon_1 + v_2/\epsilon_2} \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกันถ้ามีส่วนผสมของฉนวน n ชนิด จะหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นผสมได้

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{v_1/\epsilon_1 + v_2/\epsilon_2 + v_3/\epsilon_3 + \dots + v_n/\epsilon_n} \quad (2.12)$$

เมื่อ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$ เป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นของฉนวนองค์ประกอบ 1, 2, 3, ..., n

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ เป็นปริมาตรสัมพัทธ์ของฉนวนองค์ประกอบ 1, 2, 3, ..., n

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1 \text{ หรือ } 100\% \text{ เป็นปริมาตรรวมทั้งหมด}$$

ตัวอย่าง เกลบีสถนนวนผสมของกระดาษ (cellulos $\epsilon_r = 6$) กับน้ำมันฉนวน ($\epsilon_r = 2.2$) ความพรุนของกระดาษ = 30% คือ 30% ของปริมาตรเป็นรูพรุน

$$\text{ฉะนั้น} \quad \epsilon_{r_1} = 6, \quad v_1 = 0.7$$

$$\epsilon_{r_2} = 2.2, \quad v_2 = 0.3$$

$$\text{จะได้} \quad \epsilon_{res} = \frac{1}{0.7/6 + 0.3/2.2} = 3.95$$

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของวัสดุฉนวน (Properties of Insulating Materials *)

Insulating material	Dielectric Constant ϵ_r (air = 1) at 50 Hz	Loss factor $\tan \delta \times 10^4$		Specific Resistance At 20 ° C Ω_{cm}	Breakdown Strength kV / mm
		At 50 Hz	At 1 MHz		
Glass	3.5-9	5-100	5-100	$> 10^{10}$	10-40
Ceramic insulators					
Glazed porcelain	6	170-250	10-120	$> 10^{11}$	35
Steatite	6	10-30	3-20	$10^{12} - 10^{13}$	30-45
SINTERKORUND ^R	11	15	10	10^{15}	25-45
Mica-foil (made from mica, paper and shellac or asphalt)	4	200-400		10^{13}	17
Mineral oil (transformer oil)	2-2.5	1-5	1-5	$10^{13} - 10^{14}$	10-25
Paper (insulating paper)					
Dry	2-2.5	25-40	200-400	10^{15}	10-20
Soaked in oil	3-4	10-30		10^{15}	40-50
Acetobutyrate foil CAB	3.8-4.1	70-110	240-260	10^{15}	125-130
Epoxy casting resin EP	3.2-3.9	35-50	100-200	$10^{15} - 10^{16}$	20-45
Phenolic resin moulding	5-15	100-300	50-700	$10^9 + 10^{14}$	10-40
Polyamide PA	3.5-4	300-1000	230-270	$10^8 - 10^{11}$	50
Polyethylene PE	2.3	2-4	2-4	10^{16}	≈ 40
Polyethylene terephthalate	3.2	20	190	$> 10^{15}$	160

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

Insulating material	Dielectric Constant ϵ_r (air = 1) at 50 Hz	Loss factor $\text{Tan } \delta \times 10^4$		Specific Resistance At 20 °C Ω_{cm}	Breakdown Strength kV / mm
		At 50 Hz	At 1 MHz		
PETP	3	7	110	$\geq 10^{16}$	> 100
Polycarbonate PC	3-7	30-300	60-400	$10^{13} - 10^{15}$	25-45
Polyester casting resin UP	4	10-15	55		70
Polyacetal POM	3.5-4.5	500-600	150-300		≈ 35
Polymethylmethacrylate	2.3-2.5		5-6		75
PMMA	2.5	1.5-2.5	1.5-2.5		≈ 55
Polypropylene PP	2.0	< 2	< 2		≈ 25
Polystyrene PS	3.8-4.3	120-	60-1000	10^{15}	40
Polytetrafluorethylene	2.5-5	1500	5-500	10^{16}	20-30
TPFE		5-500		10^{16}	
Polyvinyl chloride hard				10^{17}	
PVC				10^{17}	
Silicone rubber Si				$10^{15} - 10^{16}$	
				$10^{13} - 10^{16}$	

* From SIEMENS Technical Tables 1982

จากการวิเคราะห์ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนผสมจะเห็นได้ว่า เราสามารถใช้ฉนวนพูนที่มีความหนาแน่นจำเพาะ ต่าง ๆ กัน อันเป็นผลให้ได้ค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกัน ได้ ฉนวนนั้นสายเคเบิลแรงสูงจึงใช้กระดาษบาง ๆ ที่มีความหนาแน่นของกระดาษ (พูน) $0.75 \dots 1.05 \text{ kg/dm}^3$ (ความหนาแน่นของเชื้อเซลลูโลส = 1.5 kg/dm^3) ชั้นที่อยู่ติดตัวนำจะใช้กระดาษอัดที่มีความหนาแน่นมากที่สุด (กระดาษหนาประมาณ $50 \mu\text{m}$) ชั้นนอก ๆ จะใช้กระดาษอัดที่มีความหนาแน่นน้อยลง (มีความหนาถึง $200 \mu\text{m}$) ทั้งนี้เพื่อให้ได้เงื่อนไขของความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายในเนื้อฉนวนของเคเบิลสม่ำเสมอตามแนวรัศมี คือ รัศมีน้อย ๆ จะให้ ϵ มีค่าสูง ๆ เมื่อรัศมีโตขึ้นใช้ฉนวนที่มี ϵ ต่ำลง

ข้อพึงระวังการใช้กระดาษเป็นฉนวนให้ได้ผลของการฉนวนดีที่สุด จะต้องระมัดระวังในเรื่องความชื้น ซึ่งเซลลูโลสมีลักษณะสมบัติที่ดูดความชื้นได้ง่าย พิธีกรรมการทำให้แห้งก่อนด้วย

การอบที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ในถังสุญญากาศก่อนเติมน้ำมันเป็นเรื่องสำคัญยิ่งที่มีผลต่อคุณภาพของการฉนวนด้วยกระดาษชุบน้ำมันฉนวน

2.10 ผลของชั่วแรงแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น (U_i และ U_b)

แรงดันเริ่มต้น (threshold voltage, starting voltage) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแก๊ป ถ้าอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง (direct breakdown) กล่าวคือเมื่อในแก๊ปได้เงื่อนไขเบรกดาวน์ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที ในกรณีของแก๊ปที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรกดาวน์แบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต* (p_c) แรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นชั่วลบบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าแบบชั่วบวก ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวน์ได้นั้น จะต้องมียอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างระยะเวลาชั่วตามกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้น สมมติว่าเป็นแก๊ปของอิเล็กโตรดหรือคัทกับแผ่นระนาบถ้าที่รอดเป็นชั่วลบ อิเล็กตรอนอิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายรอดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง มีโอกาสเกิดไอออไนเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างระยะเวลาชั่ววิกฤตของอิเล็กตรอนได้ได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้ารอดเป็นชั่วบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแก๊ปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดหรือคัทไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต x_c เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต ($N_c = 10^8$) ได้ ซึ่งความยาวของระยะเวลาชั่ววิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ x_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของสตรีมเมอร์ แต่ที่ระยะ x_c จากปลายรอดเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชันเพื่อสร้างระยะเวลาชั่วจึงเป็นไปได้ยากหรือเป็นไปได้ ถ้าจะให้เกิดไอออไนเซชันที่ระยะ x_c ได้บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวน์ได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของชั่วลบจึงต่ำกว่าของชั่วบวก คือ

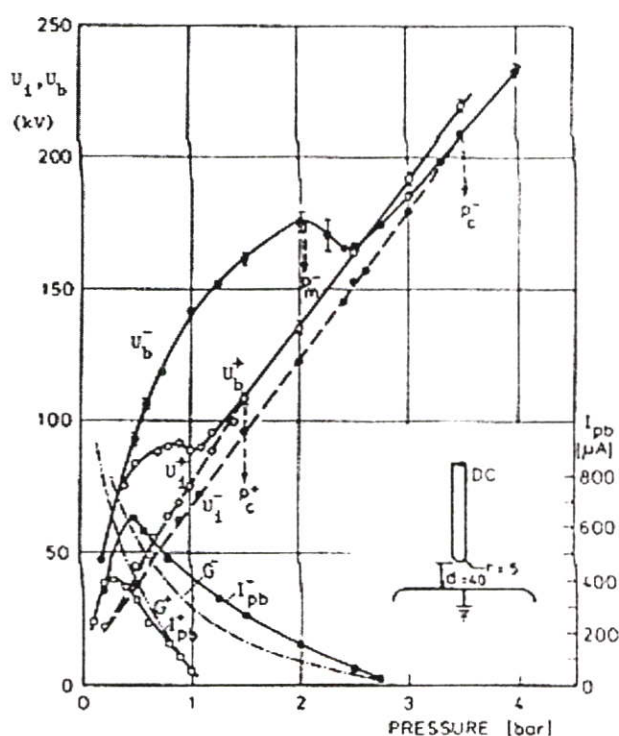
$$U_i^- < U_i^+$$

* p_c ความดันวิกฤต คือ ความดันก๊าซที่แรงดันเบรกดาวน์ U_b และแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด U_i เริ่มเท่ากันถ้าความดันก๊าซต่ำกว่า p_c ถ้า $U_i < U_b$

ถ้าเป็นแบบเบรกคาวน์โดยตรงซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูงที่ก๊าซมีความดัน $p > p_c$ จะได้ $U_b = U_i$

$$\text{ฉะนั้น} \quad U_b^- < U_b^+ \quad (\text{เบรกคาวน์โดยตรง}) \quad (2.13)$$

แต่ถ้าเบรกคาวน์เกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และ $p < p_c$ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกคาวน์ผลของโคโรนาทำให้เกิดประกายค่าแรงดันเบรกคาวน์ชั่วขณะจะสูงกว่าชั่ววอก (ดูรูป 2.13 U_b) ผลของประกายแรงดันกระแสดรของ SF_6 ในสนามไฟฟ้ารีด-ระนาบ ในเทอมของความดันก๊าซ เพื่อเปรียบเทียบแรงดันเริ่มต้น และกระแสโคโรนา I_{pb}



รูปที่ 2.13 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันเบรกคาวน์

2.11 รูปลักษณะอิเล็กโตรด (Electrode configuration)

รูปลักษณะอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกคาวน์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้น (threshold voltage) กับค่าแรงดันเบรกคาวน์เป็นค่าเดียวกัน จึงเรียกลักษณะเบรกคาวน์แบบนี้ว่าเบรกคาวน์โดยตรง (direct breakdown) เช่น เบรกคาวน์ที่เกิดขึ้นในแกปของทรงกลมที่มีระยะห่าง

ไม่มากนักเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ($d < D/2$) ความต่างของขั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรกคาวาน์เพียงเล็กน้อย

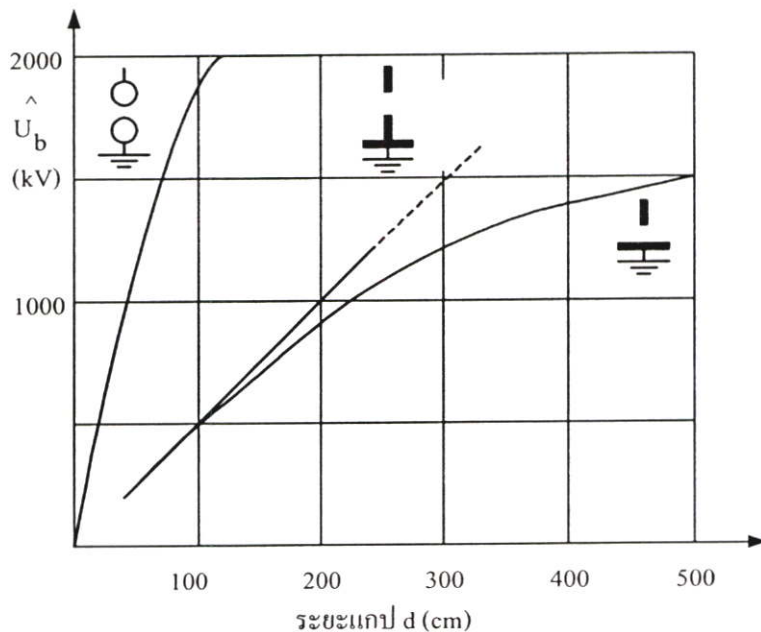
ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ระยะแกปห่างเมื่อเทียบกับรัศมีของอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกคาวาน์อย่างเห็นได้ชัด ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น แท่งกลม-แท่งกลมมีปลายเหมือนกัน รูปลักษณะอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อแรงดันเบรกคาวาน์จะมีผลในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบไม่สมมาตรมาก ๆ เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบ

เบรกคาวาน์จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_m เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกคาวาน์ E_m นั่นคือแรงดันเบรกคาวาน์คำนวณได้จากสมการ คือ

$$U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.14)$$

เมื่อ d คือ ระยะแกป และ $\eta^* =$ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอคือ แบบเกิดเบรกคาวาน์โดยตรงเท่านั้น ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง คือ เกิดโคโรนาก่อนเบรกคาวาน์ นี้ใช้คำนวณแรงดันเบรกคาวาน์ไม่ได้ แต่ใช้สำหรับคำนวณหาแรงดันโคโรนาเริ่มต้นเท่านั้น



รูปที่ 2.14 แรงดันเบรกคาวาน์เฉลี่ยค่าขอดกระแสดลัป 50/60 Hz ในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน IEC ในเทอมระยะแกป d ของอิเล็กโทรดรูปแบบต่าง ๆ

2.12 ผลของสภาวะบรรยากาศ

สภาวะบรรยากาศจะกำหนดด้วยอุณหภูมิ ความดันและความเร็วขึ้น

2.12.1 ผลของความหนาแน่นของอากาศ

จะเห็นได้ว่าระยะอิสระ λ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T และเป็นสัดส่วนกลับกับความดัน $P(\lambda \propto \frac{T}{P})$ และในสมการ ค่าคงตัว A และ B ก็สามารถแทนด้วย $\frac{P}{T}$ ได้ ในทางปฏิบัติความหนาแน่นของอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการฉนวนกลางแจ้ง (สายส่งไฟฟ้ากำลัง สวิตช์เกียร์ในสถานีจ่ายไฟย่อย การทดสอบในห้องทดลอง) บรรยากาศเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจึงถือได้ว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ หรือวาบไฟ (flashover) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $\frac{P}{T}$ ซึ่งแสดงถึง

ความหนาแน่นของก๊าซ ให้ความหนาแน่นของอากาศ $\delta = 1$ เมื่อความดันบรรยากาศ $p = 760 \text{ Torr}$ * อุณหภูมิ $t = 20^\circ\text{C}$ (ซึ่งเท่ากับ $T = 273 + 20 = 293^\circ\text{C}$) เป็นสภาวะมาตรฐานของ IEC แล้ว

$$U_b(\delta) = \delta \cdot U_{bn}$$

โดยที่ U_b เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ความหนาแน่นอากาศ = δ

U_{bn} เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

ค่าความหนาแน่นอากาศคำนวณได้จาก

$$\delta = \frac{P}{760} \cdot \frac{293}{273 + t} = 0.386 \frac{P}{273 + t} \quad (2.15)$$

เมื่อ P คือความดันอากาศเป็น Torr

t อุณหภูมิ เป็น $^\circ\text{C}$

* Torr ใช้เป็นหน่วยวัดความดันบรรยากาศ บางทีก็ใช้ bar หรือ atm,

1 Torr = 1 mmHg ที่ 0°C

760 Torr = 1 atm

2.12.2 ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของ H_2O ในอากาศมีลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าลบบอ่อน ๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศที่มีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้นตรงเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ หรือยังไม่ถึงจุดน้ำค้าง ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ไม่มีดิสชาร์จก่อน (predischage) หรือในแกปของทรงกลม ($d < D/2$) ผลของความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรกคาวาน์น้อยมากเลยได้ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดดิสชาร์จก่อน ความชื้นมีผลต่อค่าแรงดันเบรกคาวาน์ และมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสดรง ถ้าแรงดันมีช่วงเวลาน้อย เช่น แรงดันอิมพัลส์ ความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกคาวาน์น้อย

ค่าแรงดันเบรกคาวาน์เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ ฉะนั้นในการวัดแรงดันเบรกคาวาน์หรือวาบไฟตามผิว (flashover voltage) ที่สภาวะมิใช่ความชื้นมาตรฐาน ถ้าต้องการเทียบค่าแรงดันเบรกคาวาน์ U_b นี้กับค่ามาตรฐานกำหนดจะต้องแก้ค่าที่วัดได้ไปสู่ค่าที่สภาวะมาตรฐาน (U_{bn}) ด้วยตัวประกอบแปลงผันความชื้นในอากาศ (k_h) ซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกับความชื้น ซึ่งเป็นเส้นกราฟของตัวประกอบแปลงผันความชื้นในอากาศของปลอกฉนวนนำสาย (bushing) ตามมาตรฐาน ANSI ที่กำหนดความชื้นสัมบูรณ์ไว้ 15 g/m^3 ที่อุณหภูมิ 25°C ความดัน 760 Torr ค่า k_h ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน (AC, AD หรือ อิมพัลส์ ขั้วบวกหรือขั้วลบ) และชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องการหาค่าแรงดันวาบไฟตามผิว

2.13 ลักษณะดิสชาร์จในก๊าซ

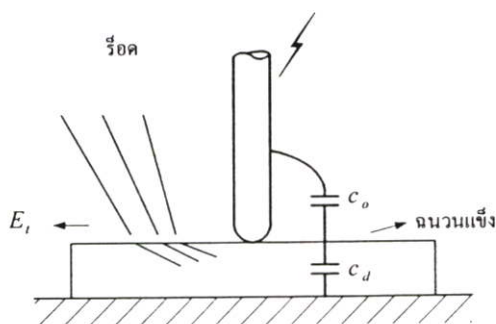
2.13.1 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharges)

ดิสชาร์จบางส่วนหรือพาร์เชียลดิสชาร์จ หมายถึงการดิสชาร์จเป็นเพียงบางส่วนในแกปที่เป็นก๊าซเบรกคาวาน์ระหว่างอิเล็กโตรดที่ยังเชื่อมโยงไม่ถึงกัน อาจแบ่งออกได้

- 1) ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)
- 2) โคโรนาดิสชาร์จ (corona discharge)
- 3) ดิสชาร์จภายใน (internal discharge)

2.13.2 ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge)

ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ตามฉนวนแข็งมีส่วนทำให้อากาศไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์เซ็นต์ดีดต่ำ เช่น ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสูงขึ้น จนเป็นผลให้เกิดดิสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน (tangential field E_t) มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต (E_c) ตัวอย่างเช่น แผ่นฉนวนแข็งกั้นระหว่างรีดอิเล็กโตรดกับแผ่นระนาบดังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผ่นฉนวนแข็งคั่นระหว่างร็อดอิเล็กโตรดกับระนาบ

ตามรูปกะเปซิเต้นซ์ระหว่างร็อดอิเล็กโตรด $C_o \ll$ กะเปซิเต้นซ์ของพื้นผิว (ชั้นฉนวนแข็ง) C_d ฉะนั้นแรงดันระหว่างร็อดกับระนาบจะตกคร่อม C_o เกือบทั้งหมด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในช่วง C_o มีค่าสูงเกิด E_c ได้ จึงเกิดเบรกควาน์หรือดิสชาร์จในช่วงที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็งซึ่งมีความคงทนต่อแรงดัน E_c สูง จึงไม่อาจเกิดเบรกควาน์ทะลุได้ แต่จะดิสชาร์จไปตามผิวฉนวนแข็ง

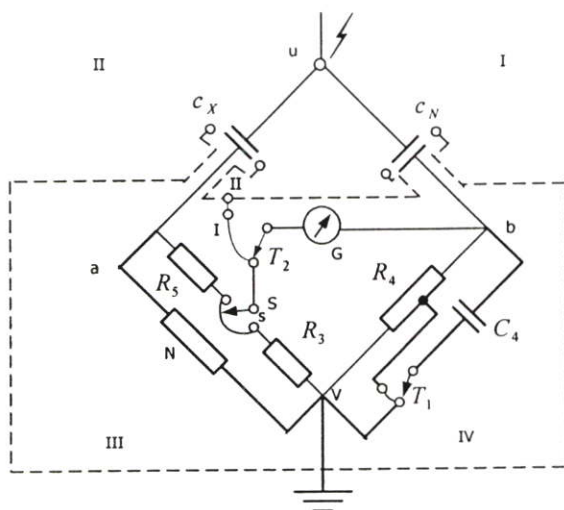
ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นได้เมื่อกะเปซิเต้นซ์ตามผิวมีค่าสูง และแรงดันที่ป้อนมีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว (กระแสอัดประจุสูง) ดังนั้นดิสชาร์จตามผิวฉนวนจะเกิดแต่ในกรณีของแรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นที่ผิวฉนวนของปลอกฉนวนนำสาย (bushing) บริเวณที่ปกยึดโลหะปลายสายเคเบิลหรือฉนวนแข็งที่ใช้ยึดขั้วสับบาร์ เป็นต้น ในทางปฏิบัติด้านเทคนิคดิสชาร์จตามผิวเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนา จึงต้องออกแบบรูปร่างและส่วนประกอบมิให้เกิดดิสชาร์จดังกล่าว ซึ่งอาจทำได้โดยทำให้อิเล็กโตรดมีรูปลักษณะที่เหมาะสมป้องกันการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง หรืออาจใส่ชั้นโลหะบางในชั้นฉนวนเพื่อควบคุมสนามไฟฟ้ากระจายตามผิวฉนวนให้สม่ำเสมอดีขึ้น เช่น ปลอกฉนวนนำสายแบบกะเปซิเตอร์

2.14 การวัดค่าเก็บประจุ C และแฟกเตอร์ $\tan \delta$

พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกในวัสดุฉนวนหรือในอุปกรณ์อาจหาได้จากสมการ โดยการวัดค่า $\tan \delta$ และค่ากะเปซิเต้นซ์ วิธีวัดค่าทั้งสองนี้ทั่วๆ ไปที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีวัดคัมมิเตอร์ และ วิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง 10^6 Hz บริดจ์ที่ใช้กันทั่วไปก็คือ Schering bridge ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz

2.14.1 Schering bridge

Schering bridge เป็นอุปกรณ์วัดค่าเก็บประจุและมุมพลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริก δ ของกะเปาซีเตอร์ โดยการเปรียบเทียบกับกะเปาซีเตอร์มาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัด (compressed gas standard capacitor) มีพลังงานสูญเสียเปล่าที่ความถี่พลังงานหรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจร Schering bridge

ในรูปที่ 2.16

C_x	คือ	ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
R_x	คือ	ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริก
C_N	คือ	ค่าเก็บประจุมาตรฐาน
R_3	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้
R_4	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
C_4	คือ	ค่าเก็บประจุปรับค่าได้
G	คือ	กัลวานอมิเตอร์ความไวสูง

การปรับบริดจ์ให้สมดุลทำได้โดยการปรับค่า R_3 และ R_4 จนกระทั่งเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริดจ์สมดุลแล้วจึงเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

เมื่อ Z_1 , Z_2 , Z_3 และ Z_4 เป็นอิมพีแดนซ์ของส่วนวงจรแกน I, II, III และ IV ตามลำดับ
คือ

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N}$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

นั่นคือ

$$\frac{R_x}{R_3(1 + j\omega C_x R_x)} = \frac{-j}{\omega C_4 R_4} (1 + j\omega C_4 R_4)$$

โดยการเทียบค่าจริงจะได้

$$\frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} = \frac{C_4 R_3}{C_N} \quad (2.16)$$

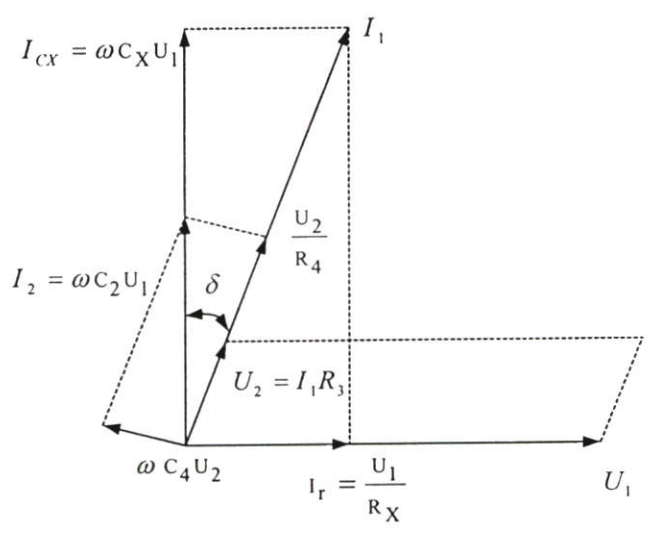
เมื่อ C_x และ R_x ต่อกันแบบขนาน

$$\cos \delta = \frac{\omega C_x R_x}{\sqrt{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}}$$

$$\cos^2 \delta = \frac{\omega^2 C_x^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}$$

$$C_x = \frac{C_N \cos^2 \delta}{\omega^2 C_x C_4 R_x R_3} \quad (2.17)$$

แทนค่าในสมการ (2.16) จะได้



รูปที่ 2.17 เวกเตอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering bridge

จากรูป 2.17

$$\text{tg } \delta = \frac{\omega C_4}{1/R_4}$$

จากรูปที่ 2.17

$$\text{tg } \delta = \frac{1/R_x}{\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$\omega C_4 R_4 = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$\frac{1}{C_x R_x} = \omega^2 C_4 R_4$$

แทนค่า $\frac{1}{C_x R_x}$ ในสมการ (2.17)

จะได้ $C_x = \frac{C_N R_4 \cos^2 \delta}{R_3}$

นั่นคือ $C_x = \frac{C_N R_4}{R_3}$ โดยประมาณ

และ $\text{tg } \delta = \omega C_4 R_4$ (2.18)

ในทางภาคปฏิบัติ R_4 มักจัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่า เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า C ส่วน R_3 นั้นเป็นความต้านทานที่ปรับได้เป็นเด็คเกทซึ่งมักมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10,000 โอห์ม ทั้งนี้เพื่อขจัดค่าสเตรย์กระแสเข้าเด็คเกทให้น้อยที่สุด ส่วน C_4 นั้นเป็นกระแสเข้าเด็คเกทที่ปรับได้เป็นเด็คเกทเช่นกัน และมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า $tg \delta$

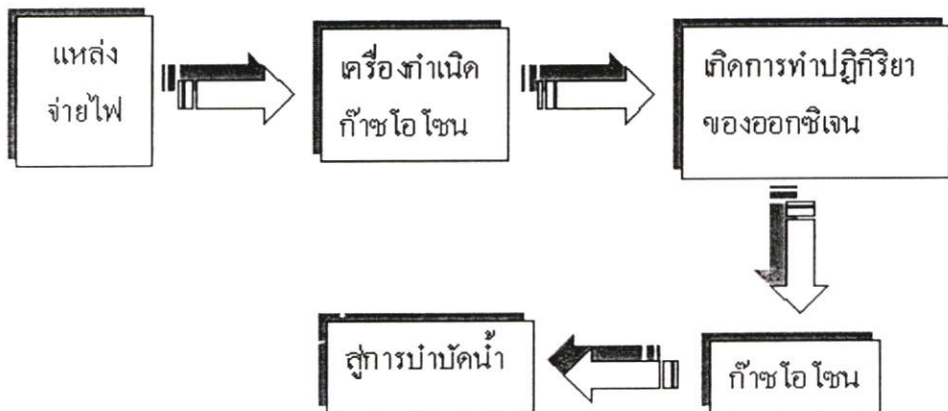
เพื่อจัดการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีต่อวงจรภาคแรงต่ำ ซึ่งอาจจะดับปลิงผ่านสเตรย์คาปาซิเต้นซ์ ฉะนั้นตั้งแต่ภาคแรงต่ำของกระแสเข้าเด็คเกทมาตรฐาน C_N และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร III, IV และกัลวานอมิเตอร์จะมีเกราะป้องกันแบบ 2 ชั้น (double screen shielding) และป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงพินเกินเนื่องจากภาคแรงสูงเกิดบกร่องขึ้นใน I หรือ II จึงใส่กับดักแรงดันเกินหรือสปาร์กแก๊ปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

บทที่ 3

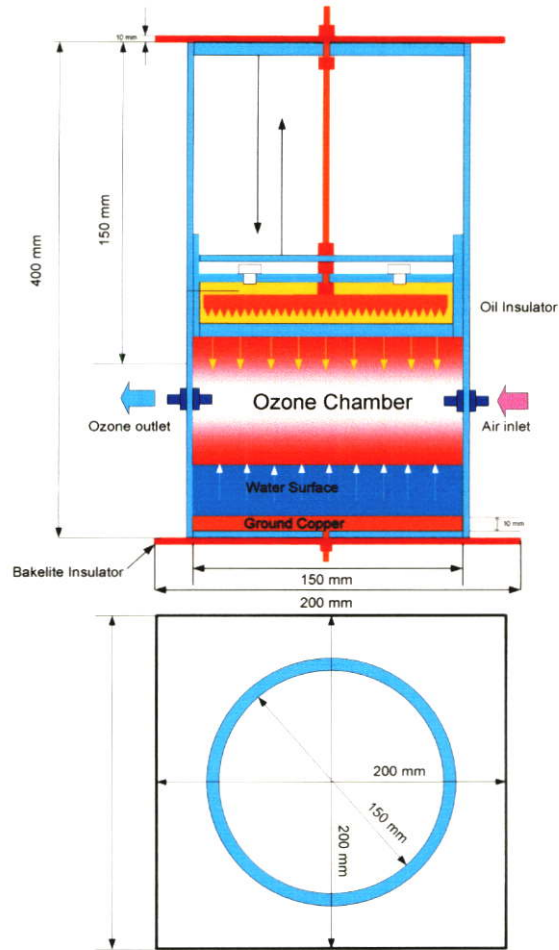
เครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

3.1 บทนำ

โครงสร้างหลักๆ ของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำในหลักการของการออกแบบมีส่วนประกอบโดยหลักใหญ่อยู่ 2 หลักการคือการสร้างความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างขึ้น โดยในส่วนของ 1 คือส่วนการสร้างแรงดันสูงเพื่อทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) อีกส่วนหนึ่งคือ ชุดอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซน (Ozone Generator) ส่วนการพิจารณาหลักการในการออกแบบนั้นต้องพิจารณาจากปัจจัยหลายประการเช่นกัน นอกจากปัจจัยในตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ลักษณะของสนามไฟฟ้า, แรงดันที่ใช้งาน, ผลของความถี่ และประเภทของการแตกตัวของก๊าซแล้วยังต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สิ่งแวดล้อมได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น, และอัตราการไหลของอากาศ ผ่านชุดอิเล็กโตรดด้วย ในเนื้อหาของบทนี้จึงแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือส่วนที่ทดสอบเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบหลักการ โดยคัดเงื่อนไขปัจจัยสิ่งแวดล้อมออก แล้วจึงนำไปสู่การออกแบบในส่วนของการออกแบบต่อไป จากผลการทดลองในบทนี้พบว่าลักษณะอิเล็กโตรดที่เลือกใช้คือ อิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบที่มีปลายแหลมซึ่งจะประยุกต์ใช้จากหลักการของสนามไฟฟ้า สม่่าเสมอกับสนามไฟฟ้าไม่สม่่าเสมอสูงมาใช้ในการทดลอง และออกแบบโดยมีฉนวน ไดอิเล็กตริก ชั้นกลางจำนวนระหว่างอิเล็กโตรดจำนวน 3 ชนิด คือ มีน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า, ฉนวนอะคริลิก, ฉนวนอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับที่มาของการออกแบบมาจากการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ต่อไป



รูปที่ 3.1 ระบบการกำเนิดของก๊าซโอโซนที่ใช้ในหลักการ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนที่ทำการออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานพันธะและความต้องการพลังงานของปฏิกิริยาเคมีในการผลิตก๊าซโอโซน ส่วนการออกแบบอยู่บนพื้นฐานของการศึกษาลักษณะสนามไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการแตกตัวของก๊าซเพื่อสามารถพิสูจน์ทฤษฎีจากการคำนวณทางเคมี และความสารณในการผลิตก๊าซโอโซนโดยเป็นการศึกษาเปรียบเทียบกับในการเปลี่ยนแปลงลักษณะของอิเล็กโตรดแบบใหม่และลักษณะของฉนวนที่มากขึ้น ระหว่างไดอิเล็กตริกที่ออกแบบสร้างขึ้น

3.2 หลักการออกแบบสร้างชุดอิเล็กโตรด

การออกแบบอิเล็กโตรดในลักษณะระนาบเริ่มการพิจารณาจากการออกแบบลักษณะที่เหมาะสม (Optimum dimension) ของชุดอิเล็กโตรดแบบระนาบซึ่งได้คำนึงถึงวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นอิเล็กโตรดโดยได้ทำการศึกษาคู่วัสดุตัวนำไฟฟ้าที่จะนำมาใช้เป็นอิเล็กโตรดโดยในงานวิจัยที่ศึกษา

เลือกใช้แผ่นทองแดงนำมาออกแบบเป็นแผ่นระนาบ 2 แผ่นแบบกลมโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 128 มิลลิเมตร หนา 15 มิลลิเมตร และการใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะใช้ในการป้อนเข้าสู่ชุดอิเล็กโตรด เพื่อสร้างความเครียดสนามไฟฟ้า (E_c) จนเพียงพอและทำให้อากาศแตกตัว ดังนั้นในขั้นต้นจึงต้องทำการคำนวณเพื่อออกแบบเบื้องต้นก่อน สิ่งที่กำหนดให้เป็นตัวเงื่อนไขของตัวในการออกแบบคือ ขนาดของอิเล็กโตรดเนื่องจากอะตอมลิทเธียมที่ประกอบที่เป็นฉนวนที่ห่อหุ้มชุดอิเล็กโตรด ซึ่งมีความจำกัดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ผลิตในทางอุตสาหกรรม จึงทำให้อิเล็กโตรดแผ่นระนาบจึงมีขนาดที่ค่อนข้างคงที่ดังนั้นเหตุผลในการออกแบบ จึงต้องจำเป็นต้องคำนึงถึงวัสดุที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ปัจจุบัน อิเล็กโตรดที่ออกแบบมานั้นถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตไอโซนเงื่อนไขในการทดลองที่กำหนด มีดังนี้

- การใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite element method : FEM) ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและเทียบผลของการเกิดก๊าซไอโซนของชุดอิเล็กโตรด
- ศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไฟฟ้าและปริมาณการเกิดของไอโซนในแก๊ปอากาศที่มีฉนวนที่เป็นน้ำมันหม้อแปลงและอะตอมลิทเธียมเป็นไดอิเล็กตริกกัน
- ศึกษาผลของชนิดของแรงดันที่ใช้ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีผลต่อความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซนของอิเล็กโตรด
- ศึกษาผลของความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโตรดผลิตก๊าซไอโซน

3.3 การทดลองเพื่อศึกษาและออกแบบอิเล็กโตรด

การทดลองในส่วนของการออกแบบชุดอิเล็กโตรดซึ่งนำไปสู่การออกแบบ แบ่งเงื่อนไขในการพิจารณาออกเป็น 3 หัวข้อซึ่งเป็นกรณีศึกษา ดังนี้

1. การเลือกประเภทของสนามไฟฟ้าและรูปร่างในการออกแบบอิเล็กโตรด
2. อิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบแบบมีปลายแหลมทั้งแผ่น (Point-to-Plane)
3. การทดสอบอิเล็กโตรด

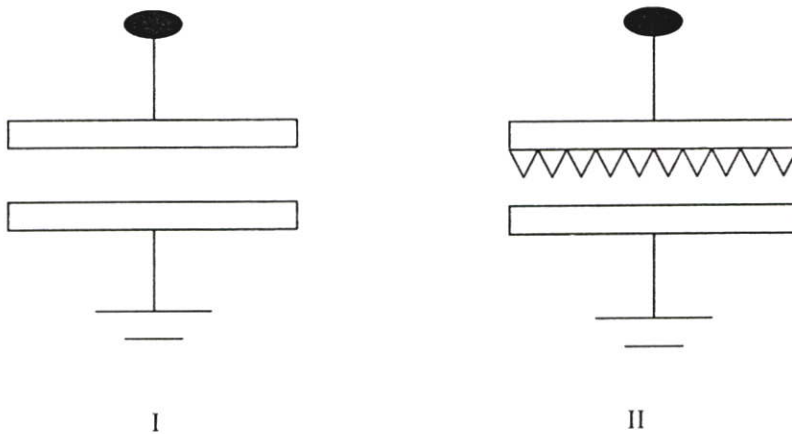
3.3.1 การเลือกประเภทของสนามไฟฟ้าและรูปร่างในการออกแบบอิเล็กโตรด

พลังงานจากสนามไฟฟ้า คือ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการผลิตก๊าซไอโซนโดยตรง ชนิดของสนามไฟฟ้าที่เลือกใช้ทางทฤษฎี ต้องมีการทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)

จากการสรุปในการออกแบบรูปลักษณะของอิเล็กโตรดที่ใช้ในการออกแบบนั้นเป็นการศึกษาโดยอาศัยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอมาผสมผสานกับลักษณะของการกระจายสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูงคือการออกแบบเป็นการรวมทั้ง 2 ทฤษฎีนี้เข้าด้วยกันซึ่งใช้เป็นกรณีศึกษาในการทดลองงานในครั้งนี้

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อการผลิตก๊าซโอโซน

จากงานวิจัยเบื้องต้นในการทดสอบคือเพื่อศึกษาการเกิดก๊าซโอโซนในสนามไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ โดยได้ออกแบบรูปร่างลักษณะของอิเล็กโทรดเป็น 2 แบบ คือการออกแบบอิเล็กโทรดเป็นแบบแผ่นระนาบเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีปลายแหลมเป็นแผ่นระนาบล้วนๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 128 มิลลิเมตรและมีความหนา 15 มิลลิเมตร ซึ่งนำไปเป็นการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และอีกแบบเป็นแบบแผ่นระนาบเช่นกันแต่มีการออกแบบให้เป็นปลายแหลมจำนวน 140 จุด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 128 มิลลิเมตร มีความหนา 15 มิลลิเมตร โดยลักษณะดังกล่าวทั้ง 2 ชนิดเป็นการออกแบบเพื่อศึกษาจำนวน 2 ทฤษฎีที่อธิบายในการเกิดโคโรนาดีสชาร์จซ์และเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.3 อันเนื่องมาจากค่าสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง



รูปที่ 3.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (I) และไม่สม่ำเสมอสูง (II)

ผลการทดลองที่ 1 ผลของสนามไฟฟ้าต่อการผลิตก๊าซโอโซน

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบการผลิตโอโซนด้วยลักษณะของอิเล็กโทรด 2 ชนิดที่มีสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างแตกต่างกัน

รูปแบบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้ง 2 แบบ	GAP (cm.)	แรงดันไฟฟ้า (kV.)	กระแส (mA)	กำลังงานไฟฟ้า (W)	ปริมาณโอโซนที่วัดได้ (ppm)
อิเล็กโทรดแบบสม่ำเสมอสูง (ระนาบ)	1.0	23.9	0.143	3.4177	32
อิเล็กโทรดแบบไม่สม่ำเสมอ ลักษณะแบบระนาบ (ระนาบมีปลายแหลม)	1.0	14.3	1.4	20.02	52

หมายเหตุ แหล่งจ่ายคือหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสสลับในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ค่า kV และ mA คือค่าที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถปรับได้ก่อนจะเกิดเบรคดาวน์

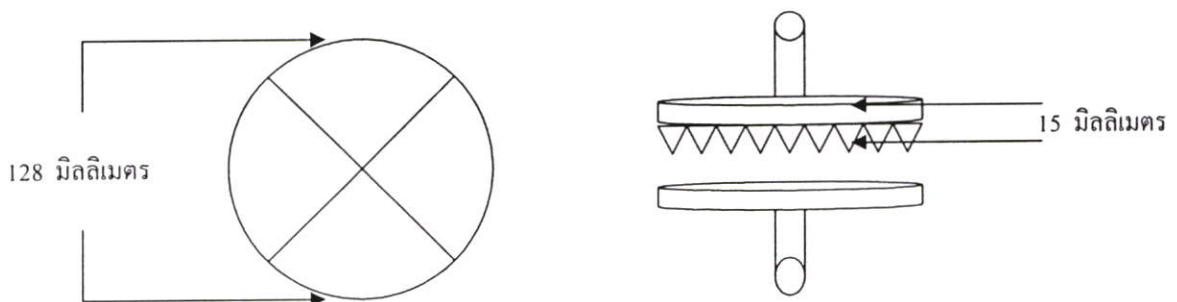
3.3.2 อิเล็กโตรดที่เป็นแผ่นระนาบที่มีปลายแหลม

จากการทดลองใน 3.2.1 พอที่จะสามารถสรุปได้ว่ารูปร่างอิเล็กโตรดที่เป็นแบบระนาบขนานกัน โดยไม่มีปลายแหลมนั้นไม่สามารถให้การผลิตก๊าซไอโซนได้มากกว่าอิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลายแหลมดังนั้น จึงได้พิจารณาเลือกใช้อิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลายแหลมด้วยจึงจะเหมาะสมกว่าในการใช้ระนาบที่ไม่มีปลายแหลมเพราะจะทำให้การเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูงกว่าจากหลักการ ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบตัวอย่างกับการที่มีจำนวนปลายแหลมที่จำนวนมากกับปลายแหลมที่มีจำนวนน้อยจากการออกแบบอิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลายแหลม พิจารณาโคโรน่าของระนาบที่มีปลายแหลมกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นหลัก

3.3.2.1 การทดสอบอิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลายแหลมจำนวนต่างๆ

อิเล็กโตรดที่ทำการออกแบบมีจำนวน 3 ตัวอย่างในการออกแบบให้มีปลายแหลมทั้ง 3 ตัวอย่างแต่จำนวนในการทำปลายแหลมบนแผ่นระนาบนั้นมีความแตกต่างกันออกไปดังจะแสดงได้ดังนี้

1) แบบระนาบที่มีปลายแหลมจากการออกแบบเป็นแผ่นทองแดงแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 128 มิลลิเมตร มีความหนา 15 มิลลิเมตร (เหตุผลของขนาดดังกล่าวให้มีความกะทัดรัด และไม่ถือเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้มีขนาดใหญ่จนเกินไปจะทำให้เป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดส่งผลให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงและมีผลต่อการเกิดของก๊าซไอโซน)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างลักษณะการออกแบบอิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลายแหลม

โดยตัวอย่างที่ 1 มีจำนวนความหนาแน่นของปลายแหลมบนแผ่นทองแดงระนาบ

โดยตัวอย่างที่ 2 มีจำนวนความหนาแน่นของปลายแหลมบนแผ่นทองแดงระนาบทั้งหมด 190 ชุด

โดยตัวอย่างที่ 3 มีจำนวนความหนาแน่นของปลายแหลมบนแผ่นทองแดงระนาบทั้งหมด 211 ชุด

รูปร่างของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 คือมีวัตถุประสงค์ในการทดสอบศึกษาถึงลักษณะการจัดเรียงของแผ่นทองแดงระนาบที่มีปลายแหลม และความหนาแน่นของปลายแหลมที่แตกต่างกันจะได้ศึกษาถึงแนวโน้มต่อการเกิดก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นมีลักษณะทิศทางไปในแนวทางใด เพื่อเลือกหาจำนวนและหลักการที่ถูกต้องในการศึกษาชุดอิเล็กโทรดที่ออกแบบขึ้น

การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะในการออกแบบจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบทองแดงเงื่อนไขในการทดลอง

1. เปรียบเทียบลักษณะอิเล็กโทรดที่มีจำนวนของปลายแหลมบนแผ่นระนาบทั้ง 3 ตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10-60 kV

2. เปรียบเทียบปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในระหว่างช่องว่างอากาศที่มีฉนวนอากาศเป็นตัวคั่นที่ระยะต่างๆกัน 1 cm., 2 cm., 3 cm. ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 10-60 kV

3. เปรียบเทียบระดับแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรดจำนวน 6 ระดับของทั้ง 3 ตัวอย่างเพื่อศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนของปลายแหลมบนแผ่นระนาบมีจำนวนที่แตกต่างกันและค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนมีความแตกต่างกันไปที่จะเป็นปัจจัยต่อการเกิดปริมาณก๊าซโอโซน

เมื่อทำการทดสอบโดยวิธีการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเข้าที่ชุดอิเล็กโทรดในขณะที่ยังไม่มีความชื้นไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างอิเล็กโทรดมีเพียงแต่ฉนวนอากาศที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรดผลปรากฏว่าการแตกตัวในการเกิดก๊าซโอโซนมีเกิดขึ้นแต่ไม่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นมากนักเพราะทำให้เกิดการเบรคดาวน์เร็วเพราะค่าไดอิเล็กตริกของอากาศโดยประมาณจะอยู่ที่ 25 kV/cm จึงทำให้การทดสอบชุดอิเล็กโทรดที่มีฉนวนอากาศคั่น ทำได้ไม่นานนัก

จากเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อ เปรียบเทียบลักษณะอิเล็กโทรดที่มีจำนวนของปลายแหลมบนแผ่นระนาบทั้ง 3 ตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันโดยได้กำหนดให้จำนวนปลายแหลมที่เกิดขึ้นบนแผ่นระนาบนั้นมีจำนวน 3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ 1 มีจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบจำนวน 140 ชุด

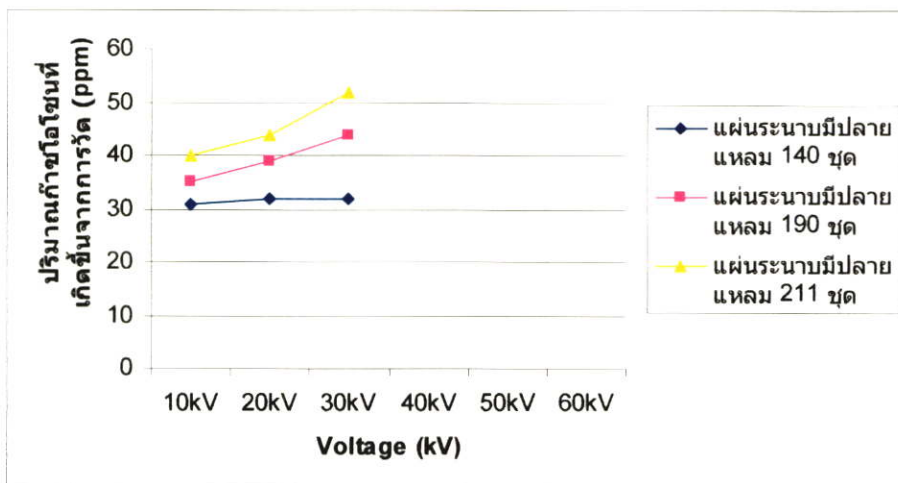
ตัวอย่างที่ 2 มีจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบจำนวน 190 ชุด

ตัวอย่างที่ 2 มีจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบจำนวน 211 ชุด

การออกแบบตัวอย่างชุดอิเล็กโทรดนั้นมาจากแนวความคิดที่จะสุ่มตัวอย่างในการทดสอบให้มีจำนวนปลายแหลมบนแผ่นอิเล็กโทรดที่มีจำนวนมากขึ้นเพื่อศึกษาว่าผลต่อการเกิดก๊าซ

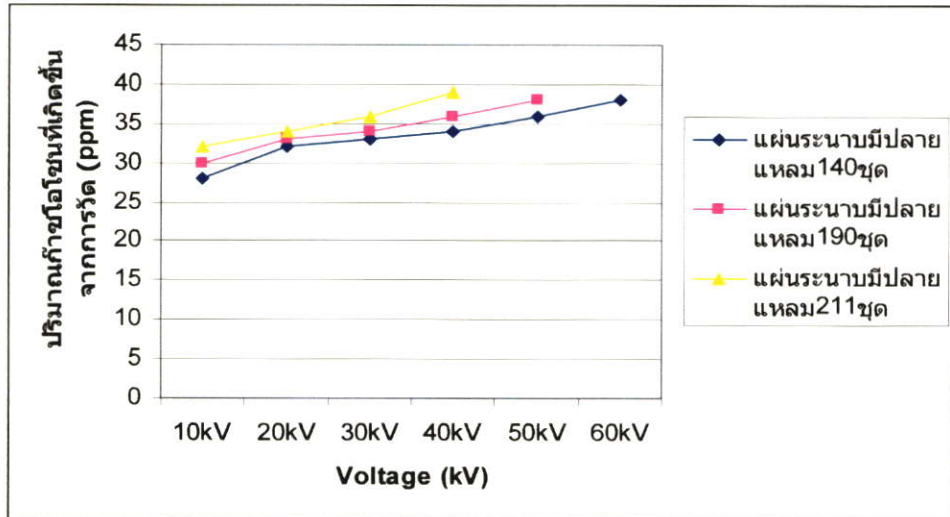
โอโซนหรือไม่อย่างไรเนื่องจากการกัดแผ่นทองแดงทั้ง 3 ชุดนั้นเป็นการกัดจากเครื่องกัดระบบ CNC จึงทำให้จำนวนของปลายแหลมที่ออกแบบตามความถี่ของปลายแหลมนั้นออกมาได้เท่ากับจำนวนดังกล่าวพอดีกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โดรดจึงเป็นที่มาของจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบที่ออกแบบ

จากตัวอย่างดังกล่าวทั้งหมดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันคือ 128 มิลลิเมตร และมีความหนา 15 มิลลิเมตร แต่เมื่อออกแบบให้จำนวนของปลายแหลมมีจำนวนน้อยดังตัวอย่างที่ 1 นั้นจะทำให้ขนาดของปลายแหลมมีขนาดใหญ่และเมื่อกลิ้งแล้วอยู่บนแผ่นระนาบและเมื่อจำนวนปลายแหลมที่กลิ้งจำนวนมากขึ้นนั้นจะทำให้ขนาดของปลายแหลมมีขนาดเล็กลงเพื่อให้จำนวนปลายแหลมที่กลิ้งบนแผ่นระนาบนั้นมีจำนวนมากขึ้นดังนั้นเมื่อวิเคราะห์การเกิดของก๊าซโอโซนของชุดอิเล็กทรอนิกส์โดรดทั้ง 3 ตัวอย่างแล้วจะปรากฏปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นได้ดังแสดงในรูป



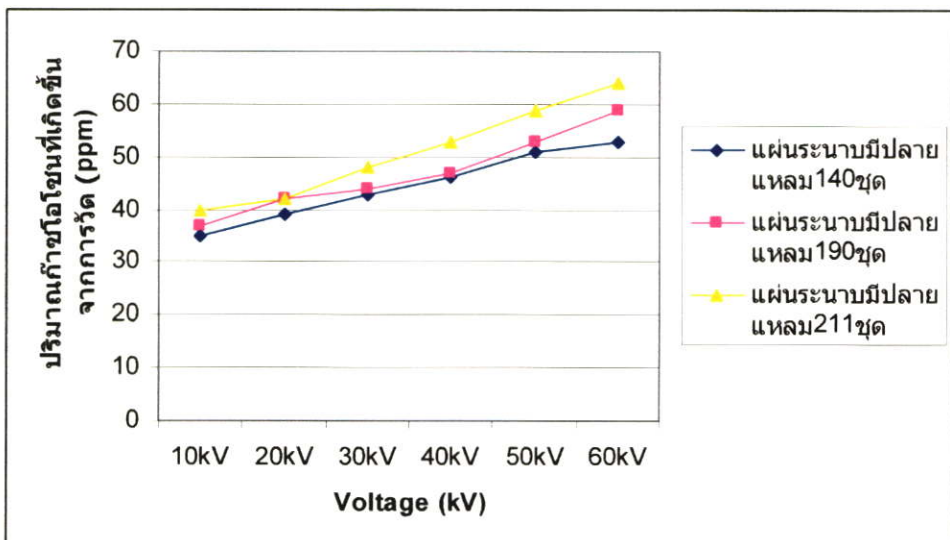
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซนโดยรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์โดรดที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคีลิตัน

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 1 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นสัคย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC test) ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหรือแปลงและอะก็ลิกคั่น

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 2 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นสัคย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC test) ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



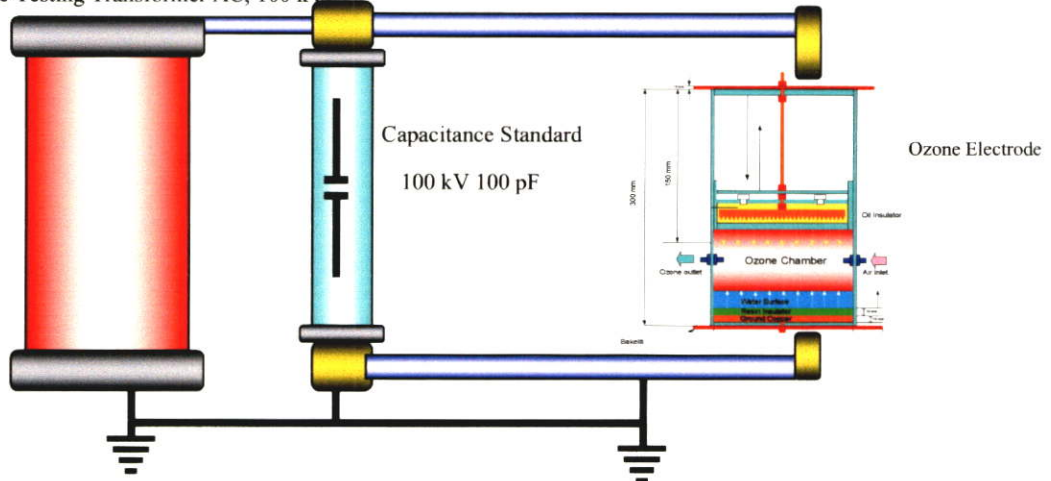
รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหรือแปลงและอะก็ลิกคั่น

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 3 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นสัคย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC test) ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



รูปที่ 3.8 หม้อแปลงกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 0-100 kV

High-Voltage Testing Transformer AC, 100 kV

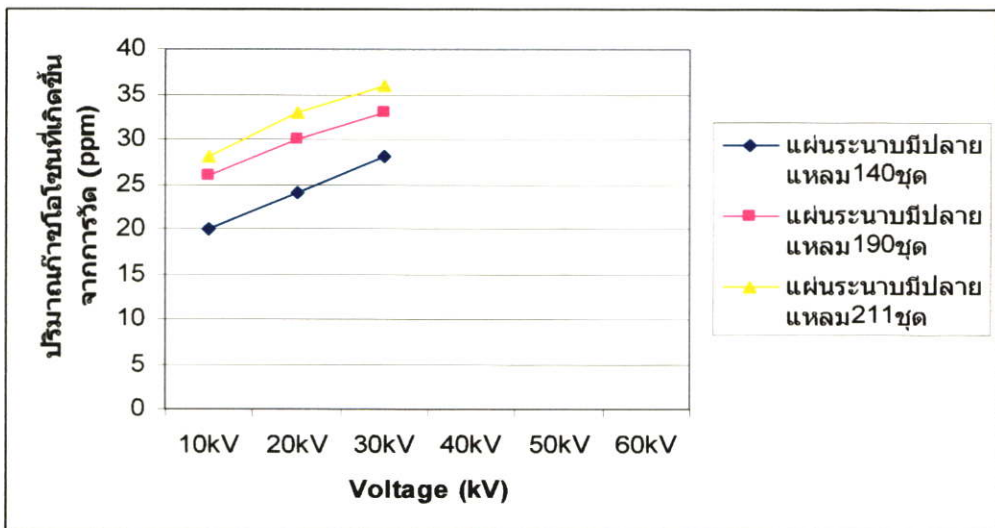


รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการผลิตโอโซนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC test)

การทดลองที่ 3 การทดลองในที่นี้เป็นการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยเปรียบเทียบกับรูปลักษณะอิเล็กโทรดที่มีจำนวนปลายแหลมเพื่อศึกษาว่าผลของชนิดแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนในลักษณะของอิเล็กโทรดแบบกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ (โดยเปรียบเทียบกับ การทดลองในการทดลองที่ 2) และผลเปลี่ยนแปลงการป้อนทั้งไฟฟ้าบวกและลบ

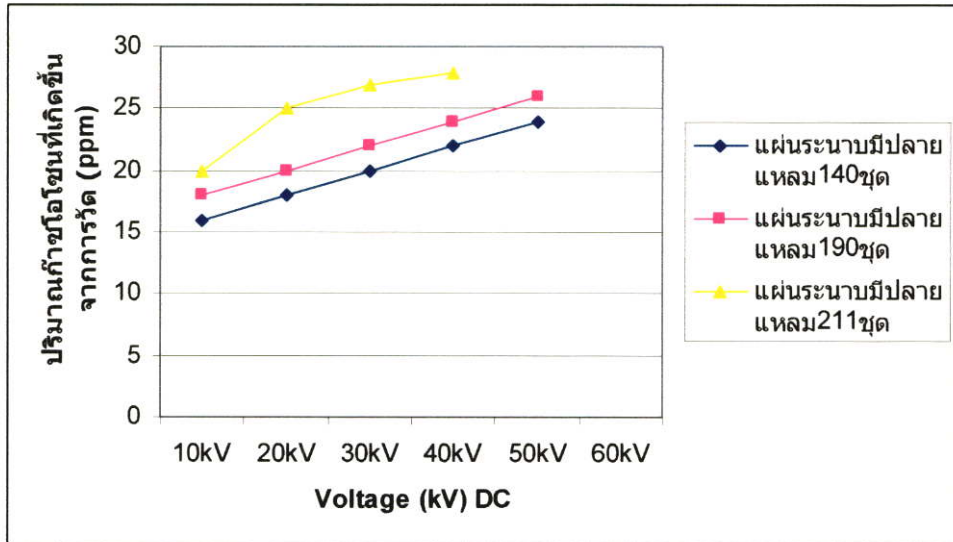
เงื่อนไขในการทดลอง

1. ทดสอบโดยการใช้อิเล็กโทรดที่มีความแตกต่างในการออกแบบซึ่งมีจำนวนปลายแหลมที่อยู่บนอิเล็กโทรดจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190,211)
2. เปรียบเทียบค่าระดับแรงดันที่เท่ากันทุกๆ ครั้งของระดับแรงดันทั้ง 2 ชนิดว่ามีปัจจัยส่งผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนในชุดอิเล็กโทรดหรือไม่
3. ศึกษาโครงสร้างของการออกแบบเพื่อหาค่าชนิดของแรงดันที่เหมาะสมต่อการใช้ในการทดลองว่าแรงดันไฟฟ้าชนิดใดเหมาะสมที่สุดต่อการทดสอบในกรณีศึกษาครั้งนี้รวมถึงการพิจารณาป้อนแรงดันไฟลบไฟบวกด้วย



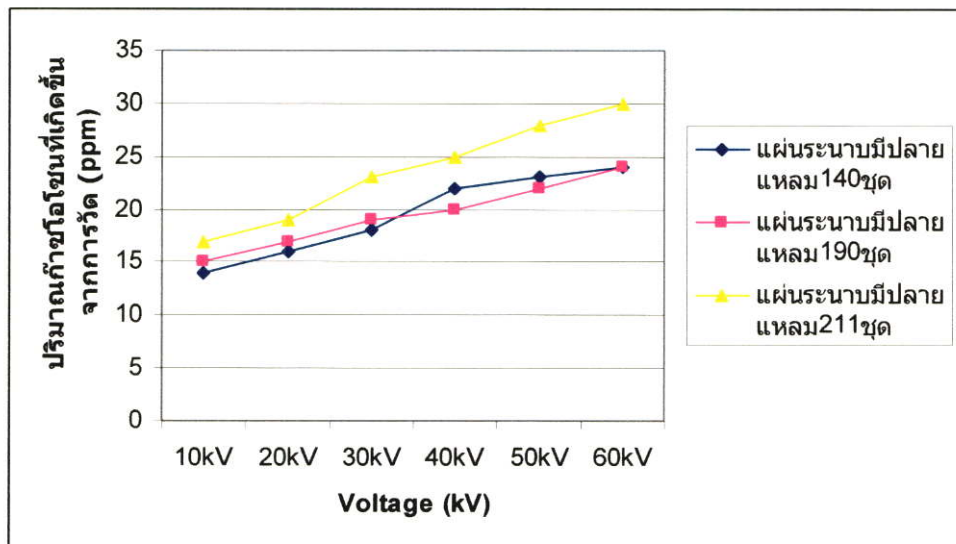
รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซนโดยรูปลักษณะอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะลิกัลกัน โดยป้อนแรงดันไฟบวก (+)

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 1 cm. กับระยะผิวน้ำซึ่งเป็นสัคย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการโดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



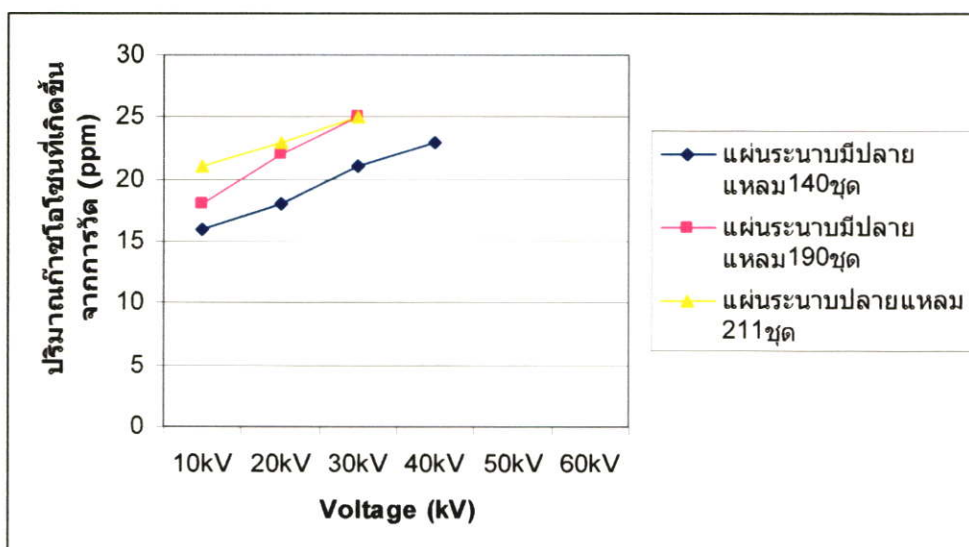
รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมัน หม้อแปลงและอะคีลิกคั่น โดยป้อนแรงดันไฟบวก (+)

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 2 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นสัคย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



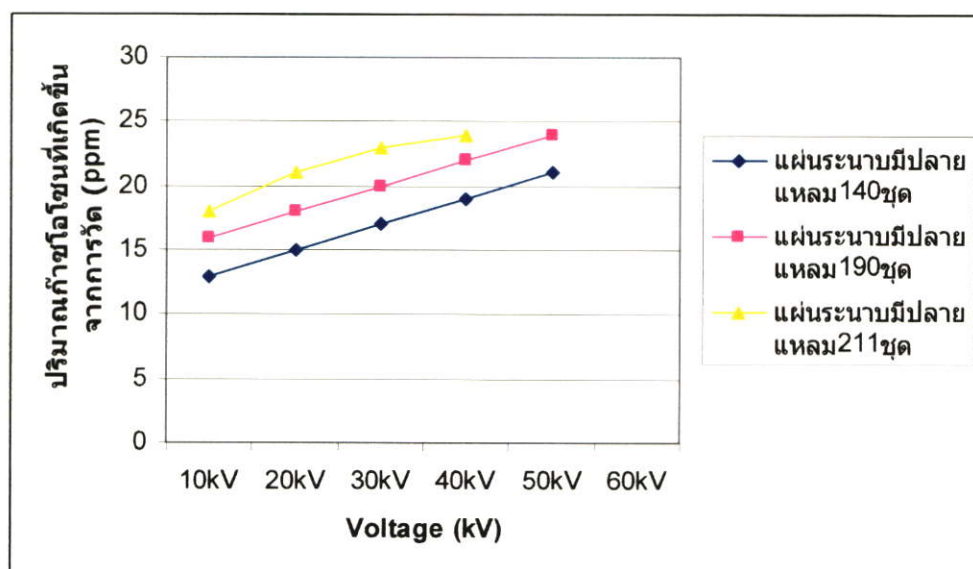
รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟบวก (+)

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 3 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นสัคย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



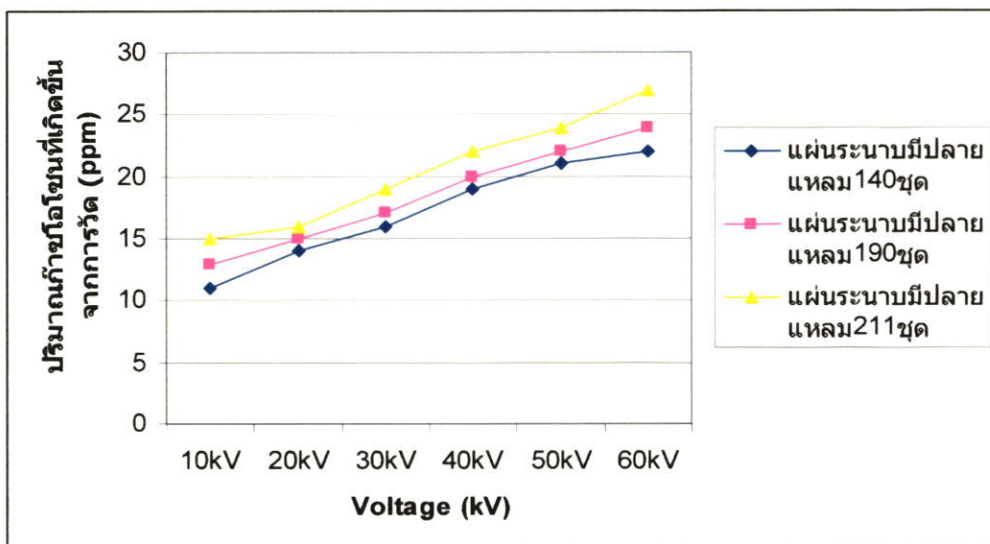
รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟลบ (-)

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 1 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นศักย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



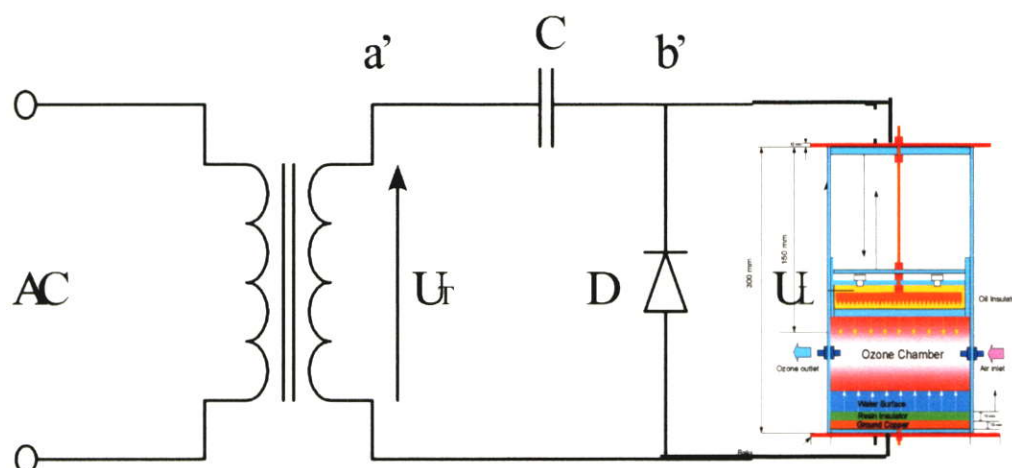
รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซน โดยรูปลักษณะอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟลบ (-)

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 2 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นศักย์กราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที

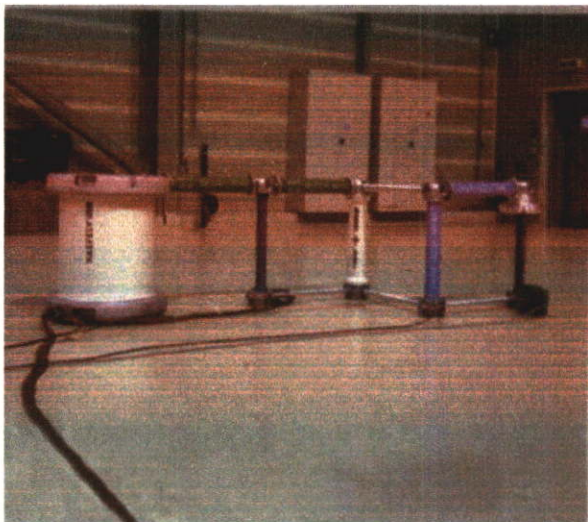


รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าต่อผลผลิตก๊าซโอโซนโดยรูปลักษณะอิเล็กโตรดที่เปลี่ยนแปลงไป (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยป้อนแรงดันไฟลบ (-)

หมายเหตุ ระยะของแกปช่องว่างอากาศกว้าง 3 cm. กับระยะผิวหน้าซึ่งเป็นสัณยกราวด์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการโดยใช้เวลาในการวัด 5 นาที



รูปที่ 3.16 แสดงวงจรการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC test)



DATA	
Type	DC-Source
Single-Stage	
Rate Voltage (rms)	140 kV
No-load Voltage	
Output Continuous	5 kVA
Ripple factor	Approx 4%
Frequency	50/60 Hz
Rated Current Continuous	13 mA
Minimum Clearance	1.25 m

รูปที่ 3.17 แสดงวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) แบบ Single-Stage และตารางแสดงค่าของวงจร

การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนแต่ละชั้นนั้นเนื่องจากระเบิดระดับค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นการระเบิดระดับแรงดันสูงดังนั้นในเนื้อฉนวนแต่ละชั้นฉนวนจะมีค่าสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปสำหรับการทดสอบของงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในเนื้อฉนวนจำนวน 3 ชั้น ทั้งนี้ได้คำนึงถึงหลักการทางไดอิเล็กตริกที่มีฉนวนกั้นกลางแต่ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะศึกษาหาค่าปริมาณไอโซนที่ได้จากการใช้ฉนวนที่มีคุณสมบัติที่เป็นฉนวนเหลว (ในที่นี้คือน้ำมันหม้อแปลง) คุณสมบัติที่เป็นฉนวนแข็ง (ในที่นี้คือ อะคริลิก) คุณสมบัติที่เป็นฉนวนก๊าซ (ในที่นี้คือ อากาศปกติ) ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะกล่าวได้ว่าการจะทดสอบเนื้อฉนวนที่เป็นไดอิเล็กตริกของฉนวนแต่ละชั้นก็มีคุณสมบัติในการฉนวนที่แตกต่างกันไปเพราะการที่เนื้อฉนวนแต่ละชนิดจะสามารถทนต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างไปด้วยดังนั้นการทดสอบจึงต้องศึกษาคุณสมบัติในการเกิดค่าสนามไฟฟ้าของชุดอิเล็กโตรดเพราะจะมีผลต่อการเกิดก๊าซไอโซน อีกทั้งรูปลักษณะของอิเล็กโตรดก็มีส่วนเป็นอย่างมากในการที่จะเกิดก๊าซไอโซนที่มากหรือน้อยแต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาจึงได้คำนึงถึงการเกิดก๊าซไอโซนในลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำเพื่อวิจัยดูถึงปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นหากการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำสามารถทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำที่ใช้ทำเป็นชุดกราวด์ (-) ซึ่งหากการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำแล้วสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและให้น้ำที่ทำหน้าที่กราวด์มีคุณสมบัติและมีคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไปหรืออาจจะพูดได้ว่า เป็นการทำให้คุณภาพน้ำให้ดีขึ้นโดยอาศัยหลักการนี้เพื่อให้

การทดลองดังกล่าวเป็นผลสัมฤทธิ์ที่เห็นชัดเจนการศึกษาการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอบๆ ฉนวนไดอิเล็กตริกนั้นก็มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ปริมาณความสัมพันธ์ของก๊าซโอโซนที่จะเกิดขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่เมื่อฉนวนทุกชั้นดังจะ ได้แสดงในการคำนวณ

ผลสรุป ในตารางที่ 3.1 และหัวข้อที่ 3.3.2.1 การทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 จะพบว่า มีข้อที่แตกต่างในการพิจารณาโดยสามารถสรุปไว้ ดังนี้

1. แผ่นระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลมและแผ่นระนาบที่มีปลายแหลมมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้ เป็นไปตามการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีข้อแตกต่างกันตามทฤษฎี

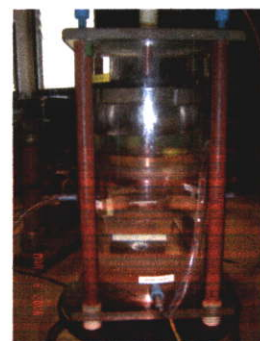
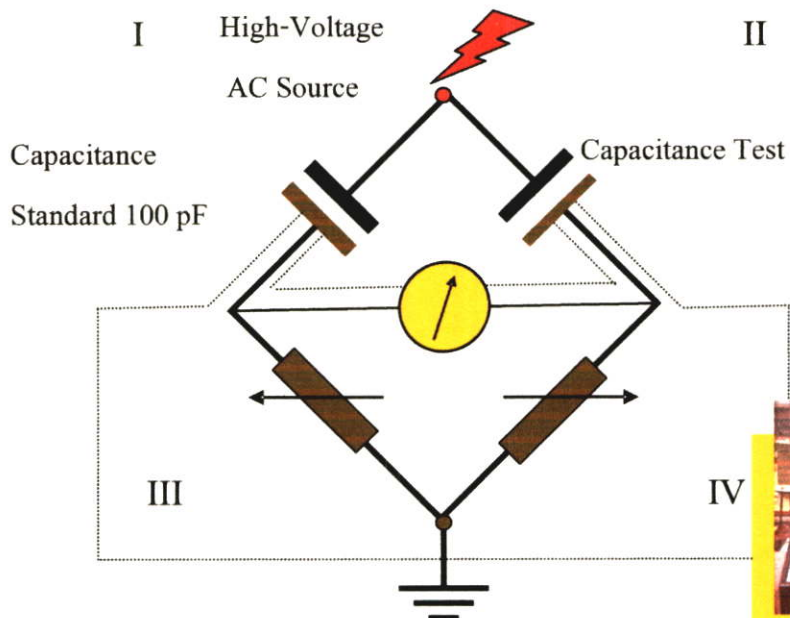
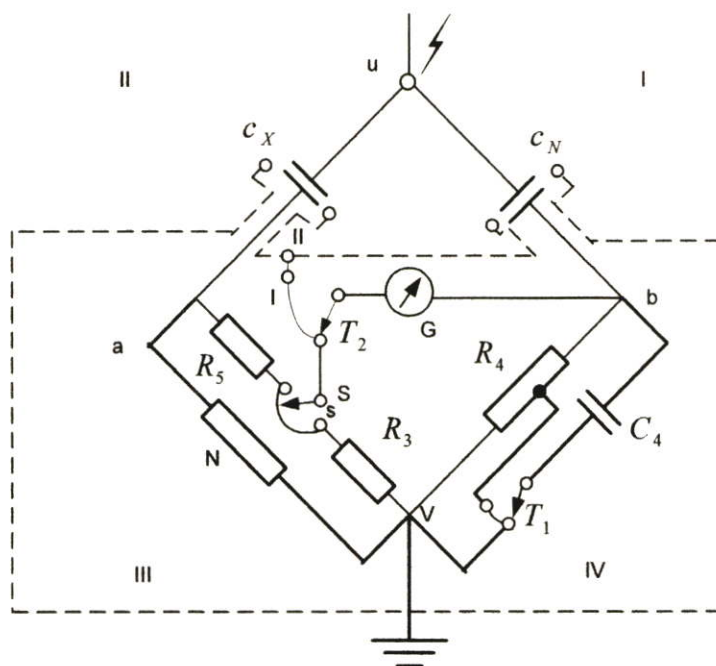
2. จากการทดลองที่ 2 และ 3 พบว่าชนิดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนที่สูงกว่าทั้งนี้อาจจะสรุปไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

3. จากการทดลองอิเล็กโตรดแผ่นระนาบที่มีปลายแหลมจำนวนปลายแหลมที่อยู่บนแผ่นระนาบมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซน และค่าแรงดันเบรกดาวน์ ของ สนามไฟฟ้า

จากข้อพิจารณาทั้ง 3 ข้อดังกล่าวจึงสามารถนำไปสู่การเลือกหรือการทดสอบที่เหมาะสมในที่นี้จึงเลือกเอาจุดที่ดีที่สุดในการออกแบบรูปแบบของอิเล็กโตรดและนำไปสู่ปัจจัยสำคัญของการพิจารณาเพื่อวิจัยในหัวข้อต่อไป

3.3.2.2 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วย C-tan δ meter

การทดลองที่ 4 การหาค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนที่ทดสอบด้วย C-tan δ meter



รูปที่ 3.18 การวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนที่เป็นไดอิเล็กตริกด้วย C-tan δ meter

ในรูปที่ 3.15

C_x	คือ	ค่าความจุของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
R_x	คือ	ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียในไดอิเล็กตริก
C_N	คือ	ค่าตัวเก็บประจุมาตรฐาน
R_3	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้
R_4	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
C_4	คือ	ค่าตัวเก็บประจุปรับค่าได้
G	คือ	กัลวานอมิเตอร์ความไวสูง

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนจำนวน 3 ชั้นอาจคำนวณได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐานคือ $E = U/d$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและใช้ความสัมพันธ์ $D = \epsilon E$ และเมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับจะนั้น D จะมีค่าคงตัว และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้าเสมือนว่ามีตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นตัวเก็บประจุแต่ละชั้นฉนวนจะมีค่าเท่ากัน จากสมการในการคำนวณและตัวอย่างการคำนวณ ดังนี้ (วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง : ดร.สำราญ สังข์สะอาด)

$$* Q = CU$$

$$* Q = C_1U_1 = C_2U_2 = C_3U_3 \quad (3.1)$$

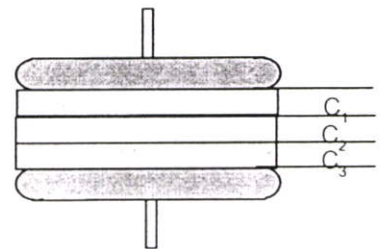
เมื่อ C_1, C_2 และ C_3 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี ϵ_1, ϵ_2 และ ϵ_3 ตามลำดับแต่เนื่องจาก

$$C_1 \sim \frac{\epsilon_1}{d_1}, \quad C_2 \sim \frac{\epsilon_2}{d_2}, \quad C_3 \sim \frac{\epsilon_3}{d_3}$$

$$Q = C_1U_1 = C_2U_2 = C_3U_3$$

$$* \quad \boxed{\frac{U_2}{U_3} = \frac{C_3}{C_2}}$$

$$Q = C_1U_1 = C_2U_2 = C$$



$C_1 =$ น้ำมันหม้อแปลง 1 cm

$C_2 =$ อะซิติกไซ 1 cm

$C_3 =$ อากาศ 2 cm

จากสมการ

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad (3.2)$$

เมื่อแผ่นทองแดงที่นำมาทำเป็นอิเล็กโทรดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 128 mm. จึงคำนวณตัวอย่างในการหาค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นจากสมการ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \varnothing &= 12.8 \text{ cm} \\ A &= \pi r^2 \\ &= 3.14 \times (0.128)^2 \\ A &= 0.05147 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\mathcal{E} = \epsilon_o \epsilon_r$$

เนื่องจากอากาศมีค่า $\epsilon_r = 1.0$ (ดร.สำราญ สังข์สะอาด. 2547 : 4-41)

$$\epsilon_o = (8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \times 1.0$$

$$= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$\mathcal{E} = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

จากสมการ

$$C = \frac{\epsilon \times A}{d}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$C = \frac{(8.854 \times 10^{-12}) \times (0.05147 \text{ m}^2)}{0.04 \text{ m}}$$

$$C = 11.39 \text{ pF}$$

\mathcal{E} คือ เปรอร์มิตติวิตซ์ของตัวกลาง

ϵ_o คือ เปรอร์มิตติวิตซ์ของสุญญากาศหรือที่ว่าง = $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ϵ_r คือ เปรอร์มิตติวิตซ์สัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)

(ดร.สำราญ สังข์สะอาด. 2547 : 4-41)

จึงสรุปผลการคำนวณตัวอย่างการคำนวณค่าคาปาซิแตนซ์ในแกปอากาศของระยะห่างตามชั้นฉนวนแต่ละชั้นคือ น้ำมันหม้อแปลง 1.0 cm อะลูมิเนียมความหนา 1.0 cm และช่องว่างอากาศกว้าง 1.0 cm ดังนั้น ในที่นี้ตามทฤษฎี ค่าตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นฉนวนมีค่าเท่ากันตามสมการที่ 3.1

ผลการทดลองที่ 4 การหาค่าคาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กตริกโดยใช้เครื่อง Tettex AG 2805 บริษัท Haefely Trench เมื่อ $C_N = 100 \text{ pF}$, C_x คือค่าคาปาซิแตนซ์ที่ต้องการทราบค่า

3.3.2.3 การศึกษาผลการเกิดค่าคาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กตริกในชั้นฉนวนแต่ละชนิด

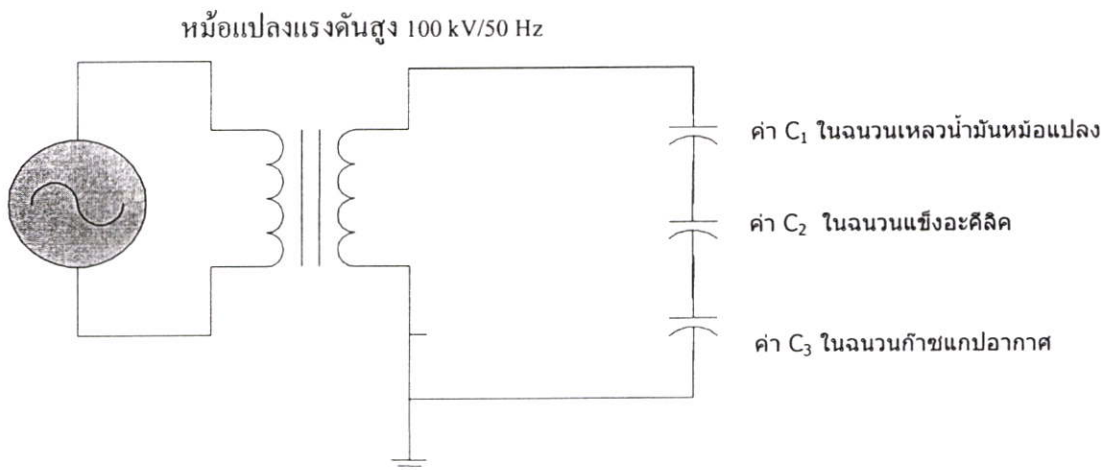
การทดลองที่ 5 ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซนของอิเล็กโตรดที่มีโครงสร้างที่มีเนื้อฉนวนแตกต่างกัน ดังในรูปที่ 3.13 ซึ่งลักษณะในการเกิดค่าคาปาซิแตนซ์ในเนื้อฉนวนแต่ละชนิดกันนั้นมีลักษณะดังในรูปที่ 3.19

การคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ในเนื้อฉนวนหาได้จากสมการ ดังนี้

$$C = C_1 = \frac{\epsilon_{1A}}{d_1} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_{2A}}{d_2} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_{3A}}{d_3} \dots\dots\dots(3.3)$$



รูปที่ 3.19 แสดงวงจรสมมูลของ Capacitance ที่เกิดในชั้นฉนวนต่างๆ

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรด ความชื้นสัมบูรณ์ที่ 38 g/m³ อุณหภูมิห้อง 33 C^o ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่างของช่องว่างอากาศ 2 cm และไม่มีฉนวนใดคั่นเป็นไดอิเล็กตริก

Sensitivity	Utest (kV)	ระยะห่างรวมของฉนวนแต่ละชั้นในชุด(cm)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan δ	Dielectric Loss (mW)
1	10	4.0	49.9	11.45	2.954*10 ⁻⁴	4.6331
2	10	4.0	49.9	11.65	2.952*10 ⁻⁴	4.5321
3	10	4.0	49.9	11.53	2.956*10 ⁻⁴	4.6020
1	20	4.0	49.9	11.67	2.956*10 ⁻⁴	9.6781
2	20	4.0	49.8	11.73	2.957*10 ⁻⁴	10.6509
3	20	4.0	49.8	11.55	2.955*10 ⁻⁴	9.6398
1	30	4.0	49.8	11.79	2.959*10 ⁻⁴	16.4743
2	30	4.0	49.8	11.94	2.957*10 ⁻⁴	18.4048
3	30	4.0	49.8	11.86	2.961*10 ⁻⁴	17.9504

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรด ความชื้นสัมบูรณ์ที่ 38 g/m³ อุณหภูมิห้อง 33 C^o ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่างของช่องว่างอากาศ 2 cm และมีฉนวนอะคีลิก 1 cm คั่นเป็นไดอิเล็กตริก

Sensitivity	Utest (kV)	ระยะห่างรวมของฉนวนแต่ละชั้นในชุด(cm)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan δ	Dielectric Loss (mW)
1	10	4.0	49.9	26.22	5.234*10 ⁻⁴	11.2385
2	10	4.0	49.9	25.97	4.426*10 ⁻⁴	12.4563
3	10	4.0	49.9	26.48	5.852*10 ⁻⁴	10.8596
1	20	4.0	49.9	27.88	5.144*10 ⁻⁴	29.5698
2	20	4.0	49.8	25.23	5.265*10 ⁻⁴	29.1278
3	20	4.0	49.8	25.70	5.742*10 ⁻⁴	29.4391
1	30	4.0	49.8	25.44	4.962*10 ⁻⁴	36.5234
2	30	4.0	49.8	26.55	5.831*10 ⁻⁴	37.7843
3	30	4.0	49.8	26.12	5.718*10 ⁻⁴	35.5241

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ ความชื้นสัมบูรณ์ที่ 38 g/m³ อุณหภูมิห้อง 33 C^o ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่างของช่องว่างอากาศ 2 cm และมีฉนวนอะคีลิก 1 cm คั่นเป็นไดอิเล็กตริก

Sensitivity	Utest (kV)	ระยะห่างรวมของฉนวนแต่ละชั้นในชุด (cm)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan δ	Dielectric Loss (mW)
1	40	4.0	49.9	26.94	5.323*10 ⁻⁴	49.8521
2	40	4.0	49.9	25.22	5.625*10 ⁻⁴	48.5243
3	40	4.0	49.9	26.74	5.723*10 ⁻⁴	46.5532
1	50	4.0	49.9	25.28	5.246*10 ⁻⁴	53.1289
2	50	4.0	49.8	25.33	4.956*10 ⁻⁴	52.4569
3	50	4.0	49.8	25.17	5.147*10 ⁻⁴	54.8423
1	60	4.0	49.8	25.32	5.154*10 ⁻⁴	61.2589
2	60	4.0	49.8	26.85	5.236*10 ⁻⁴	62.8124
3	60	4.0	49.8	25.27	5.312*10 ⁻⁴	61.5369

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ ความชื้นสัมบูรณ์ที่ 38 g/m³ อุณหภูมิห้อง 33 C^o ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่างของช่องว่างอากาศ 2 cm มีฉนวนอะคีลิก 1cm คั่น กับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง 1 cm คั่น

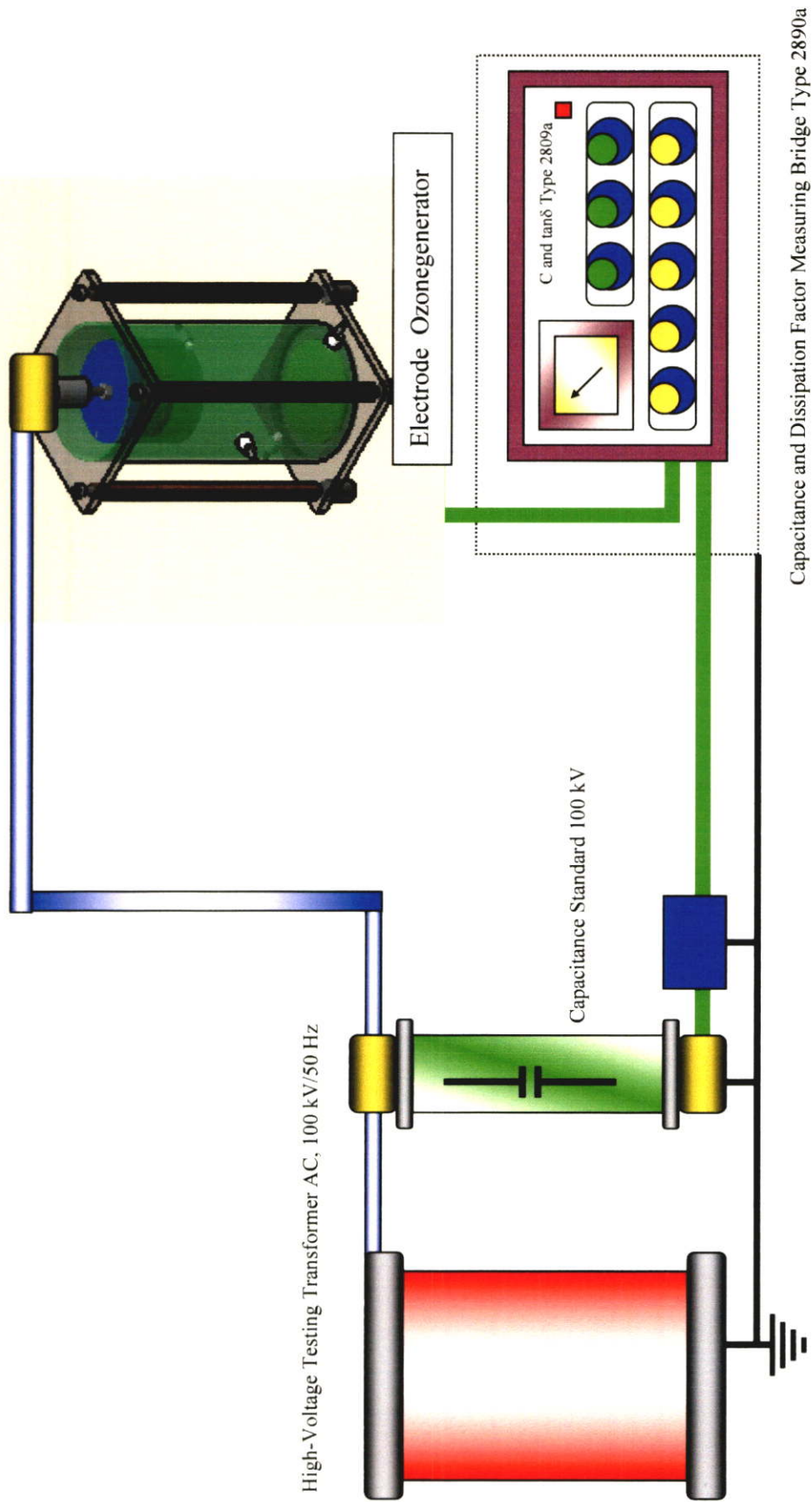
Sensitivity	Utest (kV)	ระยะห่างรวมของฉนวนแต่ละชั้นในชุด (cm)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan δ	Dielectric Loss (mW)
1	10	4.0	49.9	31.25	9.235*10 ⁻⁴	22.4523
2	10	4.0	49.9	32.68	9.423*10 ⁻⁴	23.4125
3	10	4.0	49.9	31.39	9.123*10 ⁻⁴	21.8523
1	20	4.0	49.9	30.15	8.965*10 ⁻⁴	36.2361
2	20	4.0	49.8	32.54	9.022*10 ⁻⁴	38.2741
3	20	4.0	49.8	31.42	9.352*10 ⁻⁴	37.5232
1	30	4.0	49.8	32.17	9.424*10 ⁻⁴	45.2363
2	30	4.0	49.8	31.63	9.632*10 ⁻⁴	46.8523
3	30	4.0	49.8	31.42	8.961*10 ⁻⁴	48.1254

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ ความชื้นสัมบูรณ์ที่ 38 g/m³ อุณหภูมิห้อง 33 C^o ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg ที่ระยะห่างของช่องว่างอากาศ 2 cm มีฉนวนอะซิติก 1cm คั่น กับฉนวนน้ำมันหม้อแปลง 1 cm คั่น

Sensitivity	Utest (kV)	ระยะห่างรวมของฉนวนแต่ละชั้นในชุด (cm)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan δ	Dielectric Loss (mW)
1	40	4.0	49.9	32.3635	8.845*10 ⁻⁴	62.1213
2	40	4.0	49.9	33.4152	9.112*10 ⁻⁴	61.2385
3	40	4.0	49.9	31.8523	9.248*10 ⁻⁴	63.8251
1	50	4.0	49.9	31.2365	9.418*10 ⁻⁴	71.8534
2	50	4.0	49.8	33.4123	9.261*10 ⁻⁴	70.7454
3	50	4.0	49.8	32.5237	9.362*10 ⁻⁴	72.6428
1	60	4.0	49.8	31.8956	8.952*10 ⁻⁴	83.1855
2	60	4.0	49.8	32.4512	9.142*10 ⁻⁴	84.5428
3	60	4.0	49.8	32.6523	9.437*10 ⁻⁴	84.5237



รูปที่ 3.20 แสดงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กตริก Tettex AG 2805 จากบริษัท Haefely Trench



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรการทดสอบค่าไดอิเล็กตริกของชั้นฉนวนในชุดอ็อกโทโดรด์

3.4 การคำนวณตัวอย่างเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าในการออกแบบ

การออกแบบเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน โดยการป้อนไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้เกิดผลในการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสิ่งสำคัญที่ต้องทำการวิเคราะห์คือการคำนวณหาความเป็นไปได้ต่อการทนสถานะแรงดันสูงๆ ที่ฉนวนสามารถทนได้และการเกิดค่าสนามไฟฟ้าที่ส่งผลให้เกิดการแตกตัวของอากาศเพื่อเกิดเป็นก๊าซไอโซน ซึ่งเป็นก๊าซตัวใหม่ที่เกิดจากอากาศที่อยู่บริเวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงๆ ซึ่งเป็นที่แน่นอนเมื่อมีการสร้างหรือป้อนไฟฟ้าแรงสูงเข้าที่บริเวณโดย้อมมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างแน่นอนเพียงแต่ความเข้มข้นของค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย อาทิเช่น รูปทรงของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมหรือมีจุดที่ทำให้การแตกตัวของอากาศบริเวณรอบๆ ได้ดี และปริมาณแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างขึ้นหรือป้อนเข้าสู่อิเล็กโทรด ดังนั้นการจะป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงๆ เพื่อให้เกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงๆ ได้จำเป็นอย่างยิ่งต้องมีฉนวนไฟฟ้าคั่นกลางซึ่งจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริกเพื่อให้สามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเพื่อส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตามไปและส่งผลให้อากาศบริเวณรอบๆ เกิดการแตกตัวเป็นก๊าซตัวใหม่ซึ่งเรียกกันว่า “ก๊าซไอโซน” และปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการซึ่งจะได้กล่าวไว้ในรายละเอียดต่อไป ในหัวข้อนี้จึงเป็นการวิเคราะห์เพื่อคำนวณตัวอย่างในการออกแบบเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโทรดที่ได้ออกแบบในลักษณะนี้โดยได้สมมุติฐานปัญหาในการวิเคราะห์และออกแบบดังจะ ได้แสดงในวิธีการดังนี้

3.4.1 การคำนวณตัวอย่างการหาค่าสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเพื่อเป็นการศึกษาการเลือกใช้ฉนวน

ในกรณีที่ไม่มีฉนวนน้ำมันและอะคลิกล้วนในชุดอิเล็กโทรดจะยังคงเป็นอากาศเพียงอย่างเดียว โดยป้อนแรงดันขนาด 60 kV/50 Hz เข้าที่ชุดอิเล็กโทรดที่ออกแบบสร้างที่เป็นแบบระนาบธรรมดา 2 แผ่นโดยแผ่นบนป้อนแรงดันไฟฟ้าและแผ่นล่างเป็นกราวด์เข้าที่อิเล็กโทรด ระนาบวางขนานกัน มีระยะห่าง 20 cm. ดังรูป

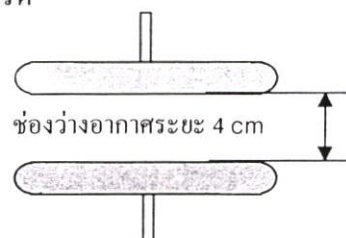
- a) เนื่องจากเป็นอิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่กระจายระหว่างอิเล็กโทรด

(ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2547: 4-41)

ค่าความคงทนของอากาศต่อความเครียดสนามไฟฟ้า คือ

$$E_b = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}} \quad \text{kv/cm}$$



$$E_{\max} = \hat{E} = \frac{\hat{U}}{d} = \frac{60 \text{ kv} \sqrt{2}}{4 \text{ cm}} = 21.21 \text{ kv / cm}$$

ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ

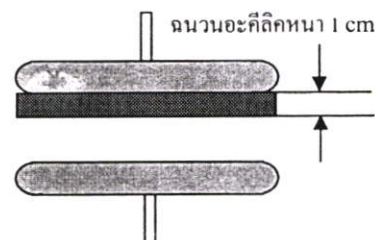
$$E_b = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{4}} = 27.26 \text{ kV/cm}$$

จึงไม่เกิดเบรกดาวน์

b) ถ้าใส่ฉนวนเคลือบหนา 1.0 cm ($= d_2$)

$$\begin{aligned} d_1 &= 4 - 1 = 3 \text{ cm.} & \epsilon_{r1} &= 1 \\ d_2 &= 1 & \epsilon_{r2} &= 2.3 \end{aligned}$$

(ดร.สำราญ สัจจ์สะอาด. 2547 : 4-41)



$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \hat{E} &= \frac{\hat{U}}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \\ &= \frac{(60 \text{ kv}) \times \sqrt{2}}{3 \text{ cm}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2.3} \times \frac{1}{3}\right)} \\ \hat{E}_1 &= (28.28) \times \left[\frac{1}{1 + (0.4347)(0.3333)} \right] \\ &= (28.28) \times \left[\frac{1}{1 + 0.1447} \right] \\ &= (28.28) \times (0.6910) \\ &= 19.54 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

แต่ที่ระยะ $d_1 = 3.0 \text{ cm}$ $E_b = 27.73 \text{ kV/cm}$

จากผลการคำนวณแสดงว่า E_1 น้อยกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของส่วนที่เป็นอากาศ จึงเกิดเบรกดาวน์ในส่วนของฉนวนเมื่อเกิดเบรกดาวน์ในส่วนที่เป็นฉนวนแล้ว แรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมชั้นฉนวนอากาศ (ฉนวนก๊าซ) ความเครียดสนามไฟฟ้าส่วนที่เป็นอากาศ จึงหาได้

$$E_2 = \frac{60kV}{1.0} = 60kV/cm$$

แต่ความคงทนของฉนวนอะซีติก 40 kV/mm จึงไม่เกิดเบรกดาวในส่วนที่เป็นอะซีติก

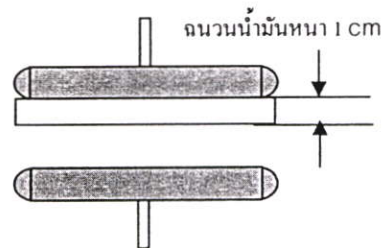
ถึงแม้ว่าจะไม่เกิดเบรกดาวผ่านอะซีติกแต่ในส่วนที่เป็นอากาศจะเกิดโคโรนาดีสชาร์จหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ มีโคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในระบบอเล็กโตรดอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้อากาศบริเวณภายในชุดอเล็กโตรดมีการแตกตัวและเกิดก๊าซโอโซน

c) ถ้ามีฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่มีความหนา ระยะ 1 cm คั่นระหว่างอเล็กโตรด (=d₂)

$$\begin{aligned} d_1 &= 4-1 = 3 \text{ cm.} & \epsilon_{r1} &= 1 \\ d_2 &= 1.0 & \epsilon_{r2} &= 2.2 \end{aligned}$$

(ดร.สำราญ สังข์สะอาด. 2547: 4-41)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \hat{E} &= \frac{\hat{U}}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \\ &= \frac{(60kV) \times \sqrt{2}}{3cm} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2.2} \times \frac{1}{3}\right)} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \hat{E}_2 &= (28.28) \times \left[\frac{1}{1 + (0.454)(0.333)} \right] \\ &= (28.28) \times \left[\frac{1}{1 + 0.151} \right] \\ &= (28.28) \times (0.868) \\ &= 24.54 \text{ kv/cm} \end{aligned}$$

แต่ที่ระยะ d₁ = 3.0 cm E_b = 27.73 kV/cm

จากผลการคำนวณแสดงว่า E₂ น้อยกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของส่วนที่เป็นอากาศ จึงเกิดเบรกดาวในส่วนของน้ำมันหม้อแปลงเมื่อเกิดเบรกดาวในส่วนที่เป็นน้ำมันหม้อแปลงแล้ว แรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมชั้นฉนวนอากาศ (ฉนวนก๊าซ) ความเครียดสนามไฟฟ้าส่วนที่เป็นอากาศ จึงหาได้

$$E_2 = \frac{60kV}{1.0} = 60kV/cm$$

แต่ความคงทนของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง 25 kV/cm จึงไม่เกิดเบรกดาวน์ในส่วนที่เป็นน้ำมัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการออกแบบชุดอิเล็กโตรดที่ออกแบบเป็นแบบแผ่นระนาบตามที่ได้สมมุติฐานจากตัวอย่างการคำนวณข้างต้น จึงเป็นที่มาของการออกแบบว่าเมื่อมีการคั่นฉนวนเป็นไดอิเล็กตริกแล้วนั้นก็ยังคงจะมีการเกิดโคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในช่องว่างฉนวนอากาศ ซึ่งนั่นหมายความว่า จะเกิดค่าสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในช่องว่างอากาศ และมีความเครียดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้อากาศในช่องว่างนั้นมีการแตกตัวกลายเป็นก๊าซไอโซน ดังนั้นสมการในการหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวนแต่ละชั้นเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปยังชุดอิเล็กโตรดและสมการสนามไฟฟ้าจะมีปัจจัยหรือตัวแปรในการคำนวณสมการสนามไฟฟ้าของฉนวนไดอิเล็กตริกแต่ละชั้น โดยในที่นี้มีการคำนวณฉนวนจำนวน 3 ชั้น คือชั้นฉนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ชั้นฉนวนแข็ง (อะคีลิก) ชั้นฉนวนก๊าซ (อากาศ) ดังนั้นสมการสนามไฟฟ้าของฉนวนแต่ละชั้นจึงสรุปได้ ดังนี้

3.5 การใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์ (FEM) ช่วยในการออกแบบอิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบ

การวิเคราะห์ฉนวนบริเวณที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดด้วย FEM (Finite element method) แบ่งเงื่อนไขการศึกษาออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ

- ศึกษาคุณสมบัติตัวแปรทางไฟฟ้าในโครงสร้างระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบธรรมดา กับระนาบที่มีปลายแหลม
- ผลกระทบเนื่องจากการใช้ชั้นฉนวนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันต่อการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าและที่เกิดค่าสนามไฟฟ้าในแกปอากาศ
- ผลกระทบของความหนาในการเลือกใช้ฉนวนแต่ละชนิด

ไฟไนท์อิลิเมนต์ FEM (Finite element method) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อช่วยในการออกแบบโครงสร้างของอิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีค่าการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และระนาบที่มีค่าการกระจายสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง โดยแสดงการกระจายของระดับแรงดันที่ป้อน, สนามไฟฟ้าที่แต่ละจุดภายในแกปอากาศสมการที่นำมาใช้เป็นแบบ 2 มิติและไม่คำนึงถึงผลประจุค้าง ($\rho_s=0$) รูปที่ 3.19 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม โดยพิจารณาอิเล็กโตรดแต่ละแบบคือ

1. อิเล็กโตรดที่เป็นแบบแผ่นระนาบเพียงอย่างเดียวไม่มีปลายแหลม
2. อิเล็กโตรดที่เป็นแบบแผ่นระนาบแต่มีปลายแหลม
3. อิเล็กโตรดที่มีฉนวนคั่นที่เป็นน้ำมันกับอากาศ
4. อิเล็กโตรดที่มีฉนวนคั่นที่เป็นอะคีลิกกับอากาศ
5. อิเล็กโตรดที่ไม่มีฉนวนน้ำมันกับอะคีลิกคั่นมีแต่อากาศ



รูปที่ 3.22 ลำดับการทำงานของโปรแกรมคำนวณและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ FEM

3.5.1 ศึกษาคุณสมบัติตัวแปรทางไฟฟ้าในอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยโดยสรุปปัญหาและลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่จะทำการวิเคราะห์

โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ชุดที่ 1 ระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์โดยมีระยะห่างที่เป็นผลรวมกับฉนวนในชั้นต่างๆ ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์มีฉนวนกันชั้นแรกคือ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีระยะ 1 cm โดยชั้นที่สอง คือ ฉนวนอะคริลิกที่มีความหนา 1 cm และฉนวนชั้นสุดท้ายคือฉนวนอากาศซึ่งสามารถปรับระยะได้โดยการปรับระยะของน้ำซึ่งมีค่าเป็นอิเล็กทรอนิกส์กราวด์ (-) ขึ้นลงซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะปรับระยะห่างในแกปอากาศ 1 cm โดยในวงของแกปอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm โดยอิเล็กทรอนิกส์นี้เป็นแบบระนาบที่ไม่มีปลายแหลม

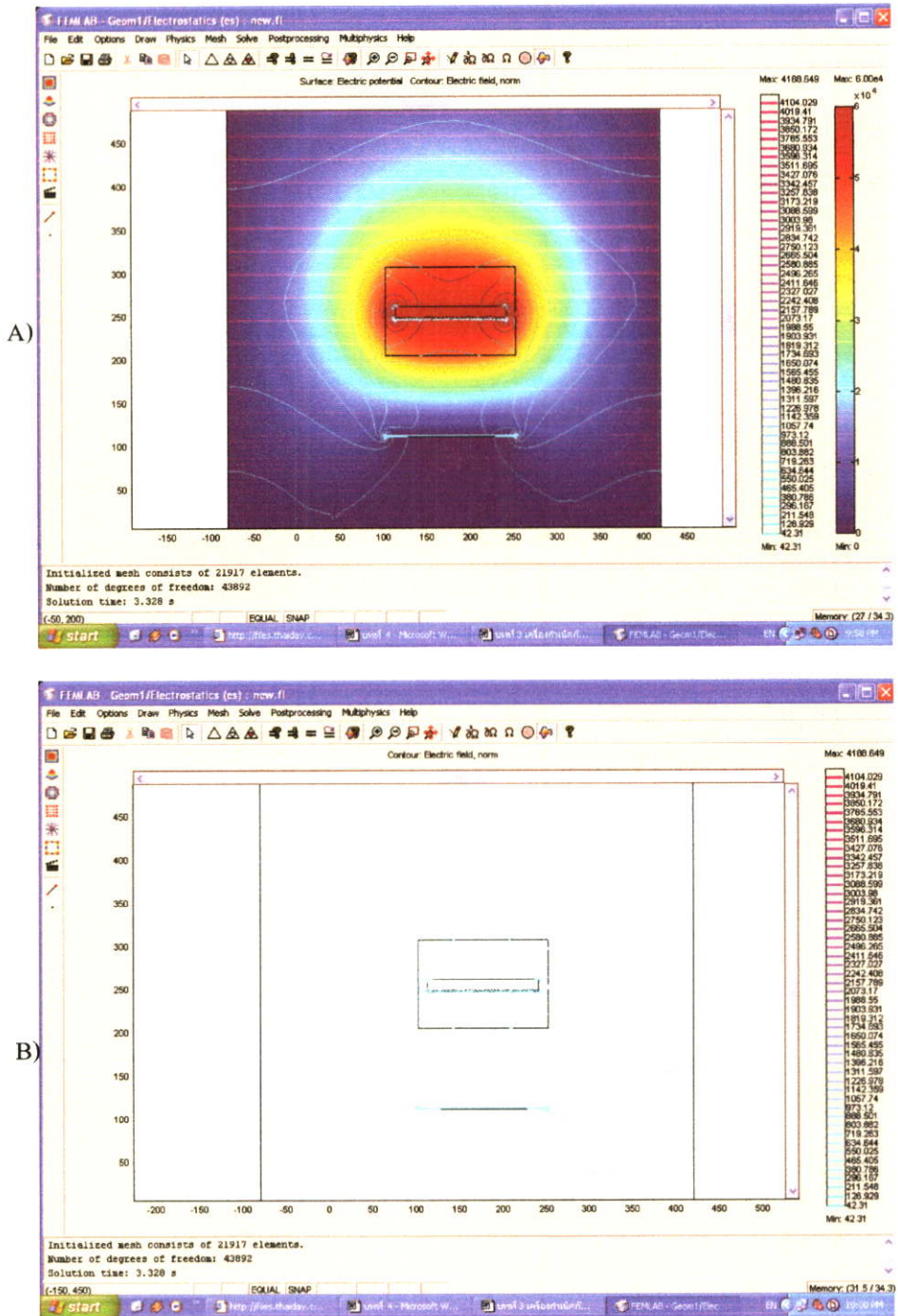
โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ชุดที่ 2 ระยะห่างของอิเล็กทรอนิกส์โดยมีระยะห่างที่เป็นผลรวมกับฉนวนในชั้นต่างๆ ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์มีฉนวนกันชั้นแรกคือ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีระยะ 1 cm โดยชั้นที่สอง คือ ฉนวนอะคริลิกที่มีความหนา 1 cm และฉนวนชั้นสุดท้ายคือฉนวนอากาศซึ่งสามารถปรับระยะได้โดยการปรับระยะของน้ำซึ่งมีค่าเป็นอิเล็กทรอนิกส์กราวด์ (-) ขึ้นลงซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะปรับระยะห่างในแกปอากาศ 2 cm โดยในวงของแกปอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm โดยอิเล็กทรอนิกส์นี้เป็นแบบระนาบที่มีปลายแหลม

ขอบเขตปัญหาที่พิจารณาคือบริเวณแกปที่มีฉนวนกันระหว่างอิเล็กทรอนิกส์จำนวนชั้นฉนวนที่ระดับและระยะห่างตามที่กล่าวมาข้างต้นแล้วบริเวณของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นสามเหลี่ยมเรียกว่าอิลิเมนต์ แต่ละอิลิเมนต์ประกอบไปด้วยโหนด (Node) 3 โหนดคือที่มุมทั้ง 3 ของสามเหลี่ยม แรงดันไฟฟ้าทดสอบจะถูกกำหนดขึ้นในโปรแกรมด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกป้อนเข้าไปที่โหนด บริเวณระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่มีฉนวนกันทุกชั้นฉนวน ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงในรูปกราฟพร้อมค่าดังต่อไปนี้

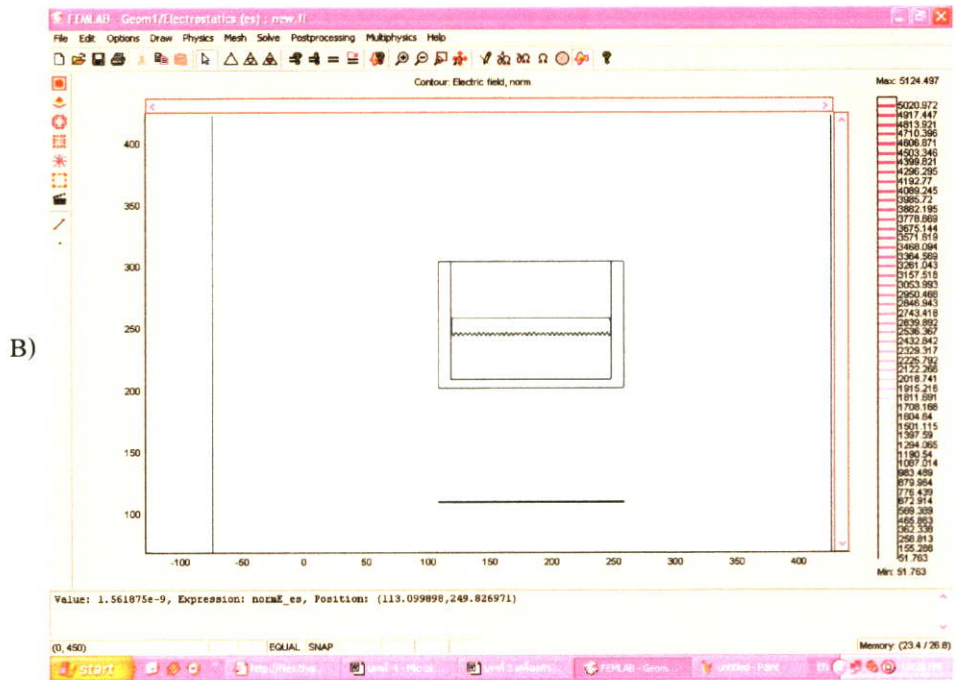
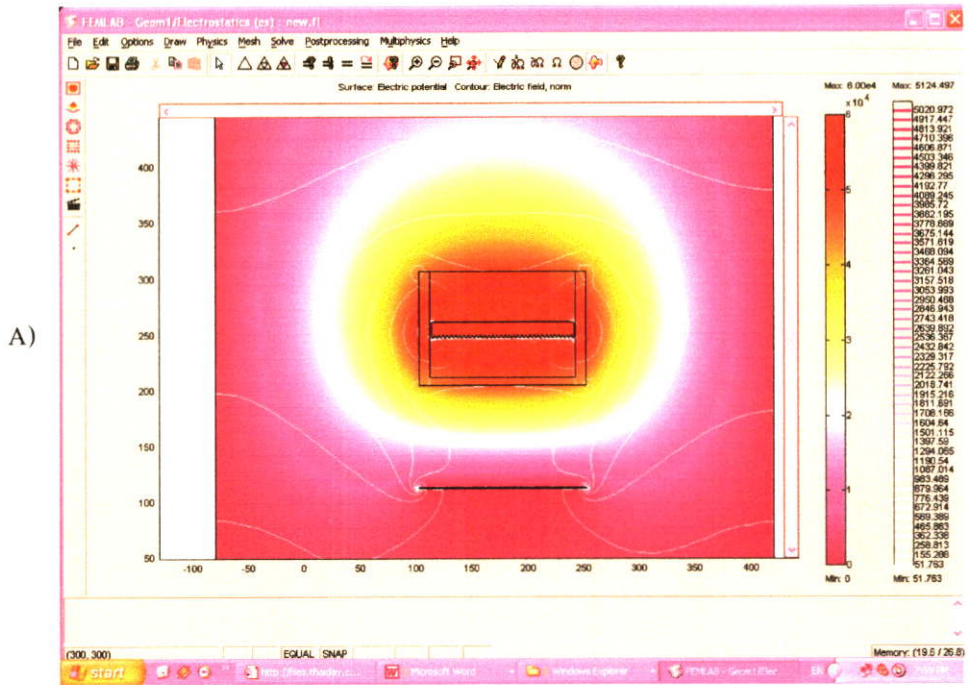
3.5.2 การแสดงผลการคำนวณของ FEM

3.5.2.1 การกระจายของระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในแกประหว่างอิเล็กทรอนิกส์

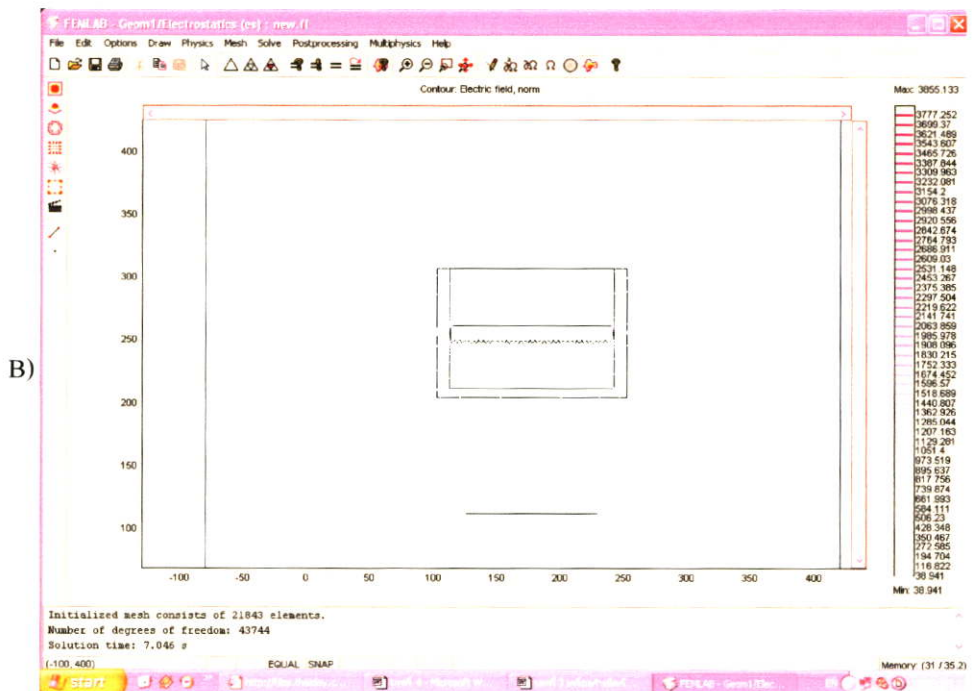
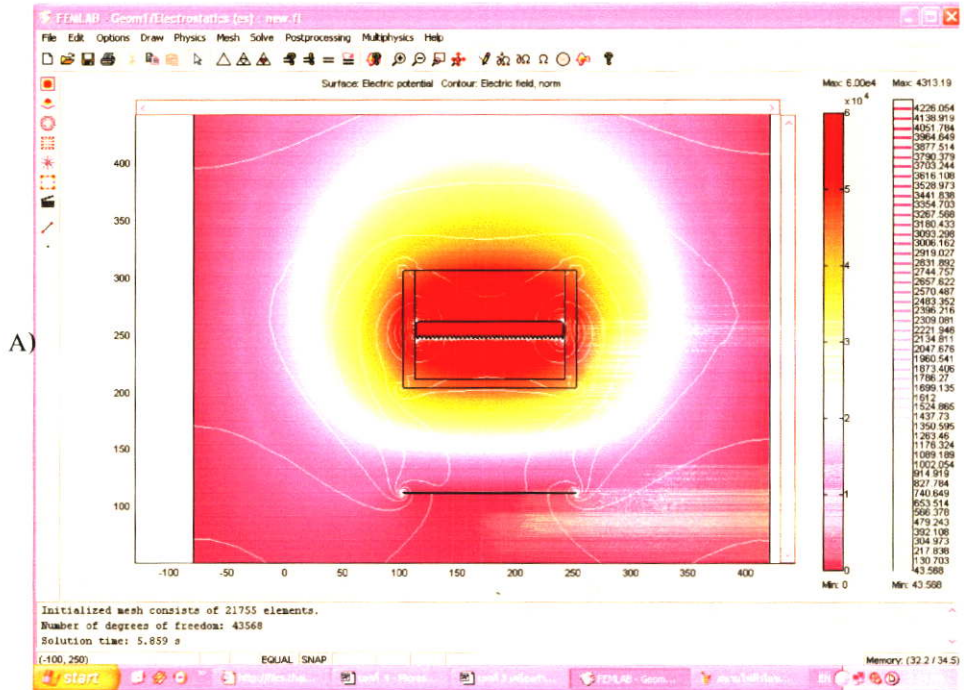
อิเล็กโตรสแตติกที่ 1 (ระยะห่างในชั้นฉนวนชั้นแรก (น้ำมันหม้อแปลง) ระยะ 1 cm ฉนวนชั้นที่ 2 (อะคริลิก) ระยะ 1 cm ฉนวนชั้นที่ 3 (อากาศ) ระยะ 2 cm แรงดันที่กำหนดทดสอบ 60 kV



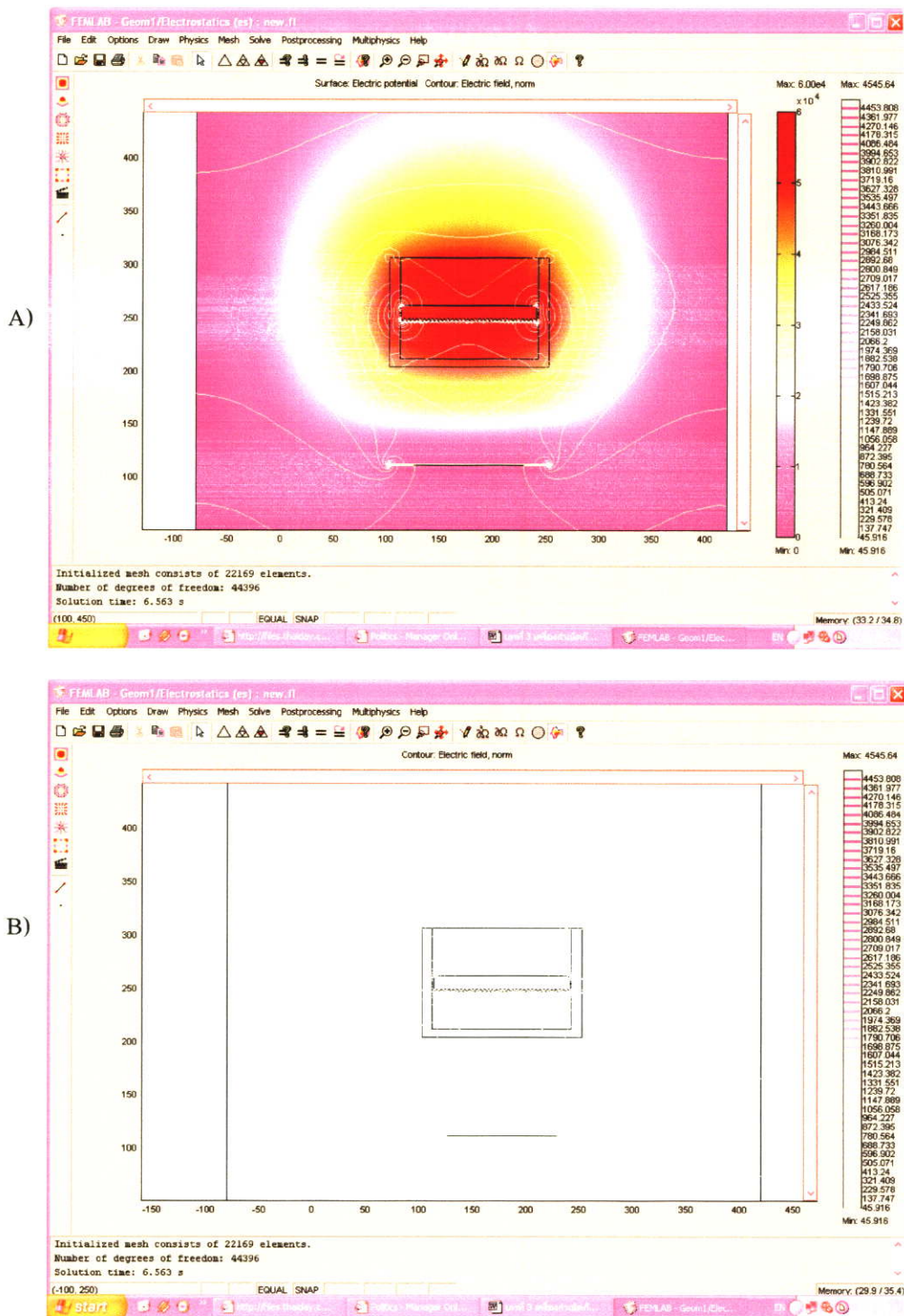
รูปที่ 3.23 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่น โดยมีฉนวนน้ำมันทั้ง 3 ชั้น (ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงระยะ 1 cm, ฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm, ฉนวนอากาศระยะ 2 cm) (ระนาบมีปลายแหลม)



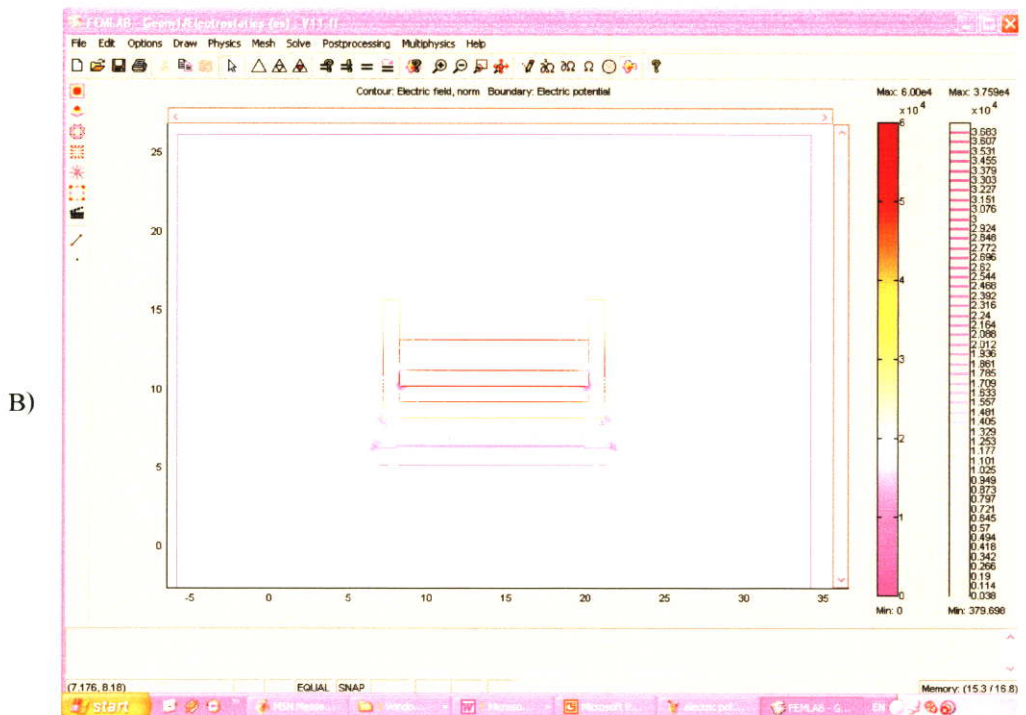
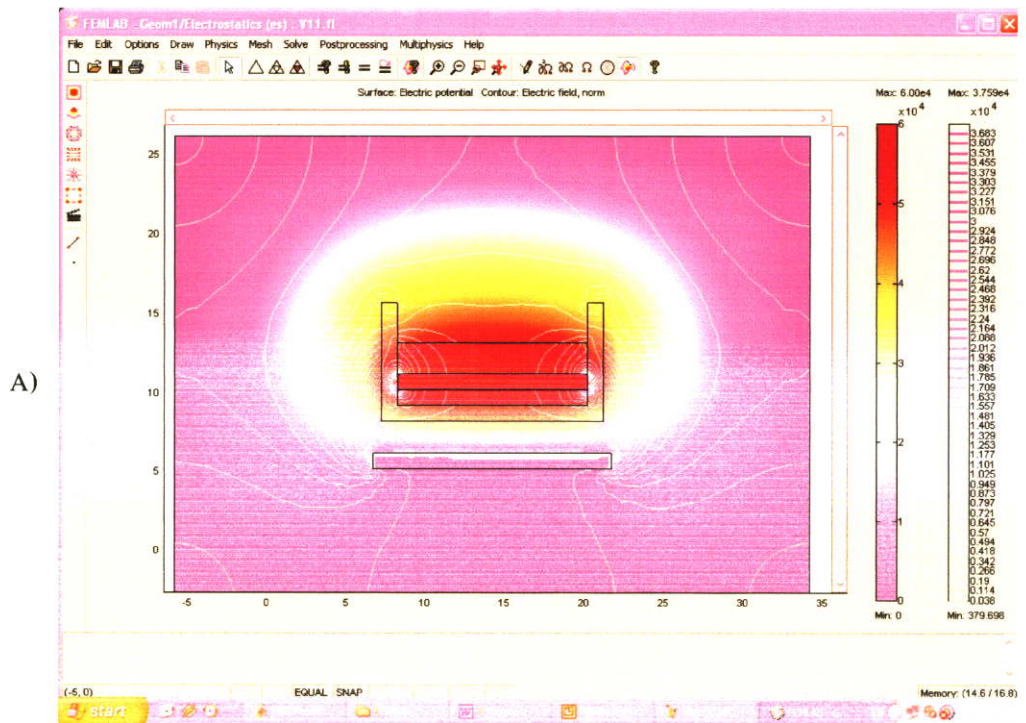
รูปที่ 3.24 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดที่คั่นโดยไม่มีฉนวน จำนวน 2 ชั้น คือ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงระยะ 1 cm และฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm มีอากาศอย่างเดียวยุทธะ 4 cm (ระนาบมีปลายแหลม)



รูปที่ 3.25 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนน้ำมัน มีฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมระยะห่างของอิเล็กโทรด 3 cm. (ระนาบมีปลายแหลม)

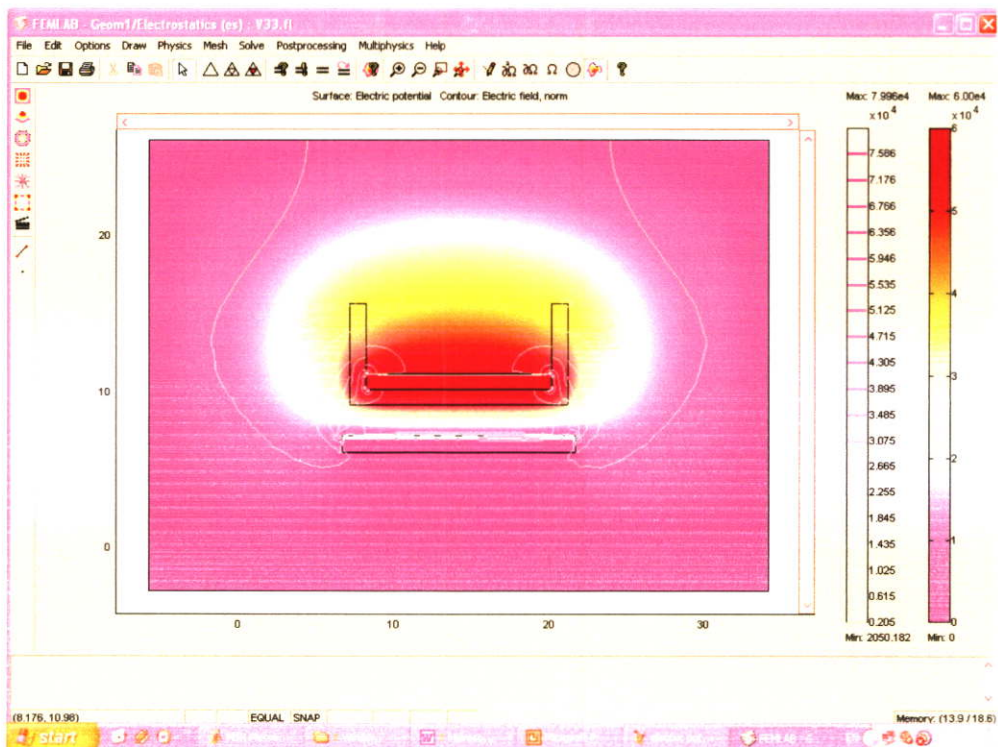


รูปที่ 3.26 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนอะกิลิก มีฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมทั้งระยะห่างของอิเล็กโทรด 4 cm. (ระนาบมีปลายแหลม)

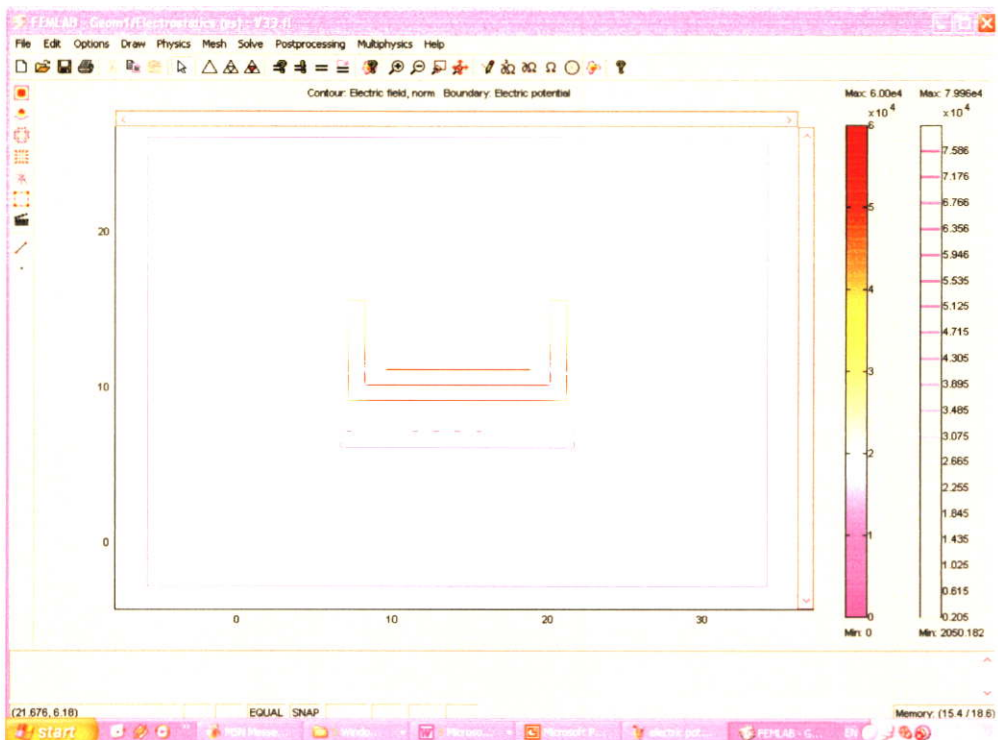


รูปที่ 3.27 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยมีฉนวนอะทิลิก 1 cm มีฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโทรด 4 cm. (ระนาบไม่มีปลายแหลม)

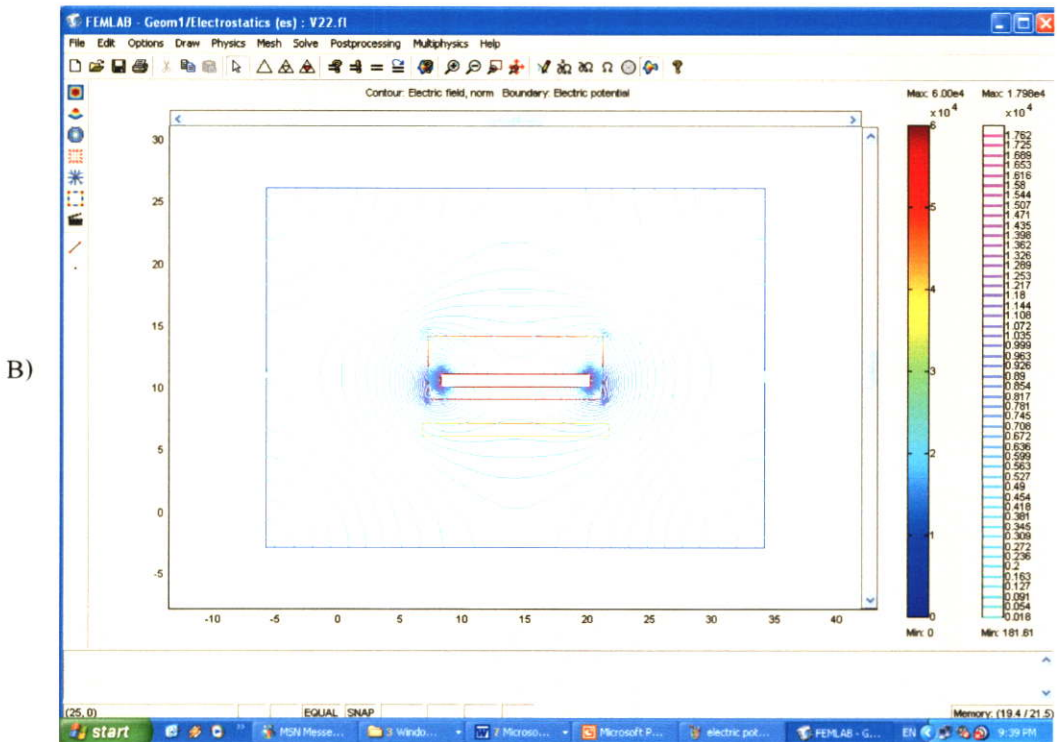
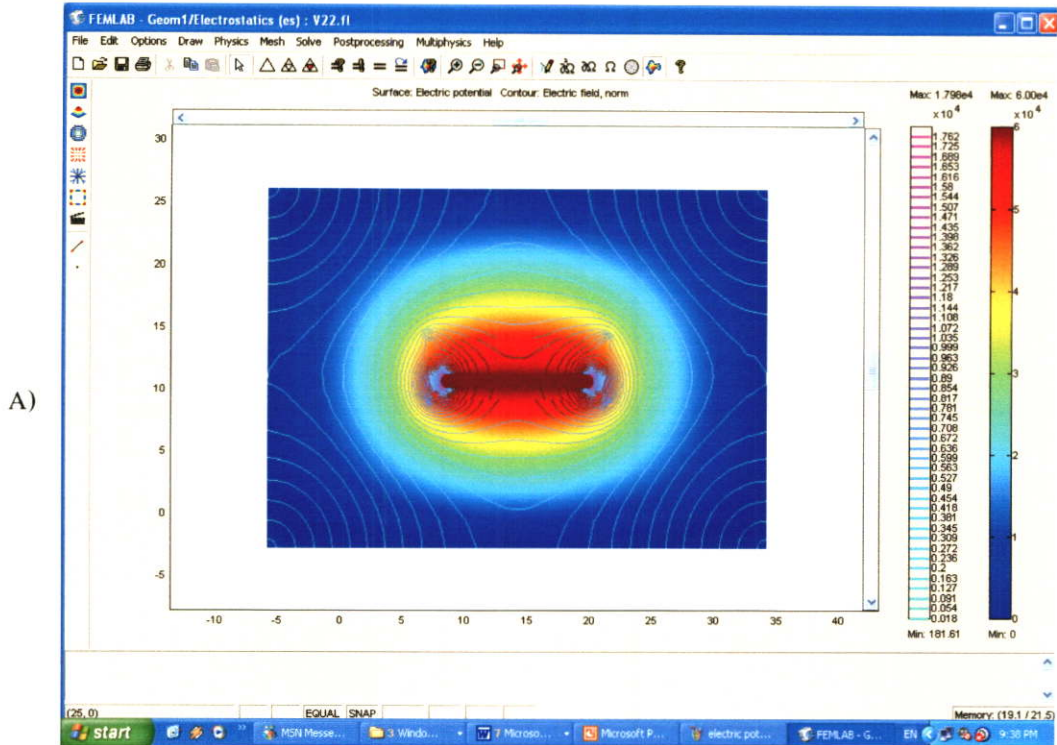
A)



B)

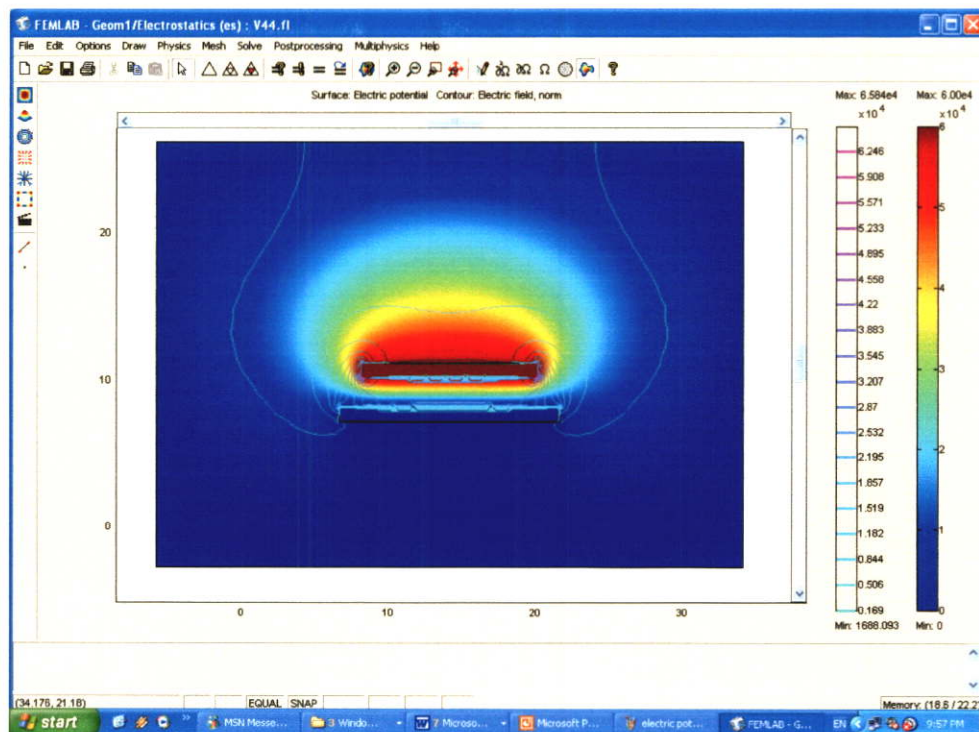


รูปที่ 3.28 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่น โดยมีฉนวนอะซิติก 1 cm ไม่มีฉนวนน้ำมัน กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโทรด 3 cm. (ระนาบไม่มีปลายแหลม)

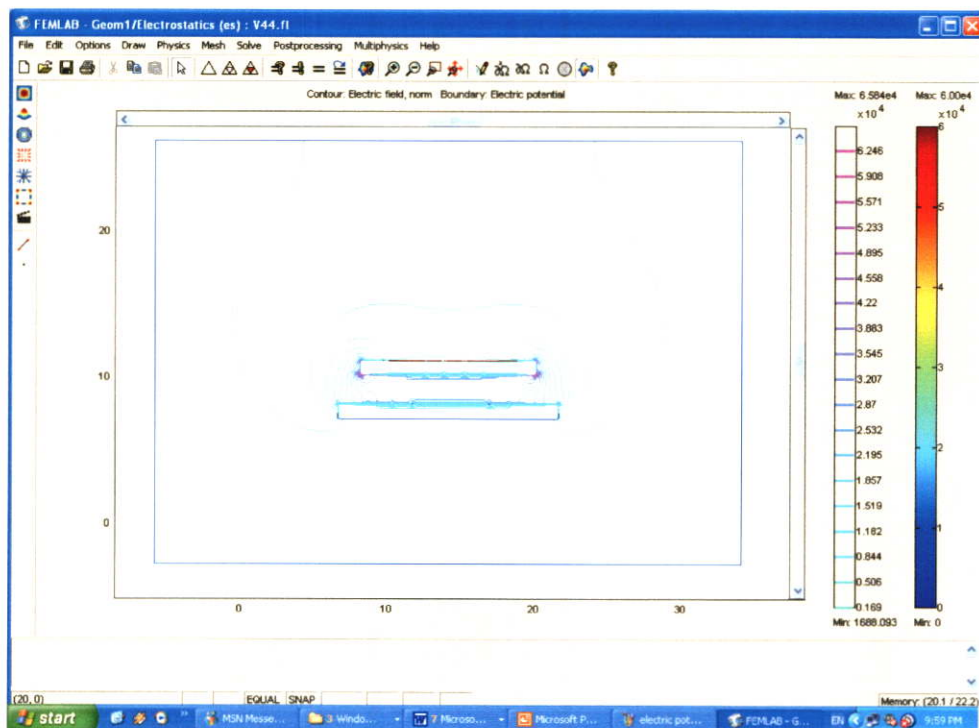


รูปที่ 3.29 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนอะกิลิก มีฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm กับอากาศระยะ 2 cm รวมที่ระยะห่างของอิเล็กโตรด 3 cm. (ระนาบไม่มีปลายแหลม)

A)



B)



รูปที่ 3.30 (A) และ (B) แสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องที่คั่นโดยไม่มีฉนวนอะทีลิก ไม่มีฉนวนน้ำมันระยะ มีแต่อากาศระยะ 2 cm รวมทั้งระยะห่างของอิเล็กโทรด 2 cm. (ระนาบไม่มีปลายแหลม)

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เนื้องานวนที่เลือกใช้ในการศึกษาทั้ง 3 ชนิด
โดยมีการศึกษาในกรณีเนื้องานวนคั่นต่างชนิดกัน

ระดับแรงดันไฟฟ้า (kV)	อิเล็กโตรดชุดที่ 2 (แผ่นระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม)			
	สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ (kV/cm)			
	อากาศ	น้ำมัน+อากาศ	อะคริลิก+อากาศ	มีงานวนคั่นทั้ง 3 ชั้น
10	2.241	1.249	0.914	0.859
20	3.429	1.846	1.054	0.946
30	4.124	2.264	1.125	1.074
40	6.529	2.356	1.296	1.125
50	9.835	2.823	1.326	1.246
60	12.259	3.014	1.810	1.428

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เนื้องานวนที่เลือกใช้ในการศึกษาทั้ง 3 ชนิด
โดยมีการศึกษาในกรณีเนื้องานวนคั่นต่างชนิดกัน

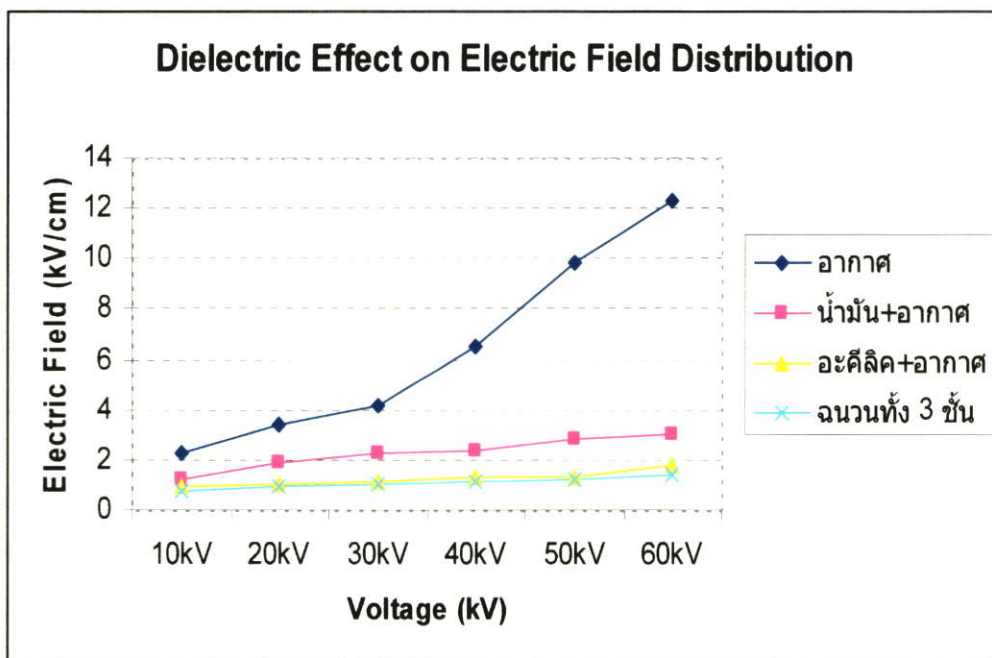
ระดับแรงดันไฟฟ้า (kV)	อิเล็กโตรดชุดที่ 1 (แผ่นระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด)			
	สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ (kV/cm)			
	อากาศ	น้ำมัน+อากาศ	อะคริลิก+อากาศ	มีงานวนคั่นทั้ง 3 ชั้น
10	6.061	2.341	1.960	1.532
20	8.935	3.076	2.309	1.954
30	10.143	3.627	2.744	2.527
40	12.561	3.810	3.441	2.919
50	14.239	4.086	3.877	3.680
60	15.923	4.453	4.226	4.104

$$\mathcal{E}_{oil} = 2.2$$

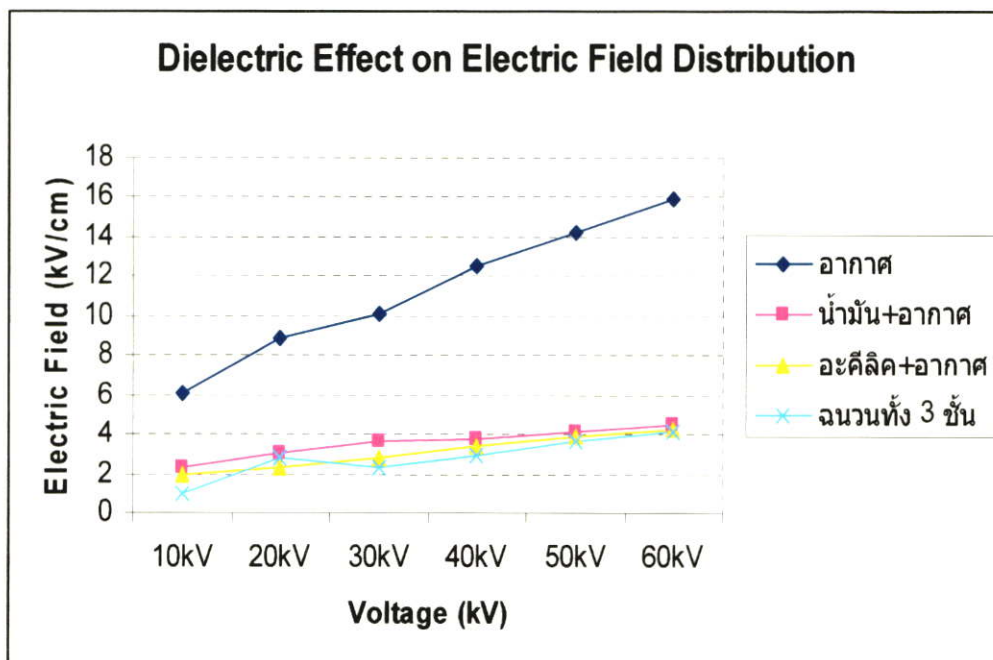
$$\mathcal{E}_{PE} = 2.3$$

$$\mathcal{E}_{air} = 1.0$$

(ดร.สำราญ สังข์สะอาด. 2547 : 4-41)



รูปที่ 3.31 แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในชั้นฉนวนต่างชนิดกันที่อเล็กโตรดแบบระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม



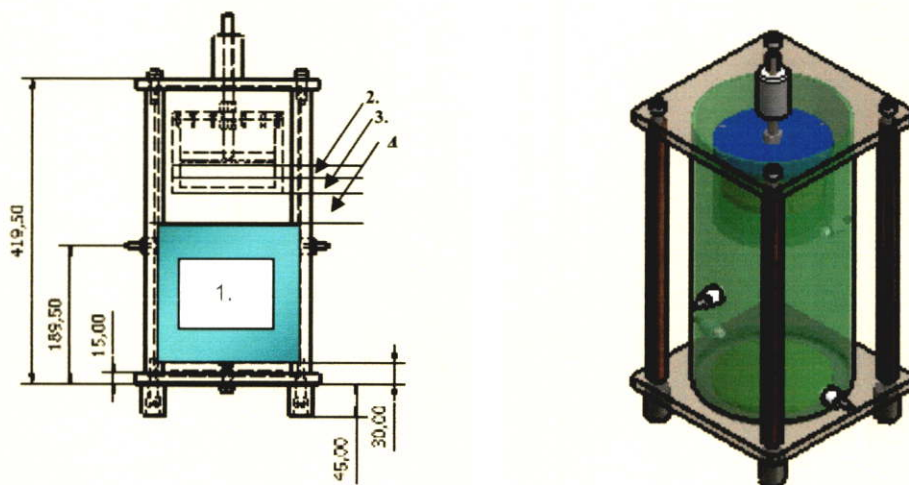
รูปที่ 3.32 แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในชั้นฉนวนต่างชนิดกันที่อเล็กโตรดแบบระนาบแบบมีปลายแหลม

3.5.3 การศึกษาผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่อการผลิตก๊าซโอโซน

การทดลองที่ 6 ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนของไดอิเล็กตริกที่มีโครงสร้าง

ฉนวนต่างชนิดกันโดยในที่นี้ได้มีการเลือกใช้ชั้นฉนวนทั้ง 3 ชนิด คือ ฉนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ฉนวนแข็ง (อะกลีค) ฉนวนก๊าซ (อากาศ) ดังนั้นตัวปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนแต่ละชนิด ดังนั้นจึงนำไปสู่การทดลองชั้นฉนวนแต่ละชั้นต่อความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนโดยสามารถวิเคราะห์ได้จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 10-60 kV และที่ทดสอบฉนวนที่ค้นเป็นไดอิเล็กตริกในแต่ละชนิดพร้อมทำการวัดค่าปริมาณโอโซนด้วยเครื่องมือวัดก๊าซโอโซน ทั้งนี้เนื่องจากชั้นฉนวนอะกลีคเป็นชั้นฉนวนที่เป็นสถานะในการใส่น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจึงขอแบ่งปัญหาในการวิเคราะห์ได้ 3 ข้อ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ชั้นฉนวนอากาศเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีชั้นฉนวนน้ำมัน และชั้นฉนวนอะกลีคค้น โดยวัดปริมาณก๊าซโอโซนในชั้นฉนวนอากาศ
2. การวิเคราะห์ชั้นฉนวนอะกลีคที่มีความหนา 1 cm กับชั้นฉนวนอากาศ โดยวัดปริมาณก๊าซ โอโซนในชั้นฉนวนอากาศ
3. การวิเคราะห์ชั้นฉนวนทั้ง 3 ชั้น คือที่ชั้นฉนวนน้ำมันหนา 1 cm อะกลีคหนา 1 cm และชั้นฉนวนอากาศระยะ 2 cm รวมระยะ 4 cm โดยวัดปริมาณก๊าซโอโซนในชั้นฉนวนอากาศ



รูปที่ 3.33 ภาคตัดขวางและ โมเดลของชุดอิเล็กโตรดที่ใช้ในการศึกษาของวิจัย

จากรูปที่ 3.33

หมายเลข 1 ชั้นน้ำธรรมดาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรดขั้วลบหรือกราวด์ (-)

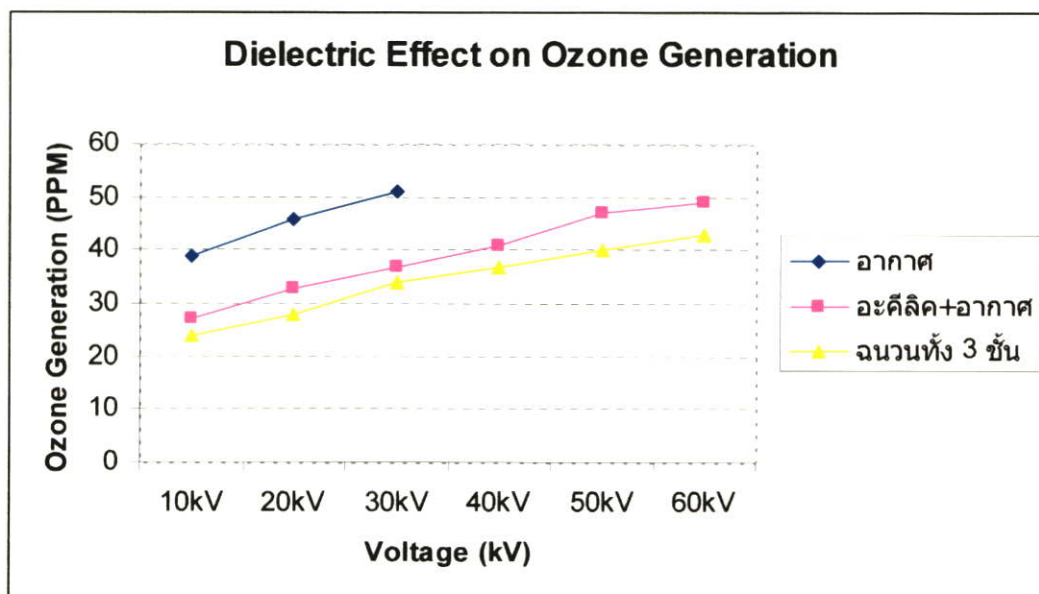
หมายเลข 2 ชั้นฉนวนเหลวหรือน้ำมันหม้อแปลงที่มีระยะ 1 cm

หมายเลข 3 ชั้นฉนวนแข็งหรืออะคริลิกที่มีความหนา 1 cm

หมายเลข 4 ชั้นฉนวนอากาศที่ระยะ 2 cm

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบการเกิดก๊าซโอโซนที่โครงสร้างฉนวนแตกต่างกันทดสอบที่อุณหภูมิที่ทดสอบ 38 องศาเซลเซียส (C°) ความดันบรรยากาศ 760 mm.Hg (ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด)

ระดับแรงดันที่ทดสอบ (kV)	ปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิด (PPM) ในชั้นฉนวนต่างกัน		
	อากาศ	อะคริลิก+อากาศ	ฉนวนทั้ง 3 ชั้น
10 kV	39	27	24
20 kV	46	33	28
30 kV	51	37	34
40 kV	เบรกดาวน์ก่อน	41	37
50 kV	-	47	40
60 kV	-	49	43



รูปที่ 3.34 ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนที่ค่าแรงดันไดอิเล็กตริกของฉนวนแตกต่างกัน

3.6 การศึกษาการแตกตัวของอากาศภายในช่องว่างอากาศ (GAP) ในชั้นฉนวนต่างๆ

การทดลองที่ 5 ทดสอบอิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลมด้วยไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับความถี่ 50 Hz และแบบระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด

อิเล็กโตรดแบบแผ่นระนาบได้มีการออกแบบสร้างขึ้นจำนวน 4 แบบ 2 ชุด คือ ชุด 1 ที่เป็นแผ่นระนาบธรรมดาแบบไม่มีการกลึงแผ่นให้มีปลายแหลม ชุดที่ 2 เป็นชุดแผ่นระนาบที่มีการกลึงให้มีปลายจำนวน 141 จุด จำนวน 190 จุด และ 211 จุด และได้มีการทดสอบที่ฉนวนจำนวน 3 ชั้นประกอบไปด้วยฉนวนเหลว (หม้อแปลงไฟฟ้า) ฉนวนแข็ง (อะคริลิก) ฉนวนก๊าซ (อากาศธรรมดา) ทั้งนี้จากการออกแบบชุดอิเล็กโตรด เพื่อศึกษาความแตกต่างของกลไกในการเกิดโคโรนาดีสชาร์จที่มีผลในช่องว่างอากาศโดยอิเล็กโตรดที่ใช้ทั้ง 4 แบบ 2 ชุดนี้ มีขนาดเท่ากันคือทำจากแผ่นทองแดงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 128 mm. มีความหนา 15 mm แตกต่างกันตรงกันมีไม่มีการกลึงปลายแหลมและการกลึงปลายแหลมก็มีการกลึงจำนวนไม่เท่ากัน

ผลการทดลองที่ 5

ตารางที่ 3.10 การทดสอบวัดค่าการเกิดก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโตรดแบบระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลมบนแผ่นระนาบโดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 20 L/min ที่ฉนวน 3 ชั้น ชั้นฉนวนน้ำมันระยะ 1 cm ฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm และช่องว่างอากาศ 2 cm

V_p (kV) AC	V_{rms} (kV)	E_{max} (kV/cm) ในช่องว่างอากาศ	Ozone (O ₃) (ppm)
14.14	10	0.859	5
28.28	20	0.946	6
42.42	30	1.074	8
56.56	40	1.125	10
70.70	50	1.246	12
84.84	60	1.428	14

ตารางที่ 3.11 การทดสอบวัดค่าการเกิดก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นในชุดอิเล็กโตรดแบบระนาบมี
 ปลายแหลมจำนวนที่เกิดสนามไฟฟ้ามากที่สุดจำนวน 211 จุด บนแผ่นระนาบ
 โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 20 L/min ที่อุณหภูมิ 3 ชั้น ชั้นฉนวนน้ำมันระยะ
 1 cm ฉนวนอะคริลิกหนา 1 cm และช่องว่างอากาศ 2 cm

V_p (kV) AC	V_{rms} (kV)	E_{max} (kV/cm) ในช่องว่างอากาศ	Ozone (O ₃) (ppm)
14.14	10	1.533	16
28.28	20	1.954	17
42.42	30	2.527	19
56.56	40	2.919	21
70.70	50	3.680	22
84.84	60	4.104	24

3.7 การศึกษาความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน

การศึกษาในหลักการนี้เป็นการศึกษาเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซโอโซน
 เมื่อทำการเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนและอิเล็กโตรดที่มีรูปทรงที่แตกต่างกันไปเพื่อ
 ศึกษาว่าความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนของชุดกำเนิดก๊าซโอโซนนี้มีความสามารถในการ
 ผลิตก๊าซโอโซนเป็นอย่างไรต่อการทดสอบโดยการทดสอบได้ทำการทดสอบจากกลุ่มตัวอย่าง
 อิเล็กโตรดที่ออกแบบมาใช้ในการทดสอบซึ่งมีแผ่นอิเล็กโตรดแบบระนาบไม่มีปลายแหลมและ
 แบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง คือมีจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบจำนวน 140,190 และ
 211 จุด โดยผลการทดสอบดังตารางที่ 3.8 และมีการทดสอบจากเนื้อฉนวนต่างชนิดกันโดยได้
 เปรียบเทียบกับฉนวนที่ค้นเป็นไดอิเล็กตริกทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้ได้ทดสอบและเปรียบเทียบกับ
 แรงดันไฟฟ้าทั้งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและกระแสสลับ โดยได้สรุปผลมาดังตารางดังนี้

ผลการทดลองที่ 6

ตารางที่ 3.12 แสดงค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับอิเล็กโตรดตัวอย่างทั้ง 4 แบบ (แบบระนาบไม่มีปลายแหลมและแบบระนาบมีปลายแหลม 140,190,211 จุด) โดยทดสอบที่ค่าแรงดันสูงกระแสสลับ โดยมีฉนวนกันทั้ง 3 ชั้น (น้ำมันหม้อแปลง 1 cm, อะคริลิก 1 cm, อากาศ 2 cm)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน (PPM)			
	ระนาบแบบไม่มีปลายแหลม	ระนาบมีปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด
10	5	8	10	16
20	6	11	14	17
30	8	13	17	19
40	10	14	19	21
50	12	16	20	22
60	14	19	22	24

ตารางที่ 3.13 แสดงค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับอิเล็กโตรดตัวอย่างทั้ง 4 แบบ (แบบระนาบไม่มีปลายแหลมและแบบระนาบมีปลายแหลม 140,190,211 จุด) โดยทดสอบที่ค่าแรงดันสูงกระแสตรง เป็นไฟบวก (+) โดยมีฉนวนกันทั้ง 3 ชั้น (น้ำมันหม้อแปลง 1 cm, อะคริลิก 1 cm, อากาศ 2 cm)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน (PPM)			
	ระนาบแบบไม่มีปลายแหลม	ระนาบมีปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด
10	-	-	8	10
20	-	9	9	12
30	6	11	11	15
40	7	13	14	18
50	9	14	16	20
60	11	16	18	21

ตารางที่ 3.14 แสดงค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบกับอิเล็กโตรดตัวอย่างทั้ง 4 แบบ (แบบระนาบไม่มีปลายแหลมและแบบระนาบมีปลายแหลม 140,190,211 จุด) โดยทดสอบที่ค่าแรงดันสูงกระแสตรง เป็นไฟลบบ (-) โดยมีฉนวนกันทั้ง 3 ชั้น (น้ำมันหม้อแปลง 1cm, อะคริลิก 1 cm,อากาศ 2 cm)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน (PPM)			
	ระนาบแบบไม่มีปลายแหลม	ระนาบมีปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด
10	-	-	10	12
20	-	11	12	14
30	7	14	14	16
40	9	15	15	18
50	10	17	18	19
60	12	18	19	23

ผลการทดลองที่ 7 การทดสอบการเปรียบเทียบการเกิดก๊าซโอโซนต่อกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับในกรณีในการบำบัดน้ำ

เนื่องจากปริมาณการวัดการเกิดก๊าซโอโซนสำหรับในน้ำ 1 ppm จะเท่ากับ $1 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ หรือ 1 mg/l และปริมาณการวัดการเกิดก๊าซโอโซนสำหรับในอากาศ 1 ppm จะเท่ากับ $2.14 \text{ mgO}_3/\text{m}^3$ (ข้อมูลจากบริษัท เพทโทรอินทรูเมนต์ จำกัด ผู้แทนจำหน่ายเครื่องมือวัดปริมาณก๊าซโอโซนในอากาศยี่ห้อ Teledyne API Model 450H O₃ Monitor จากประเทศสหรัฐอเมริกา)

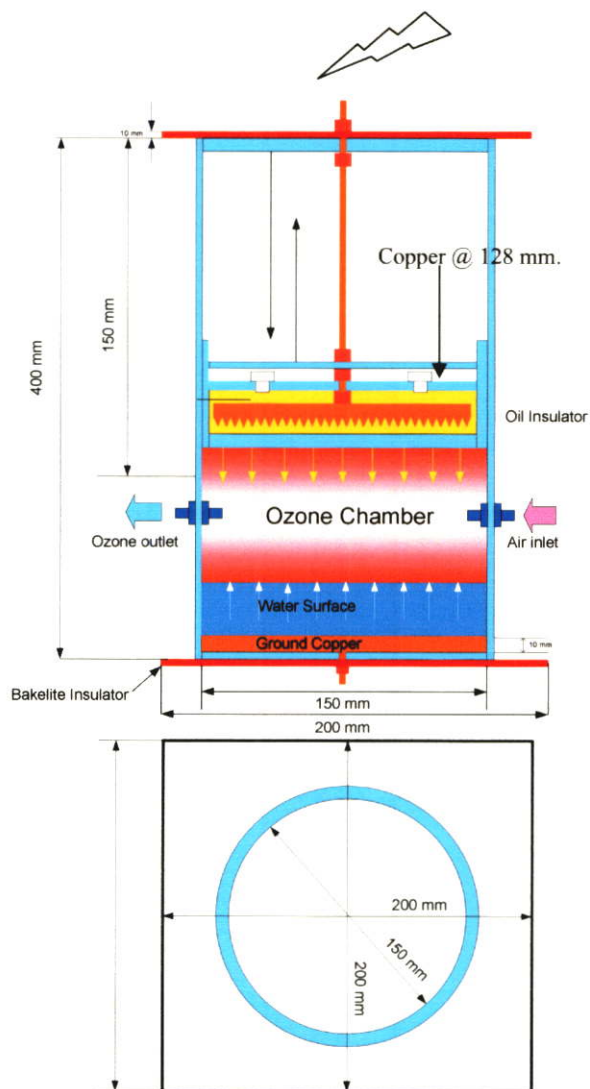
ตารางที่ 3.15 การทดสอบวัดหาค่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่ระดับแรงดันและกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่ระดับ 10-60 kV 50 Hz ได้ดังนี้

แรงดันไฟฟ้า (kV) AC test	Power Input (W) ด้านแรงต่ำ	Ozone (gO ₃ /m ³) ที่เกิดขึ้นในชุดอากาศ ที่ระนาบปลายแหลม 211 จุด
10	1.496	16
20	2.805	17
30	6.732	19
40	9.350	21
50	15.708	22
60	19.635	24

หมายเหตุ ทดสอบขณะที่มีฉนวนคั่นจำนวน 3 ชั้น น้ำมันหม้อแปลง 1 cm อะคีลิก 1 cm อากาศ 2 cm

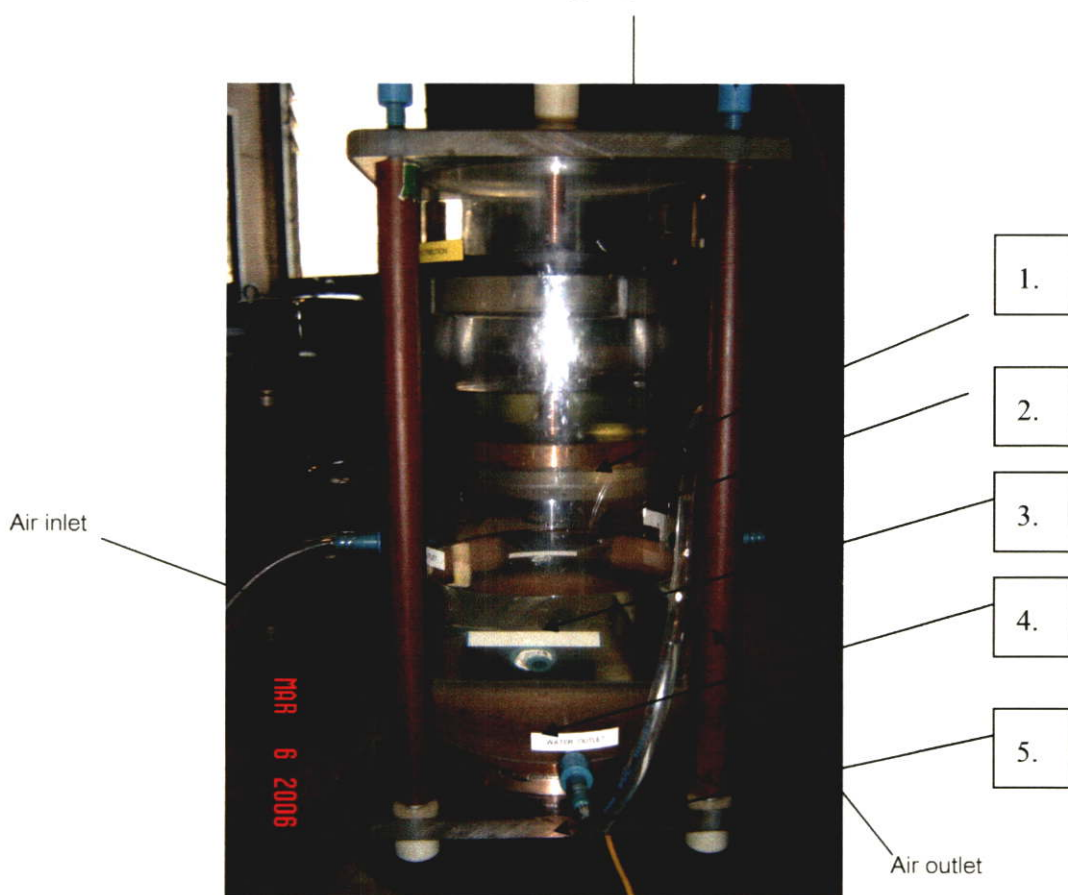
3.8 โครงสร้างของชุดอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษาสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

จากการออกแบบและทดสอบพบว่าผลการทดลองเปรียบเทียบเงื่อนไขต่างๆ ดังกล่าว 3.3-3.15 ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่ากรณีศึกษาในเรื่องการศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำนั้นสามารถผลิตก๊าซโอโซนออกมาได้จำนวนหนึ่ง และเป็นการศึกษาว่าฉนวนทั้ง 3 สถานะสถานะใดเป็นปัจจัยในการออกแบบเลือกและสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถจะพัฒนานำไปใช้งานได้จริงต่อไป ทั้งนี้จำเป็นต้องศึกษาด้านทางเคมีเพิ่มเติม โดยโครงสร้างในการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดก๊าซโอโซนเพื่อศึกษาค้นคว้าทั้ง 3 สถานะรวมถึงปรากฏการณ์กระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำว่ามีผลเป็นอย่างไร ข้อมูลของชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบมีดังนี้



รูปที่ 3.35 โครงสร้างและขนาดชิ้นส่วนของชุดอิเล็กโตรดกำเนิดก๊าซโอโซนแบบกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำ

Copper @ 128 mm.



รูปที่ 3.36 ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของชุดอิเล็กโทรด

- หมายเลขที่ 1 ชุดของฉนวนด้วยน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า
- หมายเลขที่ 2 อิเล็กโทรดแผ่นระนาบแบบไม่มีปลายแหลม (ระนาบธรรมดา) และมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่มีปลายแหลมจำนวน 140,190,211 จุด โดยเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน 128 mm หนา 15 mm
- หมายเลขที่ 3 ฉนวนอากาศและอากาศเกิดการแตกตัวและมีปฏิกิริยาเป็นก๊าซไอโซน
- หมายเลขที่ 4 น้ำทำหน้าที่เป็นตัวสักราวด์ (-) และเป็นตัวเปลี่ยนแปลงระยะของแกปอากาศโดยปรับโดยการเติมน้ำ
- หมายเลขที่ 5 แผ่นทองแดงระนาบเป็นสักราวด์ (-) โดยมีน้ำห่อหุ้มเพื่อต่อวงจรทางไฟฟ้า

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลองและการออกแบบ

4.1 บทนำ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังกล่าวในบทที่ 1 นำไปสู่การออกแบบสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง หลักในการออกแบบคือ รูปแบบของอิเล็กโทรดที่มีการออกแบบให้มีรูปลักษณ์ที่แตกต่าง เพื่อศึกษาว่าจุดเหมาะสมและความสมดุลและเป็นกรณีศึกษาถึงการสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนในลักษณะและวิธีการใหม่ที่จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษา และวิเคราะห์ผลว่าอิเล็กโทรดใดจะมีความเหมาะสมและรูปลักษณ์ของอิเล็กโทรดมีผลต่อการเกิดของปริมาณก๊าซโอโซนที่ได้จากการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำ ดังนั้นลักษณะการออกแบบสร้างในวิธีนี้จึงเป็นกรณีศึกษาในเบื้องต้นว่าหากการออกแบบในวิธีนี้สามารถวิเคราะห์และสรุปผลออกมาได้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไปในอนาคต ผลการทดสอบทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยทฤษฎีในบทที่ 4 โดยได้แบ่งส่วนการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ลักษณะคือ 1. รูปร่างอิเล็กโทรดที่มีความแตกต่างกัน 2. คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกที่เป็นตัวกันเพื่อสร้างค่าสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดก๊าซโอโซน 3. ระดับหรือระยะของการป้อนแรงดันผ่านฉนวนไฟฟ้าในเนื้อฉนวนต่าง ๆ ที่คั่นกลางว่าฉนวนชนิดใดมีผลต่อการเกิดโอโซนอย่างไร โดยในที่นี้ได้มีฉนวนทั้งสิ้นจำนวน 3 ชนิดคือ

- 3.1 ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะ 10 mm. (1 cm)
- 3.2 ฉนวนอะคริลิกใสหนา 10 mm. (1 cm)
- 3.3 ฉนวนอากาศที่ทดสอบในบทที่ 3 ระยะ 20 mm (2 cm)

4.2 เครื่องผลิตก๊าซโอโซนและรูปร่างอิเล็กโทรดที่มีความแตกต่าง

สมมุติฐานขั้นต้นของการผลิตก๊าซโอโซนคือการพยายามทำให้ก๊าซเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยใช้พลังงานจากสนามไฟฟ้าเข้าไปกระตุ้นให้พันธะทางเคมีของโมเลกุลแตกตัวออกจากกัน เพื่อจับตัวกันใหม่เป็นโอโซนโดยระดับพลังงานที่ใช้จะมีอยู่ในย่านหนึ่งซึ่งวิเคราะห์แล้วในตอนต้น

ตารางที่ 4.1 ช่วงของพลังงานสำหรับการแปลงอากาศเป็นโอโซน

Energy Band for Ozone Generation From Air	
Minimum	Maximum
1.172 kwh/m ³	1.62 kwh/m ³

4.2.1 การพิจารณาวิเคราะห์รูปร่างสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์

จากผลการทดลองในบทที่ 3 พบว่าปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ (ppm) เพิ่มขึ้นตามความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าในรูปร่างอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นระนาบทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาปริมาณไอโซนที่ได้ต่อหน่วยพลังงานที่ใช้ (ppm) เมื่อพิจารณาระดับแรงดันของอิเล็กทรอนิกส์ของสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบสม่ำเสมอเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่แผ่นระนาบแบบเรียบกับแผ่นระนาบแบบปลายแหลมซึ่งก็มีจุดที่พิจารณาคือ การยกทนต์แรงดันไฟฟ้า นี้มีข้อแตกต่างกันคือ อิเล็กทรอนิกส์แผ่นระนาบธรรมดา สามารถทนแรงดัน (V_p) ไฟฟ้าได้สูงสุดและสนามไฟฟ้าแบบระนาบที่มีปลายแหลม จำนวน 140, 190 และ 211 จุดไม่สามารถทนแรงดันได้สูงกว่า แต่กระแสที่ไหลในชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบที่มีปลายแหลมเรียกว่ากระแสโคโรน่า ดังนั้นปริมาณไอโซนที่เกิดขึ้นจึงน่าจะเกิดจากความสัมพันธ์กับการเกิดระแสโคโรน่า

4.2.2 อิเล็กทรอนิกส์ระนาบแบบธรรมดาและกับระนาบที่ปลายแหลม

จากการทดลองในข้อ 3.3 ได้ทำการทดสอบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบธรรมดาและแบบที่มีกลุ่มปลายแหลม โดยทั้ง 2 ลักษณะ จากการวิเคราะห์ผลมี ผลแตกต่างกันในความสัมพันธ์ต่อการเกิดก๊าซไอโซน แต่จากการทดลองและวิเคราะห์จะพบว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบธรรมดานั้นจะสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงแต่จะเกิดก๊าซไอโซนได้น้อยกว่าแบบระนาบที่มีปลายแหลม โดยลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกันมี 2 ลักษณะคือ

แบบที่ 1 อิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม

แบบที่ 2 อิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบที่มีกลุ่มปลายแหลมจำนวน 140, 190 และ 211 จุด

การทดลองแบ่งเงื่อนไขที่พิจารณาออกเป็น 4 ข้อ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองในเงื่อนไขต่าง ๆ นี้

เงื่อนไขที่ 1 เปรียบเทียบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบธรรมดาและแบบระนาบที่มีความหนาแน่นของกลุ่มปลายแหลมจำนวน 140, 190 และ 211 จุด

ตารางที่ 4.2 การผลิตก๊าซโอโซนของอิเล็กโตรดแบบระนาบและที่มีความหนาแน่นของกลุ่ม
ปลายแหลม แรงดันป้อนที่ระยะห่างของอิเล็กโตรดเทียบกับน้ำที่เป็นกราวด์
โดยมีไดอิเล็กตริกคั่นจำนวน 3 ชนิด น้ำมัน 1 cm อะซิติก 1 cm อากาศ 2 cm
รวมระยะห่างอิเล็กโตรด 4 cm

ชนิดอิเล็กโตรด	ปริมาณโอโซนที่เกิด	แรงดันเบรกดาวน์
อิเล็กโตรดแบบระนาบธรรมดา	29	มากกว่า 60 kV
อิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลาย แหลมจำนวน 211 จุด	52	ไม่เกิน 60 kV
อิเล็กโตรดแบบระนาบที่มีปลาย แหลมจำนวน 190 จุด	40	40 kV
อิเล็กโตรดระนาบแบบมีปลาย แหลมจำนวน 140 จุด	43	35 kV

จากแนวโน้มผลผลิตโอโซนดังกล่าวการออกแบบชุดอิเล็กโตรดค่าระดับแรงดันที่ 60 kV ดังยก
มาแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าอิเล็กโตรดที่มีความหนาแน่นหรือจำนวนกลุ่มปลายแหลมมาก (211
จุด) จะให้ผลผลิตก๊าซโอโซนโดยรวมสูงสุดแต่จะพบว่าจะไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงได้
เนื่องจากจะเกิดการเบรกดาวน์ซึ่งค่าแรงดันที่ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาจากกลุ่มที่มีจุดปลายแหลมน้อย
กว่าจำนวน 2 ตัวอย่าง จะสามารถทนแรงดันได้สูงกว่าแต่การเกิดก๊าซโอโซนจะน้อยกว่าที่ใช้
กลุ่ม 211 จุด ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากกระแสที่ไหลในแก๊ป โอโซนเกิดเนื่องจากกระแส
โคโรนาซึ่งมีค่าน้อย ๆ จะทำให้ได้โครงสร้างโมเลกุลออกซิเจน (O_2) แยกตัวออกเป็นอะตอมอิสระ
แล้วรวมกันเป็นก๊าซโอโซน (O_3) แต่การจับตัวระหว่างพันธะภายในของโอโซนไม่เสถียรมีแนวโน้มที่
จะกลับสู่สภาวะปกติได้ง่ายกรณีที่เกิดเบรกดาวน์ คือ มีกระแสไหลสูงขึ้นความร้อนที่เกิดจากกระแสที่
ไหลนี้ส่งผลให้โอโซนที่ผลิตได้สลายตัวโครงสร้างอิเล็กโตรดที่สร้างขึ้น การเพิ่มความหนาแน่น
ปลายแหลมทำให้พื้นที่ และจำนวนของปลายแหลมที่สัมพันธ์กับการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า
ฉะนั้นความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของจำนวนปลายแหลมส่งผลอย่างมากต่อสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลาย
แหลมดังนั้นจำนวนปลายแหลมที่ 211 จุดจึงมีผลรวมของกระแสภายในแก๊ปสูงสุด จึงจะเกิดเบรก
ดาวน์ก่อนเพราะมีโอกาสเกิดเบรกดาวน์บางจุดมากที่สุด

เงื่อนไขที่ 2 การศึกษาลักษณะในการออกแบบจำนวนปลายแหลมหนาเป็นระนาบทองแดง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.5 – 3.7 พบว่าจำนวนปลายแหลมที่กลิ้งบนแผ่นอิเล็กโตรดที่
แตกต่างกันไปมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซน และพบว่าอิเล็กโตรดที่มีสัดส่วนจำนวนกลุ่มปลายแหลมต่อ
พื้นที่ของแผ่นอิเล็กโตรด มีผลต่อความสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้มากกว่าแต่มีแนวโน้มจะไม่
สามารถทนอยู่ได้นานเนื่องจากเมื่อป้อนแรงดันสูงขึ้นจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้เร็วเนื่องจาก

จำนวนกลุ่มปลายแหลมจะส่งผลให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้ามากที่สุดและจะนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ง่ายกว่าอิลีกโตรดแบบอื่นๆ ในการทดลอง เนื่องจากในการทดลองนี้จะยังคงไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่นและที่แรงดันสูงขึ้นความร้อนเนื่องจากการเบรกดาวน์จึงสูงขึ้นปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จึงลดลงไปบ้างเพียงเล็กน้อย

เงื่อนไขที่ 3 การศึกษาและเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน คือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากผลการทดลองในรูปที่ 3.8 – 3.15 ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่างชนิดกันจะพบว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ชุดอิลีกโตรดแต่ละชนิดนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้โอโซนที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับกระแสตรงนั้นที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีค่าการเกิดโอโซนที่สูงกว่าการใช้แรงดันกระแสตรงทั้งนี้อาจมีผลมาจากที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีความถี่ทางไฟฟ้าที่ 50 Hz จึงเป็นผลที่ทำให้ก๊าซโอโซนมีค่าสูงกว่าการป้อนแรงดันกระแสตรง ทั้งนี้เนื่องจากความถี่จะมีผลต่อการเกิดโอโซนหรือการแตกตัวของอากาศ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวย่อมมีผลกับระยะห่างของชุดอิลีกโตรดและปัจจัยอื่น ๆ ด้วย และเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยทดลองเปลี่ยนขั้วของไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นบวกและลบ จะพบว่าเมื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นไปตามทฤษฎีคืออากาศมีความคงทนต่อแรงดันขั้วลบมากกว่าแรงดันขั้วบวกที่ช่องว่างอากาศค่าเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาคุณภาพปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นพบว่าที่แรงดันเดียวกันขั้วบวกสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้สูงกว่า จากรูปแสดงใน 3.13-3.15 แผ่นระนาบที่มีปลายแหลมขั้วบวก (คาโทด) ให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงกว่าที่ค่าแรงดันต่ำๆ ดังนั้นพลังงานเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่แรงดันต่ำๆ จึงสูงกว่า แต่แผ่นระนาบปลายแหลมขั้วบวก (คาโทด) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่ำกว่าแผ่นระนาบที่มีปลายแหลมขั้วลบ ดังนั้นที่แรงดันสูงขึ้นแผ่นระนาบที่มีปลายแหลมขั้วบวกจึงน่าจะเกิดเบรกดาวน์ก่อน

เงื่อนไขที่ 4 การศึกษาหาค่าคาปารีแตนซ์ของฉนวนที่ทดลองด้วย C tam δ meter เพื่อนำไปสู่การหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชุดอิลีกโตรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่องอากาศเพื่อหาความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้องตามหลักการทฤษฎี จากการทดลองจะพบว่าค่า C ที่เกิดขึ้นในชุดอิลีกโตรดนั้นเมื่อมีค่าของ E_r ของฉนวนต่าง ๆ คั่นเป็นไดอิเล็กตริกจำนวนถึง 3 ชั้น ซึ่งเป็นการทดลองถึงชนิดของเนื้อฉนวนทั้ง 3 แบบ คือฉนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ฉนวนแข็ง (อะคริลิก) และฉนวนก๊าซ (อากาศ) จะพบว่าค่า C ของฉนวนจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเกิดขึ้นในชุดอิลีกโตรด เพราะค่า C ที่เกิดขึ้นมีค่าสัมพันธ์กันกับค่าของค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนแต่ละชั้นหรือ E_r ดังนั้นในการคำนวณหาค่า C จึงจะแสดงได้ว่า ค่า C ที่เกิดขึ้นที่ระดับแรงดัน 60 kV ในขณะที่ยังไม่มีฉนวนน้ำมันและฉนวนอะคริลิก โดยมีช่องว่างอากาศที่ระยะห่าง 2 cm จะทำให้เกิด ค่า $C = 3.750$ pF

สรุปอิเล็กทรอนิกส์ระบายที่มีปลายแหลมกับชุดแผ่นระบายธรรมชาติ

สำหรับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ระบายธรรมชาติที่เป็นระบายที่มีปลายแหลมจำนวน 3 กลุ่ม ตัวอย่างคือ 140, 190 และ 211 จุด โดยมีน้ำหนักที่เป็นสักราวด์ (-) มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดี

1. เพิ่มผลผลิตโอโซนทำได้โดยการเพิ่มจำนวนจุดปลายแหลมที่เกิดโคโรนา
2. การเพิ่มแรงดันสามารถทำได้ง่ายเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของความเครียดสนามไฟฟ้าเพราะเนื่องจากมีฉนวนที่คั่นเป็นไดอิเล็กตริกมีจำนวน 3 ชั้น รวมถึงอากาศด้วย
3. การเพิ่มแรงดันสูงสุดขึ้นจะส่งผลทำให้กระแสที่ใช้ในการกำเนิดก๊าซโอโซนมีค่าน้อยกว่าส่งผล คือประสิทธิภาพต่อการกำเนิดก๊าซโอโซนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย

ข้อเสีย

1. การเพิ่มแรงดันสูงมากจะทำให้ยากต่อการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากการฉนวนของชุดกำเนิดก๊าซโอโซน
2. ยังไม่สามารถจะสรุปได้ว่าผลที่ได้จากการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนฉนวนนั้นจะเป็นวิธีในการทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรงหรือจะเป็นการบำบัดน้ำได้โดยตรง
3. โอกาสการเกิดเบรกดาวน์บางจุดกรณีที่มีความหนาแน่นจำนวนจุดปลายแหลมมาก ๆ มีโอกาสเป็นไปได้มาก
4. ลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กทรอนิกส์ระบายไม่สามารถหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในแก๊สที่ถูกต้องที่สุดได้ การศึกษากลไกการเกิดกับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงทำได้ยาก

ข้อสังเกต

จากการทดลองเรื่องความถี่จะมีผลต่อการเกิดโอโซนหรือผลการทดลองที่เปรียบเทียบระหว่างแรงดันกระแสสลับ ความถี่ต่ำ 50 Hz กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะพบว่าหากป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในชุดอิเล็กทรอนิกส์ระบายจะพบว่า จะเกิดปริมาณความหนาแน่นของโอโซนสูงกว่าคั้งนั้นหาก จึงสรุปได้ว่าจากพิจารณาความถี่น่าจะมีผลต่อการผลิตก๊าซโอโซนเป็นอย่างมาก สมมุติฐานขั้นต่อไปของการทดสอบคือ การเพิ่มแรงดันและความถี่หรืออาจจะทดสอบโดยใช้หม้อแปลงทดสอบในการทดสอบต่อไป

- การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Optimum dimension design) จากผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าจากตัวอย่างในบทที่ 3 และผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้ FEM (Finite element) วิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสมแต่ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องวัสดุเนื่องขนาดวัสดุที่มีขายในท้องตลาดและในอุตสาหกรรมการผลิต อาทิเช่น ขนาดของท่ออะลูมิเนียมทรงกระบอกที่ออกแบบเป็น chamber ที่เก็บน้ำมันหม้อแปลงและเก็บอากาศที่จะทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลทำให้การออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ระบายที่มีขนาดที่คงที่ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ระบายมีขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลาง 128 mm หนา 15 mm ซึ่งมีขนาดเท่ากันทั้งอิเล็กโตรดระนาบธรรมดาและอิเล็กโตรดที่มีกลุ่มปลายแหลมที่มีจำนวนปลายแหลมทั้ง 3 ชุด

4.3 เหตุผลในการเลือกใช้นวนเป็นไดอิเล็กตริกชั้นระหว่างอิเล็กโตรด

เนื่องจากการออกแบบสร้างชุดอิเล็กโตรดกำเนิดก๊าซไอโซนในลักษณะนี้มีการใช้แรงดันไฟฟ้าสูงถึง 60 kV ดังนั้นการจะออกแบบในการเลือกใช้นวนจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการเกิดก๊าซไอโซนที่เสถียรภาพจากการออกแบบได้ทำการทดสอบโดยเลือกนวนจำนวน 3 ชนิด จากนวน 3 สถานะนวนชั้นแรกเป็นเหลวซึ่งเลือกใช้น้ำมันหม้อแปลง นวนชั้นที่สองเป็นนวนแข็งเลือกใช้อะคริลิกใสและเป็นภาชนะในการใส่นวนน้ำมันหม้อแปลงและนวนก๊าซคือ อากาศธรรมดาในการวิเคราะห์ในการแตกตัวของอากาศในช่องว่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 กับ 3.4 จะเห็นได้ว่าในนวนอากาศเพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดก๊าซไอโซนได้สูงกว่าการใส่นวนไดอิเล็กตริกเข้าไปคั่นแค่มิมีโอกาสเกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายเพราะเนื่องจากการทดสอบเป็นการทดสอบที่แรงดันสูงมากจึงทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าจะนั้นจึงทำให้ผลการทดสอบบางค่าในกรณีเกิดการเบรกดาวน์ก่อนที่จะทำการบันทึกค่าดังแสดงในรูปที่ 3.5-3.6 ในการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและรูปที่ 3.10-3.11 จะไม่มีค่าแสดงในรูปกราฟเพราะเกิดการเบรกดาวน์ก่อนที่จะได้ทำการวัด

4.3.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศภายในอิเล็กโตรดด้วย Finite element method : FEM

Finite element method : FEM ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดโดยการป้อนข้อมูลเพื่อกำหนดขอบเขตของปัญหาที่พิจารณาและทำการแบ่งขอบเขตออกเป็นอิเลเมนต์สามเหลี่ยมดังแสดงในรูปกราฟฟิคที่แสดงในรูป 3.22-3.25 ผลการคำนวณจะแสดงให้เห็นภาพพจน์ในรูปของกราฟฟิคและแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ,เส้นสมศักย์และค่าสนามไฟฟ้า (E) ในชั้นนวนที่คั่นเป็นไดอิเล็กตริก เพื่อช่วยบอกแนวโน้มของค่าตัวแปรเหล่านี้ภายในบริเวณที่พิจารณา FEM ช่วยในการออกแบบชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการคำนวณและแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบในกรณีที่มีการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทุ่นเวลาในการทดสอบผลการทำงานของโปรแกรมตามเงื่อนไขต่างๆ มีดังนี้

4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ในอิเล็กโตรดแบบระนาบไม่มีปลายแหลมกับที่มีปลายแหลมร่วมกับนวนจำนวน 1 ชั้น 2 ชั้นและ 3 ชั้น

1. การกระจายของระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดและในเนื้องนวนชั้นต่างๆ อย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 3.22-3.25 เป็นการวิเคราะห์การกระจายระดับแรงดันภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบทั้ง 2 แบบโดยในรูปที่ 3.22 เป็นโครงสร้างของการแสดงค่าแรงดันและสนามไฟฟ้ารวมถึงเส้นศักย์ไฟฟ้าโดยมีนวนคั่นจำนวน 3 ชั้น

คือที่ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่ระยะ 1 cm และฉนวนอะคริลิกแข็งหนา 1 cm และฉนวนอากาศที่ระยะ 1 cm

อิเล็กโตรดชุดที่ 1 แรงดันทดสอบ 60 kV 50 Hz

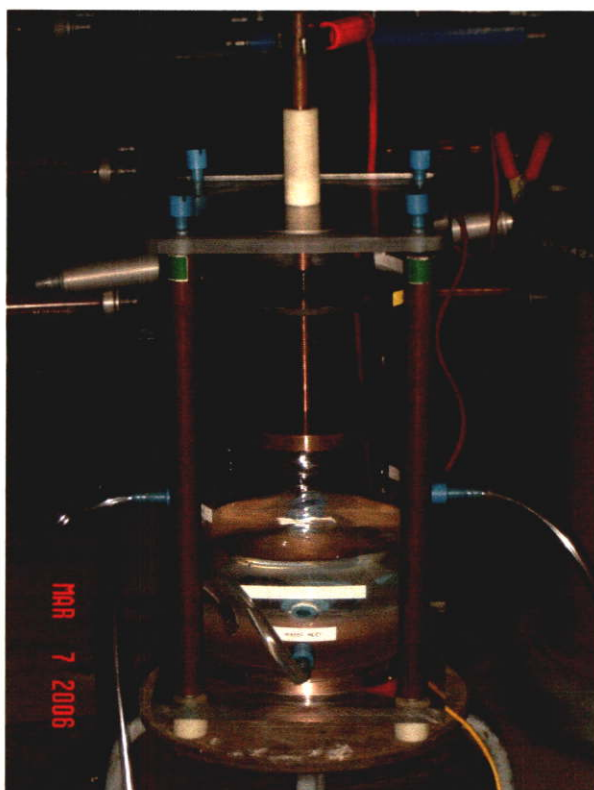
อิเล็กโตรดชุดที่ 2 แรงดันทดสอบ 60 kV 50 Hz

ผลการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 3.22-3.25 สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.3

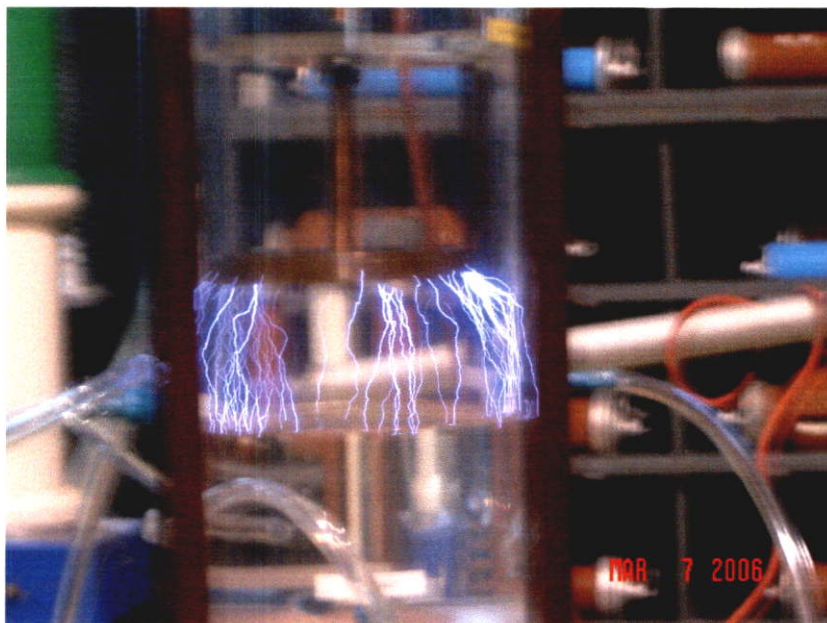
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ห้ระดับแรงดันและสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด

อิเล็กโตรดแบบระนาบไม่มีปลายแหลม						อิเล็กโตรดแบบระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด					
อากาศ		น้ำมัน+อากาศ		อะคริลิก+อากาศ		อากาศ		น้ำมัน+อากาศ		อะคริลิก+อากาศ	
V(kV)	E (kV/cm)	V(kV)	E (kV/cm)	V(kV)	E (kV/cm)	V(kV)	E (kV/cm)	V(kV)	E (kV/cm)	V(kV)	E (kV/cm)
10-60	2.2-12.2	10-60	1.2-3.0	10-60	0.9-1.8	10-60	6.0-15.9	10-60	2.3-4.4	10-60	0.9-4.1

หมายเหตุ ลักษณะการเกิดของสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนที่ระยะต่างๆ ที่มีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 แสดงการทดสอบป้อนแรงดันเข้าที่ชุดอิเล็กโตรดในขณะที่มีฉนวนอากาศเพียงอย่างเดียว

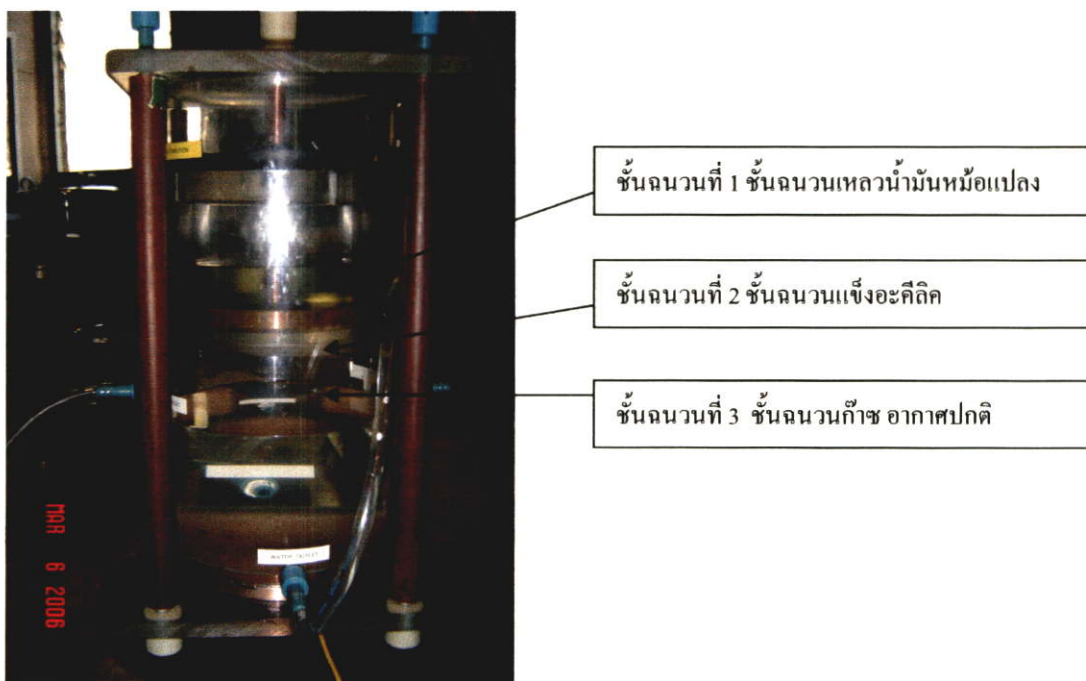


รูปที่ 4.2 แสดงการทดสอบป้อนแรงดันเข้าที่ชุดอิเล็กโตรดในขณะที่มีฉนวนอากาศเพียง
อย่างเดียว

แสดงให้เห็นถึงประกายแรงดันเบรกดาวน์ที่เบรกดาวน์ลงบนฉนวนเมื่อถึงค่าแรงดันวิกฤติ
(Breakdown Voltage)

4.3.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ภายในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโตรดด้วย FEM

FEM ช่วยทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในแก๊ปที่มีชั้นฉนวนจำนวน 3 ชั้นคั่นเป็น ไดอิเล็กตริกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวไปเช่น การทดลองค้นฉนวนที่ละชั้นฉนวนเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการเกิดค่าสนามไฟฟ้าทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสนามที่ตกคร่อมส่วนอากาศ เพิ่มขึ้นในกรณีที่มีชั้นฉนวนที่หนาขึ้นหรือมีการเพิ่มชั้นฉนวน หรือเมื่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของ ฉนวนจะทำให้ค่า คงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปก็จะทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ที่ตกคร่อมในฉนวนอากาศหรือในแก๊ปอากาศเพิ่มขึ้นส่วนที่ตกคร่อมฉนวนไดอิเล็กตริก อาทิเช่น ชั้นฉนวนเหลวและฉนวนแข็งมีค่าลดลง แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงไม่มากเท่าใดนัก



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งของชั้นฉนวนในชุดอิเล็กโตรดในการวิเคราะห์การเกิดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆ

สรุปในการเลือกใช้ฉนวนทางไฟฟ้าในวิเคราะห์หาชั้นฉนวนชนิดใดจะเป็นไดอิเล็กตริกได้ดีในการสร้างหรือกำเนิดก๊าซโอโซนจะพบและสรุปได้ว่าหากมีการใช้ฉนวนเหลวคือ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริกในการคั่นระหว่างอิเล็กโตรดได้ดีกว่าฉนวนแข็งเพราะสามารถดูจากการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่แสดงในการวิเคราะห์ FEM จะพบว่าค่าสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนเหลวจะสามารถเกิดค่าสนามไฟฟ้าได้สูงกว่าในชั้นฉนวนแข็ง หรืออะคริลิก และการเปรียบเทียบกันในการผลิตก๊าซโอโซนก็พบว่า หากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนเหลวมีค่าสูงการเกิดก๊าซโอโซนในสถานะที่ฉนวนเหลวเป็นไดอิเล็กตริกคั่นน่าจะมีความสามารถผลิตก๊าซโอโซนในปริมาณที่สูงกว่าเพราะเนื่องจากชั้นฉนวนอะคริลิกเป็นชั้นฉนวนที่เป็นภาชนะที่ต้องใส่ น้ำมันจึงทำให้ยากต่อการเก็บผลที่แน่นอนถึงเฉพาะชั้นฉนวนเหลวเพียงอย่างเดียว

4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซโอโซน

จากข้อที่ 4.3 ได้ศึกษาผลของชุดอิเล็กโตรดด้วว่าการเปลี่ยนแปลงของชุดอิเล็กโตรดจะมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนหรือไม่อย่างไรและศึกษาข้อดีข้อเสียของอิเล็กโตรดต่างๆ แบบที่ได้ทำการออกแบบมาใช้ในงานวิจัยว่าจุดเหมาะสมอย่างไรจะเป็นการดีและก็จะพบว่าข้อดีของอิเล็กโตรดที่มีเป็นแบบแผ่นระนาบมีการกลิ้งปลายแหลมลงบนแผ่นระนาบมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่

บริเวณปลายแหลมสูงมากทำให้ค่าแรงดันเริ่มต้นในการแตกตัวของอากาศกลายเป็นก๊าซไอโซนต่ำ แต่การลดลงของสนามไฟฟ้าเป็นอย่างรวดเร็วที่ระยะห่างมีการเปลี่ยนแปลงออกไปจนถึงกราวด์ โดยค่าของ E_c ของชั้นฉนวนต่างๆ มีค่าสูงเช่น น้ำมันหม้อแปลงมีค่า 2.0 และอะซิติกมีค่า 3.0 ดังนั้น หากนำไปทดสอบที่แรงดันสูงที่มีความถี่สูงร่วมด้วยก็จะทำให้การสร้างก๊าซไอโซนสูงขึ้น

อิเล็กโตรดชุดที่ 1 นั้นเป็นแบบระนาบไม่มีปลายแหลมนั้นจะเห็นว่าการแตกตัวของอากาศในช่องว่างในขณะที่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่นนั้นจะพบว่าการแตกตัวกลายเป็นก๊าซไอโซนนี้นั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าแรงดันเดียวกันกับการทดสอบอิเล็กโตรดที่มีการกลิ้งปลายแหลมบนแผ่นระนาบ

อิเล็กโตรดชุดที่ 2 นั้นเป็นแบบระนาบมีปลายแหลมจะพบว่าการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะเกิดง่ายกว่าแบบชุดที่ 1 ดังนั้นความเข้มข้นของปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนจึงมีค่าแตกต่างจากแบบที่ 1 และในที่นี่ได้มีการกลิ้งจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบที่มีจำนวนจุดที่ไม่เท่ากันเพื่อศึกษาดูและเปรียบเทียบกันว่าหากจำนวนปลายแหลมจำนวน 140 จุด, 190 จุด และ 211 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างไรก็จะพบว่าเมื่อทดสอบอิเล็กโตรดที่มีจำนวนจุดปลายแหลมที่มากคือชุดที่มีจำนวน 211 จุดนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจากการคำนวณโดยใช้ FEM ในการวิเคราะห์และเมื่อนำไปป้อนแรงดันทดสอบเปรียบเทียบกับชุดที่มีจำนวนจุดปลายแหลม 140 จุดกับ 190 จุด ก็จะพบข้อแตกต่างกันคือปริมาณก๊าซไอโซนที่เกิดขึ้นในอิเล็กโตรดแผ่นระนาบแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ชุด ดังกล่าว ชุดที่มีจำนวนจุดปลายแหลมจำนวน 211 จุด มีค่าความเข้มข้นในการแตกตัวกลายเป็นก๊าซไอโซนได้สูงกว่าทั้งนี้หากมีการทดสอบโดยใช้ค่าแรงดันสูงที่มีความถี่สูงร่วมด้วยก็จะมีปริมาณก๊าซไอโซนสูงมากขึ้นดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอิเล็กโตรดที่มีจำนวนปลายแหลมที่มากจะมีความสามารถในการแตกตัวของอากาศได้ดีในที่ระดับแรงดันและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากัน

4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเร็วลมในการป้อนอากาศเข้าสู่ชุดอิเล็กโตรด

ปัจจัยในการวิเคราะห์วิธีการปรับเปลี่ยนความเร็วลมที่ป้อนเข้าสู่ชุดอิเล็กโตรดนั้นเพื่อศึกษาว่าความเร็วลมในการป้อนอากาศเข้าสู่ชุดอิเล็กโตรดมีผลต่อการเกิดก๊าซไอโซนหรือมีผลต่อการแตกตัวของก๊าซอย่างไรแต่การวิเคราะห์ก็ได้ข้อสรุปว่าความเร็วลมที่ผ่านเข้าสู่ชุดอิเล็กโตรดสูงมากและไหลออกมาจากชุดอิเล็กโตรดเร็วเกินไปก็จะทำให้เวลาในการแตกตัวของอากาศที่ป้อนไม่สามารถจะแตกตัวได้ดังนั้นการแตกตัวของอากาศนั้น จำเป็นต้องใช้เวลาที่เหมาะสมกับความสัมพันธ์ในการไหลเข้าและไหลออกของก๊าซหรืออากาศ จึงได้สรุปผลการปรับเปลี่ยนระดับความเร็วลมหรืออากาศ โดยได้ทำการทดสอบโดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 10-60 kV 50 Hz ทดสอบในขณะที่มีฉนวนคั่นไดอิเล็กตริกจำนวน 3 ชั้นคือน้ำมันหม้อแปลงที่ระดับ 1 cm ฉนวนอะซิติกหนา 1.0 cm และระยะแกปอากาศ 2.0 cm คงที่ ที่เวลาในการวัดเท่ากันคือ 5 นาที โดยทดสอบกับอิเล็กโตรดจำนวน 2 ชุดคือแบบระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลมและแบบแผ่นระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด ซึ่งเป็น

อิเล็กโตรดจำนวนปลายแหลมที่มากที่สุดซึ่งระดับปริมาณการปรับความเร็วลมและการเกิดก๊าซโอโซนเปรียบเทียบได้ดังนี้ได้ดังแสดง ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเร็วลมที่เข้าไปในชุดอิเล็กโตรดต่อปัจจัยในการเกิดก๊าซโอโซน (O₃) ทดสอบกับอิเล็กโตรดระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม

Voltage (kV)	20 L/min	30 L/min	60 L/min	Time
	Ozone Effect (ppm)	Ozone Effect (ppm)	Ozone Effect (ppm)	
10	-	-	-	5
20	-	-	-	5
30	6	4	1	5
40	7	5	5	5
50	9	7	6	5
60	11	9	8	5

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเร็วลมที่เข้าไปในชุดอิเล็กโตรดต่อปัจจัยในการเกิดก๊าซโอโซน (O₃) ทดสอบกับอิเล็กโตรดแบบระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด

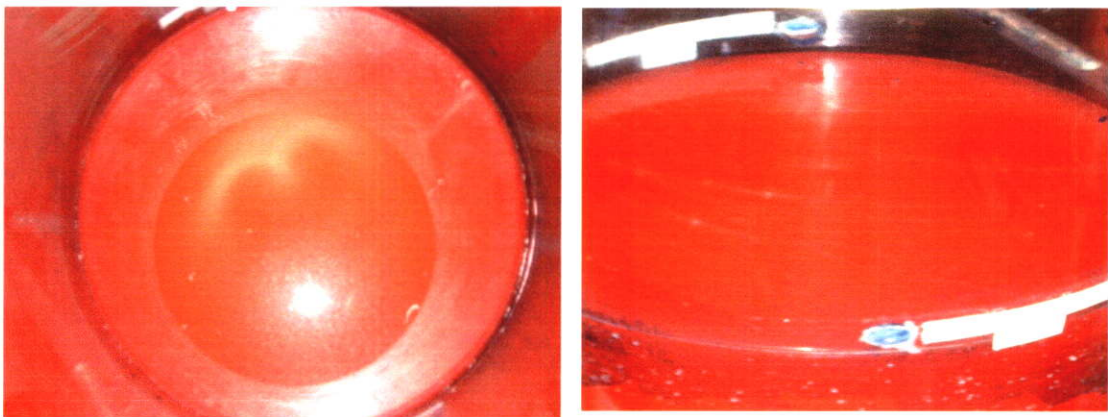
Voltage (kV)	20 L/min	30 L/min	60 L/min	Time
	Ozone Effect (ppm)	Ozone Effect (ppm)	Ozone Effect (ppm)	
10	16	14	12	5
20	17	16	14	5
30	19	18	15	5
40	21	20	17	5
50	22	21	19	5
60	24	22	20	5

จากการทดลองพบว่าที่ระดับความเร็วลมที่เบาจะทำให้อากาศมีเวลาในการแตกตัวเป็นก๊าซโอโซนจึงทำให้ความหนาแน่นของปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นที่สูงกว่าความเร็วของลมอากาศที่เข้าไปชุดอิเล็กโตรดทั้ง 2 ชุด ซึ่งมีผลระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ระดับการแตกตัวคล้ายคลึงกันเพียงแต่มีปริมาณเล็กน้อยที่แตกต่างกันตรงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากรูปร่างของอิเล็กโตรดที่เปลี่ยนแปลงไป จึงน่าจะใช้ระดับความเร็วลมที่เบาและช้าจะทำให้ปริมาณ

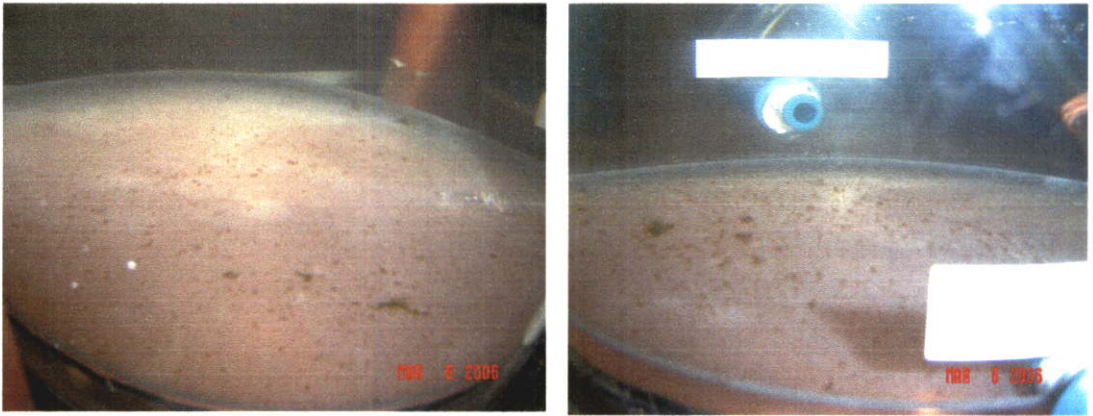
การเกิดก๊าซโอโซนที่หนาแน่นกว่าโดยเปรียบเทียบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โดรดทั้งแบบระนาบธรรมดาไม่มี
ปลายแหลมกับแบบระนาบมีปลายแหลมจำนวน 211 จุด

4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ทำหน้าที่เป็นกรวดทางไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ผลในค่าต่างๆ ในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์โดรด
กำเนิดก๊าซโอโซนที่จะอาศัยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำ ซึ่งเนื่องจากการวิเคราะห์ปัจจัย
ต่างๆ ในการเกิดก๊าซโอโซนจนครบถ้วนแล้วจะเห็นว่าปรากฏการณ์กระจายสนามไฟฟ้าลงผิวน้ำมี
ปรากฏการณ์หรือน้ำที่ทำหน้าที่เป็นกรวดนั้นจะมีผลจากการทดลองในงานวิจัยอย่างไร แต่การ
ทดสอบจะพบว่าปรากฏให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นหากน้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำ
ที่มีคุณภาพดีอยู่แล้ว ดังนั้นถ้าให้เห็นภาพที่ชัดเจนตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางเคมี ควรจะต้อง
ใช้น้ำที่มีคุณภาพไม่ดีเช่นน้ำเสียหรือน้ำที่มีส่วนผสมของการเจือปนเปื้อนของสีน้ำที่มีปฏิกลเจือปน
จะทำให้เห็นผลชัดเจนก็ปรากฏว่าเมื่อนำน้ำที่คุณภาพไม่ดีมาทำการทดสอบป้อนเข้าสู่ชุดอิเล็กทรอนิกส์โดรด
แล้วมีความเปลี่ยนแปลงของน้ำ น้ำที่นำมาทดสอบกลับมีคุณภาพทางกายภาพที่ดีขึ้นดังที่จะได้แสดง
ปรากฏการณ์ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงของสีน้ำผสมกับน้ำที่เป็นสักร์กรวดโดยทิ้งไว้ที่เวลาเท่ากันกับการทดลอง
ในรูปที่ 4.4



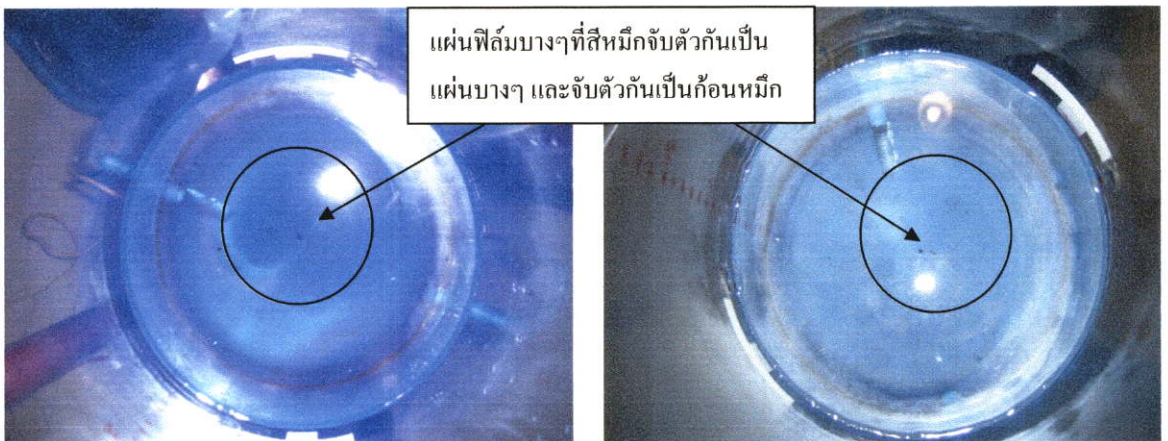
รูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้น้ำไฟฟ้ากระจายบนผิวน้ำโดยใช้น้ำที่มีส่วนผสมของสีน้ำ

สรุปผลการทดสอบ จากการทดสอบดังกล่าวเป็นการนำน้ำที่มีส่วนผสมของสีน้ำเพื่อลองวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของก๊าซโอโซนว่าปฏิกิริยาต่อน้ำหรือไม่ในกรณีที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำแล้วจะส่งผลอย่างไรต่อน้ำที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดทางไฟฟ้าซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกราวด์ (-) ในวงจรการทดสอบปรากฏว่าน้ำที่มีส่วนผสมของสีมีการตกตะกอนเมื่อทำการทดสอบไปเป็นเวลา 40 นาทีส่งผลให้ความเข้มข้นของสีเจือจางลงและตกตะกอนลงด้านล่างของชุดอิเล็กโทรดซึ่งแสดงในภาพ ซึ่งตรงตามคุณสมบัติทางเคมีที่โอโซนมีความสามารถในการฟอกสีทำให้สีที่เจือปนหรือผสมกับน้ำตกตะกอนและจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสีที่ผสมในน้ำทำให้น้ำใสขึ้นและกลับกลายเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีขึ้นทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบในงานวิจัย ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวของก๊าซโอโซนนั้นมีผลต่อน้ำที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดศักย์กราวด์ (-) ทั้งนี้ก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรงในทางเคมี

แต่ในทางกลับกันได้มีการทดสอบโดยใช้สีน้ำชนิดเดียวกันผสมลงไปใต้น้ำที่ทำหน้าที่เป็นศักย์กราวด์โดยไม่ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้เกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเข้าสู่ชุดอิเล็กโทรดโดยทิ้งไว้ที่เวลาเท่ากันที่เวลา 40 นาที จะพบว่าไม่ปรากฏผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหรือการตกตะกอนของน้ำที่ผสมสีแต่ประการใดยังคงมีคุณภาพน้ำที่ไม่ดีเหมือนเดิมในเวลาที่เท่ากัน จึงสรุปผลได้ว่าการกระจายสนามไฟฟ้าแรงสูงลงบนผิวน้ำนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับคุณภาพ หรือส่วนผสมเจือปนในน้ำได้จากการวิเคราะห์ทางกายภาพดังแสดงรูปที่ 4.4-4.5 แต่ผลในรูปที่ 4.4 สรุปผลว่าคุณภาพดีขึ้นเนื่องจากมีความใสขึ้นมาในระดับหนึ่งกว่าที่ไม่ทำการป้อนสนามไฟฟ้าแรงสูงลงบนผิวน้ำซึ่งถือว่าเป็นการทำปฏิกิริยากับสีที่ผสมลงไป แต่อย่างไรก็ตามในเวลา 40 นาที เท่ากันก็ยังคงมีความขุ่นของน้ำอยู่ระดับหนึ่งซึ่งทั้งนี้ น่าจะมาจากสาเหตุที่เวลาในการทดสอบวิธีการนี้เป็นการทดสอบที่ต้องใช้เวลานานมากซึ่งวิธีการบำบัดน้ำด้วยวิธีนี้จึงยังถือว่าไม่ดีเท่าที่ควร

4.6.1 การวิเคราะห์น้ำที่มีส่วนผสมของสีหมึกปากก้า

เพื่อให้การศึกษาเรื่องการเกิดก๊าซโอโซนด้วยวิธีและหลักการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำมีความชัดเจนและสามารถทดสอบด้วยการทางเคมีวิเคราะห์แบบง่าย ๆ โดยศึกษาคุณสมบัติของก๊าซโอโซนที่สามารถทำการฟอกสีในน้ำได้ดีโดยสามารถสลายส่วนผสมที่เป็นสีที่ทำให้น้ำสะอาดและมีลักษณะใสขึ้นตามคุณสมบัติของโอโซน (O_3) ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ทำการจำลองการทดสอบขึ้นว่ามีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายบนผิวน้ำจนเกิดเป็นก๊าซโอโซนได้แต่ต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน โดยได้ทำการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.5 แสดงความเปลี่ยนแปลงของน้ำที่มีส่วนผสมของสีหมึกปากก้าไวท์บอร์ดสีน้ำเงินโดยใส่สีผสมในน้ำที่เป็นสัคช์กรวดในปริมาณค่าหนึ่งผลปรากฏว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับเข้าที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์แล้วเป็นเวลา 40 นาทีสีที่ผสมลงในน้ำมีการจับตัวกันเป็นก้อนฟิล์มบางๆ และหนาขึ้นบนผิวน้ำหลังจากนั้นสีของน้ำที่ผสมด้วยสีนั้นมีสีที่จางลงดังรูปที่ 4.5-4.7



(ก)

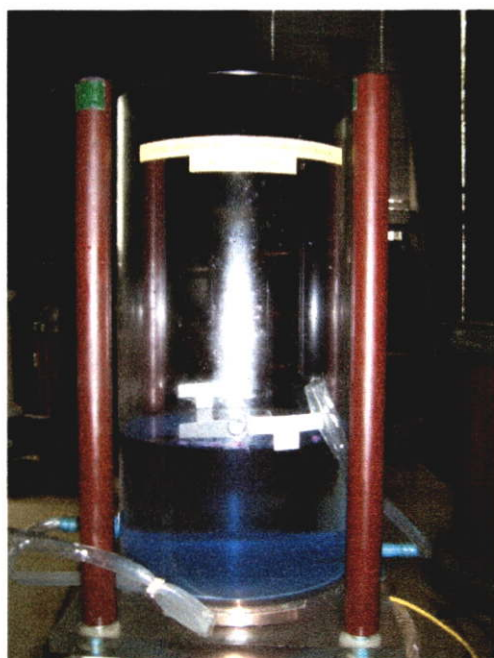
(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) ก่อนผ่านสนามไฟฟ้า

(ข) หลังผ่านสนามไฟฟ้า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) ก่อนทดสอบผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูง

(ข) หลังการทดสอบผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูง



รูปที่ 4.8 แสดงของสีหมึกปากกาไวท์บอร์ดผสมกับน้ำที่เป็นสัคช์กราวด์โดยทิ้งไว้ที่เวลาเท่ากับกับการทดลองในรูปที่ 4.6 ก,ข และรูปที่ 4.7 ก,ข

สรุปผลการทดลอง จากการทดสอบจะพบว่ามีปฏิกิริยาทางเคมีในการทดสอบกล่าวคือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเข้าที่ขั้วอิเล็กโตรดแล้วเกิดการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำที่มีการผสมสีปากกาไวท์บอร์ดพบว่าสีที่ผสมเริ่มจับตัวกันเป็นฟิล์มบางๆ และรวมตัวกันเป็นก้อนเล็กๆ เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าสีที่ผสมในน้ำที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์นั้นมีสภาพความเข้มข้นของสีที่เปลี่ยนไป

จากที่สี่เข้มนจะเห็นว่าเมื่อเวลาการทดสอบผ่านไปเป็นเวลา 40 นาทีซึ่งเป็นเวลาในการทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลได้ว่าการกระจายของสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำที่ทดสอบนั้นมีปฏิริยากับน้ำที่มีส่วนผสมที่เป็นสีซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าสามารถฟอกสีได้ตามคุณสมบัติของโอโซนที่เกิดขึ้น แต่เมื่อทดสอบแล้วจะพบว่า การทดสอบนี้จะต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน การทดสอบนี้จึงไม่สามารถจะฟอกสีได้ดีเท่าที่ควรเพราะวิธีการอื่นจะมีความเหมาะสมกว่าวิธีการนี้เพราะจะใช้เวลานานซึ่งการทดสอบนี้ จึงสรุปว่ายังไม่สามารถใช้งานในการฟอกสีได้ดีจากโอโซนที่ผลิตได้ในวิธีการทำปฏิริยากับน้ำโดยตรงโดยอาศัยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าแรงสูงลงบนผิวน้ำ แต่เนื่องจากการวิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นกรณีศึกษาเท่านั้นเพื่อให้ทราบถึงการเกิดปฏิริยาต่างๆ จากการสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดก๊าซโอโซนจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

แต่ในทางกลับกันได้มีการทดสอบโดยใช้สีหมึกปากกาไวท์บอร์ดชนิดเดียวกันผสมลงไป ในน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสค์กราวด์โดยไม่ป้องแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้เกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเข้าที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์โดยทิ้งไว้ที่เวลาเท่ากันที่เวลา 40 นาที จะพบว่าไม่ปรากฏผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหรือการตกตะกอนของน้ำที่ผสมสีแต่ประการใดยังคงมีคุณภาพน้ำที่ไม่ดีเหมือนเดิมในเวลาที่เท่ากัน จึงสรุปผลได้ว่าการกระจายสนามไฟฟ้าแรงสูงลงบนผิวน้ำนั้นสามารถเกิดปฏิริยาทางเคมีกับคุณภาพหรือส่วนผสมเจือปนในน้ำได้จากการวิเคราะห์ทางกายภาพดังแสดงรูปที่ 4.6-4.8 แต่ผลในรูปที่ 4.6 สรุปผลว่าคุณภาพดีขึ้นเนื่องจากมีความใสขึ้นมาในระดับหนึ่งกว่าที่ไม่ทำการป้อนสนามไฟฟ้าแรงสูงลงบนผิวน้ำซึ่งถือว่าการทำปฏิริยากับสีที่ผสมลงไป แต่อย่างไรก็ตามในเวลา 40 นาที เท่ากันก็ยังคงมีความขุ่นของน้ำอยู่ระดับหนึ่งซึ่งทั้งนี้ น่าจะมาจากสาเหตุที่เวลาในการทดสอบวิธีการนี้เป็นการทดสอบที่ต้องใช้เวลานานมากซึ่งวิธีการบำบัดน้ำด้วยวิธีนี้จึงยังถือว่าไม่ดีเท่าที่ควร

4.7 การสรุปผลการเลือกใช้นวนทางไฟฟ้าสถานะต่างๆ

จากเหตุผลในการออกแบบเพื่อศึกษาหาจุดและความเหมาะสมในการเลือกใช้สารฉนวน ในการนำมาทำเป็น ไดอิเล็กตริกเพื่อเป็นฉนวนคั่นระหว่างอิเล็กโตรดในการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์ได้สูงขึ้นทำให้เกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูงๆ ซึ่งเป็นผลทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซโอโซน (O_3) และนำคุณสมบัติที่ดีของโอโซนจากวิธีนี้ไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบ และศึกษามาจากงานวิจัยที่ได้ทำผ่านมาแล้ว ซึ่งลักษณะเดิมจะใช้ฉนวนแข็งที่เป็นหลอดแก้วคั่นระหว่างอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวม โดยมิช่องว่างอากาศ ดังที่ได้แสดงและสรุปเบื้องต้นไว้ในบทที่ 1 แต่ในงานวิจัยนี้จะเลือกฉนวนทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนจำนวน 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง,ของเหลว,ก๊าซ ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบแล้วปรากฏว่าฉนวนทางไฟฟ้าหากนำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงเพื่อสร้างความเครียดสนามไฟฟ้าแล้วนั้น ก็จะทำให้การผลิตก๊าซโอโซนที่ได้ไปสัมพันธ์

กับแรงดันที่ป้อนเนื่องจากมีจำนวนฉนวนที่คั่นถึง 3 ชั้นทำให้ค่าแรงดันเบรกควาน์ที่ป้อนมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการทดสอบจึงโยงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซโอโซนในสถานะของสารฉนวนต่างชนิดกันรวมถึงการเกิดการแตกตัวของอากาศกลายเป็นโอโซนอันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงจากเหตุผลในการทดสอบ โดยการใส่สารฉนวนต่างชนิดเข้าไปในอิเล็กโตรไฟฟ้าแรงสูงจึงสรุปข้อพิจารณาในการเลือกใส่สารฉนวนแต่ละชนิดไว้ได้ดังนี้

1. กรณีการใส่สารฉนวนเหลวที่เลือกใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากเหตุผลของอิเล็กโตรดแผ่นระนาบที่เป็นแบบธรรมดาและมีจุดปลายแหลมในแต่ละชุดมีความแตกต่างกันในการเกิดโคโรนาดีสชาร์จสารฉนวนเหลวจึงเป็นล่อหลุมเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของชุดอิเล็กโตรดเนื่องจากการผลิตชุดอิเล็กโตรดแผ่นระนาบนั้นยังมีบางส่วนเป็นขอบแหลมคมการใส่น้ำมันหม้อแปลงเข้าไปล่อหลุมนั้นเพื่อให้เกิดการลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวซึ่งเป็นที่มาที่จะทำให้เกิดการเบรกควาน์ที่รวดเร็วและเป็นจุดวิกฤติของแรงดันเบรกควาน์ได้

2. กรณีการใส่สารฉนวนแข็งที่เป็นอะคีลิกอันเนื่องมาจากการที่อะคีลิกใสดุ๊กนำมาใช้เป็นภาชนะเก็บน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ห่อหุ้มอิเล็กโตรดการออกแบบจึงมีการสร้างความสัมพันธ์กันในทางไฟฟ้ากล่าวคือ อะคีลิกใสดุ๊กเลือกที่นำมาใช้ทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงอีกชั้นหนึ่งในการออกแบบนี้

3. สำหรับสารฉนวนก๊าซที่ใช้ในการทดสอบนี้คืออากาศในบรรยากาศปกติเนื่องจากการทดสอบต้องการเห็นการเปลี่ยนแปลงของการเกิดโอโซนจากอากาศปกติที่นำเข้าไปในชุดอิเล็กโตรดโดยอากาศนี้จะมีผลต่อสนามไฟฟ้าที่กระจายลงมาในลักษณะสม่ำเสมอ (Uniform Field) โดยผ่านสารฉนวนในชั้นที่ 1 และ 2 แล้วหลังจากนั้นจึงเกิดการแตกตัวใน

ดังผลการทดสอบที่ตารางในบทที่ 3 และเป็นผลต่อการศึกษาในการทำปฏิกิริยาในน้ำโดยตรงที่ทำหน้าที่เป็นกรวดคั่นของชุดอิเล็กโตรด

4.8 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดอิเล็กโตรดกำเนิดก๊าซโอโซน

การวิจัยเพื่อศึกษาถึงหลักการสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำซึ่งเป็นหลักการแบบใหม่และเป็นกรณีศึกษา โดยในที่นี่ยังมีเงื่อนไขในออกแบบที่เป็นปัจจัยแวดล้อมที่ไม่ได้คำนึงถึงในงานวิจัยนี้อีกหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิของโคโรนาดีสชาร์จ ความดัน ความชื้น ระบบเตรียมก๊าซที่เป็นอากาศที่สะอาด เป็นต้น และเนื่องจากหลักการนี้ยังเป็นแค่กรณีศึกษาความเป็นไปได้ในการที่จะนำมาทำปฏิกิริยาโดยตรงกับก๊าซโอโซนโดยหลักการใหม่ดังกล่าวนี้จากการทดลองและทดสอบแล้วก็พบว่ามีส่วนในการที่ตั้งสมมุติฐานตั้งแต่เริ่มแรกในการวิจัยว่าจะมีผลที่ทำให้คุณภาพของการพัฒนาเพื่อสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนมีคุณภาพที่ดีขึ้นและพัฒนาไปในทางที่เปลี่ยนแปลงต่อไป ทั้งนี้จะได้ทำการสรุปรายละเอียดไว้ในบทถัดไปในบทสรุปของงานวิจัย

บทที่ 5

บทสรุป

จากการที่ได้ทำการศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้ถือได้ว่าเป็นการศึกษาเพื่อออกแบบสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบใหม่ซึ่งแต่เดิมยังมีการออกแบบลักษณะอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยและค้นคว้ามาในรูปแบบลักษณะแตกต่างกันไป เพื่อให้ได้มาซึ่งการพัฒนาคงงานวิจัยในด้านนำก๊าซไอโซนที่ผลิตได้นำมาใช้ประโยชน์ในทางด้านต่างๆ ที่จำเป็นและให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพที่ดีและมีความเสถียรภาพในการใช้งานในด้านต่างๆ และที่สำคัญอย่างยิ่งก็คือด้านความปลอดภัยจากไอโซนและจากไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่ง ดังนั้นรูปลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้งานวิจัยสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นในอนาคตและการออกแบบที่ผ่านมาก็มีการออกแบบทั้งทดลองและวิจัยอย่างหลากหลายมากแต่ กระนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีและหาแนวทางในการที่จะสามารถออกแบบลดกำเนิดก๊าซไอโซนที่เป็นการพัฒนาและเทคนิคใหม่ที่จะนำไปสู่การพัฒนาและหาแนวทางที่เป็นรูปธรรม จากวัตถุประสงค์ดังกล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่วนของบทที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานดังกล่าวเพื่อทดลองและทดสอบให้มีลักษณะในการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำเพื่อให้วิธีการนี้เป็นกรณีศึกษาว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะสามารถสร้างก๊าซไอโซนให้ทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับน้ำเพื่อให้เป็นหลักการและแนวทางหนึ่งในการบำบัดน้ำได้โดยตรง ซึ่งไม่มีพลังงานส่วนอื่นมากระทบต่อการนำไอโซนไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยวิธีการวิจัยหลักๆ มีโครงสร้างและส่วนการวิจัยอยู่ประมาณ 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนการออกแบบและเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนศึกษาจนวนที่เป็นไดอิเล็กตริกในการค้นระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนการศึกษาปรากฏการณ์การกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำและการเกิดการแตกตัวเป็นปริมาณก๊าซไอโซน จึงจะได้เขียนเป็นแผนและระเบียบวิธีการวิจัยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สำคัญของการวิจัยได้ดังนี้

1. การออกแบบรูปลักษณะอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบแผ่นระนาบจำนวนตัวอย่าง 2 ชุด 4 แบบ อิเล็กทรอนิกส์ชุดแรกเป็นแบบแผ่นระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม กับแบบแผ่นระนาบที่มีปลายแหลมจำนวน 3 แบบ โดยมีจำนวนปลายแหลมจำนวน 140,190,211 จุด ทั้งนี้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทำจากแผ่นทองแดงหนา 15 mm ส่วนที่เป็นระนาบปลายแหลมจะใช้วิธีการกลึงเป็นปลายแหลมตามจำนวนที่กล่าวไว้ข้างต้น

2. ทดสอบและศึกษาคุณสมบัติของจนวนที่จะใช้ในการศึกษาหาจุดเหมาะสมเพื่อทดสอบกับจนวนทางไฟฟ้า 3 สถานะ คือ จนวนเหลว เลือกใช้น้ำมันหม้อแปลงโดยระดับน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ 1 cm จนวนแข็ง เลือกใช้ แผ่นอะซิติกไสหนา 15 mm และ จนวนก๊าซในที่นี้คือแก๊ปช่องว่างอากาศ

3. ศึกษาและคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับชั้นฉนวนที่คั่นในชุดฉนวนเล็กโตรดทั้ง 3 ชั้น

จากวัตถุประสงค์ดังกล่าวในบทที่ 1 สามารถสรุปผลการออกแบบและทดสอบได้ดังต่อไปนี้

1. จากการศึกษาการประยุกต์ใช้งานทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูงเพื่อผลิตก๊าซโอโซนพบว่ากระบวนการเกิดก๊าซโอโซนจากปฏิกิริยาเคมี สามารถเชื่อมโยงกับหลักการทางไฟฟ้าได้ และพลังงานจากภายนอกที่ป้อนให้กับระบบมีความสำคัญเท่ากันกับความสามารถในการรับพลังงานของแกปอากาศที่ออกแบบ นั่นคือ ในทางไฟฟ้าแรงสูง อากาศมีความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่ง การเสียดสภาพของอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลกลายเป็นโอโซน แต่ขีดจำกัดความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ซึ่งนำไปสู่การเบรกดาวน์นั้นทำให้โอโซนที่ผลิตได้สลายไปเพราะความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเบรกดาวน์ ในกระบวนการผลิตการเกิดก๊าซโอโซนและสลายของโอโซนจึงเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กัน

2. พลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบคือพลังงานที่เข้าไปทำให้โมเลกุลก๊าซออกซิเจนแตกตัว พลังงานนี้มาจากสนามไฟฟ้าที่ป้อน จากผลการทดลองพบว่าถ้าความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ถึงย่านที่ให้พลังงานเพียงพอจะไม่มีก๊าซโอโซนเกิดขึ้นในระบบ และปริมาณโอโซนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นแต่ในที่นี้ขึ้นอยู่กับค่าความร้อนภายในกับแกปอากาศด้วย ตัวแปรทางไฟฟ้าที่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการผลิตคือค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ แต่การใช้แรงดันสูงมากๆ นั้นมีผลต่อการสร้างความสนามไฟฟ้าแน่นอนและมีผลต่อการเกิดก๊าซโอโซนตามไปด้วยและเป็นวิธีการที่ทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าน้อยลง แต่เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าสูงๆ ก็ย่อมมีปัญหาในการเรื่องการฉนวนให้ปลอดภัย ซึ่งมีผลอย่างมาก และเป็นปัญหาหลักของการใช้วิธีการนี้แต่ในการศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบปัจจัยอื่นคือทดสอบปัจจัยในผลิตก๊าซโอโซนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำปฏิกิริยาโอโซนกับน้ำโดยตรงเพื่อวิเคราะห์ และศึกษาดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบคงใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแรงสูงในการทดสอบที่ระดับแรงดัน 60 kV 50 Hz โดยใช้หม้อแปลงทดสอบในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

3. การออกแบบฉนวนเล็กโตรด ได้นำข้อดีข้อเสียของฉนวนเล็กโตรดมาวิเคราะห์และพิจารณาทั้งที่เป็นระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลมและที่เป็นระนาบที่มีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยมีจำนวนปลายแหลมที่แตกต่างกันจำนวน 140,190,211 จุด เพื่อดูความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนของชุดฉนวนเล็กโตรดทั้ง 4 แบบ เพื่อศึกษาคูณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้า

4. จากการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาจากบทที่แล้วก็สามารถทำให้สามารถทราบได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้านั้นจะมีค่าสูงก็ต่อเมื่อฉนวนเล็กโตรดมีจำนวนปลายแหลมจำนวนมาก ทั้งนี้เป็นไปตามหลักการในทฤษฎีทางไฟฟ้าแรงสูงและฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงที่นำมาใช้เป็นตัวไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างฉนวนเล็กโตรดนั้นจากคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของฉนวนทั้ง 3 ชนิดที่ได้ทำการทดสอบ

แล้วนั้นปรากฏว่าหากเป็นฉนวนน้ำมันค่าคงตัวไดอิเล็กตริกทางไฟฟ้าจะค่อนข้างเหมาะสมในการเลือกแต่เนื่องจากเป็นฉนวนเหลวจึงยากต่อการนำมาใช้งานเพราะจะต้องมีภาชนะใส่ ซึ่งภาชนะที่ใส่ต้องเป็นฉนวนไฟฟ้า จึงทำให้ต้องนึกถึงเรื่องของฉนวนไฟฟ้าที่มาทำเป็นภาชนะใส่น้ำมัน ดังตัวอย่างในการออกแบบที่ต้องมีภาชนะใส่ที่ทำจากอะคริลิกใสจึงต้องมาพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ในทางไฟฟ้าแรงสูงอีกเพราะถือว่าเป็นฉนวนไดอิเล็กตริกเช่นกัน

ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงนั้นจากการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงเพื่อเปรียบเทียบกันผลปรากฏว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะมีความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนได้ดีกว่ากระแสตรง (DC) เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) มีความถี่ 50 Hz ดังนั้นความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จึงมีส่วนต่อการผลิตก๊าซโอโซนอย่างแน่นอน ดังนั้นหากมีการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูงด้วยก็ย่อมมีความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซนได้ดีกว่าเนื่องจากกำลังที่สูญเสียไฟฟ้าส่วนหนึ่งมาจากการดิ่งกระแสของหม้อแปลงที่ค่อนข้างสูง

2. ระบบการผลิตก๊าซโอโซนในทางอุตสาหกรรมจะต้องประกอบไปด้วยระบบการเตรียมก๊าซแต่สำหรับระบบระบายความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นการระบายความร้อนอันเนื่องมาจากชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบสำหรับในการทดสอบของงานวิจัยนี้ถูกระบายความร้อนด้วยน้ำมันหม้อแปลงแล้วเนื่องจากชุดอิเล็กทรอนิกส์จะอยู่ในเนื้อฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเป็นการระบายความร้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของการออกแบบแต่ระบบการเตรียมอากาศนี้ในงานวิจัยไม่ได้ทำการทำการทดสอบระบบนี้ และไม่ได้กล่าวถึง ระบบเหล่านี้จะช่วยให้อากาศที่ป้อนสูงชุดอิเล็กทรอนิกส์มีสภาพที่เหมาะสมยิ่งขึ้นเป็นการช่วยเพิ่มผลผลิตอีกทางหนึ่ง

3. โอโซนเป็นก๊าซอันตรายหากมีปริมาณสูงๆ การทดสอบและวิจัยควรมีความรู้และป้องกันระดับหนึ่งซึ่งในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ก๊าซโอโซนด้วยเครื่องมือวัดปริมาณก๊าซโอโซน (Ozone Monitor) ซึ่งจะเป็นการช่วยให้การวัดปริมาณโอโซนที่ผลิตได้สะดวกต่อการวิเคราะห์ แต่ในแง่ของความถูกต้อง วิธี Iodometric method จะให้ความถูกต้องมากกว่า แต่ผู้ที่ทำการวัดและวิเคราะห์ต้องมีทักษะทางเคมีพอสมควร

4. สืบเนื่องจากการสารฉนวนจำนวนหลายชั้นในงานวิจัยชิ้นนี้ซึ่งเป็นการใส่สารฉนวนจำนวนถึง 3 ชั้น ทั้งนี้ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายต้องการศึกษาพฤติกรรมของปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซโอโซนของฉนวนในสถานะต่างๆ จึงทำให้ผลการทดลองออกมาจึงพบว่าการใส่สารฉนวนจำนวนมากจะก่อให้เกิดปัญหาของการเกิดสนามไฟฟ้าแรงสูงที่น้อยลงในแต่ละชั้นฉนวนเพราะสารฉนวนเป็นตัวแปรในการเกิดสนามไฟฟ้าและปริมาณก๊าซโอโซนอย่างเห็นได้ชัดรวมถึงการคำนวณสนามไฟฟ้าแรงสูงโดยวิธีการ Finite Element Method ก็แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเกิดสนามไฟฟ้าที่มีค่าลดลงของจำนวนชั้นฉนวนที่ใส่เข้าไปเป็นไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้จึงสรุปผลว่า

ปัจจัยต่อการเกิดการแตกตัวของอากาศกลายเป็นก๊าซโอโซน (O_3) นั้นเป็นปัจจัยหลักต่อการเกิดปริมาณของก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นของการเกิดค่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูง (E_{max}) ในแต่ละชั้นฉนวนที่เลือกใช้งาน

5. การทดสอบพฤติกรรมทางกายภาพที่แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาในการเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือปฏิกิริยาของน้ำที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ซึ่งทดสอบผสมสิ่งลงไปน้ำเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของน้ำทั้งที่มีค่าสนามไฟฟ้ากระจายลงบนผิวน้ำหรือไม่มีค่าสนามไฟฟ้ากระจายลงบนผิวน้ำก็ตามผลที่ได้ยังไม่ถือว่าดีเท่าที่ควรสำหรับในวิธีการนี้เพราะยังไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงได้กับน้ำแต่ก็แสดงให้เห็นผลที่แปรเปลี่ยนไปได้บ้างว่ามีผลต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการกระจายค่าสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำและไม่กระจายค่าสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำได้ในระดับหนึ่งจากทางกายภาพ จากการทดสอบนี้ก็จะพบผลของความเปลี่ยนแปลงของสีที่ผสมทั้ง 2 ชนิด อย่างชัดเจน กล่าวคือผลการกระจายสนามไฟฟ้าลงบนผิวน้ำที่มีส่วนผสมของสีน้ำจะเห็นพฤติกรรมได้ชัดเจนกว่าสีหมึกปากกาไวท์บอร์ดทั้งนี้น่าจะมาจากการทำปฏิกิริยาของสีทั้ง 2 ชนิด ในการทดสอบนี้แตกต่างกันในเวลาเท่ากัน โดยในสีน้ำจะพบว่ามีความใสมากกว่าสีหมึกปากกาไวท์บอร์ดที่ผสมลงในน้ำ ซึ่งผลที่ได้อาจเป็นเหตุและปัจจัยต่อการพัฒนางานการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนต่อไปได้ในอนาคตจากกรณีศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

6. ในส่วนการพัฒนาต่อไปยังมีตัวแปรที่น่าสนใจและวิเคราะห์เพิ่มเติมดังต่อไปนี้

6.1 ส่วนเตรียมคุณภาพอากาศ

6.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงควรจะเป็นแบบ High Voltage และ High Frequency

6.3 ชุดอิเล็กทรอนิกส์ควรมีจำนวนปลายแหลมบนแผ่นระนาบควรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น

กว่านี้อาจจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซโอโซน

เอกสารอ้างอิง

1. ชำนาญ ห่อเกียรติ . “ **High Voltage.**” ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2522
2. พรพิมล รัตนวิเชียร และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543
3. วัชระ เวชมงคล. “การผลิตโอโซนโดยใช้ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อการบำบัดน้ำ.” บทคัดย่อการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2534
4. หิรัญ ดวงอุไร และคณะ . “ชุดสร้างโครโนสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2542
5. ดร.สำรวย สังข์สะอาด. “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2528
6. ดร.สุทธิเวช ด.แสงจันทร์. “รักชีวิต รักโอโซน.” กองเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, ครั้งที่ 1 เมษายน 2541
7. สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
8. พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล, จงรักษ์ บุญเส็ง. “เครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนเพื่อการบำบัดน้ำเสีย” งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
9. 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
10. James A. Robinson, Maurice A. Bergougnou ,William L. Cairns, G. S. Peter Castle, Follow, IEEE, “A New Type of Ozone Generator Using Taylor Cones on Water Surfaces”,IEEE,1998,pp.1218-1223
11. EGAT, Annual Report, 1983
12. IEC Standard, Publ. No. 60-1976, High voltage Test Techniques
13. IEC Standard, Publ. No. 71-1976, Insulation Co-ordination,
14. Zaengl, W., Hochspannungstechnik I, ETH, Zurich 1970
15. Staub, B, Introduction to high-voltage technique, Chlalongkorn University, 1968

16. Pinz, H., Hochspannungsfelder, R. Oldenbourg Verlag, 1969
17. E. Haefely & Co., Ltd. Basel, High Voltage Laboratory Equipment
18. Kind, D., Einführung in die Hochspannungsversuchstechnik Friedr, Vieweg + Sohn, 1972
19. Holler, K., Hochspannungstechnik I, Rhein-Westf. Techn. Hochschule Aachen 1972
20. Raupach, F., MWB-Hochspannungs-Laboratorium
21. Greenwood, A., Electrical Transients in Power Systems, Wiley-Interscience, 1971
22. Craggs, J.D. & Meek, J.M. High Voltage Laboratory Techniques, Butter-worth 1954
23. Kuffel, E., & Abdullah, M., High-Voltage Engineering, Pergamon Press, 1977
24. IEC Standard, Publ. No. 52-1960, High-Voltage Measurement by Means of Sphere-gaps
25. Schwab, A.J., Hochspannungsmesstechnik, Springer-Verlag, 1970
26. Zaengl, W., Ein neuer Teiler für steile Stossspannungen, Bull. SEV. 56, 1956
27. Zahn, M., Electromagnetic Field Theory : a Problem solving approach, John Wiley & Sons, 1979
28. Lesch, G., Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Springer-Verlag, 1959
29. Alston, L.L., High-Voltage Technology, Oxford University Press, 1968
30. Siemens, Technical Tables, 1982 Edition

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลองเพื่อออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์

ข้อมูลผลการทดสอบเพื่อออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรผลิตก๊าซไอโซน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้ากับความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซนของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรที่ทำการออกแบบโครงสร้างที่ทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ อิเล็กทรอนิกส์ระนาบธรรมดาไม่มีปลายแหลม และอิเล็กทรอนิกส์ระนาบแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ ก.1 อิเล็กทรอนิกส์ระนาบธรรมดากับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190 และ 211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสสลับ AC test)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมีปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด
5	2	5	9	13
10	3	8	12	19
15	3	10	15	29
20	3	13	17	30
25	4	14	18	33
30	5	16	19	35
35	6	19	22	39
40	8	24	23	40
45	9	24	30	Breakdown
50	11	26	Breakdown	Breakdown
55	13	27	Breakdown	Breakdown
60	15	28	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.2 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190และ211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากันที่ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกคั่น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ไฟบวก)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมีปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด
5	1	3	5	12
10	2	4	7	15
15	2	7	10	18
20	3	10	12	20
25	3	12	13	22
30	4	15	15	25
35	5	17	17	26
40	7	18	18	27
45	9	19	19	Breakdown
50	12	22	Breakdown	Breakdown
55	14	23	Breakdown	Breakdown
60	16	24	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.3 อิเล็กโตรครรณนบธรรมดกบเบมมีปลยหลมจันน 3 ดวอย่ง (จันนปลยหลม 140,190 และ 211 จด) ที่ระยเบเกปอากศเท่กันที่ 2 cm ไม่มีจนวนไดอิเล็กตริกกัน และแรงดันที่ป้อนเท่กันดงแสดงในตาราง (แรงดันกระแสดรง DC test ข้วลบ)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน (ppm)			
	ระนบธรรมด	ระนบมีปลย หลม 140 จด	ระนบมีปลย หลม 190 จด	ระนบมีปลย หลม 211 จด
5	ไม่เกิด	ไม่เกิด	4	7
10	ไม่เกิด	5	6	9
15	3	6	8	12
20	4	7	10	15
25	4	8	11	18
30	5	10	13	19
35	6	11	14	24
40	7	13	16	25
45	8	15	18	26
50	9	19	Breakdown	Breakdown
55	10	20	Breakdown	Breakdown
60	11	21	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.4 อิเล็กโตรครณะนาขรรคมคกับแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190และ211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากันที่ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น จำนวน 1 ชั้นอะทิลิกหนา 1 cm และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดัน กระแสสลับ AC test)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน (ppm)			
	ระนาบขรรคมค	ระนาบมีปลาย แหลม 140 จุด	ระนาบมีปลาย แหลม 190 จุด	ระนาบมีปลาย แหลม 211 จุด
5	1	2	5	8
10	2	3	8	12
15	3	5	9	18
20	5	8	11	26
25	6	11	12	31
30	8	12	14	33
35	9	15	15	36
40	9	18	16	37
45	10	19	17	Breakdown
50	11	22	Breakdown	Breakdown
55	12	24	Breakdown	Breakdown
60	14	25	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.5 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190 และ 211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับที่ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น จำนวน 1 ชั้นอะกลีคหนา 1 cm และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดัน กระแสตรง DC test ขั้วบวก)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมีปลาย แหลม 140 จุด	ระนาบมีปลาย แหลม 190 จุด	ระนาบมีปลาย แหลม 211 จุด
5	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	7
10	ไม่เกิด	ไม่เกิด	7	11
15	2	4	8	15
20	3	6	8	18
25	5	7	9	21
30	7	8	10	28
35	7	10	12	30
40	8	14	13	34
45	9	15	15	Breakdown
50	11	18	Breakdown	Breakdown
55	12	20	Breakdown	Breakdown
60	13	22	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.6 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190 และ 211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับที่ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกจำนวน 1 ชั้นอะคริลิกหนา 1 cm และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วลบ)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมีปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมีปลายแหลม 211 จุด
5	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	6
10	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	8
15	1	2	6	10
20	2	3	8	18
25	2	4	9	19
30	5	6	10	24
35	6	7	12	28
40	8	10	14	30
45	10	12	14	Breakdown
50	11	14	Breakdown	Breakdown
55	12	18	Breakdown	Breakdown
60	12	20	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.7 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190 และ 211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากันที่ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น จำนวน 2 ชั้นเป็นฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคีลิก แรงดันที่ป้อนเท่ากัน ดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสสลับ AC test)

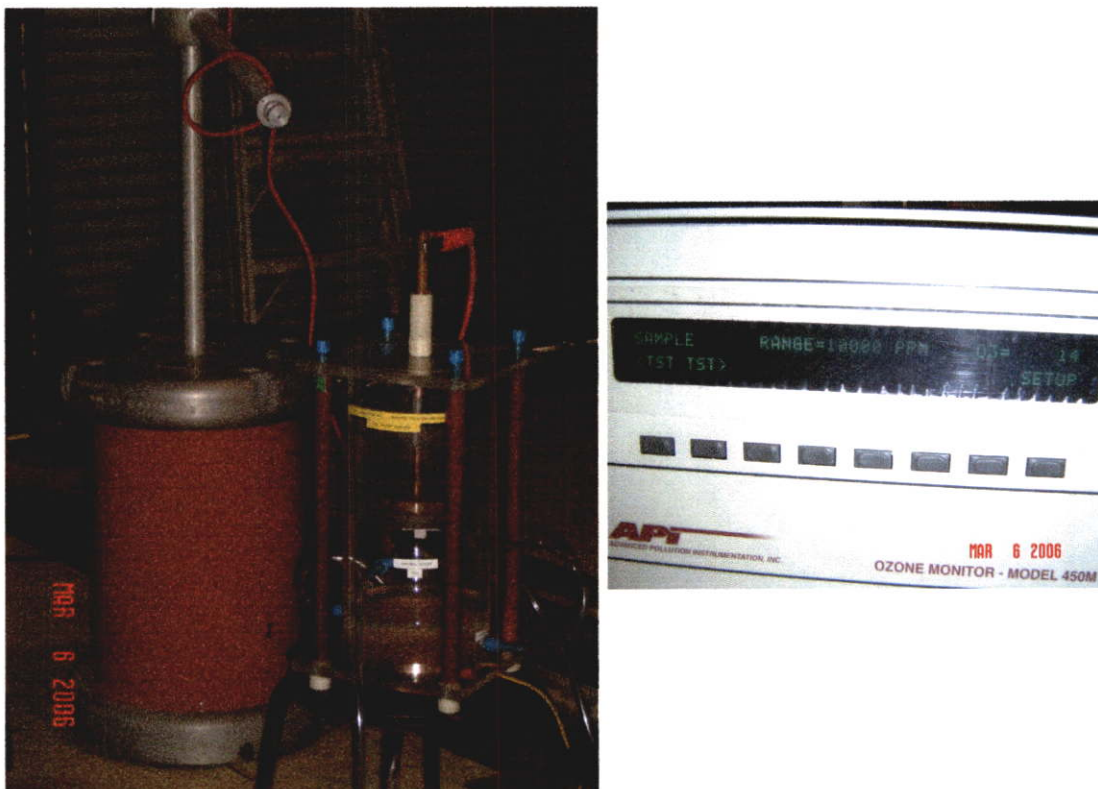
แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมี ปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมี ปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมี ปลายแหลม 211 จุด
5	ไม่เกิด	ไม่เกิด	6	8
10	5	4	8	10
15	6	7	10	12
20	8	9	11	13
25	9	12	12	15
30	11	13	13	18
35	13	15	15	25
40	14	16	18	28
45	15	18	19	Breakdown
50	17	19	Breakdown	Breakdown
55	19	21	Breakdown	Breakdown
60	20	22	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.8 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190 และ 211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับที่ 2 cm มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น จำนวน 2 ชั้นเป็นฉนวนน้ำมันหม้อแปลงและอะคีลิก แรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดง ในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วบวก)

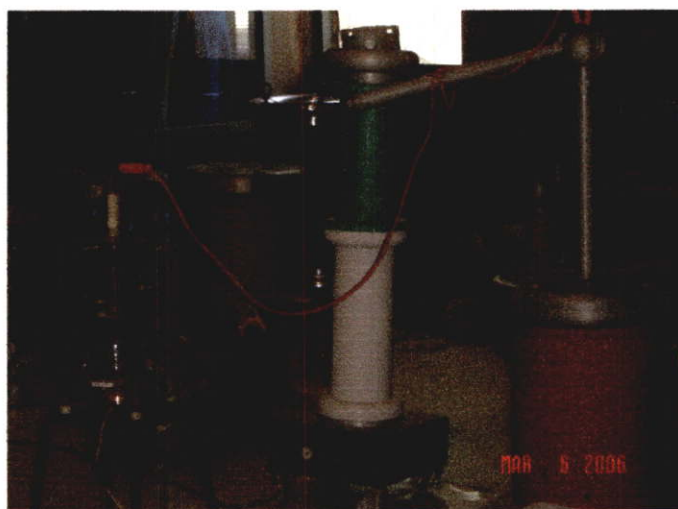
แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซโอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมี ปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมี ปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมี ปลายแหลม 211 จุด
5	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	7
10	ไม่เกิด	ไม่เกิด	7	8
15	2	4	8	11
20	4	8	9	12
25	6	9	11	13
30	8	10	14	15
35	10	12	16	18
40	11	14	18	25
45	13	15	19	Breakdown
50	14	16	Breakdown	Breakdown
55	15	20	Breakdown	Breakdown
60	17	22	Breakdown	Breakdown

ตารางที่ ก.9 อิเล็กโตรดระนาบธรรมดาแบบมีปลายแหลมจำนวน 3 ตัวอย่าง (จำนวนปลายแหลม 140,190 และ 211 จุด) ที่ระยะแกปอากาศเท่ากับ 2 cm ไม่มีฉนวนไดอิเล็กตริกชั้น และแรงดันที่ป้อนเท่ากันดังแสดงในตาราง (แรงดันกระแสตรง DC test ขั้วลบ)

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความสามารถในการผลิตก๊าซไอโซน (ppm)			
	ระนาบธรรมดา	ระนาบมี ปลายแหลม 140 จุด	ระนาบมี ปลายแหลม 190 จุด	ระนาบมี ปลายแหลม 211 จุด
5	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	9
10	ไม่เกิด	ไม่เกิด	6	11
15	ไม่เกิด	3	8	12
20	2	5	9	13
25	3	8	10	18
30	4	9	11	19
35	5	11	12	23
40	6	12	17	24
45	8	16	18	Breakdown
50	9	18	Breakdown	Breakdown
55	14	19	Breakdown	Breakdown
60	15	20	Breakdown	Breakdown



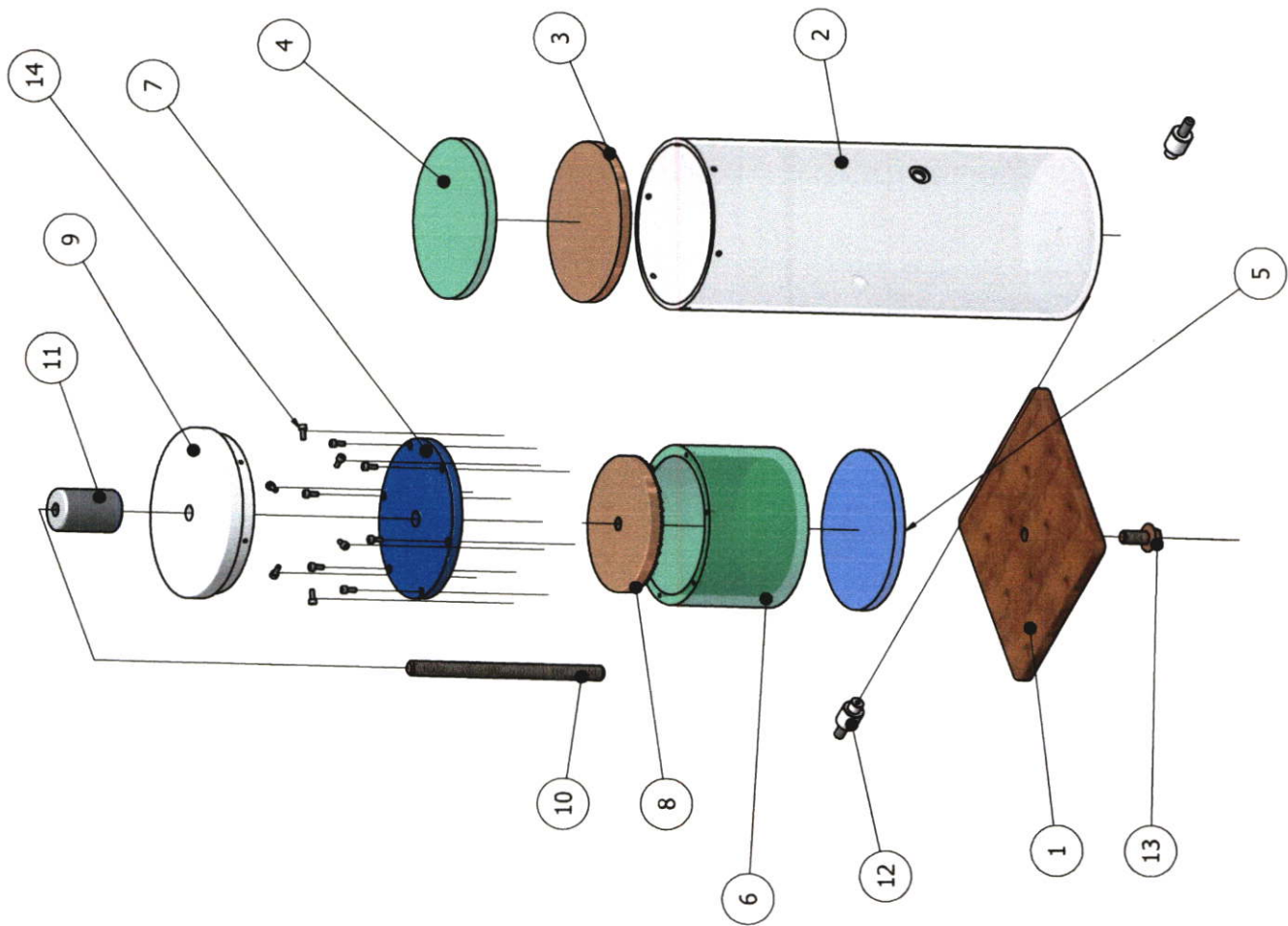
รูปที่ ก.1 แสดงการต่อวงจรในการวัดหาค่าปริมาณ โอโซนในอากาศที่วัดได้ในช่องว่างอากาศ
(วงจร+เครื่องบีกวัด)





รูปที่ ก.2 แสดงการต่อวงจรในการวัดหาค่าป้าซิแทนซ์ (C-TanD) ของไดอิเล็กตริกโดยใช้เครื่อง Tettex
AG 2805 บริษัท Haefely Trench

ภาคผนวก ข.

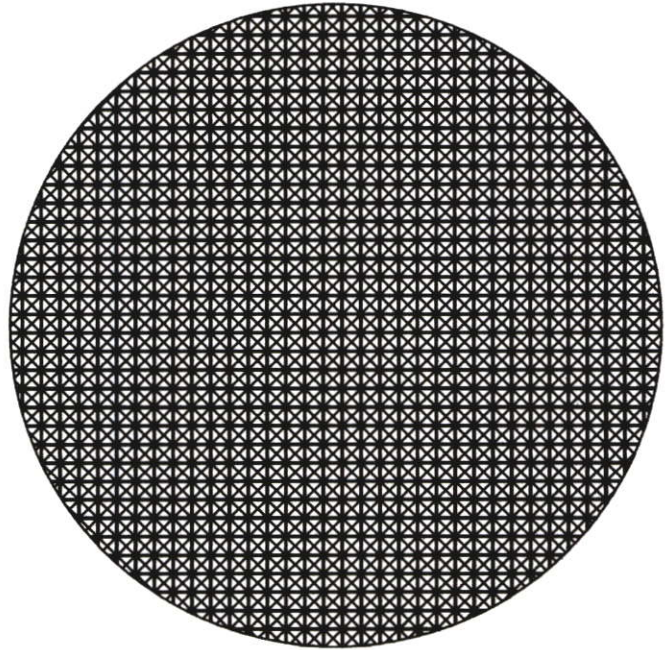
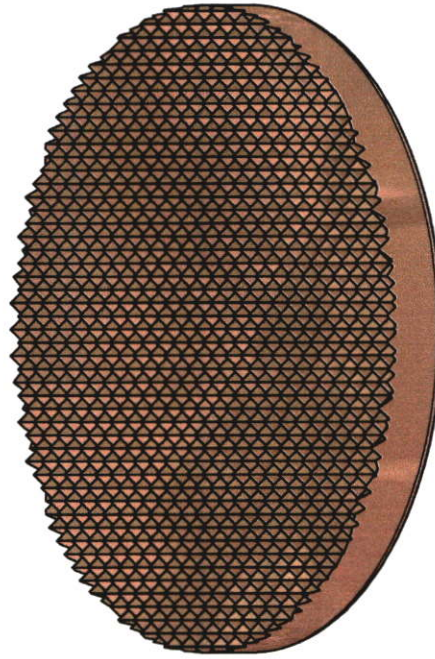
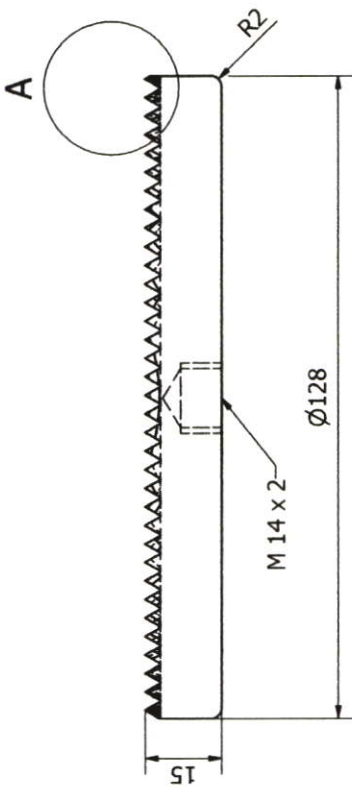
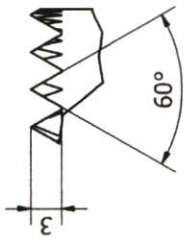
การออกแบบชิ้นส่วนของชุดอิเล็กทรอนิกส์







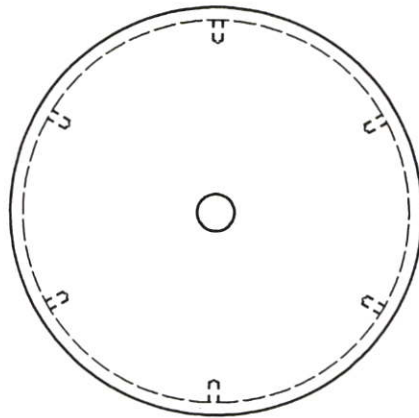
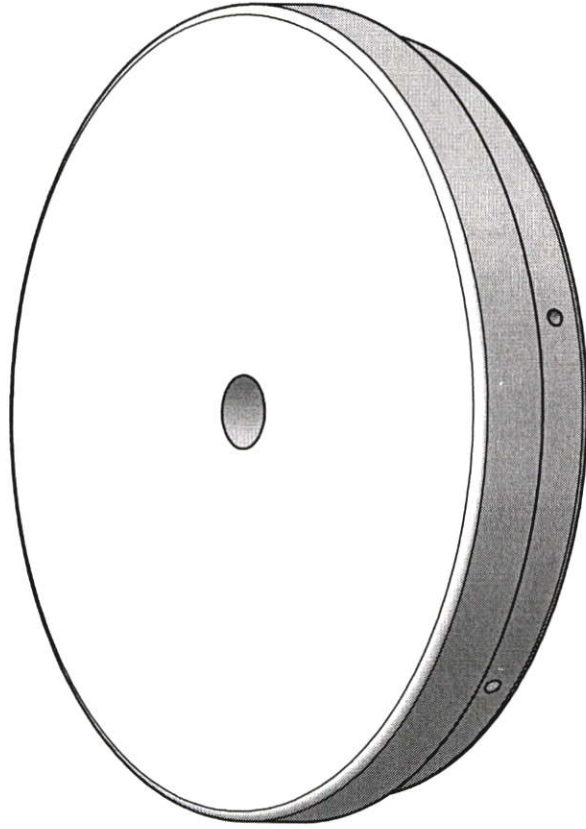
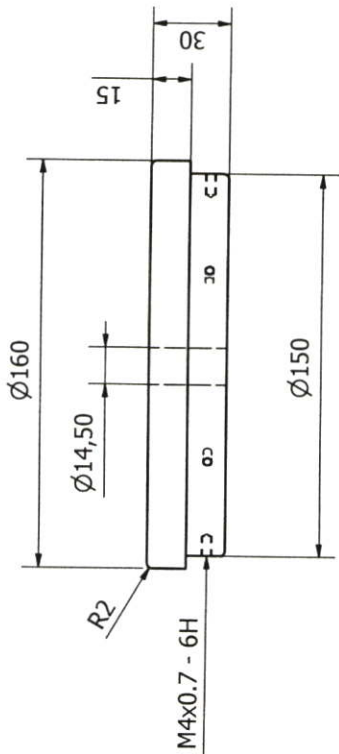
Parts List			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Parta	
2	1	Partb	
3	1	Part3	
4	1	PartD	
5	1	PartE	
6	1	PartF	
7	1	PartG	
8	1	PartH	
9	1	I	
10	1	PartH	
11	1	PartO	
12	2	PartT	
13	1	M12-25-A	Hexagon Flange Bolt
14	12	M4-10	Hexagon Socket Head Cap Screw

ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุรินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุรินทร์				
ผู้ตรวจ	ศ.ศ.มนตรี ปวงจิตร์				
ผู้ตรวจ ม.ช.	ศ.ศ.มนตรี ปวงจิตร์				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน				
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี					
				 	

A (2:1)



ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัศวิน แก้วสุโขทัย				
ผู้ออกแบบ	นายอัศวิน แก้วสุโขทัย				
ผู้ตรวจ	ศ.ศ.มนตรี บวมจิตร				
ผู้ตรวจ ม.ย.	ศ.ศ.มนตรี บวมจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี					
				 	 

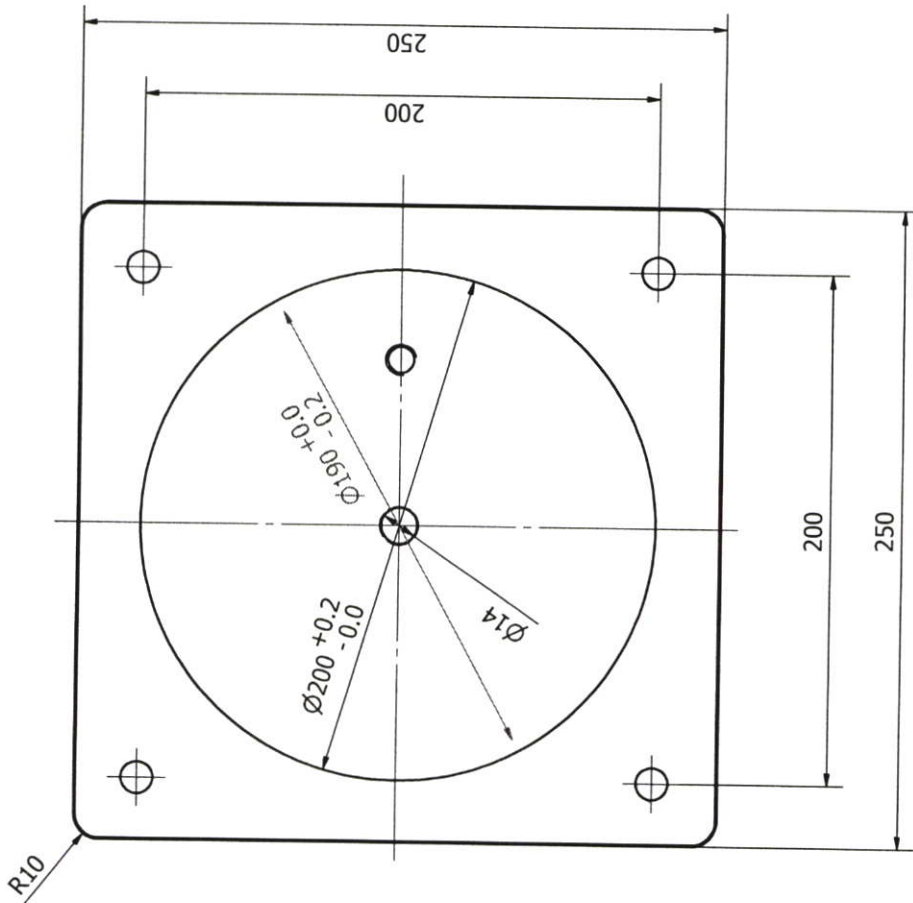


ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัศวิน แก้วสุรินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายอัศวิน แก้วสุรินทร์				
ผู้ตรวจ	ศ.สมมนตรี ปววจิตร				
ผู้ตรวจ ม.ช.	ศ.สมมนตรี ปววจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	

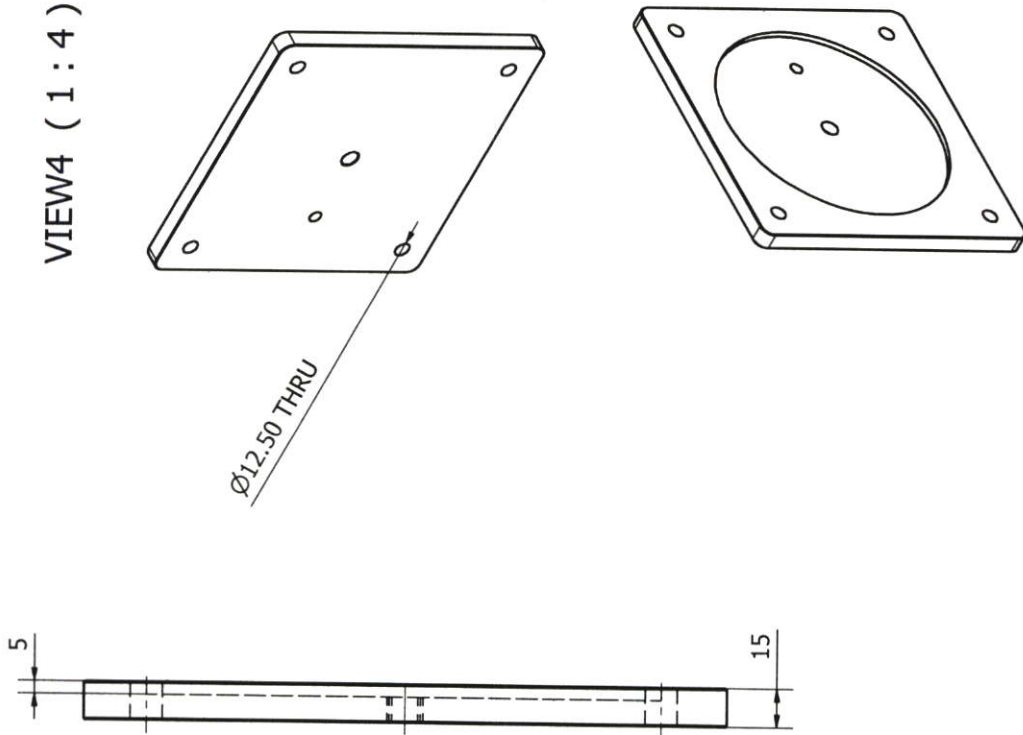
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



VIEW1 (1 : 2)

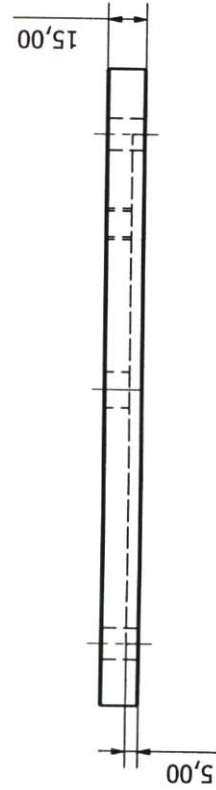
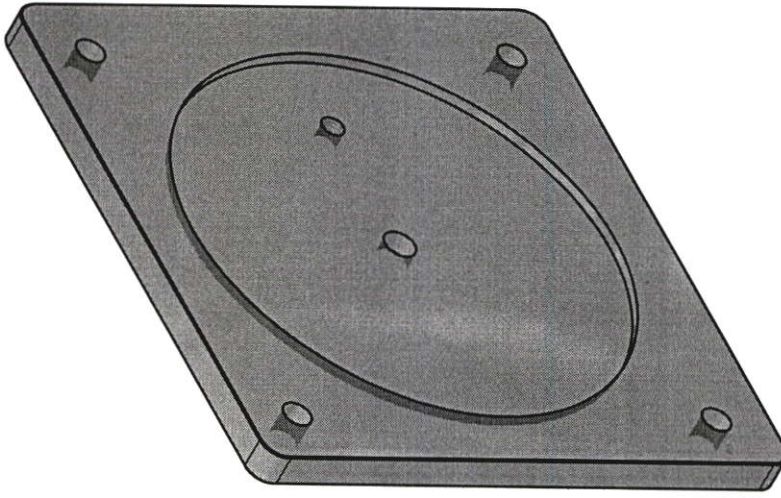
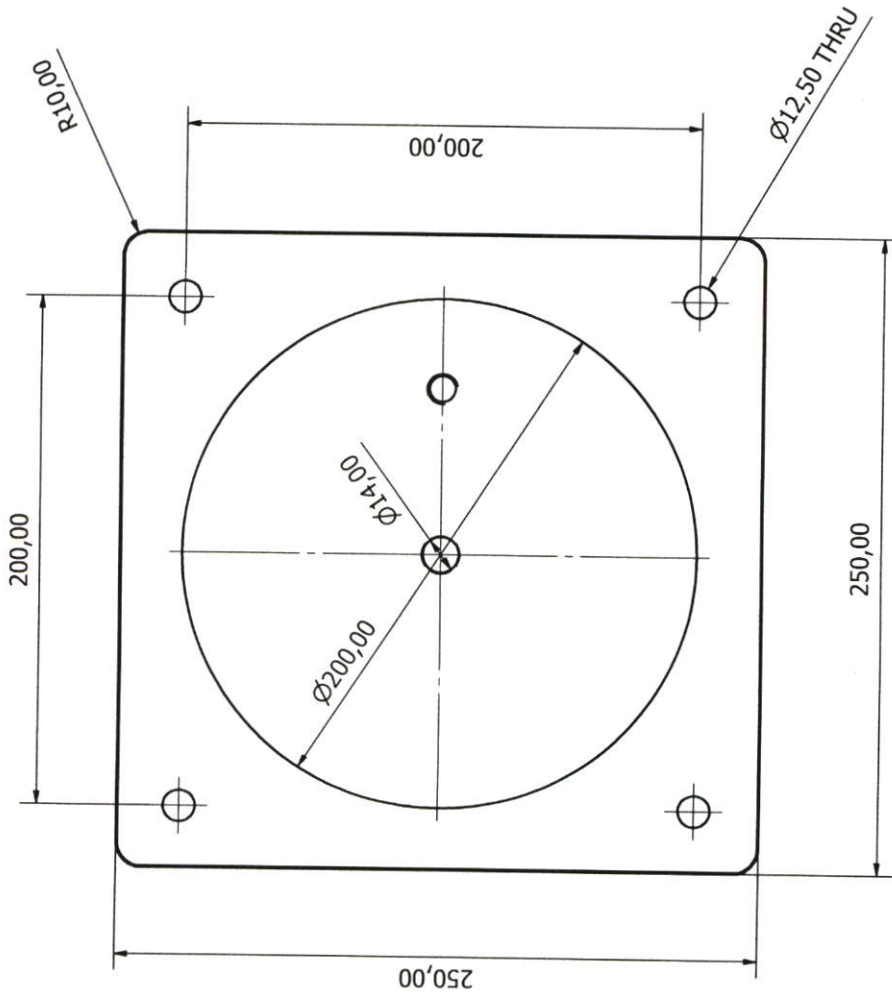


VIEW4 (1 : 4)



ชนิด	ชนิดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ชื่อ	รายการ	ขนาดวัสดุ	ชื่อชิ้นงาน	
ผู้เขียนแบบ	นายอัศวิน แก้วสุรินทร์		ชื่อชิ้นงาน	
ผู้ออกแบบ	นายอัศวิน แก้วสุรินทร์		ชื่อชิ้นงาน	
ผู้ตรวจ			ชื่อชิ้นงาน	
ผู้ตรวจ ม.ช.			ชื่อชิ้นงาน	
มาตรฐาน			ชื่อชิ้นงาน	
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หมายเลขแบบ				

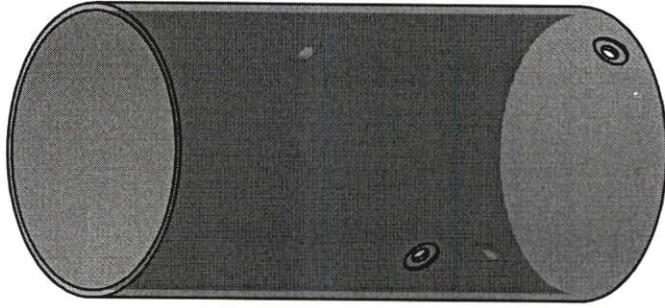
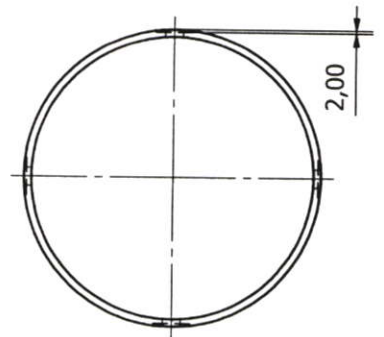
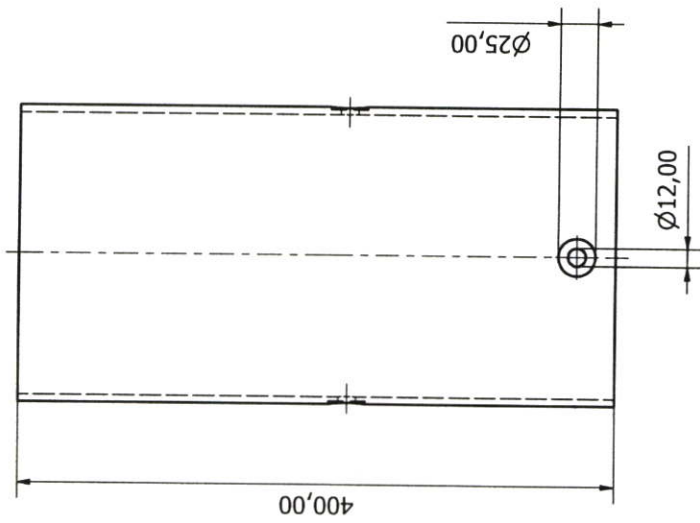
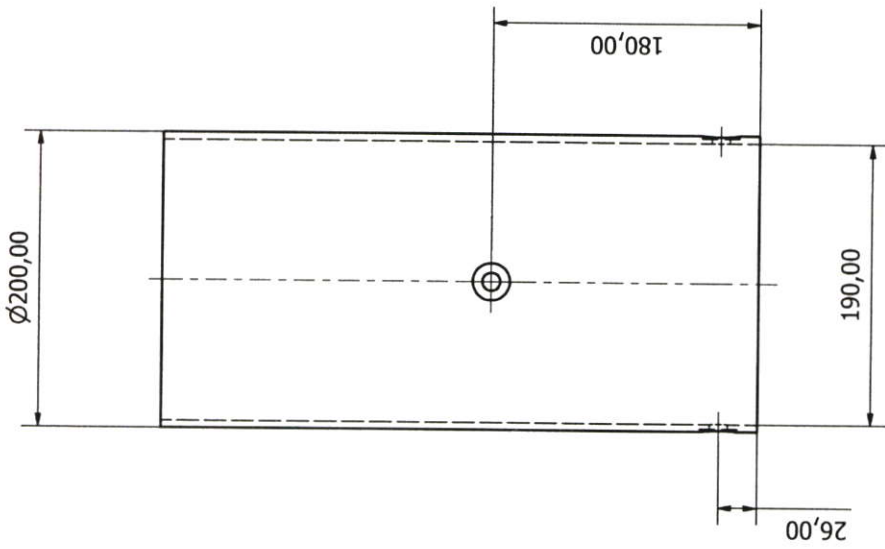




ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัศวิน แก้วสุชินธ์				
ผู้ออกแบบ	นายศุภาณี เบนตรีโพธิ์แก้ว				
ผู้ตรวจ	นายพร้อมศักดิ์ อภิรัตน์กุล				
ผู้ตรวจ ม.ช.	นายพร้อมศักดิ์ อภิรัตน์กุล				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	

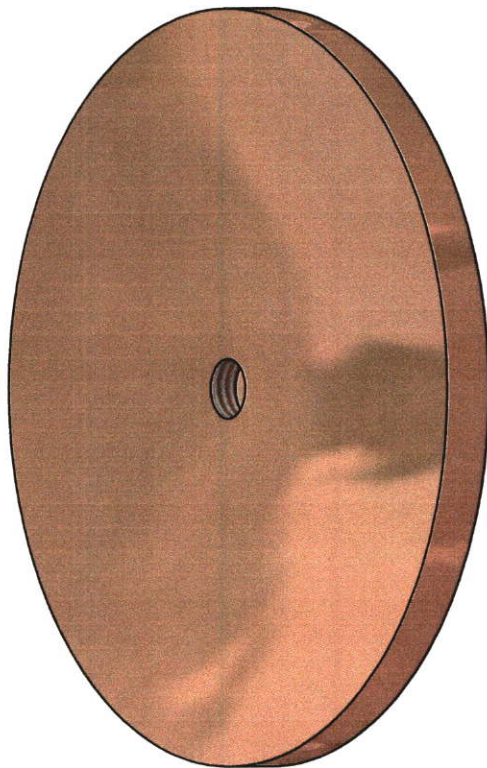
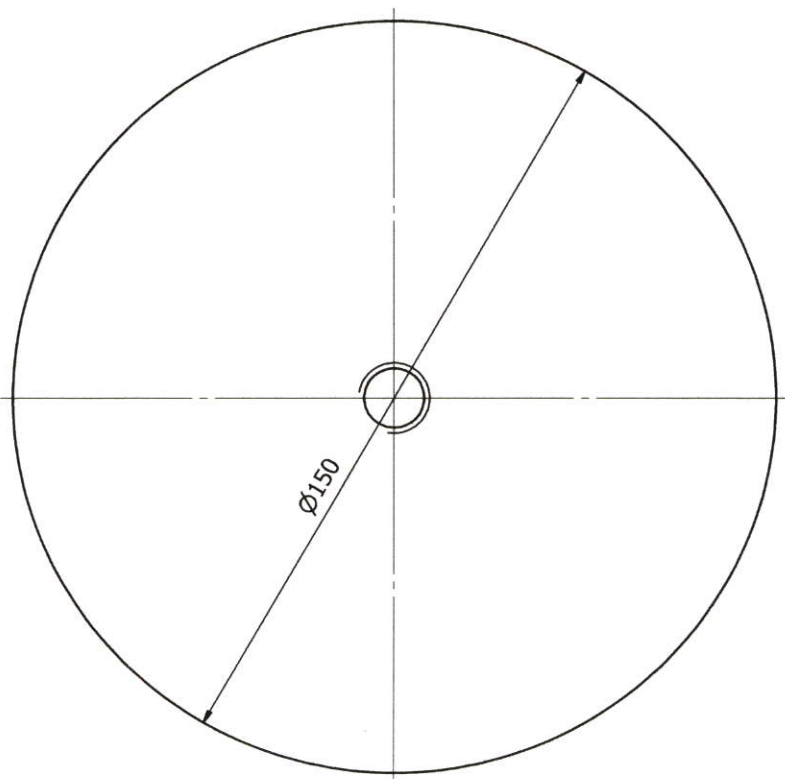
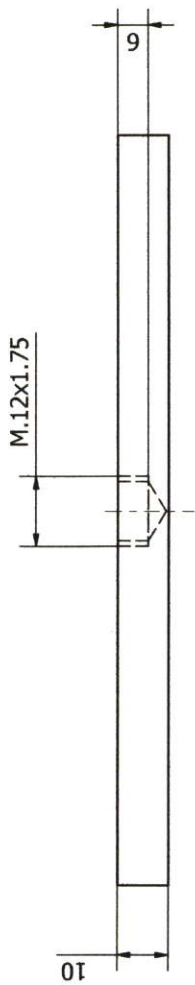
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



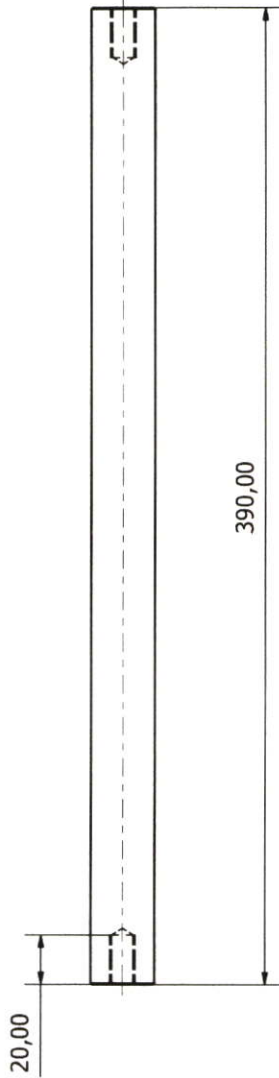
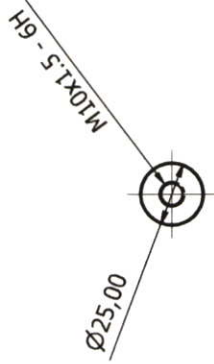


ชนิด	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายชัชวาล แก้วสุรินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายศุภชาติ เมตรโพธิ์แก้ว				
ผู้ตรวจ	นายพร้อมศักดิ์ อภิรัตน์กุล				
ผู้ตรวจ ม.ช.	นายพร้อมศักดิ์ อภิรัตน์กุล				
มาตรฐาน	ชื่อใช้งาน				
<p style="text-align: center;">คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี</p>					
<p style="text-align: center;">หมายเลขแบบ</p>					

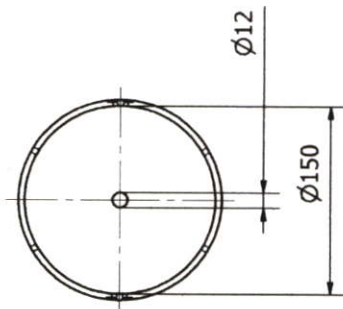
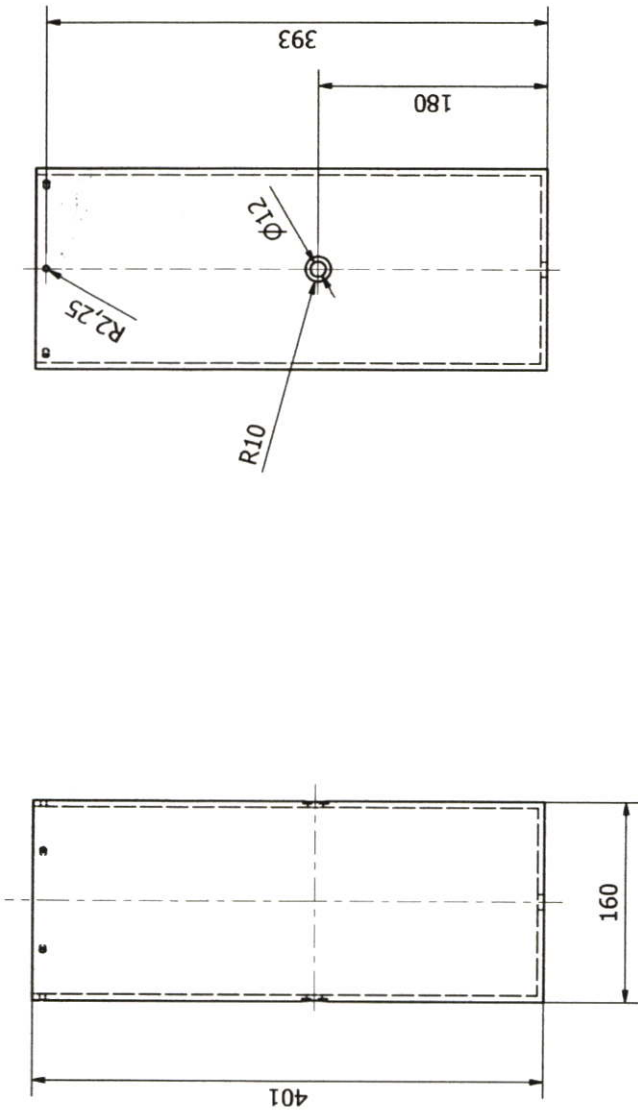
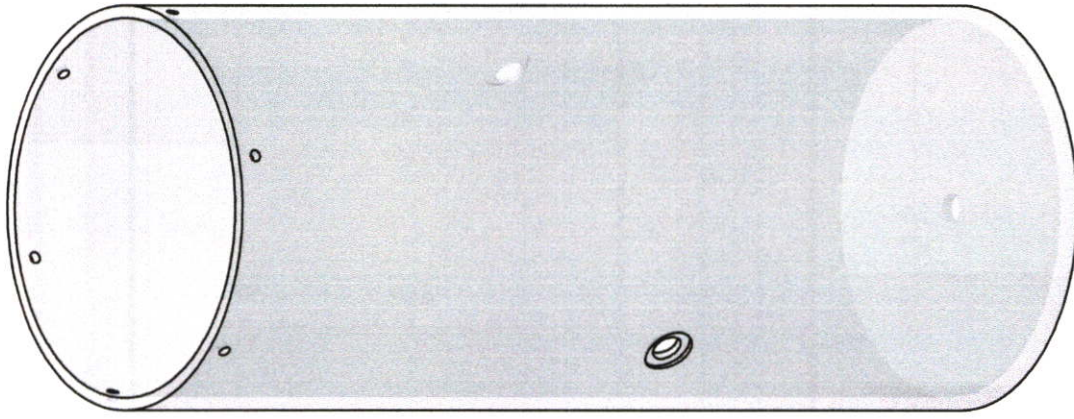




ชื่อบริษัท	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ					
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.บ.					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	
					



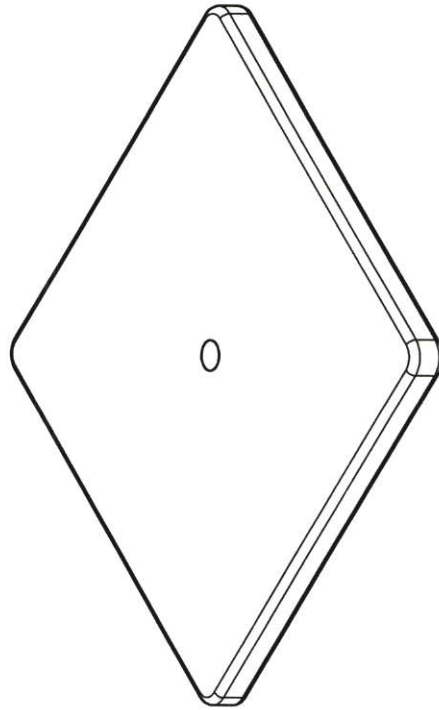
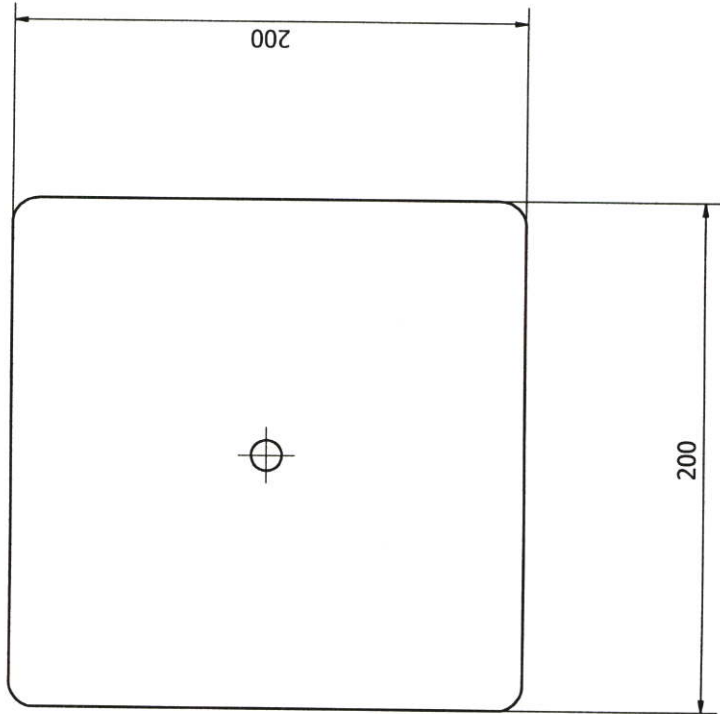
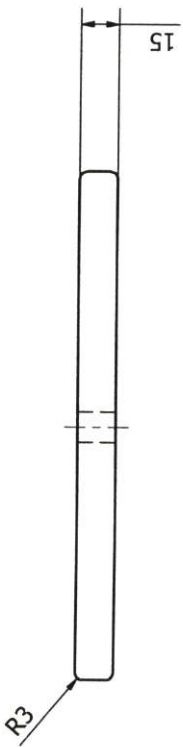
ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุชินธ์				
ผู้ออกแบบ	นายศุภาณี เนตรโพธิ์แก้ว				
ผู้ตรวจ	นายพร้อมศักดิ์ อภิรัตน์กุล				
ผู้ตรวจ ม.ย.	นายพร้อมศักดิ์ อภิรัตน์กุล				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน				
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หมายเหตุแบบ					



ชนิด	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุชินันท์				
ผู้ออกแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุชินันท์				
ผู้ตรวจ	ศ.ดร.มนตรี วัฒนจิตร				
ผู้ตรวจ ม.ย.	ศ.ดร.มนตรี วัฒนจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	

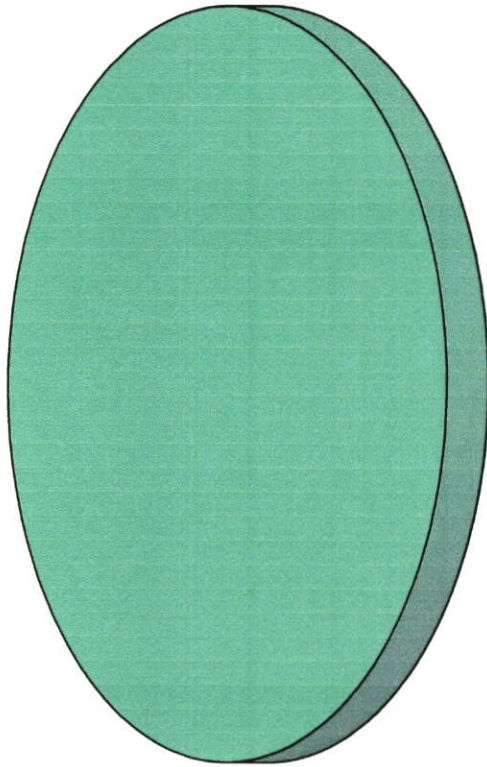
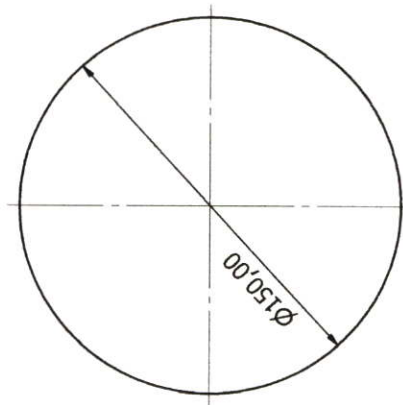
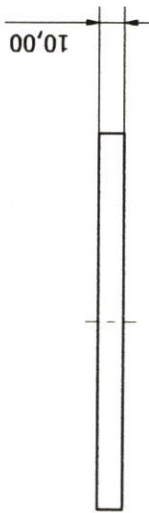
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



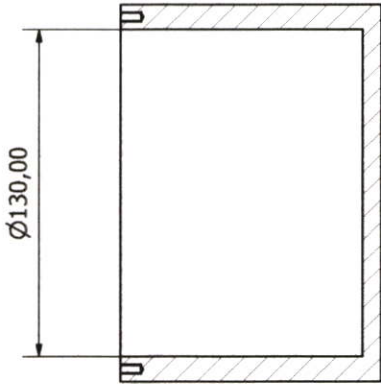


ชื่อ	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุชินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุชินทร์				
ผู้ตรวจ	ศ.ศ.มนต์โรจน์ นวนรินทร์				
ผู้ตรวจล.ม.ช.	ศ.ศ.มนต์โรจน์ นวนรินทร์				
มาตรฐาน	ชื่อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี			
	นางชัญญา	หมายเลขแบบ			

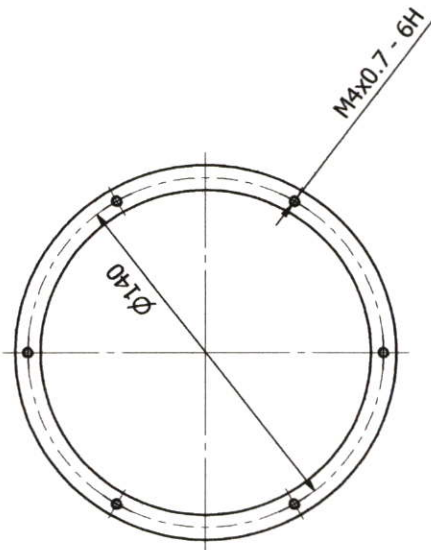
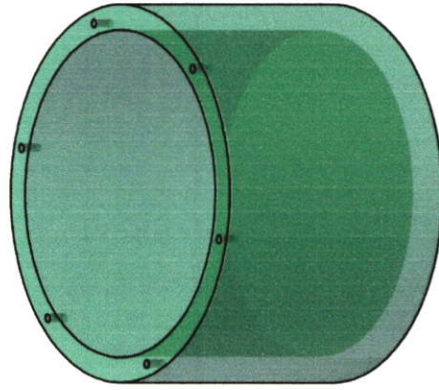
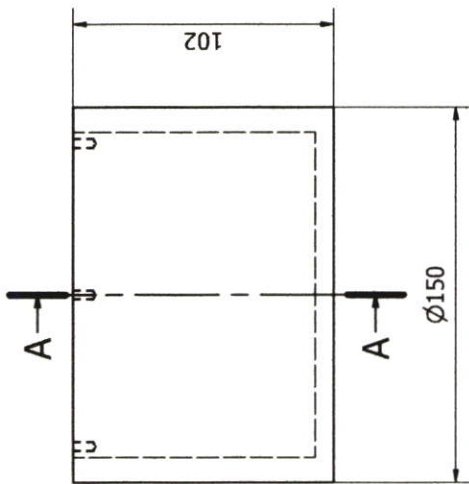






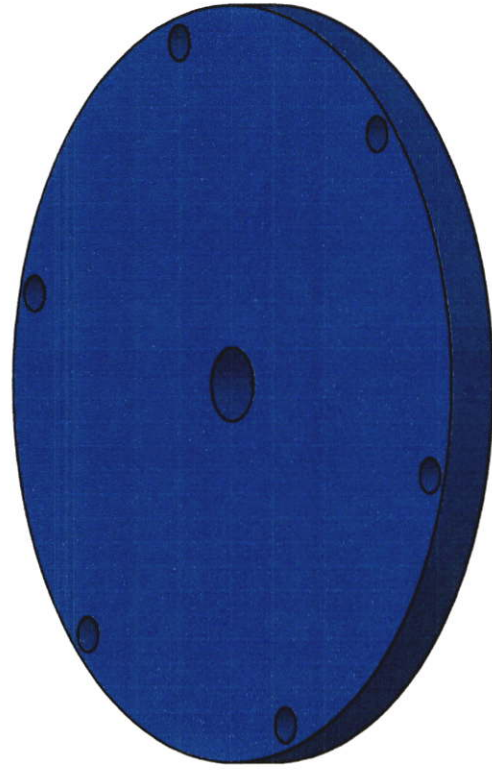
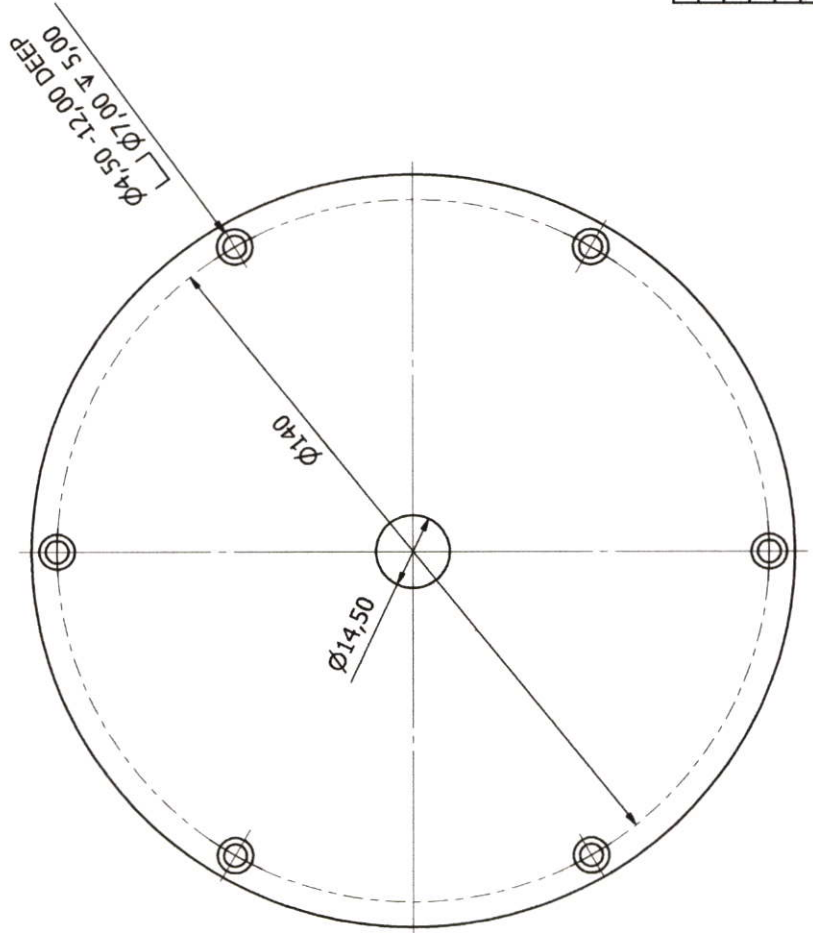
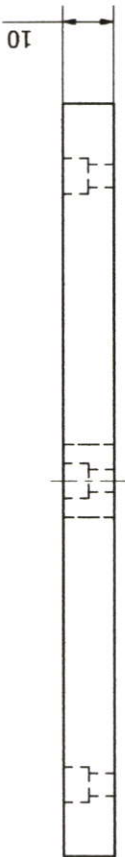
ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายสุวัฒน์ แก้วสุชินธ์				
ผู้ออกแบบ	นายสุวัฒน์ แก้วสุชินธ์				
ผู้ตรวจ	ศศ.มณฑรี นวมจิตร				
ผู้ตรวจ ม.บ.	ศศ.มณฑรี นวมจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	
					 



A-A (1 : 2)



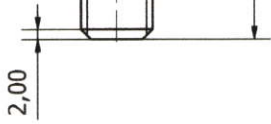
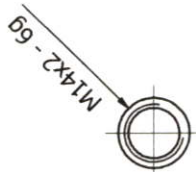
ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุรินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายอัครินทร์ แก้วสุรินทร์				
ผู้ตรวจ	ผศ.มนตรี นวมจิตร				
ผู้ตรวจ ม.ช.	ผศ.มนตรี นวมจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี					
				 	





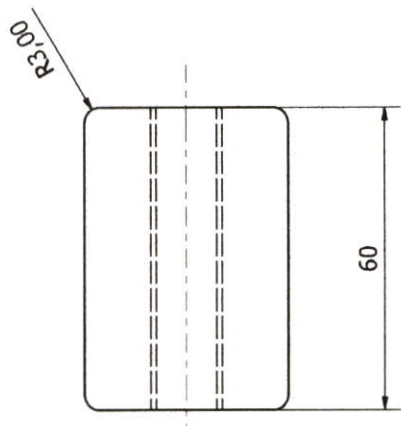
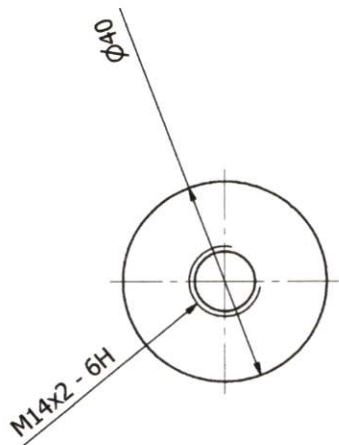
ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัคราน แก้วสุรินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายอัคราน แก้วสุรินทร์				
ผู้ตรวจ	ศศ.มนตรี นวมจิตร				
ผู้ตรวจ ม.ช.	ศศ.มนตรี นวมจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน			หมายเลขแบบ	



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



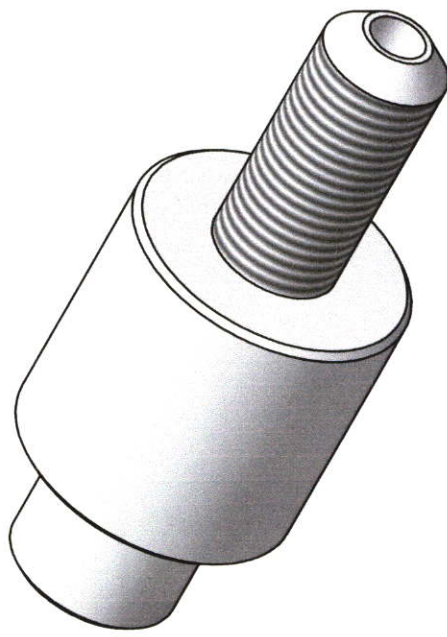
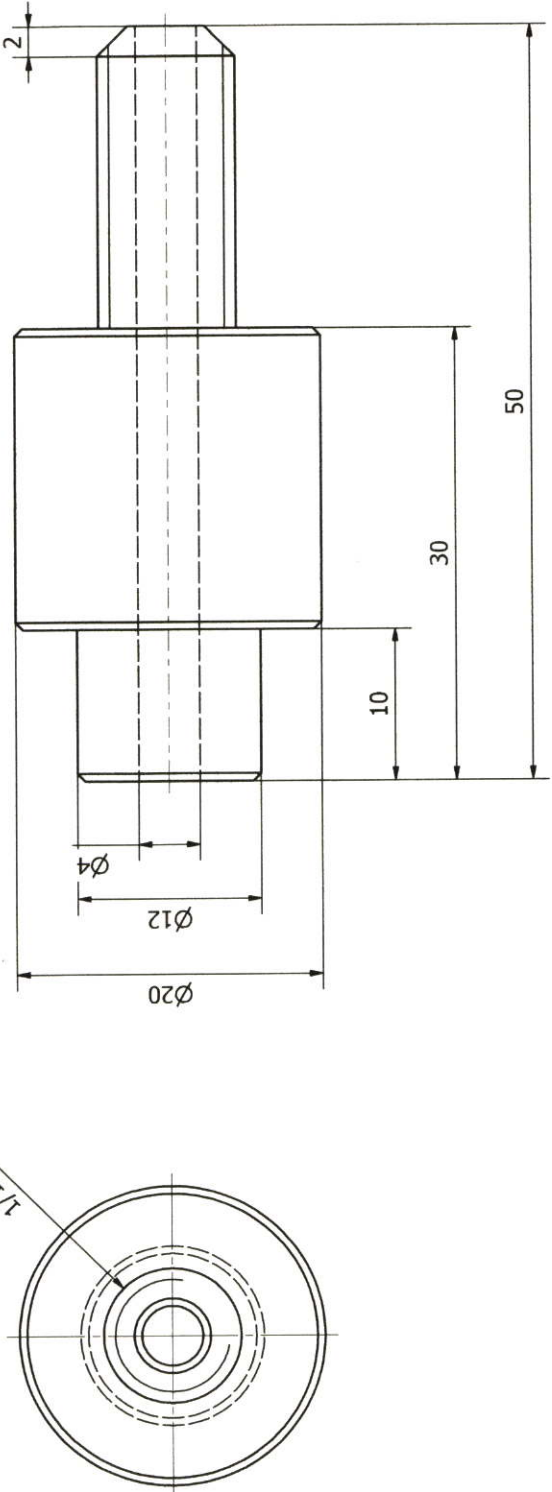


ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ					
ผู้ออกแบบ					
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ ม.ช.					
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	
					 



ชื่อที่	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอัครวิทย์ แก้วสุโขทัย				
ผู้ออกแบบ	นายอัครวิทย์ แก้วสุโขทัย				
ผู้ตรวจ	ศศ.ม.บ.ตรี นวรัตน์				
ผู้ตรวจ ม.ย.	ศศ.ม.บ.ตรี นวรัตน์				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน				
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี					
				หมายเลขแบบ	 

1/16-27 NPT



ชนิด	รายการ	ขนาดวัสดุ	วัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียนแบบ	นายอภิรักษ์ แก้วสุรินทร์				
ผู้ออกแบบ	นายอัศวิน แก้วสุรินทร์				
ผู้ตรวจ	ศส.มนตรี นวมจิตร				
ผู้ตรวจ ม.ช.	ศส.มนตรี นวมจิตร				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		หมายเลขแบบ	
				คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	

ภาคผนวก ก.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
27th Electrical Engineering Conference

Volume I

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ซอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



การศึกษาเครื่องกำเนิดโอโซนด้วยการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ

A Study Ozone Generator With Electric Fields Distribution on Water Surface

ศุภวุฒิ กัมภีรานนท์ ภาควิชา วิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ +66(0)-2549-3569 โทรสาร +66(0)-2549-3422 e-mail: Supawud@thaimail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอเพื่อศึกษาเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน (O_3) โดยศึกษาหลักการออกแบบอิเล็กโทรดในลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (Uniform field) โดยเป็นอิเล็กโทรดแบบระนาบ ศักย์บวก (+) จะหุ้มด้วยฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเพื่อป้องกันการคายประจุสนามไฟฟ้าแรงสูงบริเวณรอบๆอิเล็กโทรดเป็นผลมาจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าไดอิเล็กตริกการคิซซาร์จในช่องว่างอากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาด, ชนิดของไดอิเล็กตริกและที่สำคัญอย่างยิ่งคือ ขนาดแรงดันสูงที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรด โดยงานวิจัยนี้ระหว่างอิเล็กโทรด กับ ช่องว่างอากาศ จะมีไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นฉนวนอะคริลิก และจะใช้แผ่นสแตนเลสมีน้ำหุ้มขานทำหน้าที่เป็นศักย์กราวด์ (-) เพื่อกระจายประจุสนามไฟฟ้าแรงสูงเป็นลักษณะระนาบคิซซาร์จบนผิวน้ำ โดยให้น้ำเปรียบเสมือนเป็นอิเล็กโทรด (-) การเกิดเบรคความจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ทั้งนี้ เมื่อมีการกระจายประจุสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ผิวของอิเล็กโทรดน้ำแล้ว จะพบว่าปริมาณก๊าซโอโซน (O_3) ที่เกิดการไอออไนเซชันหนาแน่น ซึ่งผลงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาออกแบบลักษณะรูปแบบการสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนด้วยวิธีการและเทคโนโลยีใหม่ได้ต่อไป และ เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมีในการบำบัดลงได้

คำสำคัญ: อิเล็กโทรด , สนามไฟฟ้า , ไดอิเล็กตริก , โอโซน , คิซซาร์จ

ABSTRACT

In research this paper present a study and construction design Ozone generator. By study and design electrode surface discharge electric field stress between electrode dielectric air gap using PE. The authors present experimental results obtained using a parallel-plate discharge geometry. The lower electrode consists of a grounded (-) pool of still water separated by a discharge gap from an upper insulated planar electrode (-). When the electrode is energized by an ac and dc high Voltage. The tips of the cones provide points for electrical discharge pulses which initiate ozone generator. This method generators ozone in close proximity to the water surface. Research and study design Ozone generator results has a high density It is found that there

is sufficient amount of ozone due to the ionization this can be used as a principle to construct a new type of ozone generator.. Suitable ratio at used waste water treatment industrial and reduce chemical for at present.

Keyword : Electrode , Electric field , Dielectric , Ozone , Discharge

1. บทนำ

สืบเนื่องจากก๊าซโอโซน (O_3) มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำให้มีความปลอดภัยและบริสุทธิ์เนื่องจากคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ได้ดีกว่าสารเคมีซึ่งมีการใช้ก๊าซโอโซนเพื่อนำมาทำปฏิกิริยากับน้ำที่ต้องการบำบัดกันอย่างแพร่หลายในยุโรปโดยมีการกล่าวถึงรูปแบบของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนหลายประเศ ซึ่งมีหลักการคายประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดกับช่องว่างอากาศโดยมีไดอิเล็กตริกขานมาคายประจุในเชิงระนาบคิซซาร์จแผ่นล่างจะมีกราวด์ซึ่งต่อรวมและจะมีน้ำกับช่องว่างอากาศส่วนด้านบนจะมีหลักการแบบเทอร์รับนพื้นผิวของน้ำการเบรคความของหลักการเทอร์รับนจะขึ้นอยู่กับค่าสนามไฟฟ้าและเมื่อมีการคายประจุไฟฟ้าที่ผิวของน้ำ ก็จะมีกลุ่มก๊าซโอโซน (O_3) เกิดขึ้นอย่างหนาแน่น

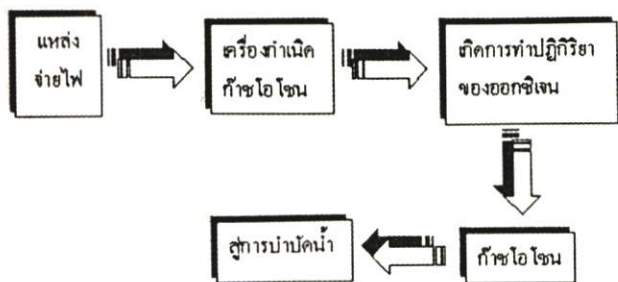
2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 คุณสมบัติของก๊าซโอโซน

ก๊าซโอโซน (O_3) มีคุณสมบัติที่สามารถทำการออกซิไดซ์ทำปฏิกิริยากับแบคทีเรียต่างๆที่อยู่ในน้ำและยังสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำได้โดยการทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารของพืชน้ำทำให้พืชในน้ำหยุดการเจริญเติบโตและตายในที่สุดและคุณสมบัติอีกข้อหนึ่งคือโอโซนสามารถใช้ในการกำจัดสีและกลิ่นสามารถแยกสารแขวนลอยจากน้ำได้ดีโดยกระบวนการทางเคมี

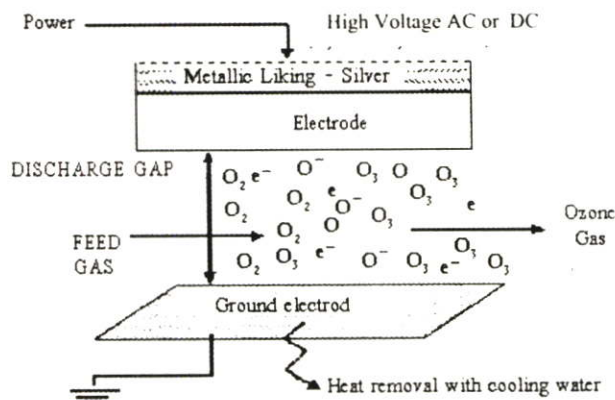
2.2 การสร้างแรงดันสูงพื้นฐานในการผลิตก๊าซโอโซน

โอโซน (O_3) นอกจากเกิดได้ตามธรรมชาติแล้วก็สามารถเกิดได้จากการสร้างแรงดันสูงจากศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับหรือกระแสตรงป้อนให้กับอิเล็กโทรดที่มีไดอิเล็กตริกคั่นอยู่สำหรับในการออกแบบอิเล็กโทรดแผ่นระนาบนั้นมีหลักการลักษณะคล้ายคลึงกับอิเล็กโทรดระนาบปลายแหลมคือใช้หลักการโคโรนาคิซซาร์จแต่ต่างกันตรงที่ว่าอิเล็กโทรดในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะแผ่นระนาบ(กระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอลงบนผิวน้ำ)

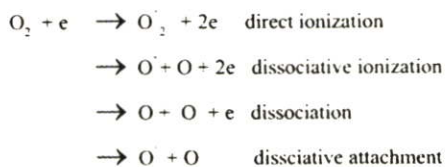


รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบสร้าง

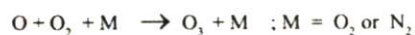
ในการศึกษาเพื่อออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน (O₃) ในหลายวิธี เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าปริมาณก๊าซโอโซน (O₃) ที่พอเหมาะและพอดีกับการนำไปใช้การบำบัดน้ำ, อากาศ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ที่ได้ทำการศึกษาออกแบบ ลักษณะรูปลักษณะของอิเล็กโทรดที่มีค่าเปลี่ยนไป ในลักษณะเชิงเรขาคณิตและศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนไปคือค่าปริมาณก๊าซโอโซนที่ได้จากการทดลอง ทำให้เกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การไอออนในเข้ชั้น เกิดเป็นก๊าซใหม่เรียกว่า ก๊าซโอโซน (O₃)



รูปที่ 2 หลักการกำเนิดก๊าซโอโซนแบบแผ่นระนาบ



Ozone is generated by free radical reaction :



3. การออกแบบและวิเคราะห์

ในการสร้างชุดกำเนิดก๊าซโอโซน (O₃) โดยใช้ไฟฟ้าแรงสูงนั้นสิ่งที่มีความสำคัญคือ ชุดอิเล็กโทรดซึ่งเป็นตัวสร้างความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม (Mathlab 6.0) ในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้า

ในการหาค่าสนามไฟฟ้าที่มีจำนวนชั้น 3 ชั้นซึ่งมีจำนวนชั้นที่ 1 เป็นน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_1) เท่ากับ 2.2 และชั้นที่ 2 จะเป็นแผ่นพลาสติกชนิดอะคริลิกซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_2) เท่ากับ 2 และจำนวนชั้นที่ 3 จะเป็นฉนวนอากาศซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_3) เท่ากับ 1 (ค่าเปอร์มิตติวิตี มาจาก ตารางที่ 6.1 หน้า 6-9 วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คร. ตำราวย สังข์สะอาด) ซึ่งผลการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม (Matlab 6.0) ดังรูปที่ 3-5 แสดงการกระจายสนามไฟฟ้า โดยแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 40 kV ที่ชุดอิเล็กโทรด จากลักษณะการวางของฉนวนในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามีคาปาซิเตอร์ต่อกันดังนั้น ประจวบ คาปาซิเตอร์แต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากัน คือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3 \quad (1)$$

เมื่อ C_1 , C_2 และ C_3 เป็นคาปาซิเตอร์ของฉนวนแต่ละชั้นที่มี ϵ_1 , ϵ_2 และ ϵ_3 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 A}{d_1} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 A}{d_2} \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_3 A}{d_3} \quad (4)$$

ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้น คือ

$$E_{1(Oil)} = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U_1}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (5)$$

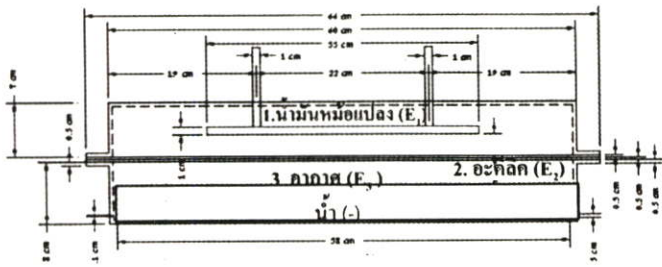
$$E_{1(Oil)} = \frac{U_1}{d} \cdot \frac{\epsilon_2 \epsilon_1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1\right) + 1}$$

$$E_{2(PE)} = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U_2}{d_1} \cdot \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (6)$$

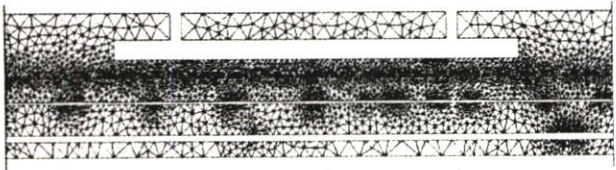
$$E_{(2)PE} = \frac{U_2}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1\right) + 1}$$

$$E_{3(Air)} = \frac{U_3}{d_3} = \frac{U_3}{d_1} \cdot \frac{\epsilon_2 \epsilon_3}{\left(1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \cdot \frac{d_3}{d_2}\right)} \quad (7)$$

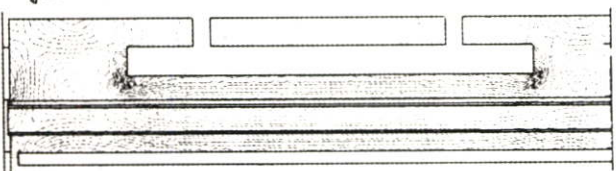
$$E_{3(Air)} = \frac{U_3}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} - 1\right) + 1}$$



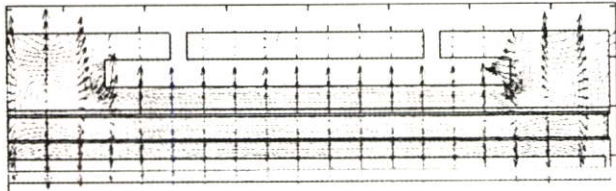
รูปที่ 3 ลักษณะอเนกโทรดและตำแหน่งชั้นไดอิเล็กตริกต่างๆ



รูปที่ 4 แสดงจำนวน Node element ที่ทำการวิเคราะห์ (Mathlab 6.0)



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการวิเคราะห์ Electric field force line (Mathlab 6.0)



รูปที่ 6 แสดงลักษณะวิเคราะห์การกระจายของ Electric field (Mathlab 6.0)

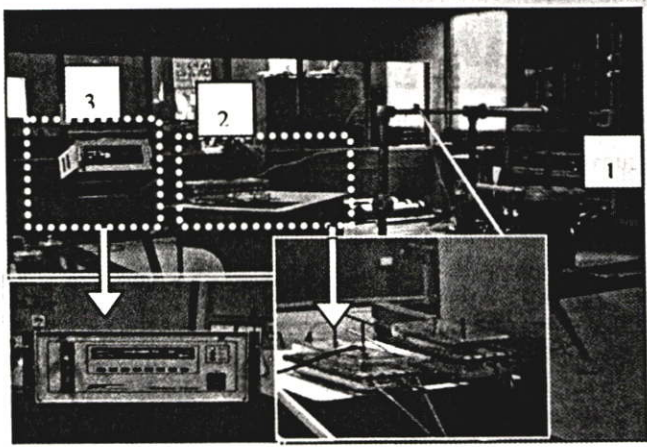
ตารางที่ 1 สรุปค่าสนามไฟฟ้าของฉนวนแต่ละชั้นในระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม (Mathlab 6.0)

U_{RMS} (kV.)	d_{OIL} (cm.)	d_{PE} (cm.)	d_{AIR} (cm)	E_{OIL} (kV/cm.)	E_{PE} (kV/cm.)	E_{AIR} (kV/cm)
$10\sqrt{2}$	1.5	0.5	1	5.61	2.80	2.54
$20\sqrt{2}$	1.5	0.5	1	11.22	5.60	5.08
$30\sqrt{2}$	1.5	0.5	1	16.84	8.40	7.63
$40\sqrt{2}$	1.5	0.5	1	22.45	11.20	10.17

สรุปค่า

- d_{OIL} คือ ระยะของอเนกโทรดในชั้นฉนวนน้ำมันในไดอิเล็กตริก (cm)
- d_{PE} คือ ความหนาของชั้นฉนวนแผ่นอะคิลิกที่คั่นในไดอิเล็กตริก (cm)
- d_{AIR} คือ ช่องว่างของอากาศที่คั่นในไดอิเล็กตริก (cm)
- E_{OIL} คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นชั้นฉนวนน้ำมันในไดอิเล็กตริก (kV/cm) ที่ระดับแรงดันต่างๆ
- E_{PE} คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นชั้นฉนวนอะคิลิกในไดอิเล็กตริก

(kV/cm) ที่ระดับแรงดันต่างๆ
 E_{AIR} คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศในไดอิเล็กตริก
 (kV/cm) ที่ระดับแรงดันต่างๆ



รูปที่ 7 ชุดอเนกโทรดเมื่อประกอบเพื่อทำการทดสอบ

จากรูปที่ 7 ส่วนหมายเลขที่ 1 คือ หม้อแปลงแรงสูงกระแสสลับ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ 40 kV ส่วนหมายเลขที่ 2 คือ ชุดอเนกโทรดที่ทำการทดสอบ ส่วนหมายเลขที่ 3 คือ เครื่องมือวัดความเข้มข้นของก๊าซไอโซนในหน่วย PPM (Part per Million) Teledyne API Model 450H O₃ Monitor

4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

การทดสอบชุดอเนกโทรดกำเนิดก๊าซไอโซนโดยหลักการกระจายสนามไฟฟ้าบนผิวน้ำ โดยมีวิธีการวิเคราะห์ คือ การวัดวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของก๊าซไอโซน ของ Teledyne API Model 450H O₃ Monitor ผลการวัดวิเคราะห์ สรุปได้ดังนี้

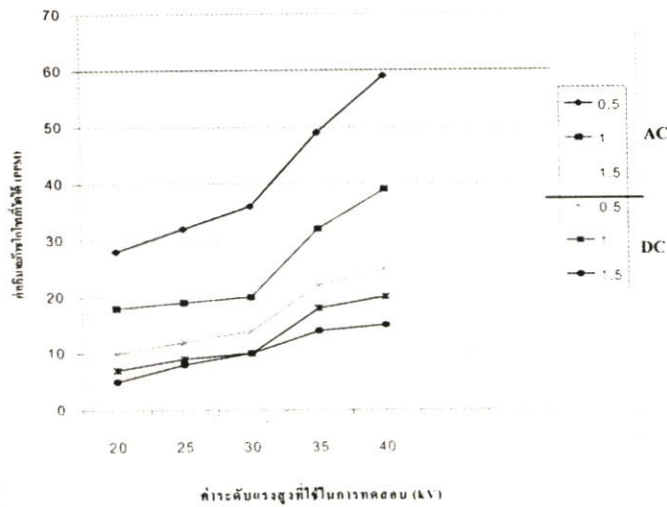
ตารางที่ 2 ผลการวัดปริมาณก๊าซไอโซนที่เกิดขึ้นจากชุดอเนกโทรด โดยปรับระดับเฉพาะในไดอิเล็กตริกฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่แรงดัน 2 ชนิด (AC,DC) ปรับที่ระยะ 3 ระดับ (cm)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ (kV.)	ปริมาณก๊าซไอโซนที่เกิดขึ้นจากการวัด (PPM.)						เวลาที่ใช้ในการวัด/ครั้ง (นาที)
	การทดสอบแรงดัน AC.			การทดสอบแรงดัน DC.			
	การปรับระยะของอเนกโทรด (cm) ที่ระดับไดอิเล็กตริกน้ำมัน			การปรับระยะของอเนกโทรด (cm) ที่ระดับไดอิเล็กตริกน้ำมัน			
10√2	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	5
20√2	32	19	12	12	9	8	5
30√2	36	20	14	14	10	10	5
40√2	49	32	19	22	18	14	5
40√2	59	39	20	25	20	15	5



รูปที่ 8 ตัวอย่างการแสดงผลการวัดปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดสูงสุดจากโปรแกรมของเครื่องมือวัดก๊าซโอโซน Teledyne API Model 450H O₃ Monitor

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซโอโซน ระหว่าง ระยะอิเล็กโทรดกับ แรงดันสูงที่ใช้ทดสอบ อิเล็กโทรดระนาบ



5. บทสรุป

จากการออกแบบและศึกษาการวิเคราะห์ผลลักษณะของชุดอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงจากการใช้วิธีเดิมที่ใช้การออกแบบลักษณะทรงกระบอกซ้อนกันมาเป็นลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในรูปของอิเล็กโทรดแผ่นระนาบ ซึ่งผลที่ได้เป็นลักษณะเชิงวิจัยศึกษาเท่านั้น แต่งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยศึกษาการกำเนิดก๊าซโอโซนลักษณะใหม่ และหากการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป ผลของก๊าซโอโซนที่ใช้หลักการกระจายสนามไฟฟ้าแรงสูงบนผิวน้ำก็จะเป็นอีกแนวหนึ่งที่สามารถทำให้ก๊าซโอโซนที่ได้จากงานวิจัยทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับน้ำที่ต้องการบำบัด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หอปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและบุคลากรช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยด้วยดี และขอขอบพระคุณ รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ และรศ.จงรักษ์ บุญเส็ง ที่ให้คำปรึกษาแนะนำอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยด้วยดีเสมอมา

7. เอกสารอ้างอิง

[1]. ส้ารวบ สังข์สะอาด,วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรม

ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

[2.] พร้อมศักดิ์ อภริตกุล,จงรักษ์ บุญเส็ง "เครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนเพื่อการบำบัดน้ำเสีย"ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
 [3.] 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
 [4] James A. Robinson, Maurice A. Bergougnou ,William L. Cairns, G. S. Peter Castle, Follow, IEEE, "A New Type of Ozone Generator Using Taylor Cones on Water Surfaces",IEEE,1998,pp.1218-1223

8. ประวัติผู้เขียนบทความ



ศุภวุฒิ คัมภีรานนท์ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมไฟฟ้าไฟฟ้ากำลัง) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลปี2541ปัจจุบันเป็น นักศึกษา ระดับปริญญาโท (วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ ด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พลังงานทดแทน



ประภาส ไพรสุวรรณ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี(วศ.บ.)และปริญญาโท(วศ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้า จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ.2524 และ2527 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. อดีตหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. สาขางานวิจัย ด้านการแปรรูปพลังงาน,อิเล็กทรออนิกส์กำลัง

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล** นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว
- วันเดือนปีเกิด** 16 ธันวาคม พ.ศ. 2519 ที่ กรุงเทพมหานคร
- ที่อยู่** 30/2 หมู่ 2 ตำบลท่าตำหนัก อำเภอ นครชัยศรี
จังหวัดนครปฐม โทร 034-333-389 โทร 0-1658-7153
- ประวัติการศึกษา** 2539 สำเร็จการศึกษา ประกาศนียบัตรชั้นสูง ช่างไฟฟ้ากำลัง
แผนกช่างไฟฟ้ากำลัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ
2541 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลอง 6 อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี
2544 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง) จนถึงปัจจุบัน
- ความชำนาญเฉพาะด้าน**
- 1) งานด้านออกแบบระบบไฟฟ้าแรงสูง-แรงต่ำ
 - 2) งานวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูง
 - 3) งานวิจัยด้านพลังงานทดแทน
 - 4) งานควบคุมดูแลระบบไฟฟ้าแรงสูง-แรงต่ำ ของ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลอง 6 ปทุมธานี
 - 5) งานด้านอนุรักษ์พลังงานและประหยัดพลังงาน