

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน  
CORONA CELL FOR OZONE GENERATOR



โดย  
นายหิรัญ ดวงอุไร  
นายอดิศักดิ์ หิรัญยานุรักษ์  
นางสาวอักรินทร์ บุญคง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2542

เลขหมึก.....  
เลขทะเบียน..... 37017  
วัน, เดือน, ปี..... ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
หากมีการคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมายและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2542

ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน  
CORONA CELL FOR OZONE GENERATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน

ผู้จัดทำ

- |                    |                |          |
|--------------------|----------------|----------|
| 1. นายหิรัญ        | ดวงอุไร        | 39014637 |
| 2. นายอดิศักดิ์    | หิรัณยานุรักษ์ | 39014639 |
| 3. นางสาวอัครินทร์ | บุญคง          | 39014665 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ศิริวัฒน์ โพลีเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน

นายหิรัญ ดวงอุไร

นายอดิศักดิ์ หิรัญยานุรักษ์

นางสาวอักรินทร์ บุญคง

รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ปีการศึกษา 2542

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการออกแบบและการพัฒนาชุดสร้างโคโรนาเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดโอโซน โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงออกแบบมิติของชุดสร้างโคโรนาที่เหมาะสมและใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าและใช้พิจารณาแนวโน้มการเกิดโอโซนของชุดสร้างโคโรนา โดยต้องอาศัยโปรแกรมปาสคาล(Pascal) และแมทแลป(Matlab) ช่วยในการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าของชุดสร้างโคโรนาตามทีออกแบบไว้ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น ได้แก่ จำนวนชั้นของฉนวน ชนิดของฉนวน ความหนาของชั้นฉนวน ก๊าซ ชนิดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขนาดความยาวของชุดสร้างโคโรนา ลักษณะของแกนอิเล็กโตรด อุณหภูมิและความชื้น

ข้อมูลที่ได้จะสามารถนำมาสรุปผลเพื่อปรับปรุงความสามารถในการผลิตโอโซนของชุดสร้างโคโรนา โดยเครื่องกำเนิดโอโซนในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ผลิตได้สูงสุดประมาณ 3,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งก๊าซโอโซนที่ได้มีปริมาณมากพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมในอนาคต

## CORONA CELL FOR OZONE GENERATOR

Hirun Duangurai  
Adisak Hirunyanulux  
Akarin Boonkong  
Asso.Prof. Siriwat Pothivejkul  
Semester 1999

### Abstract

This thesis demonstrates the procedures of corona-cell design and development for composing it to be ozone generator. The optimum dimension of corona cell can be describes from high voltage theory. From using Finite Element , Pascal and Matlab , we can obtain the electrical field values and the distribution of electrical field use them to determine the possibility of ozone generation. We use corona cell for finding the factors that related to ozone generation such as temperature , humidity , electrical source type , length of corona cell , inner electrode type , insulation type , the number of insulation layer and gas insulation thickness.

The obtained data can be used for developing the ozone generator performance and the ozone generator from this thesis can generate ozone about 3,000 mg/hr that can be applied for water treatment in the industrial processes in the future.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับไอโซนและระบบบำบัดน้ำ.....	3
2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับไอโซน.....	3
2.1.2 ผลของไอโซนต่อสารต่างๆที่มีอยู่ในน้ำ.....	4
2.1.2.1 สิ่งมีชีวิตเล็กๆ(Micro organisms).....	4
2.1.2.2 กำจัดเหล็ก(de-ironising).....	5
2.1.2.3 กำจัดแมงกานีส(de-manganising).....	5
2.1.2.4 ออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์(Organic compounds).....	5
2.1.3 การใช้งานของก๊าซไอโซน.....	6
2.1.3.1 ผลิตน้ำดื่ม.....	6
2.1.3.2 ระบายน้ำ.....	7
2.1.3.3 การบำบัดน้ำเสีย.....	7
2.1.3.4 ผลิตน้ำโซดา.....	7
2.1.3.5 บ่อเลี้ยงปลา.....	7
2.1.3.6 กรองอากาศ.....	7
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซไอโซน.....	10
2.2.1 การหาค่าพลังงานและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซน.....	10
2.2.2 วัสดุลักษณะอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดที่มีผลต่อสนามไฟฟ้า.....	11
2.2.2.1 ทรงกลมเดี่ยวในอากาศ.....	13

2.2.2.2	ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม.....	14
2.2.2.3	มิติที่เหมาะสม.....	14
2.2.3	ผลของแผ่นฉนวนบางคั่นที่มีผลต่อการเกิดโอโซน.....	15
2.3	ทฤษฎีของไฟไนต์อิลิเมนต์(Finite Element Method, FEM) ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า.....	15
2.3.1	การแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นอิลิเมนต์(Element).....	15
2.3.2	การหาสมการของแต่ละอิลิเมนต์.....	16
2.3.3	การรวบรวมอิลิเมนต์เป็นขอบเขตปัญหาดังเดิม.....	18
2.3.4	การแก้ระบบสมการเพื่อหาผลลัพธ์.....	20
2.4	วิธีการวัดปริมาณ โอโซน.....	20
2.4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
2.4.2	สารเคมีและการเตรียมสารเคมี.....	21
2.4.3	กระบวนการเตรียมสารเคมี.....	22
บทที่ 3	การออกแบบชุดสร้างโคโรนาเบื้องต้น.....	24
3.1	ลักษณะเบื้องต้นของชุดสร้างโคโรนา.....	24
3.2	การหาค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้า.....	25
3.2.1	ฉนวน พีวีซี.....	26
3.2.2	ฉนวน ไมก้า.....	26
3.3	สรุปการออกแบบเบื้องต้นของชุดสร้างโคโรนา.....	27
3.4	การใช้งานโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ในการออกแบบ.....	28
3.4.1	การใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น.....	29
3.4.2	การนำค่าไปวิเคราะห์.....	30
3.4.3	การนำค่าไปplotต่อเพื่อพิจารณา.....	31
บทที่ 4	การทดลองและการพัฒนาชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน.....	34
4.1	การทดลองที่1 ศึกษาผลของปริมาณโอโซนที่เกิดจากฉนวนชั้นเดียวและฉนวนสองชั้นของชุดสร้างโคโรนา.....	34
4.1.1	ฉนวนชั้นเดียว(อากาศ).....	34
4.1.2	ฉนวนสองชั้น(ไมก้า+อากาศ)ความช่องว่างอากาศ 1.4 mm.....	35
4.2	การทดลองที่2 ศึกษาความกว้างของช่องว่างอากาศที่มีผลต่อปริมาณโอโซน.....	38

4.3 การทดลองที่3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีค่าความคงทนสนามต่างกันซึ่งมีผลต่อปริมาณไอโซน.....	40
4.4 การทดลองที่4 ศึกษาชนิดของแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณไอโซน.....	43
4.5 การทดลองที่5 ศึกษาความยาวชุดสร้างโคโรนาที่มีผลต่อปริมาณไอโซน.....	45
4.5.1 ชุดสร้างโคโรนาความยาว 10 เซนติเมตร.....	45
4.5.2 ชุดสร้างโคโรนาความยาว 20 เซนติเมตร.....	46
4.6 การทดลองที่6 ศึกษาชนิดของตัวนำแกนในของชุดสร้างโคโรนาที่เป็นเส้นลวดซึ่งมีผลต่อปริมาณไอโซน.....	48
4.7 การทดลองที่7 ศึกษาชนิดของตัวนำแกนในของชุดสร้างโคโรนาที่เป็นฝอยแสตนเลสซึ่งมีผลต่อปริมาณไอโซน.....	50
4.8 การทดลองที่8 ศึกษาอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อปริมาณไอโซน.....	52
4.9 การทดลองที่9 ศึกษาความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมีผลต่อปริมาณไอโซน.....	54
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์.....	56
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
2.1 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน.....	10
2.2 คุณสมบัติสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโตรดต่างกัน.....	13
2.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง $v_b$ และ $E_{r1}$ ในเทอมของ $r_1$ เมื่อกำหนดให้ $r_2$ คงที่.....	15
2.4 การวิเคราะห์ปัญหาด้วย Finite Element Method (FEM).....	16
2.5 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวัดปริมาณไอโซน.....	21
2.6 ขั้นตอนแรกของการวัดปริมาณไอโซน.....	23
2.7 สีของโปรคัสเซียมไอโอไดด์ที่เปลี่ยนไป.....	23
3.1 ลักษณะของของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	24
3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า.....	24
3.3 ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	25
3.4 เครื่องวัดค่าคาปาซิเตอร์ของ Tettex AG 2805.....	25
3.5 การต่อวงจรเพื่อวัดค่าคาปาซิแตนซ์ Cx.....	26
3.6 แสดงมิติของฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าความคงทนสนามไฟฟ้า.....	26
3.7 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาแบบมีฉนวนไฟฟ้าและไม่มีฉนวนไฟฟ้า.....	28
3.8 แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาที่จะสร้างมาทดสอบ.....	28
3.9 โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ยังไม่ได้กรอกค่า.....	28
3.10 ตัวอย่างของการตีกริตแบ่งอิเล็กโตรด.....	30
3.11 โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์หลังจากคำนวณค่าเสร็จสิ้น.....	31
3.12 แสดงการกระจายค่าศักดาไฟฟ้าภายในชุดสร้างโคโรนา.....	32
3.13 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในชุดสร้างโคโรนาฉนวนชั้นเดียวและฉนวนสองชั้น.....	33
4.1 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาสำหรับฉนวนชั้นเดียว.....	34
4.2 แสดงปริมาณไอโซนของฉนวนชั้นเดียว(อากาศ) ,AC ช่องว่างอากาศกว้าง 4.4 mm.....	35
4.3 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาสำหรับฉนวนสองชั้น(ไม้ก้ำ+อากาศ).....	35
4.4 แสดงปริมาณไอโซนของฉนวน 2 ชั้น (ไม้ก้ำ+อากาศ) , AC gap 1.4mm.....	37

เอกสาร 4.5 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไอโซนของชุดสร้างโคโรนาฉนวนชั้นเดียวและสองชั้น.....37

ไม่ว่า 4.6 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาสำหรับความกว้างช่องว่างอากาศ 2.44 mm.....38

4.7	แสดงปริมาณ โอโซนของฉนวน 2 ชั้น(PVC+อากาศ) ช่องว่างอากาศกว้าง2.4 mm.....	39
4.8	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่ความกว้างของช่องว่างอากาศต่างกัน.....	39
4.9	แสดงลักษณะของฉนวนพีวีซีและไม้ก้ำ.....	40
4.10	แสดงลักษณะของฉนวน ไฟฟ้าที่มีค่าความคงทนสนาม ไฟฟ้าต่างกัน.....	40
4.11	แสดงปริมาณ โอโซนที่ได้จากชุดสร้างโคโรนาที่มีฉนวน ไฟฟ้าเป็นพีวีซี.....	41
4.12	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่ได้จากฉนวน ไฟฟ้าที่มีลักษณะต่างกัน.....	42
4.13	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-330 kV <sub>DC</sub> .....	43
4.14	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 0-100 kV(rms).....	43
4.15	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	44
4.16	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่ได้จากการใช้แรงดัน ไฟฟ้าต่างชนิดกัน.....	44
4.17	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว10เซนติเมตร.....	45
4.18	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว20เซนติเมตร.....	46
4.19	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีความยาวต่างกัน.....	47
4.20	แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนเป็นเส้นลวดแสดคนเลดเส้นเดียว.....	48
4.21	แสดงปริมาณที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีแกนกลางเป็นเส้นลวดแสดคนเลดเส้นเดียว.....	49
4.22	แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาที่มีแกนกลางเป็นฝอยแสดคนเลด.....	50
4.23	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนกลางเป็นฝอยแสดคนเลด.....	51
4.24	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิ29องศาเซลเซียส.....	52
4.25	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิ32องศาเซลเซียส.....	53
4.26	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิต่างกัน.....	53
4.27	แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีสารดูดความชื้น(ซิลิกาเจล).....	54
4.28	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนจากชุดสร้างโคโรนาที่มีและ ไม่มีสารดูดความชื้น.....	55
5.1	แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาที่พัฒนาแล้ว.....	56
5.2	ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนที่พัฒนาแล้ว.....	57

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลเฉพาะของไอโซน.....	3
2.2 ข้อมูลการกำจัดสิ่งมีชีวิตเล็กๆของไอโซนเทียบกับคลอรีน.....	5
2.3 ข้อมูลแสดงผลของไอโซนต่อสารต่างๆ.....	6
2.4 ข้อมูลปริมาณการใช้ไอโซนในลักษณะต่างๆ.....	8
2.5 ข้อมูลระดับไอโซนและผลที่เกิดขึ้น.....	8
2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ ไอโซนกับคลอรีน.....	9
4.1.1 แสดงปริมาณ ไอโซนของฉนวนชั้นเดียว(อากาศ) ,AC ช่องว่างอากาศกว้าง 4.4 mm.....	35
4.1.2 แสดงปริมาณ ไอโซนของฉนวน 2 ชั้น (ไม้ก้ำ+อากาศ) , AC gap 1.4 mm.....	36
4.2 แสดงปริมาณ ไอโซนของฉนวน 2 ชั้น(PVC+อากาศ) ,ช่องว่างอากาศกว้าง2.4 mm.....	38
4.3 แสดงปริมาณ ไอโซนที่ได้จากชุดสร้างโคโรนาที่มีฉนวนไฟฟ้าเป็นพีวีซี.....	41
4.4 แสดงปริมาณ ไอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	44
4.5.1 แสดงปริมาณ ไอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว10เซนติเมตร.....	45
4.5.2 แสดงปริมาณ ไอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว20เซนติเมตร.....	46
4.6 แสดงปริมาณที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีแกนกลางเป็นเส้นลวดแสดงตนเลขเส้นเดียว.....	48
4.7 แสดงปริมาณ ไอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนกลางเป็นฝอยแสดงตนเลข.....	50
4.8 แสดงปริมาณ ไอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิ29องศาเซลเซียส.....	52
4.9 แสดงปริมาณ ไอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีสารดูดความชื้น(ซิลิกาเจล).....	54
5.1 การเปรียบเทียบชุดสร้างโคโรนา.....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

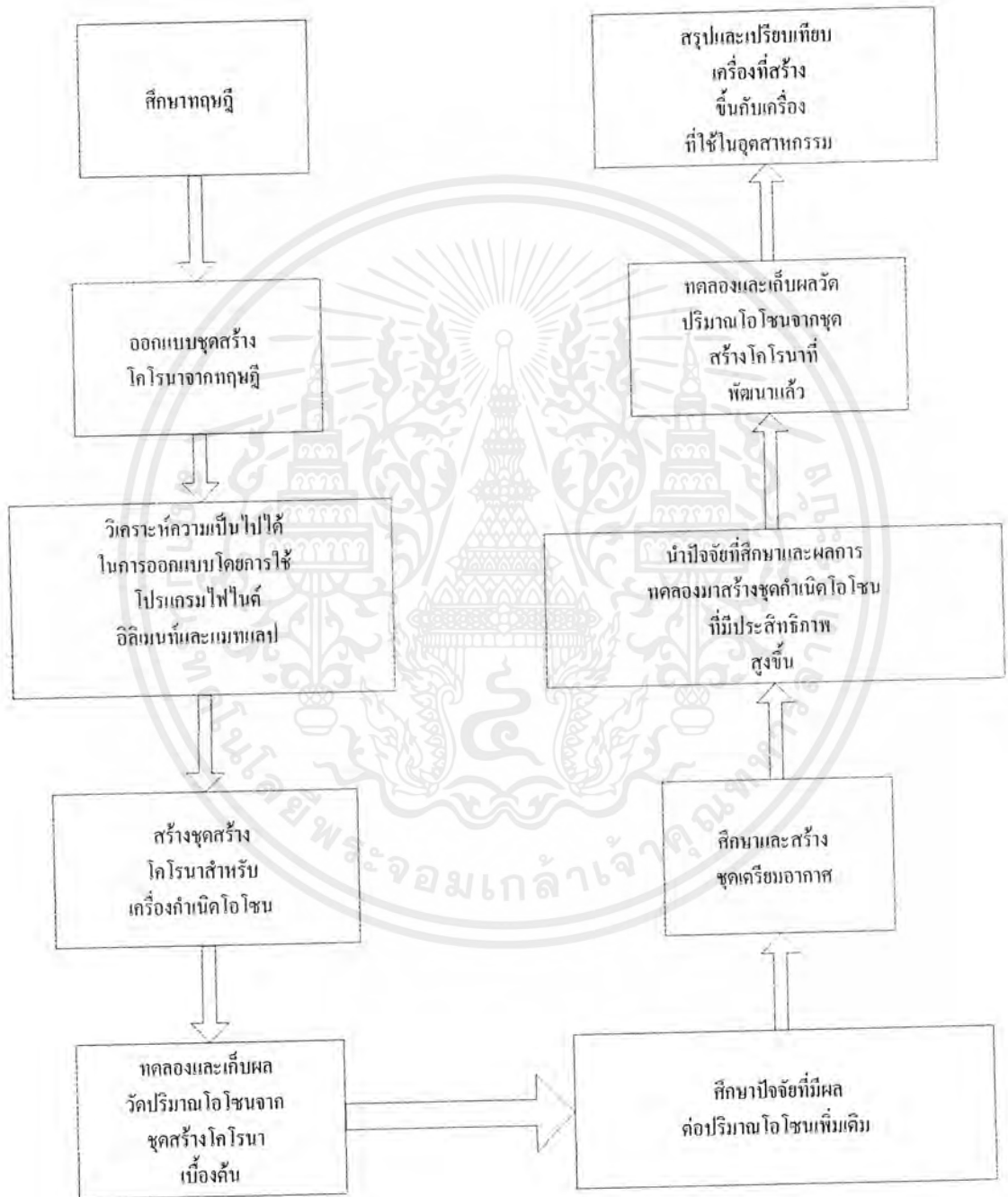
### 1.1 บทนำ

ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ถูกกล่าวถึงมากในปัจจุบันเนื่องจากเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติพิเศษในการออกซิไดส์(Oxidation) จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทั้งในครัวเรือน เช่น นำไปใช้สลายสารพิษในผัก ผลไม้และเนื้อสัตว์ ทำความสะอาดภาชนะต่างๆ ฟอกอากาศภายในบ้านหรือรถเพื่อขจัดเชื้อโรค ควันบุหรี ใช้ในการเสริมความงามโดยการอบผิวหรือใช้ในทางอุตสาหกรรมซึ่งโดยส่วนใหญ่จะนำไปบำบัดน้ำเสียในโรงงาน

โอโซนจะมีข้อดีกว่าสารอื่นๆที่ใช้งาน คือ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างจึงมีแนวคิดที่จะสร้างชุดกำเนิดโอโซนที่มีประสิทธิภาพที่ดี โดยศึกษาจากปัจจัยเบื้องต้นจากหลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในการออกแบบพร้อมก็นำแบบเบื้องต้น ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม แล้วทดลองสร้างชุดสร้างโคโรนาเพื่อทดลองเก็บผลวัดปริมาณโอโซน และศึกษาปัจจัยต่างๆที่คาดว่าจะมีผลต่อปริมาณการเกิดโอโซน ดังแสดงในขั้นตอนการดำเนินงาน โครงการงานในรูปที่ 1.1

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

1. เพื่อศึกษาและเข้าใจคุณสมบัติพื้นฐานของกระบวนการเกิดโอโซน โดยใช้ปรากฏการณ์โคโรนารวมทั้งออกแบบโคโรนาเซลล์
2. สามารถทดลองสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนได้ตามขั้นตอนการออกแบบ
3. เพื่อเป็นแนวทางให้กับผู้ที่ต้องการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับโอโซนและระบบบำบัดน้ำ

##### 2.1.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับโอโซน

โอโซน (Ozone) เป็นก๊าซที่เกิดจากก๊าซออกซิเจนแตกเป็นอะตอมของออกซิเจน แล้วอะตอมของออกซิเจนจะไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนเป็นโอโซน มีจุดเดือด  $-115^{\circ}\text{C}$  จุดหลอมเหลว  $-192^{\circ}\text{C}$  เป็นก๊าซที่มีสีน้ำเงิน

- โอโซนมีรากศัพท์จากภาษากรีก คือ โอเซอิน (Ozein) แปลว่า กลิ่นจืด (Smelling)
- โอโซนเป็นก๊าซที่ต้องใช้งานทันที จะไม่มีการเก็บไว้ใช้งาน เนื่องจากสลายตัวได้ง่ายซึ่งปัจจัยในการสลายตัวขึ้นกับ

1. ความหนาแน่น (Concentration)
2. อุณหภูมิ (Temperature)
3. ความบริสุทธิ์ของอากาศ (Purity of air) จากฝุ่นและความชื้น (Humidity)

- โอโซนเป็นหนึ่งในสารที่มีความสามารถในการออกซิไดส์สูงสุด จะเป็นรองเพียง  $\text{F}_2$  และอนุมูลอิสระบางตัว โอโซนมีค่าความสามารถในการออกซิไดส์ (Oxidation potential)  $E_0 = 2.7 \text{ V}$  โดย  $\text{F}_2$  มีค่า  $E_0 = 3.3 \text{ V}$ ,  $\text{HCl} = 1.49 \text{ V}$ ,  $\text{Cl}_2 = 1.36 \text{ V}$
- โอโซนมีความสามารถในการละลายน้ำดีกว่าออกซิเจน 20 เท่า

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเฉพาะของโอโซนจาก [1]

Section	Detail	
1. Product Identification	Product Name	OZONE
	Synonyms	Activated Oxygen , Triatomic Oxygen
	Chemical Family	Oxidizer
	Molecular Formula	$\text{O}_3$
	Molecular Weight	48
2. Hazardous Ingredients	Component	Ozone Gas
	Concentration	0-4 % by weight

3. Health Hazard Data	Permissible Exposure	0.1 ppm. (in Air)
	Symptoms	Irritation for sensitive tissues as eyes, nose and throat. Pungent smell, notice at 0.04 ppm. High concentration of OZONE destroyed lung.
	Toxicological Property	High concentration of OZONE endanger human respiratory organs. Effect on chromosomes structure. Destroyed the exposed tissues.

- โอโซนสามารถเกิดได้จาก

1. จากรังสีอัลตราไวโอเลต(Ultraviolet)โอโซนจะพบอยู่รอบชั้นบรรยากาศห่างจากพื้นโลก 15-30 km เกิดจากการสลายตัวของออกซิเจน โดยรังสีอัลตราไวโอเลต

2. จากปฏิกิริยาเคมี เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ

3. จากสนามไฟฟ้า ทั้งจากธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า และจากเครื่องกำเนิดโอโซน

- ประวัติความเป็นมาและการใช้งานของโอโซน

ปี 1840 Schonbein ค้นพบก๊าซและเรียกว่าโอโซน

ปี 1857 Werner von Siemens สร้างเครื่องกำเนิดโอโซนเครื่องแรกขึ้น

ปี 1893 โรงงานผลิตน้ำดื่มที่ใช้โอโซนแห่งแรกถูกสร้างขึ้นที่ ออดชอร์น(Oudshorn),

เนเธอร์แลนด์

### 2.1.2 ผลของโอโซนต่อสารต่างๆที่มีอยู่ในน้ำ

#### 2.1.2.1. สิ่งมีชีวิตเล็กๆ (Micro organisms)

โอโซนสามารถฆ่าสิ่งมีชีวิตเล็กๆและยับยั้งไวรัส ซึ่งคลอรีนไม่สามารถฆ่าได้หรือต้องใช้สารในปริมาณมาก ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลการกำจัดสิ่งมีชีวิตเล็กๆของโอโซนเทียบกับคลอรีน[2]

Germ load	Disinfectant	Volume applied mg/L	Lethal effect
60,000 coliforme/ml	Chlorine	0.1	15,000 sec
	Ozone	0.1	5 sec
350 spores B. subtilis/ml	Chlorine	1.4	9,000 sec
	Ozone	0.05	30 sec
PM virus MV parent solution and Le virus suspension of 1:1000	Chlorine	0.25 - 1.5	Inactivation within 180 min
	Ozone	0.05 - 0.5	

นอกจากนี้โอโซนยังสามารถใช้ได้ดีกับ : อะมีบยา (Amoeba), คอคคัส (Coccus), ฟังกัซ (Fungus) และ สาหร่าย (Algae)

#### 2.1.2.2 กำจัดเหล็ก (De-ironising)

เปลี่ยนจากไอออน  $Fe^{2+}$  เป็น  $Fe^{3+}$  จะทำให้เกิดเป็นตะกอนเหล็กซึ่งง่ายต่อการกำจัดออก โดยจะเป็นกลไกตามสมการ



#### 2.1.2.3 กำจัดแมงกานีส (De-manganising)

ออกซิไดส์ไอออน  $Mn^{2+}$  เป็นไอออนเปอร์แมงกานีส ( $MnO_4^-$ ) โดยเป็นกลไกตามสมการ



และไอออนเปอร์แมงกานีสสามารถกำจัดได้โดยใช้ ชาร์โคล (Charcoal) จะได้  $MnO_2$

#### 2.1.2.4 ออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ (Organic compounds)

ทำให้สารที่มีพันธะคู่และมีพันธะสาม เปลี่ยนเป็น สารพวก แอลดีไฮด์ (Aldehyde), คีโตน (Ketone), กรดคาร์บอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สารพวกอะโรมาติก เปลี่ยนเป็น กรดออกซาติก, กรดฟอร์มิก และ คาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากนี้ยังสลายสิ่งสกปรก, เชื้อโรค, กลิ่น, สีได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลแสดงผลของโอโซนต่อสารต่างๆ

Tested substance	Application of mg/L	Before O <sub>3</sub> treatment	After O <sub>3</sub> treatment	O <sub>3</sub> destroyed
Methanol	2,000	175	14	92%
Ethanol	1,000	620	56	91%
Isoamyl acetate	1,000	200	16	92%
Acetic ether	1,000	90	78	of no consequence
Acetic acid	2,000	2,000	1,800	do
Sugar	2,000	2,000	1,900	Negligible
Matter colouring	black	black	light yellow	Brightening
Hydrazine	100	300	4	Completely
Carbon	100	odour	no odour	destroyed
bisulphide				
H <sub>2</sub> S	10	10	0	Transf. to SO <sub>2</sub> .SO <sub>3</sub>
Phenole	100	900	11	Destroyed
Gasoline	1,000	900	130	Destroyed
Chloroform	500	490	400	Hardly destroyed
Xylene	500	do	do	do
Toluole	500	do	do	do

## 2.1.3 การใช้งานของก๊าซโอโซน ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่การใช้งานในระบบใหญ่

### 2.1.3.1 ผลิตน้ำดื่ม

จุดมุ่งหมายเพื่อ :

- ให้โลหะหนักตกตะกอน (เหล็ก, แมงกานีส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จับตัวสารต่างๆ ให้เป็นคอลลอยด์

### 2.1.3.2 สระว่ายน้ำ

จุดมุ่งหมายเพื่อ :

- กำจัดกลิ่นของสระว่ายน้ำในร่ม
- ชะล้างการเติบโตของไวรัส
- สลายหรือทำให้สารอินทรีย์ในน้ำจับตัวกัน
- สลายยูเรียเพื่อให้อยู่ในรูปสารประกอบของคลอรีนกับไนโตรเจน
- ทำให้น้ำใสขึ้น
- ก่อให้เกิดการระคายเคืองกับผิวหนังและเนื้อเยื่อต่างๆ น้อย ถ้าใช้ปริมาณเหมาะสม

### 2.1.3.3 การบำบัดน้ำเสีย

จุดมุ่งหมายเพื่อ :

- กำจัดสี, กลิ่น และความเป็นพิษ
- กำจัดสารประกอบอินทรีย์
- เปลี่ยนรูปของไอออนไนตรัส (Nitride,  $NO_2^-$ ) และ ซัลไฟด์ (Sulfide,  $SO_2^-$ ) ซึ่งเป็นสารที่เป็นพิษ
- ลดความเป็นพิษของไซยาไนด์ (Cyanide)

### 2.1.3.4 ผลิตน้ำโซดา

จุดมุ่งหมายเพื่อ :

- กำจัดเหล็กและแมงกานีสโดยใช้ชั้นกรองคาร์บอนหรือชั้นกรองสองชั้น
- กำจัดเชื้อโรคโดยไม่มีสารตกค้าง

### 2.1.3.5 บ่อเลี้ยงปลา

กำจัดเชื้อโรค, สารประกอบอินทรีย์ และเพิ่มออกซิเจนโดยปราศจากสารตกค้าง

### 2.1.3.6 กรองอากาศ

กำจัดกลิ่นและกำจัดเชื้อโรคจากอากาศ ในสถานที่เช่น โรงบำบัดน้ำเสีย, โรงฟอกหนัง หรือ โรงฆ่าสัตว์

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลปริมาณการใช้โอโซนในลักษณะต่างๆ

ลักษณะและพื้นที่ของการใช้งาน	ปริมาณที่ใช้(มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)
1. ในรถยนต์	10-15
2. ในห้อง	10 ตารางเมตร
	20 "
	33 "
	55 "
3. ทำน้ำดื่ม	10-30 ลิตร
4. - สลายสารพิษในผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์	100
- ทำความสะอาดภาชนะ	
- ซักล้างสารที่ตกค้างบนเสื้อผ้า	
- เสริมความงาม	
5. ในอ่างอาบน้ำ	150 ลิตร
6. สลายสารเคมี ทำลายและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคและกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ต่างๆ	250

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA : International Ozone Association)

Ozone Level (ppm. : part per million)	Effect
0.001-0.125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ คำนีแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และ อุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรม และที่สาธารณะ
0.3	เริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เกิดการปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย ติดเชื้อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอก และทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4-5.6	การทดสอบกับคนพบว่าใน 70 วินาที ใบบัวเกิดอาการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้ายแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ โอโซนกับคลอรีน

Chlorine	Ozone
1. มีความเป็นพิษสูง และเป็นก๊าซพิษ	1. ระดับความเป็นพิษอยู่ที่ 1 mg/L (ระบุโดย EPA สหรัฐอเมริกา) มีกลิ่นฉุน เริ่มสังเกตได้ที่ระดับ 0.01 mg/L ที่ระดับสูงกว่านี้มีการระคายเคืองสูงมาก
2. คลอรีนจะถูกเก็บที่ภาชนะบรรจุความดันสูง และสามารถเป็นอันตรายได้เมื่อมีการรั่วไหลเกิดขึ้น	2. โอโซนต้องทำการผลิต ณ ตำแหน่งที่ใช้งาน ไม่สามารถเก็บได้
3. คลอรีนเมื่อผสมกับยูรีนและเหงื่อจะทำให้เกิดสารประกอบโครเคน ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองตาและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	3. โอโซนมีวงชีวิตสั้น หลังทำปฏิกิริยาสลายตัวเป็นออกซิเจน
4. ราคาคลอรีนสูง	4. ราคาโอโซนต่ำลงเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีและการใช้พลังงานน้อยลงในการผลิตในปัจจุบัน
5. คลอรีนมีค่าความรุนแรงในการทำปฏิกิริยา (Oxidation potential) 1.36 V	5. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยาสูงสุดเนื่องจากค่า Oxidation potential 2.07 V
6. คลอรีนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้	6. โอโซนที่ค่าความเข้มข้นเดียวกับคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่าคลอรีน 600-3000 เท่า
7. คลอรีนมีกลิ่นรุนแรงคดค้างหลังการบำบัด	7. โอโซนไม่มีกลิ่นคดค้าง แต่สามารถกำจัดกลิ่นของยูรีน, ควิน, อาหาร และ สีได้
8. คลอรีนทำงานกับตะไคร่น้ำได้ผลดีมาก กำจัดตะไคร่น้ำได้ดี	8. โอโซนพบปัญหาการเติบโตของตะไคร่น้ำ ต้องใช้คลอรีนช่วยโดยการทำ Shock treatment
9. คลอรีนทำงานได้ดีต้องควบคุม pH ให้อยู่ในย่าน 7.0-7.4	9. โอโซนไม่ต้องมีการควบคุม pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

การเกิดโอโซนเกิดจากปรากฏการณ์โคโรนาซึ่งทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซ อันเนื่องจากการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งซึ่งเพียงพอ โดยออกซิเจนจะเปลี่ยนเป็นโอโซนตามขั้นตอนดังนี้

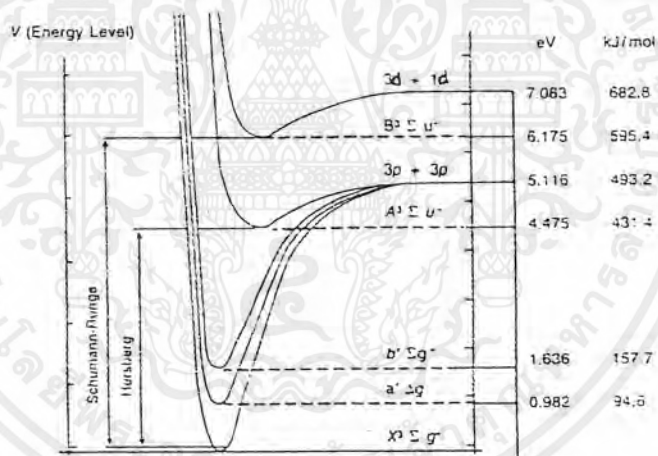
1. ขั้นตอนการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน



2. ขั้นตอนการรวมตัวระหว่างโมเลกุลของออกซิเจนกับอะตอมอิสระเกิดเป็นก๊าซโอโซน



ซึ่งพลังงานที่ใช้ทั้งสองขั้นตอนมีค่า 493.2 kJ/mol จากกราฟ ซึ่งต้องใช้พลังงานในชั้น 3p+3p



Source: Masschelein (1977).

รูปที่ 2.1 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน[3]

### 2.2.1 การหาค่าพลังงานและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน

จากสมการแวนเดอวาลส์

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = R T$$

P=ความดันบรรยากาศ(mm.Hg)

V=ปริมาตรอากาศ(m<sup>3</sup>/kmol)

R=เลขอาโวกาโดร์=8314.3 Pascal.m<sup>3</sup>/(kmol °K)

T=อุณหภูมิ(°K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และใช้วิธีทดลองผิดลองถูก (Trial and error) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะสามารถแปลงขนาดหน่วยโมลไปสู่หน่วยปริมาตรตามหลักการทางเคมีได้อย่างถูกต้อง  
จะได้

$$1 \text{ โมล} = 0.02455 \text{ m}^3$$

และจากรูปที่ 2.1 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจนจาก [3] ในการแตกสลายพันธะ  
ออกซิเจนออกเป็น  $O(^3P)$  ซึ่งต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น  $493.3 \text{ kJ/mol}$

$$\text{จาก } 3.6 \times 10^3 \text{ J} = 1 \text{ Wh} \text{ -----} \rightarrow 1 \text{ J} = 2.78 \times 10^{-4} \text{ Wh}$$

$\therefore$  ในการแตกสลายพันธะออกซิเจนออกเป็น  $O(^3P)$  ซึ่งต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น  $137.1 \text{ Wh/mol}$

$$\text{จาก } 1 \text{ โมล} = 0.02455 \text{ m}^3$$

$\therefore$  ในการแตกสลายพันธะออกซิเจนออกเป็น  $O(^3P)$  ซึ่งต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น  $5.584 \text{ kWh/m}^3$

แต่เนื่องจากในอากาศมีปริมาตรของออกซิเจนเพียง  $20.95 \%$

$\therefore$  จะต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น  $1.169 \text{ kWh/m}^3$  จึงจะเริ่มเกิดก๊าซโอโซนขึ้นในบริเวณช่องว่างอากาศ

จาก

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dV$$

จะได้

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

จาก  $W = 1.169 \times 10^3 \times V \times 10^{-6} \text{ Wh}$ ,  $V = \text{ปริมาตรอากาศหน่วย } \text{cm}^3$  และ  $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$

$$E = \sqrt{\frac{2 \times 1.169 \times 10^3 \times 10^{-6}}{8.854 \times 10^{-12}}} = 16.25 \text{ kV/cm}$$

$\therefore$  ต้องใช้สนามไฟฟ้า  $16.25 \text{ kV/cm}$  เพื่อให้เกิดโอโซนพอดี

## 2.2.2 ลักษณะอิเล็กโตรดแต่ละชนิดที่มีผลต่อสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามแฟลคเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างอิเล็กโตรดลักษณะทาง  
เรขาคณิตของอิเล็กโตรดค่าแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^*$  คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta^* = \frac{E_{\max}}{E_{\text{avg}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

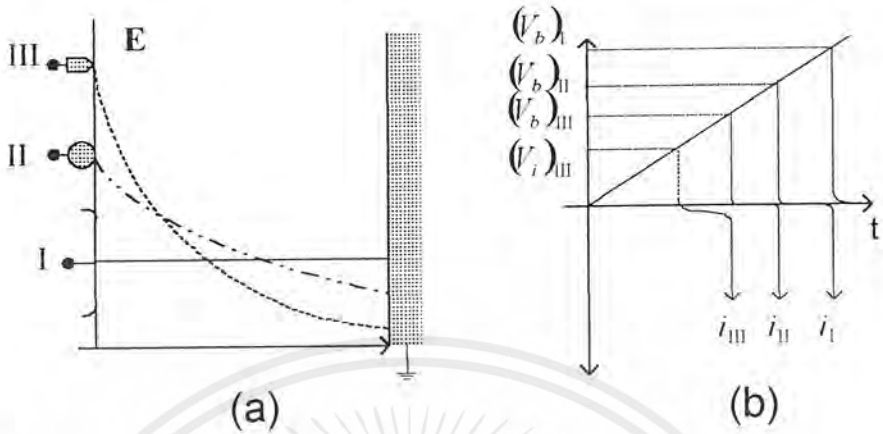
เมื่อ  $E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด  
 $E_{av}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ที่เกิดขึ้นในแก๊สระหว่างอิเล็กโทรด

### 1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า  $\eta = 1$  นั่นคือกรณีที่ป้อนแรงดันให้ชุดอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าแบบนี ถ้าค่า  $E_{\max}$  ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับค่าความคงทนของฉนวนต่อสนามไฟฟ้า ( $E_p$ ) จะเกิดเบรกดาวทันที เนื่องจากสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ( $E_{av}$ ) ทุกจุดเท่ากัน

### 2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform field)

- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า  $100\% < \eta \leq 40\%$  คุณสมบัติใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมาก
- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field) คือสนามไฟฟ้าที่มีค่า  $\eta \leq 20\%$  คุณสมบัติที่โดดเด่นของสนามไฟฟ้าแบบนี้คือมีผลของประจุค้างเกิดขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ จะเกิดกระแสไหลก่อนเกิดเบรกดาวนานมาก เรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona current) ดังแสดงในกราฟ  $i_{cm}$  ในรูปที่ 2.2 (b) และความเครียดสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจากอิเล็กโทรดออกไปจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) ใน [4] อิเล็กโทรดที่ III เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตแตกตัวของอากาศแล้วแต่สนามไฟฟ้าบริเวณอื่นยังต่ำมาก จึงไม่เกิดการเบรกดาวผ่านตลอดช่องว่างอากาศ แต่ค่าแรงดันที่อากาศเริ่มแตกตัวคือ  $V_i$  (Ignition voltage) ในสนามไฟฟ้าชนิดนี้การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวนี้ทำได้ยากเนื่องจากผลของประจุค้างทำให้สนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามลักษณะทางเรขาคณิต



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโทรดต่างกัน

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

รูปร่างอิเล็กโทรดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไอออนมีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูงเช่น ทรงกลมขนาดเล็กมาก(ปลายแหลม)และรูปทรงกระบอกแกนร่วม ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสมการทางเรขาคณิตได้

2.2.2.1 ทรงกลมเดี่ยวในอากาศ

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

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกลม

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.2 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

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

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

แรงดัน  $V$  ที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้ง 2

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

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

ได้

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

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกระบอกวงใน

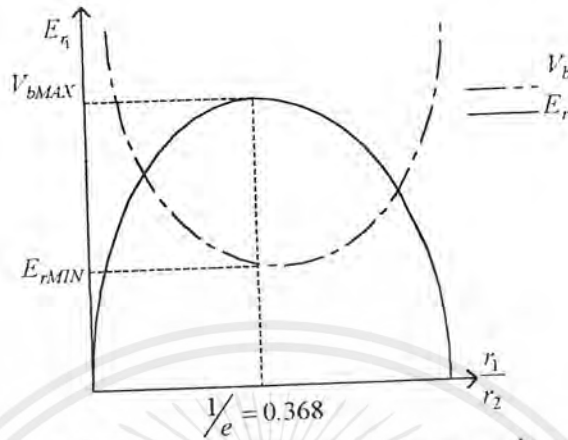
$$E_{MAX} = E_{r_1} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

### 2.2.2.3 มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มิติที่เหมาะสมคือลักษณะการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดทนต่อแรงดันได้สูงที่สุด ตัวอย่างเช่น ในกรณีกำหนดรัศมีอิล็คโตรดนอก  $r_2$  ให้ อีล็คโตรดในรัศมี  $r_1$  ใกล้เคียงกับ  $r_2$  มาก ๆ ระยะห่างระหว่างอีล็คโตรดนอกและในคือ  $d = r_2 - r_1$  มีค่าน้อยเกิดเบรคควางง่าย แต่การลดรัศมี  $r_1$  ลงเพื่อเพิ่มค่า  $d$  จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวดำเนินสูงชันมาก จนถึงค่าวิกฤตและเกิดโคโรนาได้ง่าย การหาค่าจุดที่เหมาะสมของ  $r_1$  ที่อยู่ระหว่าง  $0 - r_2$  ที่ทำให้ระบบทนแรงดันได้สูงที่สุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อนดังกล่าวใน [4] กรณีอีล็คโตรดทรงกระบอกแกนร่วมคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง  $V_b$  และ  $E_r$  ในทอมของ  $r_1$  เมื่อกำหนดให้  $r_2$  คงที่

### 2.2.3 ผลของแผ่นฉนวนบางกั้นที่มีผลต่อการเกิดไอโซน

แผ่นฉนวนบางกั้นช่วยให้ช่องว่างอากาศทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงขึ้น แผ่นฉนวนจะกั้นการเคลื่อนที่ของไอออนประจุบวกที่เกิดขึ้นจากการไอออไนเซชัน (Ionization) ที่คาโทด (Cathode) ไม่ให้ตีหน้าไป ประจุบวกจะรวมตัวกระจายอยู่บนระนาบของแผ่นฉนวนบาง ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นฉนวนบางกับระนาบอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขณะเดียวกันความเครียดระหว่างคาโทดกับแผ่นฉนวนบางลดลง แรงดันเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับความคงทนของช่องอากาศในสนามสม่ำเสมอ ผลของแผ่นฉนวนบางกั้นทำให้อากาศทนแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูงขึ้นในสนามไม่สม่ำเสมอ

## 2.3 ทฤษฎีของไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ในทางไฟฟ้า [5]

### 2.3.1 การแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นอิลิเมนต์ (Element)

ขอบเขตปัญหาที่พิจารณาทั้งหมด ถูกแบ่งออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย ๆ ที่รู้จำนวนคงแสดงในรูปแบบที่ 2.4 (a) ซึ่งอิลิเมนต์ทั้ง 9 ชิ้นไม่ซ้อนทับกัน และประกอบด้วย 12 โหนด เมื่อหาค่าศักดาไฟฟ้าโดยประมาณภายในอิลิเมนต์คือ  $V_e$  แล้วทำการเชื่อมโยงการกระจายศักดาไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์หลายๆ อิลิเมนต์ จะทำให้ศักดาไฟฟ้ามีความต่อเนื่องภายในขอบเขตของอิลิเมนต์ (Inter-element boundary) ค่าตอบโดยประมาณของบริเวณทั้งหมดของปัญหาที่พิจารณาคือ

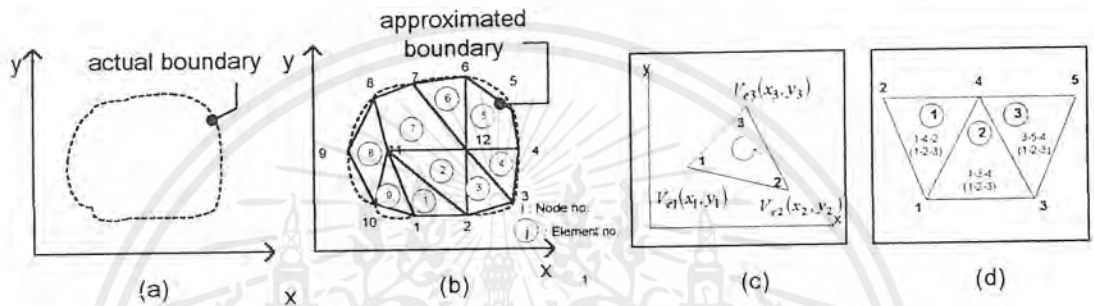
$$V(x, y) = \sum_{e=1}^N Y_e(x, y) \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนอิลิเมนต์ที่บริเวณของปัญหาถูกทำการแบ่ง

รูปแบบทั่ว ๆ ไปที่ใช้ในการประมาณค่า  $V$  ภายในอิลิเมนต์เป็น Polynomial Approximation ตัวอย่างสมการที่ใช้ในอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมคือ

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \tag{2}$$



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ปัญหาด้วย Finite Element Method : FEM

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

ค่าศักดาไฟฟ้า  $V_e$  ภายในอิลิเมนต์มีค่าไม่เท่ากับ 0 ส่วนภายนอกเท่ากับ 0 นิยมใช้อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมมากกว่า โดยตั้งสมมติฐานให้ Linear variation ของ  $V_e$  ภายในอิลิเมนต์เป็นดังสมการที่ (2) เหมือนเป็นการสมมติว่าสนามไฟฟ้าภายในอิลิเมนต์เป็นแบบสม่ำเสมอ

$$\bar{E}_e = -\nabla V_e = -(b\bar{a}_x + c\bar{a}_y) \tag{3}$$

### 2.3.2 การหาสมการของแต่ละอิลิเมนต์

จากรูปที่ 2.4 (c) คืออิลิเมนต์พื้นฐานรูปสามเหลี่ยม ค่าศักดาไฟฟ้า ณ โหนด 1, 2, 3 คือ  $V_{e1}$ ,  $V_{e2}$ ,  $V_{e3}$  ตามลำดับ จากสมการที่ (2) จะได้เมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{4}$$

ได้ 
$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (5)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเชิงเส้น เรียกว่า Element shape function ซึ่งมีคุณสมบัติ

$$\alpha_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (7)$$

พลังงานต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่สัมพันธ์กับโวลูเมนที่  $e$  คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |E|^2 dS = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad (8)$$

เมื่อสมมติให้บริเวณของปัญหาในลักษณะ 2 มิติที่พิจารณาไม่มีประจุอิสระ ( $\rho_s = 0$ ) แต่จากสมการที่ (8) พบว่า

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i \quad (9)$$

แทนสมการที่ (9) ใน (8) ได้

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon V_{ei} \left[ \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \right] V_{ej} \quad (10)$$

นิยามให้เทอมในวงเล็บเป็น

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dS \quad (11)$$

สมการที่ (10) จะเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$  (13)

และ  $[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix}$  (14)

เมตริกซ์  $[C^{(e)}]$  เรียกว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์ (Stiffness matrix) สมาชิกแต่ละตัวพิจารณาระหว่างการจับคู่ระหว่างโหนด  $i$  และ  $j$  รายละเอียดการหาค่าสมาชิกแต่ละตัวอ้างอิงจาก [5] โดยมีพื้นฐานมาจากสมการที่ (11)

### 2.3.3 การรวบรวมอิลิเมนต์เป็นขอบเขตของปัญหาดังเดิม

จากรูปที่ 2.4 (d) พลังงานที่สัมพันธ์เกี่ยวกับการรวมอิลิเมนต์คือ

$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V_e]^T [C] [V_e] \quad (15)$$

เมื่อ  $[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$  (16)

$n$  เป็นจำนวนโหนด,  $N$  เป็นจำนวนอิลิเมนต์ และ  $[C]$  เรียกว่า Global coefficient matrix คือการรวม Element coefficient matrix เข้าด้วยกัน เพื่อสร้าง Global coefficient matrix ตัวอย่างรูปที่ 2.4 (d) เป็นไฟไนต์อิลิเมนต์เมช (Finite element mesh) ซึ่งประกอบด้วยอิลิเมนต์ 3 ชั้น โหนด 1,2,3,4 และ 5 เป็น global node และ โหนด  $i$ - $j$ - $k$  เรียกว่า Local node ซึ่งคือโหนด 1-2-3 การรวมโหนด Local จะลำดับในทิศทวนเข็มนาฬิกาเริ่มจากโหนดใดก็ได้ ดังนั้นวิธีการเรียงลำดับเลขจึงมีหลายลักษณะเช่น อิลิเมนต์ที่ 3 อาจใช้ 4-3-5 แทน 3-4-5 ก็ได้ Global coefficient matrix ของตัวอย่างในรูปที่ 2.4 (d) คือ

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \quad (17)$$

เป็นเมตริกซ์  $5 \times 5$  เนื่องจากรูปที่ 2.4 (d) มีทั้งหมด 5 โหนด ( $n=5$ ) เนื่องจาก  $C_{ij}$  เป็นการจับคู่ระหว่างโหนด  $i$  และ โหนด  $j$  ค่า  $C_{ij}$  หาได้จากข้อเท็จจริงที่ว่า การกระจายของศักดาไฟฟ้าต้องมีค่าต่อเนื่องตลอด Interelement boundary องค์ประกอบ  $i, j$  ใด ๆ ใน  $[C]$  จึงมาจากทุก ๆ อิลิเมนต์ที่มี โหนด  $i, j$  ตัวอย่างเช่น

$$C_{11} = C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} \quad (18) \text{ a.}$$

ส่วนโหนด 2 เป็นของอิลิเมนต์ 1 เท่านั้น

$$C_{22} = C_{33}^{(1)} \quad (18) \text{ b.}$$

เมื่อ ไม่มีการจับคู่กันเช่นระหว่าง โหนด 2 และ 3

$$C_{23} = C_{32} = 0 \quad (18) \text{ c.}$$

ทำเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป จะได้ Global coefficient matrix ในรูปที่ 2.5 (d) คือ

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} & C_{11}^{(3)} & C_{12}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} & 0 \\ C_{31}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & C_{32}^{(1)} & 0 \\ C_{21}^{(2)} & 0 & C_{22}^{(2)} + C_{11}^{(3)} & C_{23}^{(2)} + C_{13}^{(3)} & C_{12}^{(3)} \\ C_{21}^{(1)} + C_{31}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{32}^{(2)} + C_{31}^{(3)} & C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} & C_{32}^{(3)} \\ 0 & 0 & C_{21}^{(3)} & C_{23}^{(3)} & C_{22}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

คุณสมบัติของ  $[C]$  มีดังต่อไปนี้

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

### 3. เป็น Singular ( $\det = 0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การแก้ระบบสมการเพื่อหาผลลัพธ์

สมการลาปลาซ(Laplace's)จะสามารถหาค่าตอบที่สอดคล้องได้เมื่อพลังงานรวมที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหาที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุด การทำ Partial derivative ค่า W เทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าที่ทุก ๆ โหนดจะได้ว่า

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

หรือ

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0 \text{ เมื่อ } k = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

นำไปสู่

$$0 = \sum_{i=1}^n V_i C_{ik} \quad (21)$$

สมการที่ 21 เป็นสมการสำหรับทุก ๆ โหนด  $k = 1, 2, \dots, n$  เซตคำตอบของสมการสามารถหาค่าของ  $[V] = [V_1, V_2, \dots, V_n]$  ได้ วิธีที่มี 2 วิธีคือ Iteration method และ Band matrix method จาก [5]

## 2.4 วิธีการวัดปริมาณไอโชน

การวัดปริมาณ ไอโชนในโรงงานนี้ใช้วิธีที่เรียกว่า Iodometric Method มีหลักการคร่าวๆ คือ ใช้สาร โปตัสเซียมไอโอไดด์(Potassium iodide, KI) ทำหน้าที่เก็บก๊าซไอโชนและนำสารที่ได้มาทำการไทเทรต(Titrate) กับ โซเดียมไทโอซัลเฟต(Sodium thiosulfate,  $Na_2S_2O_3$ ) จะได้ปริมาณสารเคมีที่ใช้ไปแทนค่าในสูตรเพื่อหาปริมาณ ไอโชนต่อไป

### 2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |                                                           |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| 1. ขวดรูปชมพู่ (Flask) 250 mL                             | 3 ใบ |
| 2. บีกเกอร์ 50, 100, 150, 250, 500, 1000, 2000 mL อย่างละ | 1 ใบ |
| 3. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL 4 ใบ, 250 mL 1 ใบ, 1000 mL    | 2 ใบ |
| 4. กระบอกตวง 50 mL 2 ใบ, 100 mL                           | 1 ใบ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปิเปต 2 mL, ลูกยาง, กระจกบอกล้น, บิวเรต 50 mL อย่างละ 1 อัน



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวัดปริมาณ ไอโซน

#### 2.4.2 สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

##### 1. สารละลายโพตัสเซียมไอโอไดด์ (KI)

นำสารโพตัสเซียมไอโอไดด์ ปริมาณ 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1 L (น้ำกลั่นต้องต้มให้เดือด แล้วทิ้งให้เย็นก่อนจึงนำมาใช้ได้) เก็บในขวดสีชาอย่างน้อย 1 คืนจึงนำมาใช้งานได้

##### 2. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid, $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 1 N

##### 3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน (Standard sodium thiosulfate titrant, $Na_2S_2O_3$ ), 0.1 M

นำสารโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) ปริมาณ 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1 L (น้ำกลั่นเตรียมคั่งข้อ 1.) ถ้าจะทำให้ได้มาตรฐานต้องทำสแตนดาร์ด ไคส์ (Standardize) กับโพตัสเซียมไบโอไอเดต (Potassium bi-iodate) หรือโพตัสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate)

##### 4. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน, 0.005 M

นำสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน, 0.1 M ที่เตรียมไว้ปริมาณ 50 mL มาเจือจางให้เป็น 1000 mL สำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงต้องทำสแตนดาร์ด ไคส์สารละลายวันต่อวันกับโพตัสเซียมไบโอไอเดตหรือโพตัสเซียมไดโครเมต, 0.005 M

##### 5. น้ำแป้ง (Starch indicator solution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค้มน้ำให้เดือดแล้วใส่แป้งมันประมาณ 5 กรัม ลงไป คนไปเรื่อยๆจนเป็นเนื้อเดียวกันจึงทิ้งไว้ให้เย็นทิ้งไว้อย่างน้อยคืนหนึ่งจึงนำไปใช้งานได้

### 2.4.3 กระบวนการทดสอบหาปริมาณโอโซน

1. นำสารละลายโพตัสเซียม ไอโอไดด์แบ่งมาปริมาณ 100 mL. ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL. แล้วนำไปผ่านโอโซนจากเครื่องกำเนิดโอโซนเป็นเวลา 5-10 นาที ดังรูปที่ 2.6
2. นำสารละลายโพตัสเซียม ไอโอไดด์ที่ผ่าน โอโซนแล้วมาใส่กรดซัลฟูริกปริมาณ 5 mL. เพื่อปรับค่าพีเอช(pH) ให้ต่ำลง
3. ทำการไทเทรตสารละลายจากข้อ 2. ด้วย สารละลายโซเดียม ไทโอซัลเฟตมาตรฐาน, 0.005 M. จนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีฟางข้าวจึงใส่น้ำแป้งลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์บอกจุดยุติที่แน่นอน
4. ไทเทรตสารละลายต่อจนกลายเป็นสารละลายใสจึงหยุด แล้วทำการบันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้
5. นำสารละลายโพตัสเซียม ไอโอไดด์ที่ยังไม่ผ่าน โอโซนมาปริมาณ 100 mL. ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL.แล้วทำกระบวนการ ไทเทรตดัง ข้อ 2.-4. ทำการบันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้
6. แทนค่าในสูตร

$$mg O_3 / L = \frac{(A - B) \times M \times 24000}{mL \text{ sample}}$$

A = mL ของไทเทรนต์ (Titrant) สำหรับสารตัวอย่าง(Sample) (ค่าที่บันทึกจากข้อ 4.)

B = mL ของไทเทรนต์สำหรับแบลนค์ (Blank) (ค่าที่บันทึกจากข้อ 5.)

7. แปลงค่าที่ได้จากต่อหน่วยเวลาที่วัด ( 5-10 นาที) เป็นหน่วย มิลลิกรัม โอโซนต่อชั่วโมง ( $mgO_3 / hr$ )

8. ทำการบันทึกผลการทดลองและทำการวิเคราะห์ผล

หมายเหตุ - ค่าต่ำสุดที่วิธีนี้วัดได้ คือ  $30 \mu g O_3 / L$

-ค่าความแม่นยำจะเป็น  $\pm 1\%$  สำหรับค่าความเข้มข้นที่  $3 mg O_3 / L$  หรือมากกว่า

-การวัดค่าโดยวิธีนี้ต้องทำรีบโดยทันทีหลังจากครบเวลาที่ใช้วัด เพื่อป้องกันค่าผิด

พลาดจากการสลายตัวของโอโซนและควรจะวัดที่มีอุณหภูมิต่ำและสารอยู่ในสภาวะที่มีค่า



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนแรกของการวัดปริมาณไอโอดีน



รูปที่ 2.7 สีของสาร โปตัสเซียมไอโอไดด์ที่เปลี่ยนไป โดยทางซ้ายเป็นสารที่ยังไม่ผ่าน ไอโอดีน ทางขวาเป็นสารที่ผ่าน ไอโอดีนแล้ว

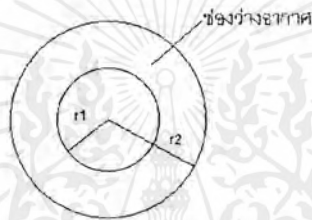
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบชุดสร้างโคโรนาเบื้องต้น

### 3.1 ลักษณะเบื้องต้นของชุดสร้างโคโรนา

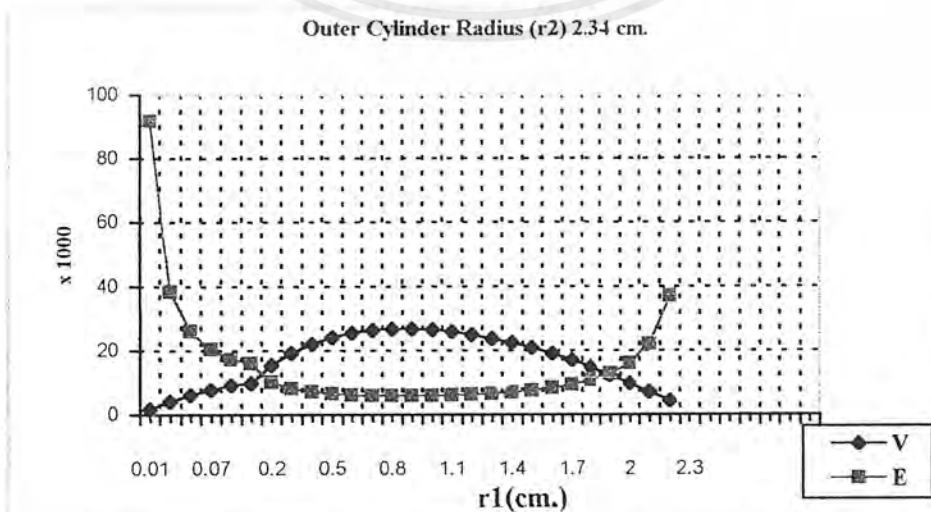
ชุดสร้างโคโรนาที่ต้องการจะออกแบบเป็นลักษณะทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมซึ่งเป็นลักษณะของชุดสร้างโคโรนาที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 3.1 ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมจำนวน 2 ชั้น

จะมีสมการสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับแรงดันคือ 
$$E = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

เนื่องจากเราควรหาค่ามิติที่เหมาะสม (Optimum dimension) เนื่องจากเป็นจุดที่เราประยุกต์ค่าแรงดันเข้าไปมากแต่จะได้ค่าสนามไฟฟ้าออกมาน้อย โดยลักษณะกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าสนามไฟฟ้า มีลักษณะดังรูป



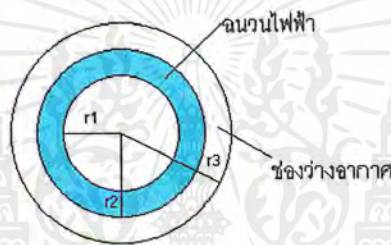
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่โรงเรียนศึกษาพิเศษ โดยยกเว้นให้ท่านใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเราจะสังเกตเห็นว่าชุดสร้างโคโรนาที่เราเลือกซึ่งมีรัศมี  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$ . ไม่อยู่ในช่วงที่เราต้องใช้ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) สูง แต่ได้ค่าสนามไฟฟ้า (E) ต่ำ ซึ่งช่วงนั้นจะมีค่ารัศมีอยู่ในช่วง  $r_1 = 0.1-1.85 \text{ cm}$ .

เมื่อนำค่า  $r_1, r_2$  ไปออกแบบจะได้ชุดการทดลองที่ 1 แต่เมื่อเราสังเกตจากผลการทดลองจะได้ปริมาณไอโซนน้อยมาก

จากเนื้อหาในส่วนของทฤษฎี เมื่อเราเพิ่มฉนวนไฟฟ้าเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศทำให้ช่องว่างอากาศแคบลง ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกลงบนช่องว่างอากาศมีค่าสูงขึ้น และช่วยให้บริเวณช่องว่างอากาศเกิดการเบรคความได้ง่ายขึ้น เราจึงทำการออกแบบใหม่ได้ดังรูป



รูปที่ 3.3 ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

จะมีสมการค่าสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับแรงดันคือ 
$$E_{r_2} = \frac{\epsilon_1 V}{r_2 (\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1})}$$

จากการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าเราต้องทราบค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้า ( $E_r$ ) เราจึงต้องทำการหาค่า  $E_r$  ต่อไป

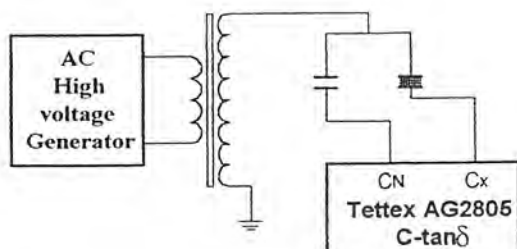
### 3.2 การหาค่า $E_r$ ของฉนวนไฟฟ้า

เนื่องจากต้องการทราบค่า  $E_r$  ที่แน่นอนของฉนวน จึงทำการทดลองหาค่า C ของแต่ละฉนวน โดยใช้เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของ Tettex รุ่น AG 2805



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ระบุว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำการต่อวงจรดังรูป



รูปที่3.5 การต่อวงจรเพื่อวัดค่าคาปาซิแตนซ์  $C_x$  เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความคงทนสนามไฟฟ้า



รูปที่3.6 แสดงมิติของฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าความคงทนสนามไฟฟ้า

แล้วนำค่าคาปาซิแตนซ์ที่ได้นำมาคำนวณหาค่าความคงทนสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

โดยใช้สมการ

$$C = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

### 3.2.1 ฉนวน PVC

$$C = 99.91 \times 10^{-12} \cdot C_x, \quad r_1 = 1.9 \text{ cm}, \quad r_2 = 2.1 \text{ cm}, \quad \ell = 0.04 \text{ m}$$

ผลการทดลอง

kV	$C_x$
1	1.10
1.5	1.12
2	1.13
2.5	1.11

$$C_{AV} = 1.115$$

$$\text{จะได้ } \epsilon_r = 5.017$$

### 3.2.2 ฉนวน MICA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $C = 99.91 \times 10^{-12} \cdot C_x, \quad r_1 = 1.9 \text{ cm}, \quad r_2 = 2.2 \text{ cm}, \quad \ell = 0.04 \text{ m}$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

kV	$C_x$
1	0.62
1.5	0.62
2	0.60
2.5	0.61

$$C_{AV} = 0.6125$$

$$\text{จะได้ } \epsilon_r = 4.037$$

## 3.3 สรุปการออกแบบเบื้องต้นของชุดสร้างโคโรนา

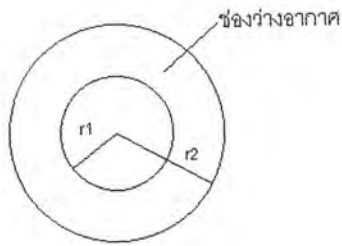
เมื่อเรานำค่าที่เหมาะสมซึ่งได้มาจาก

- การพิจารณาค่ารัศมีของชุดสร้างโคโรนา จากกราฟรูป 3.2
- ค่าความคงทนสนามไฟฟ้า ซึ่งได้มาจากผลการทดสอบค่า C-tan $\delta$  ของฉนวนไฟฟ้า แต่ละชนิด
- การตรวจสอบค่าสนามไฟฟ้าจากโปรแกรม

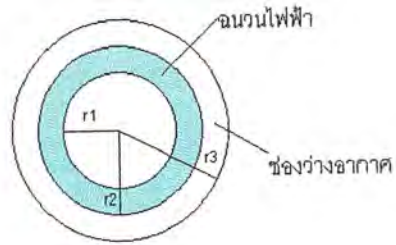
เราสามารถออกแบบลักษณะชุดสร้างโคโรนาที่จะใช้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการทดลองและการคำนวณ ได้ดังนี้

1. แท่งตัวนำวงในใช้ท่อแอสตนเลสมีขนาดรัศมี 1.9 cm.
2. แท่งตัวนำวงนอกใช้ท่อแอสตนเลสมีขนาดรัศมี 2.34 cm.
3. ชนิดของฉนวนไฟฟ้าที่นำมาใช้ทดสอบ
  - PVC หนา 2 mm.
  - MICA หนา 2 mm.
  - MICA หนา 3 mm.

จะได้ชุดสร้างโคโรนาจากการออกแบบเบื้องต้นดังนี้

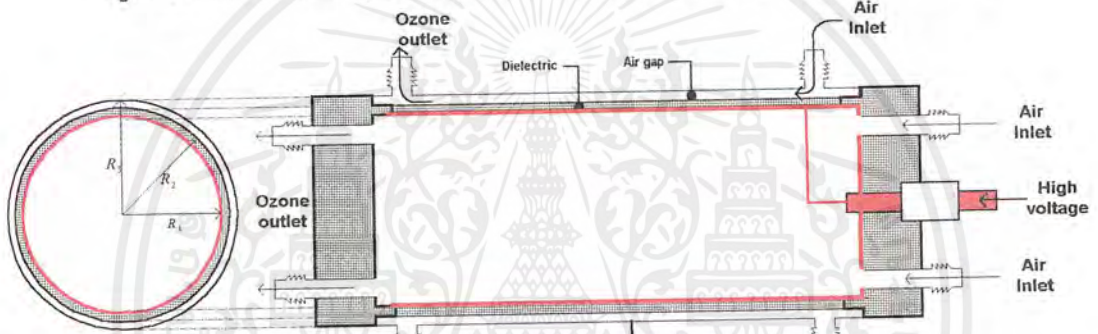


$r_1 = 1.9 \text{ cm.}$   
 $r_2 = 2.34 \text{ cm.}$



$r_1 = 1.9 \text{ cm.}$   
 $r_2 = 2.1, 2.2 \text{ cm.}$   
 $r_3 = 2.34 \text{ cm.}$

รูปที่ 3.7 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาแบบมีฉนวนไฟฟ้าและไม่มีฉนวนไฟฟ้า

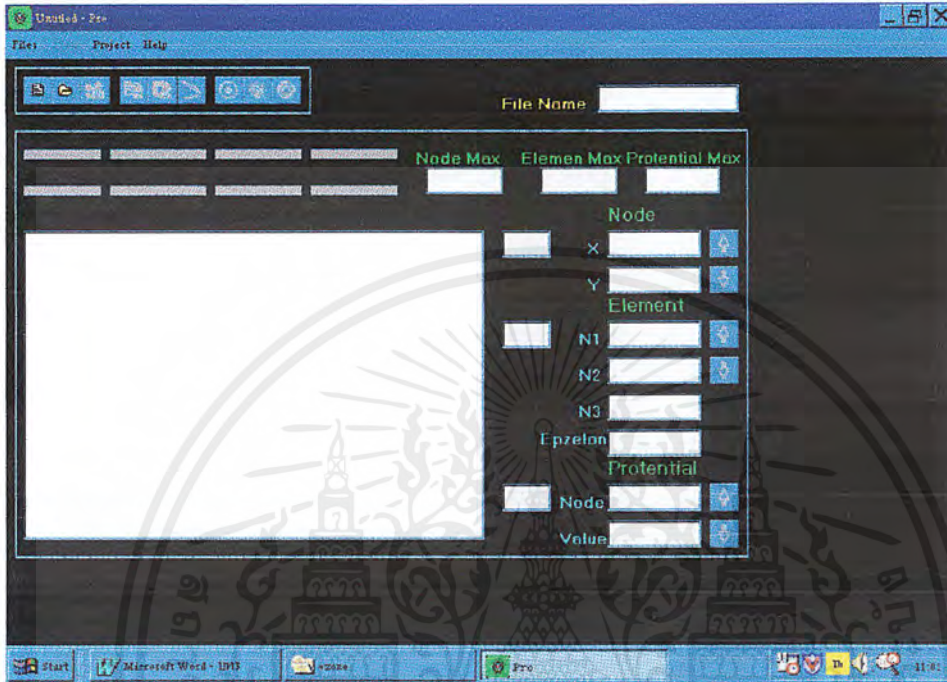


รูปที่ 3.8 แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาที่จะสร้างมาทดสอบ

### 3.4 การใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ในการออกแบบ

หลังจากทำการออกแบบและได้รูปร่างลักษณะของชุดสร้างโคโรนาเบื้องต้นแล้ว เราจำเป็นต้องทำการทดสอบชุดสร้างโคโรนาโดยการใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ซึ่งถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้งานทางไฟฟ้าโดยเฉพาะมาคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและเราสามารถใช้ค่านี้มาเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าเริ่มต้นในการเกิดโอโซนทำให้เราว่าชุดสร้างโคโรนามีความสามารถจะผลิตก๊าซโอโซนได้หรือไม่

### 3.4.1 การใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น



รูปที่ 3.9 โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ยังไม่ได้กรอกค่า

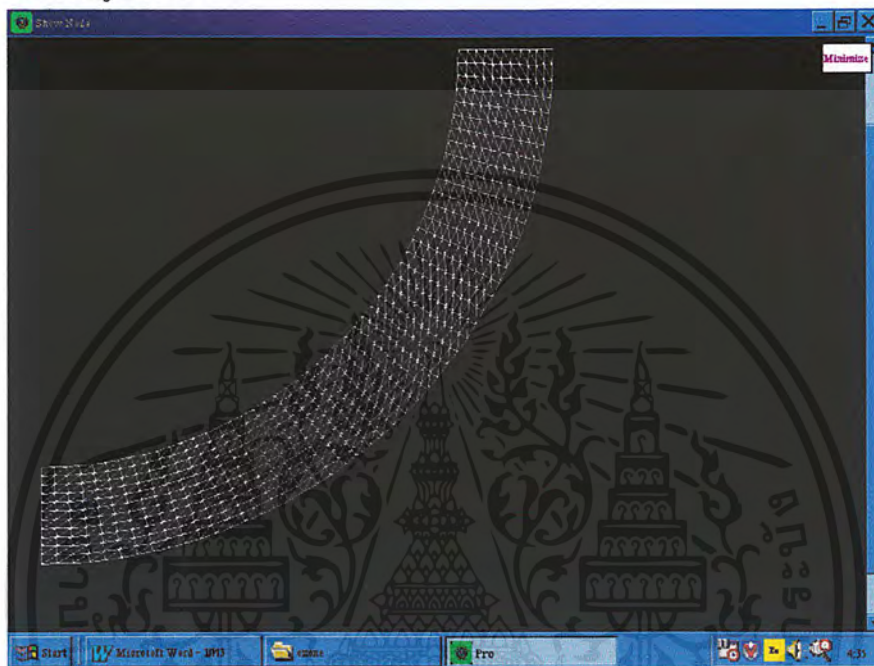
การใช้งานโปรแกรมจะมีขั้นตอนโดยพิจารณาจากรูปที่ 3.9 ดังต่อไปนี้

1. ตั้งชื่อ ไฟล์ (File) ที่ใช้งาน
2. ป้อนค่า Node Max, Element Max และ Potential Max (วิธีการหาจะกล่าวไว้โดยละเอียดที่ภาคผนวก)
3. ป้อนค่า x และ y ของแต่ละ Node ซึ่งค่าของ x และ y สามารถหาได้โดยการใช้โปรแกรมปาสคาลเขียนตามซอสโคด (Source code) ดังรายละเอียดในภาคผนวก
4. ป้อนค่า N1, N2, N3 และ Epzelon โดยค่าของ Epzelon คือ ค่า  $E$  ของฉนวนที่ใช้ ส่วนค่า N1-N3 จะหาได้จากการใช้โปรแกรมปาสคาลดังภาคผนวก
5. กรอกค่าในส่วนของ Protential คือ ค่าศักดาไฟฟ้าของ โหนด (Node) ที่ขอบรอบนอกที่เราทราบค่า เช่น บริเวณที่ติดกับกรวดก็จะมีค่าศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 0 บริเวณที่ติดกับแหล่งจ่ายจะมีค่าศักดาเท่ากับค่าศักดาของแหล่งจ่าย
6. ทำการตรวจสอบว่ากรอกค่าถูกต้องหรือไม่โดยการลองรันดู ถ้าใส่ค่าถูกต้องหมดจะได้ผลลัพธ์

ออกมา เพื่อนำไปพิจารณาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

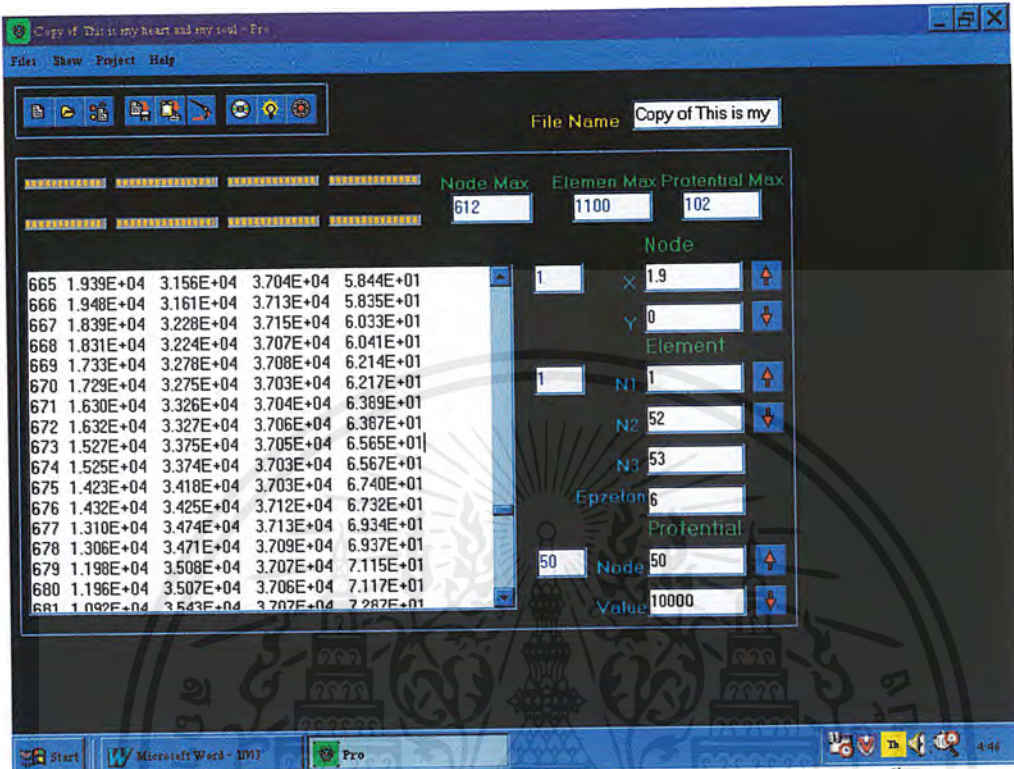
หมายเหตุ : ในการหาค่าในข้อ2-4 อาจใช้วิธีการแบ่งขอบเขตของชุดสร้างโคโรนาเป็นส่วนๆด้วยมือ หรือที่เรียกว่า การตกริด (Grid) ก็ได้ แต่การตีค่อนข้างยุ่งยากและเสียเวลามากกว่า โดยเราต้องแบ่งขอบเขตดังเช่นในรูปที่ 3.10



รูปที่3.10 ตัวอย่างของการตกริดแบ่งชุดสร้างโคโรนา

### 3.4.2 การนำค่าไปวิเคราะห์

เมื่อโปรแกรมทำการประมวลผลเสร็จสิ้นจะได้ผลลัพธ์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นค่าศักดาไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้า ซึ่งค่าที่เราจะนำมาวิเคราะห์เป็นหลักก็คือ ค่าสนามไฟฟ้า โดยเราจะทำการพิจารณาบริเวณชั้นของอากาศเท่านั้นเพราะจะเป็นบริเวณที่เกิดการแตกตัวของก๊าซ ออกซิเจนเป็นก๊าซไอออน เราสามารถพิจารณาได้ว่าบริเวณที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิด ไอออนคือ บริเวณที่มีค่าสนามไฟฟ้ามากกว่า  $16.25 \text{ kV/cm}$  ซึ่งเป็นค่าที่อากาศแตกตัวให้ออกซิเจน ดังตัวอย่าง การพิจารณา



รูปที่ 3.11 โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์หลังจากคำนวณค่าเสร็จสิ้น

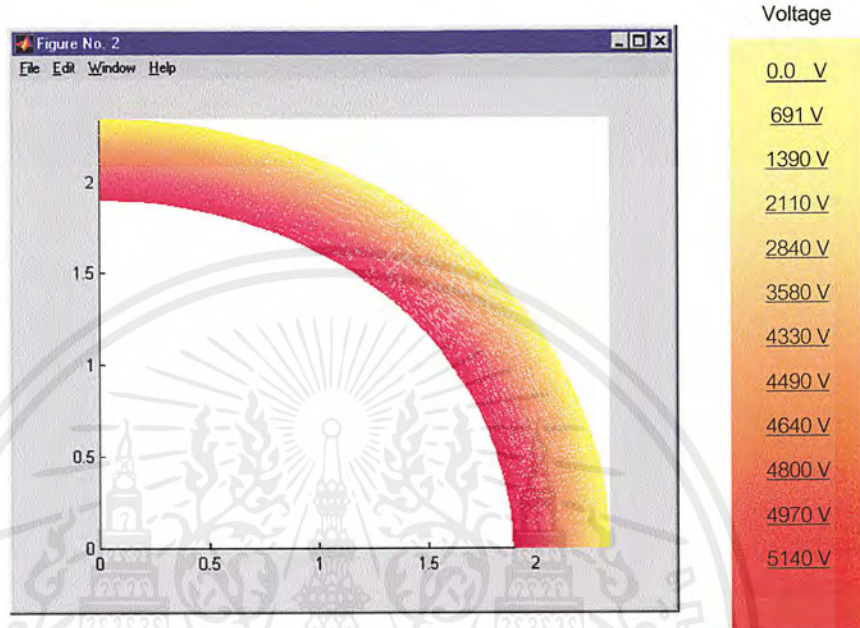
จากรูป 3.11 จะสังเกตเห็นเลขอยู่ 5 แถวอยู่ทางซ้ายมือเราจะสนใจค่าในแถวที่ 4 จากซ้ายมือซึ่งก็คือ ค่าสนามไฟฟ้ารวมของแต่ละอิลิเมนต์จะเห็นว่าทุกค่ามีค่าประมาณ 37 kV/cm ซึ่งมีค่ามากกว่า 16.25 kV/cm แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะมีโอโซนเกิดขึ้นในบริเวณอิลิเมนต์ 665-681

#### 3.4.3 การนำค่าไปพลอตเพื่อพิจารณา

เมื่อเรานำผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ซึ่งแสดงค่าของแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดภายในชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันนำมาแสดงด้วยการใช้โปรแกรมเมทเพล [5] ทำให้เห็นการกระจายของแรงดันไฟฟ้าภายในชุดสร้างโคโรนาดังรูป

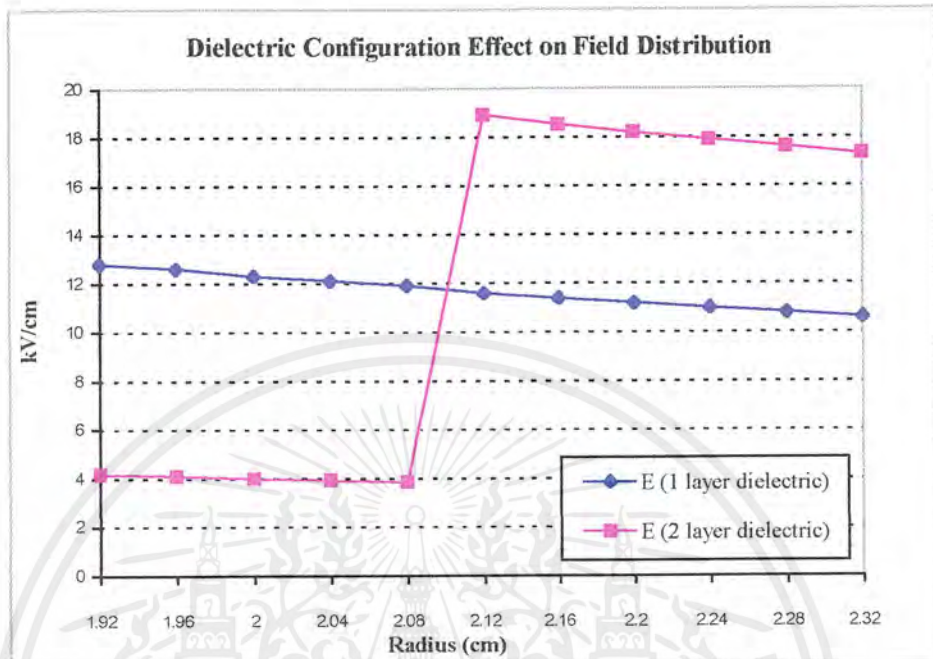
3.12

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



รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายค่าศักดาไฟฟ้าภายในชุดสร้างโคโรนา

จากกราฟรูปที่ 3.12 บริเวณสีแดงเข้มจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณที่มีสีแดงอ่อนกว่าลงไปจนถึงบริเวณที่มีสีเหลืองจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ซึ่งขนาดของสนามไฟฟ้าภายในชุดสร้างโคโรนาที่มีฉนวนชั้นเดียวและฉนวนสองชั้นจะแสดงได้ดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในชุดสร้างโคโรนาจนวนชั้นเดียวและจนวนสองชั้น

จากรูปที่ 3.13 เราจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดสนามไฟฟ้าของจนวนชั้นเดียวและจนวนสองชั้นซึ่งได้จากการใช้โปรแกรมแมทแลปและไฟไนต์อิลิเมนต์ที่มีค่าต่างกันโดยบริเวณช่องว่างอากาศของจนวน 2 ชั้น ซึ่งเริ่มที่รัศมีเท่ากับ 2.12 cm. มีขนาดสนามไฟฟ้าดกคร่อมช่องว่างอากาศสูงกว่าชุดสร้างโคโรนาที่มีจนวนชั้นเดียวซึ่งจะมีผลต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นโดยถ้าชุดสร้างโคโรนาใดมีขนาดของสนามไฟฟ้าดกคร่อมช่องว่างอากาศมากกว่าโอกาสการเกิดโอโซนก็จะมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในผลการทดลองต่อไป

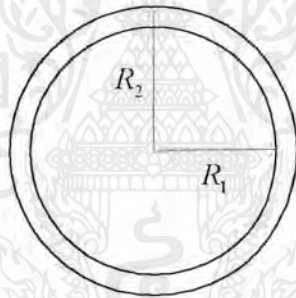
## บทที่ 4

### การทดลองและการพัฒนาชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดไอออน

ในบทที่ 3 ที่ผ่านมาเราได้ทำการออกแบบชุดสร้างโคโรนาเบื้องต้นตามหลักทฤษฎีที่ได้ศึกษามาในบทที่ 2 ดังนั้นในบทที่ 4 นี้เราจะนำผลการออกแบบเบื้องต้นนั้นนำมาทดสอบและพัฒนาต่อไปตามผลการทดลองที่จะแสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณไอออนที่เกิดจากฉนวนชั้นเดียวและฉนวนสองชั้นของชุดสร้างโคโรนา

##### 4.1.1 ฉนวนชั้นเดียว (อากาศ)



รูปที่ 4.1 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาสำหรับฉนวนชั้นเดียว

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_r = 1$
- ความยาว 30 เซนติเมตร
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 18 พฤศจิกายน 2542 เวลา 19:00 น. อุณหภูมิ  $27.5^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 63 %

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$
$$= 2.53V \text{ kV/cm}$$

จากค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดก๊าซไอออน  $E = 16.25 \text{ kV/cm}$ .

$$16.25 = 2.53V$$

$$\therefore \text{ต้องใช้แรงดันทั้งสิ้น } V_{\text{peak}} = 6.423 \text{ kV}$$

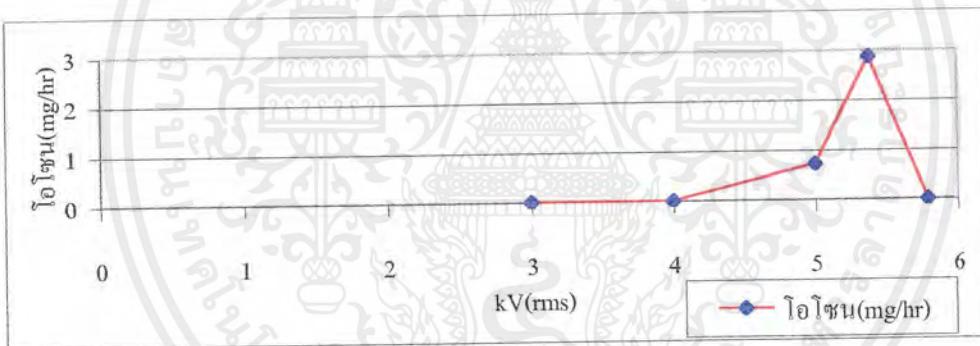
$$V_{\text{rms}} = 4.54 \text{ kV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

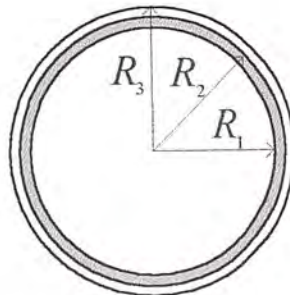
ตารางที่ 4.1.1 แสดงปริมาณ โอโซนของฉนวนชั้นเดียว(อากาศ) ,AC ช่องว่างอากาศกว้าง 4.4 mm

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต (mL)	โอโซน (mg/hr)	หมายเหตุ
3	-	-	
4	-	-	
5	0.1	0.72	
5.38	0.4	2.88	
5.79	-	-	Breakdown



รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณ โอโซนของฉนวนชั้นเดียว(อากาศ) ,AC ช่องว่างอากาศกว้าง 4.4 mm

4.1.2 ฉนวนสองชั้น (ไม้ก้ำ+อากาศ) ความกว้างช่องว่างอากาศ 1.4 mm.



รูปที่ 4.3 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาสำหรับฉนวนสองชั้น(ไม้ก้ำ+อากาศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.2 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 4, \epsilon_2 = 1$
- ความยาว 30 เซนติเมตร
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 20 พฤศจิกายน 2542 เวลา 19:00 น. อุณหภูมิ  $27.5^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 61 %

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

$$E_{r_2} = 4.62 \text{ V/cm.}$$

จากค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดก๊าซไอโอโซน  $E = 16.25 \text{ kV/cm}$

$\therefore$  ต้องใช้แรงดันทั้งสิ้น  $V_{peak} = 3.51 \text{ kV}$

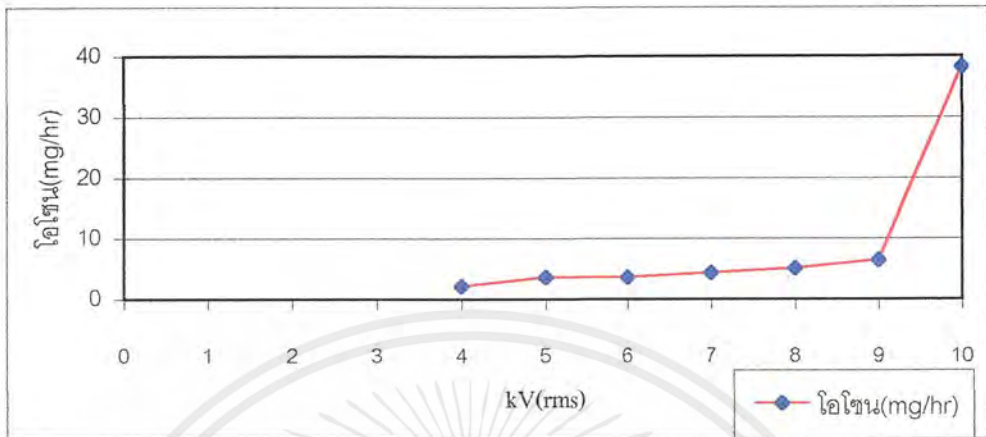
$$V_{rms} = 2.48 \text{ kV}$$

ผลการทดลอง

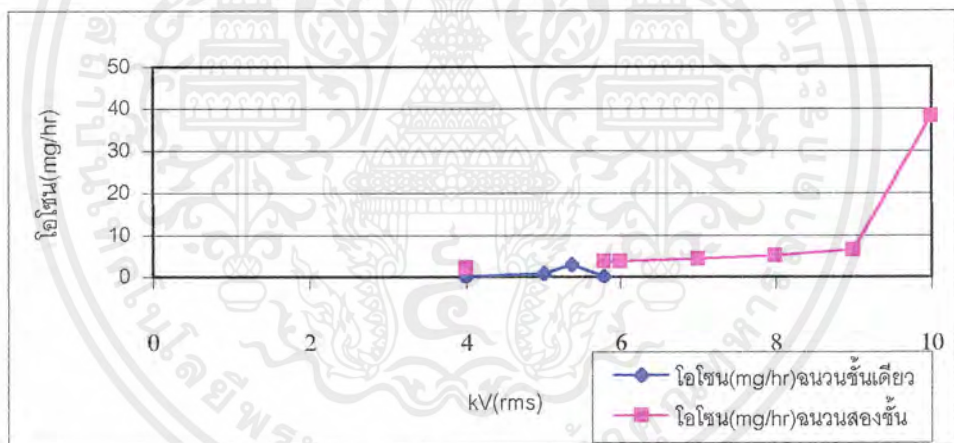
ตารางที่ 4.1.2 แสดงปริมาณ ไอโอโซนของจนวน 2 ชั้น (ไม้ก้ำ+อากาศ) , AC gap 1.4 mm

kV(rms)	ไอเดียมไทโอซัลเฟต (mL)	ไอโอโซน (mg/hr)	หมายเหตุ
4	0.3	2.16	
5	0.5	3.6	
6	0.5	3.6	
7	0.6	4.32	
8	0.7	5.04	
9	0.9	6.48	
10	5.3	38.16	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณ โอโซนของจนวน 2 ชั้น (ไม้ก้ำ+อากาศ) , AC gap 1.4 mm

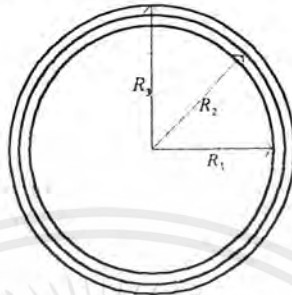


รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนของชุดสร้างโคโรนาจนวนชั้นเดียวและสองชั้น

จากกราฟผลการทดลอง เราจะเห็นว่าจุดเริ่มเกิดก๊าซโอโซนตามผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ และยังแสดงให้เห็นอีกว่า ปริมาณ โอโซนจากการใช้จนวนสองชั้นมีค่ามากกว่าการใช้จนวนชั้นเดียว ดังนั้นเราจะนำชุดสร้างโคโรนาจนวนสองชั้นมาพิจารณาต่อไป

#### 4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาความกว้างของช่องว่างอากาศที่มีผลต่อปริมาณ โอโซน

ฉนวน 2 ชั้น (MICA + อากาศ) ความกว้างช่องว่างอากาศ 2.4 mm ยาว 30 cm



รูปที่ 4.6 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาสำหรับความกว้างช่องว่างอากาศ 2.44 mm

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 4$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz.
- วันที่ 21 พฤศจิกายน 2542 เวลา 19:00 น. อุณหภูมิ  $27.4^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 61%

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

$$E_{r_2} = 3.57 \text{ kV/cm.}$$

จากค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซน  $E = 16.25 \text{ kV/cm}$

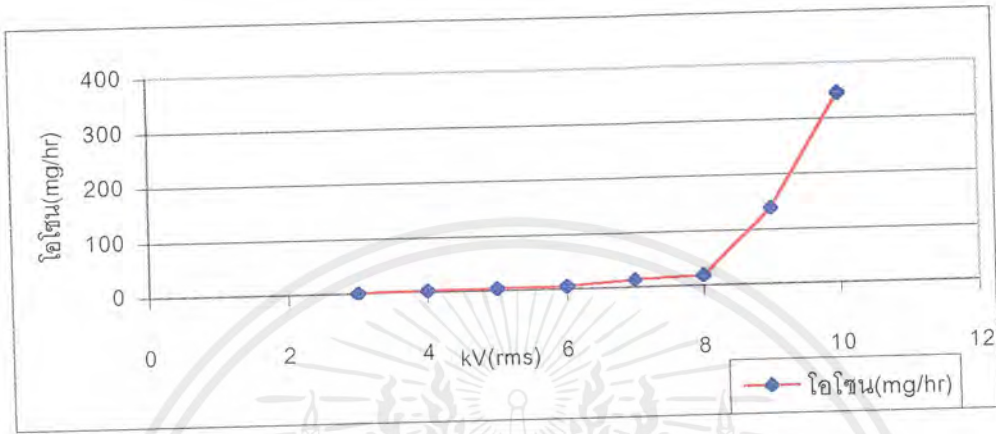
$$\therefore \text{ต้องใช้แรงดันทั้งสิ้น } V_{peak} = 4.54 \text{ kV}$$

$$V_{rms} = 3.21 \text{ kV}$$

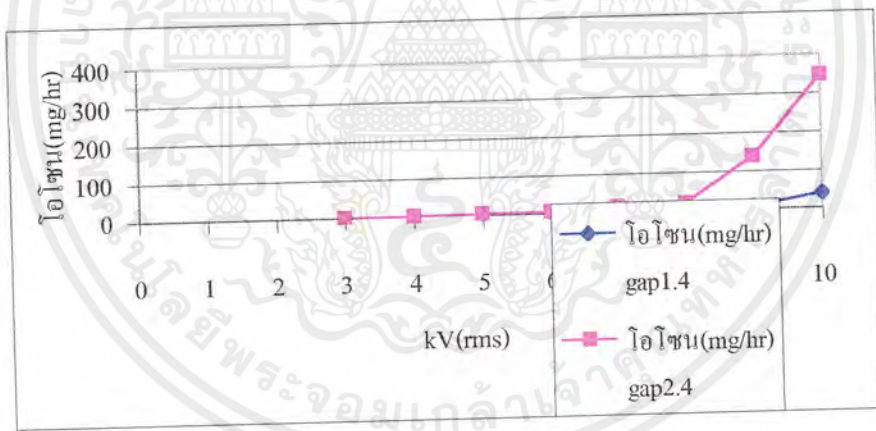
ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณโอโซนของฉนวน 2 ชั้น (PVC+อากาศ) , ช่องว่างอากาศกว้าง 2.4 mm

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต (mL)	โอโซน (mg/hr)	หมายเหตุ
3	0	0	
4	0.3	2.16	
5	0.4	2.88	
6	0.6	4.32	
7	1.9	13.68	
8	2.6	18.72	
9	19.2	138.24	
10	48.2	345.6	



รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณโอโซนของฉนวน 2 ชั้น(PVC+อากาศ) ,ช่องว่างอากาศกว้าง2.4 mm



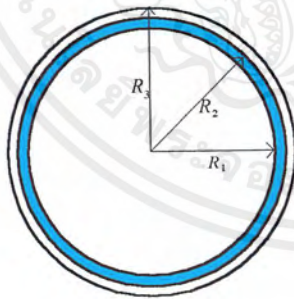
รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอ โจนที่ความกว้างของช่องว่างอากาศต่างกัน

จากกราฟผลการทดลอง จะเห็นว่าความกว้างของช่องว่างอากาศมีผลต่อปริมาณ โอ โจน อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยความกว้างของช่องว่างอากาศของชุดสร้าง โคโรนาฉนวนสองชั้นจากการทดลองที่ 1 จะได้ปริมาณ โอ โจนน้อยกว่าดังนั้นเราจะนำชุดสร้าง โคโรนาตามการทดลองที่สองนี้มา พิจารณาต่อไป

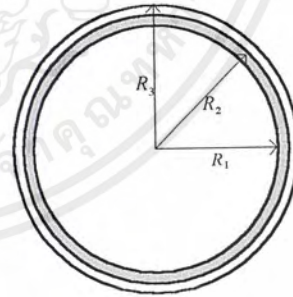
### 4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของฉนวนที่มีค่าความคงทนสนามต่างกันซึ่งมีผลต่อปริมาณไอโซน



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของฉนวนพีวีซี(บน)และไมก้า(ล่าง)



ฉนวนไฟฟ้า พีวีซี  $\epsilon_1 = 5$



ฉนวนไฟฟ้า ไมก้า  $\epsilon_1 = 4$

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของฉนวนไฟฟ้าที่มีค่าความคงทนสนามไฟฟ้าต่างกัน

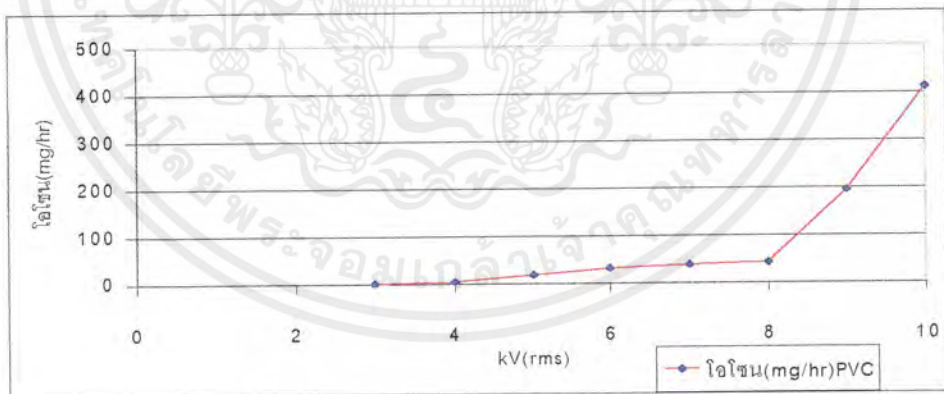
- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz.
- ความยาว 30 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วันที่ 4 ธันวาคม 2542 เวลา 16:00 น. อุณหภูมิ 27.3 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 62%  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

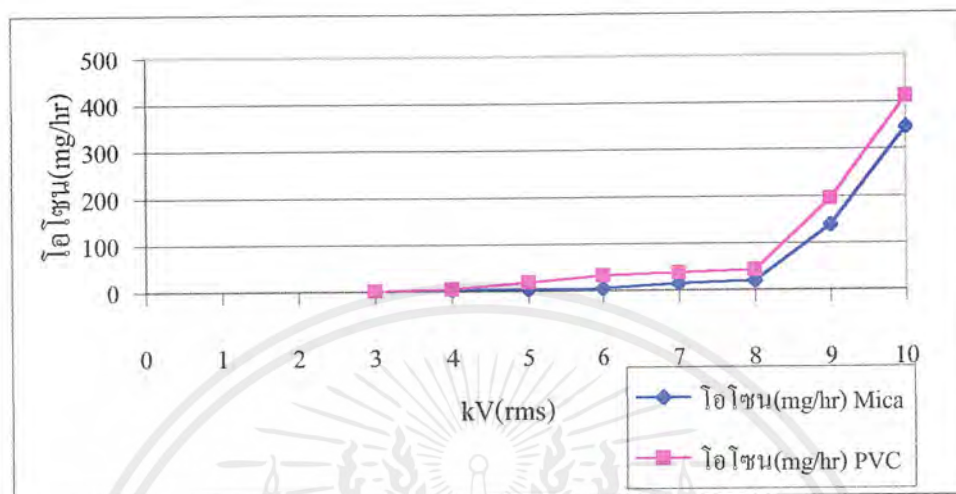
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณ โอโซนที่ได้จากชุดสร้างโคโรนาที่มีฉนวนไฟฟ้าเป็นพีวีซี

kV(rms)	โซเดียม ไทโอซัลเฟต(mL)	โอโซน(mg/hr)	หมายเหตุ
3	0	0	
4	0.5	3.6	
5	2.4	17.28	
6	4.3	30.96	
7	5.2	37.44	
8	5.8	41.76	
9	27	194.4	
10	57.2	411.84	



รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณ โอโซนที่ได้จากชุดสร้างโคโรนาที่มีฉนวนไฟฟ้าเป็นพีวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่ได้จากจนวนไฟฟ้าที่มีลักษณะต่างกัน

จากกราฟผลการทดลอง จะเห็นว่าไมก้าซึ่งมีค่าความคงทนสนามไฟฟ้าน้อยกว่าพีวีซี ทำให้ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากันชุดสร้างโคโรนาที่ใช้พีวีซีเป็นจนวนไฟฟ้าจะมีขนาดสนามไฟฟ้าสูงกว่าจนวนไฟฟ้าที่ทำจากไมก้า ส่งผลให้ชุดสร้างโคโรนาที่ทำจากจนวนพีวีซีสามารถให้ปริมาณโอโซนได้สูงกว่าด้วย ดังนั้นเราจะใช้ชุดสร้างโคโรนาจนวนสองชั้นซึ่งมีจนวนพีวีซี และอากาศมาทำการพิจารณาต่อไป

#### 4.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาชนิดของแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณ ไอโซน

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- ความยาว 30 เซนติเมตร
- แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- วันที่ 6 ธันวาคม 2542 เวลา 16:00 น. อุณหภูมิ 27.6 ความชื้นสัมพัทธ์ 64%



รูปที่ 4.13 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-330 kV<sub>DC</sub>



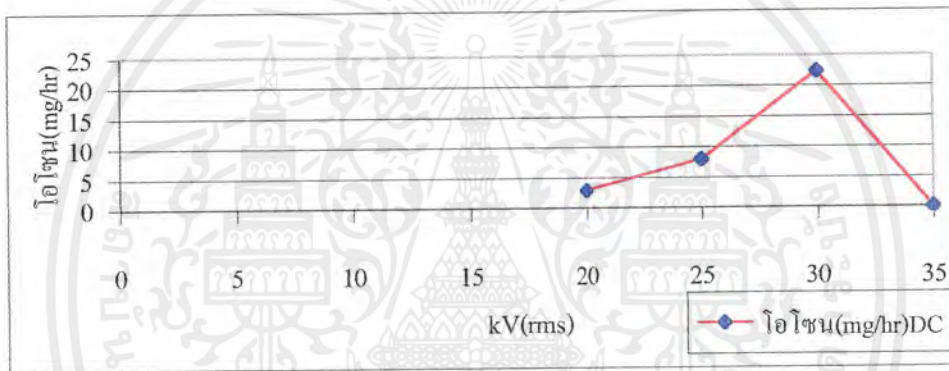
รูปที่ 4.14 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 0-100 kV(rms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

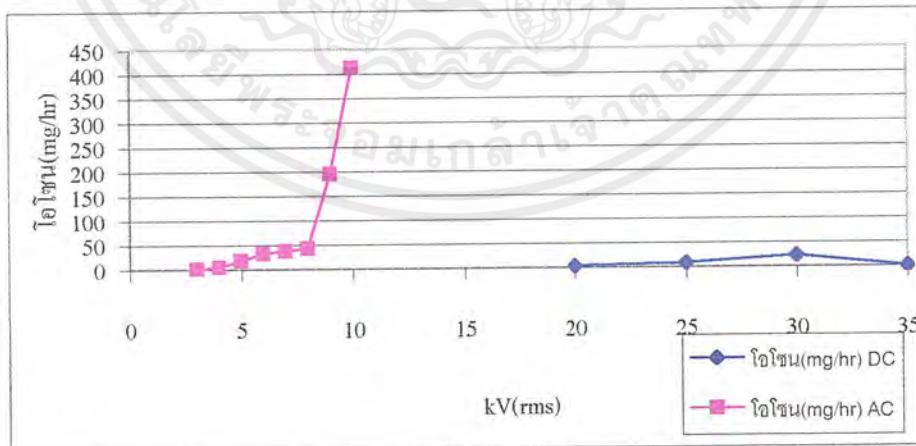
ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

kV(rms)	โตะเต็มโทไอซัลเฟต(mL)	โอโซน(mg/hr)	หมายเหตุ
20	0.4	2.88	
25	1.1	7.92	
30	3.1	22.32	
35	0	0	breakdown



รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่ได้จากการใช้แรงดันไฟฟ้าต่างชนิดกัน

จากกราฟผลการทดลองจะเห็นว่าชนิดของแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อปริมาณ โอโซนได้อย่างชัดเจน โดยแรงดันไฟฟ้าชนิดกระแสสลับจะทำให้เกิดก๊าซโอโซนมากกว่า ดังนั้นเราจึงนำชุด

สร้างโคโรนาจากการทดลองก่อนนี้มาพิจารณาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาความยาวของชุดสร้างโคโรนาที่มีผลต่อปริมาณ โอโซน

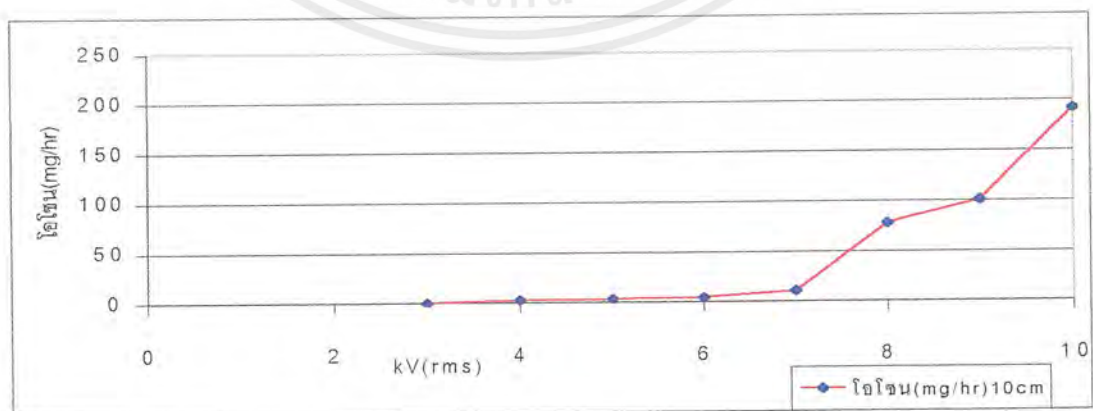
##### 4.5.1 ชุดสร้างโคโรนาความยาว 10 เซนติเมตร

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 13 ธันวาคม 2542 เวลา 19:00 น. อุณหภูมิ  $27.8^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 61%

#### ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5.1 แสดงปริมาณโอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว 10 เซนติเมตร

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต(mL)	โอโซน(mg/hr)	หมายเหตุ
3	0	0	
4	0.4	2.88	
5	0.5	3.6	
6	0.6	4.32	
7	1.5	10.8	
8	10.8	77.76	
9	14	100.8	
10	26.7	192.24	



รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

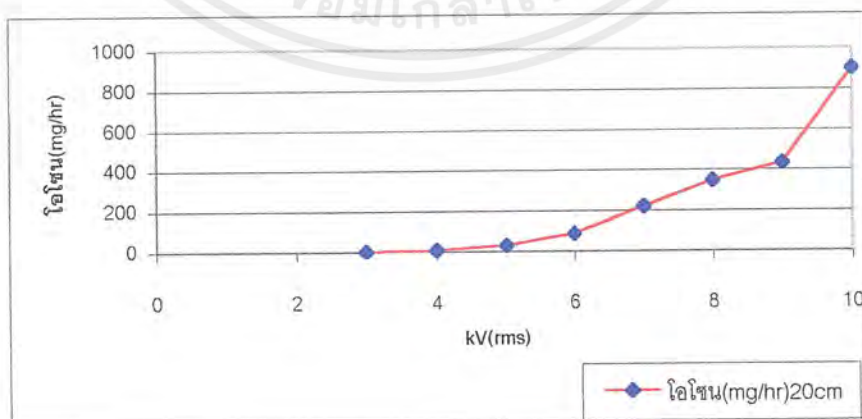
#### 4.5.2 ชุดสร้างโคโรนาความยาว20เซนติเมตร

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 13 ธันวาคม 2542 เวลา 19:00 น. อุณหภูมิ  $27.8^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 61%

#### ผลการทดลอง

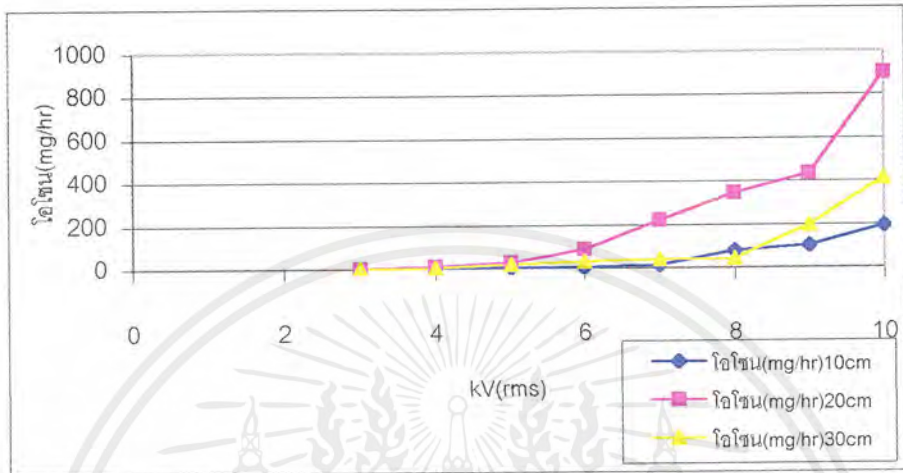
ตารางที่4.5.2 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว20เซนติเมตร

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต(mL)	โอโซน(mg/hr)	หมายเหตุ
3	0	0	
4	1.1	7.92	
5	3.9	28.1	
6	12	86.4	
7	30.6	220.3	
8	48	345.6	
9	60	432	
10	125	900	



รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาความยาว20เซนติเมตร

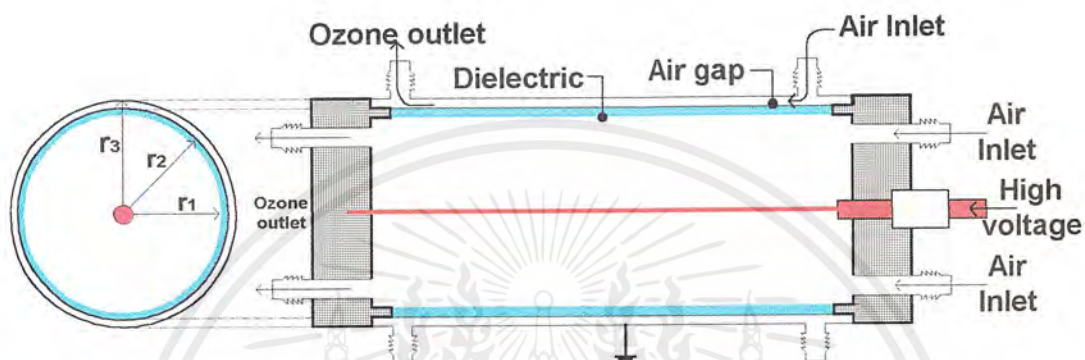
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีความยาวต่างกัน

จากกราฟผลการทดลอง จะเห็นว่าความยาวของชุดสร้างโคโรนามีผลต่อปริมาณ โอโซนอย่างชัดเจน โดยความยาวของชุดสร้างโคโรนาที่เหมาะสมซึ่งให้ปริมาณ โอโซนมากที่สุดคือ ชุดสร้างโคโรนาที่มีความยาวเท่ากับ 20 เซนติเมตร

#### 4.6 การทดลองที่ 6 ศึกษาชนิดของตัวนำแกนในของชุดสร้างโคโรนา ที่เป็นเส้นลวดซึ่งมีผลต่อปริมาณ โอโซน



รูปที่ 4.20 แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนเป็นเส้นลวดแสดนเลสเส้นเดียว

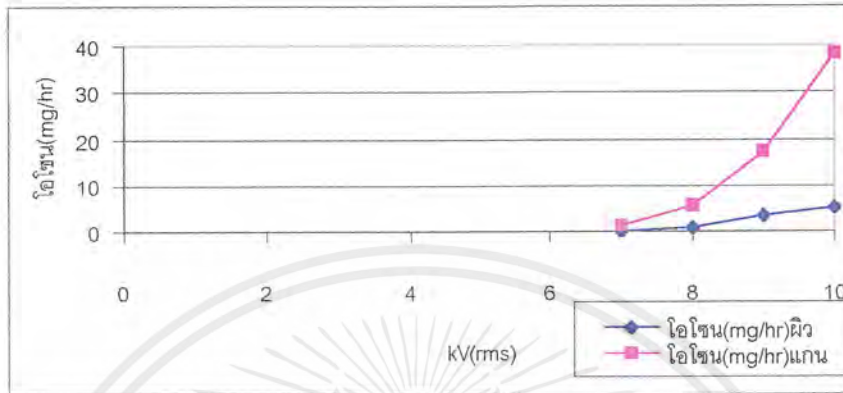
- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- ความยาว 20 เซนติเมตร
- รัศมีของเส้นลวดแสดนเลส 0.025 เซนติเมตร
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 16 ธันวาคม 2542 เวลา 19:00 น. อุณหภูมิ  $27.5^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 61%

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีแกนกลางเป็นเส้นลวดแสดนเลสเส้นเดียว

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต(mL)ผิว	โซเดียมไทโอซัลเฟต(mL)แกน	โอโซน(mg/hr)ผิว	โอโซน(mg/hr)แกน
7	0	0.2	0	1.44
8	0.1	0.8	0.72	5.76
9	0.5	2.4	3.6	17.28
10	0.7	5.3	5.04	38.16

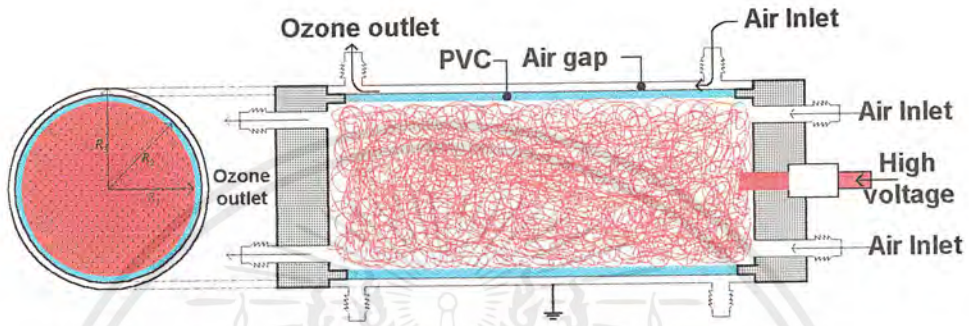
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงปริมาณที่เกิดจากชุดสร้าง โครโรนาที่มีแกนกลางเป็นเส้นลวดแอสแตนเลสเส้นเดียว

จากกราฟผลการทดลองถึงแม้ว่าปริมาณ โอโซนรวมแล้วจะได้ค่าน้อยมาก แต่จากการทดลองนี้เราจะเห็นว่าปริมาณ โอโซนเกิดขึ้นที่บริเวณแกนของชุดสร้าง โครโรนาด้วยไมโซที่ผิวอย่างเดียว จากผลการทดลองนี้ทำให้เราได้แนวความคิดที่จะพัฒนาชุดสร้าง โครโรนาต่อไปโดยใช้แกนที่เป็นฝอยแอสแตนเลสซึ่งแสดงตัวเป็นเส้นลวดจำนวนมาก อีกทั้งบริเวณที่ฝอยแอสแตนเลสสัมผัสกับผิวของฉนวน ไฟฟ้ายังมีลักษณะที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตกลงบนบริเวณช่องว่างอากาศได้อีกด้วย ซึ่งผลการทดลองและลักษณะของชุดสร้าง โครโรนาดังกล่าวจะแสดงต่อไปในการทดลองที่ 7

4.7 การทดลองที่ 7 ศึกษาชนิดของตัวนำแกนในของชุดสร้างโคโรนาที่เป็นฟอยล์สแตนเลส  
ซึ่งมีผลต่อปริมาณ โอโซน



รูปที่ 4.22 แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาที่มีแกนกลางเป็นฟอยล์สแตนเลส

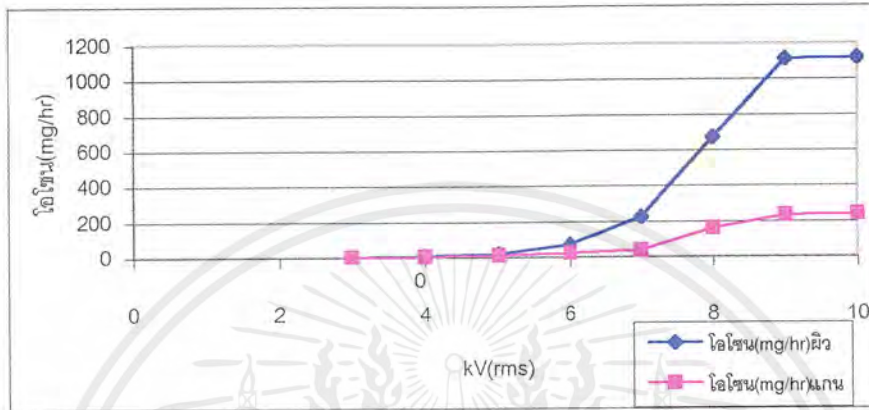
- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 22 มกราคม 2543 เวลา 22:00 น. อุณหภูมิ  $27.2^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 63%

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนกลางเป็นฟอยล์สแตนเลส

kV(rms)	ขเดิมโทไอซัลเฟต(mL)ผิว	ขเดิมโทไอซัลเฟต(mL)แกว	โอโซน(mg/hr)ผิว	โอโซน(mg/hr)แกน	โอโซน(mg/hr)รวม
3	0	0	0	0	0
4	1.2	0.4	8.64	2.88	11.52
5	2.7	1.4	19.44	10.08	29.52
6	9.4	3.2	67.68	23.04	90.72
7	31.3	4.8	225.36	34.56	259.92
8	93.3	22.2	671.76	159.84	831.6
9	154.4	32	1111.68	230.4	1342.08
10	155.5	33.1	1119.6	238.32	1357.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนกลางเป็นฟอยล์สแตนเลส

จากผลกราฟการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าบริเวณแกนกลางของชุดสร้างโคโรนาสามารถกำเนิดโอโซนได้ในปริมาณมากขึ้นอีกทั้งบริเวณผิวนอกของชุดสร้างโคโรนาก็สามารถให้กำเนิดโอโซนในปริมาณมากได้เช่นกัน รวมแล้วปริมาณโอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่ใช้แกนเป็นฟอยล์สแตนเลสมีค่ามากกว่าชุดสร้างโคโรนาที่มีแกนเป็นทรงกระบอกสแตนเลส ดังนั้นเราจึงนำชุดสร้างโคโรนาชนิดนี้มาพิจารณาต่อไป

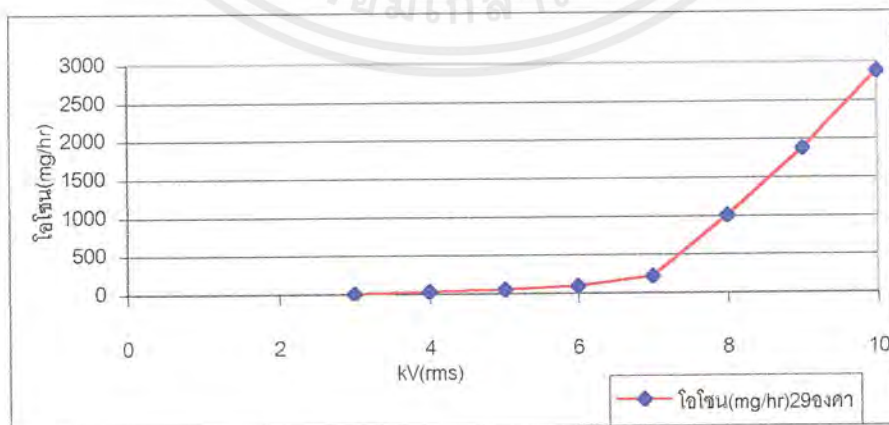
#### 4.8 การทดลองที่ 8 ศึกษาอุณหภูมิของอากาศซึ่งมีผลต่อปริมาณ โอโซน

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 28 มกราคม 2543 เวลา 04:00 น. อุณหภูมิ  $22.0^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 64%

ผลการทดลอง

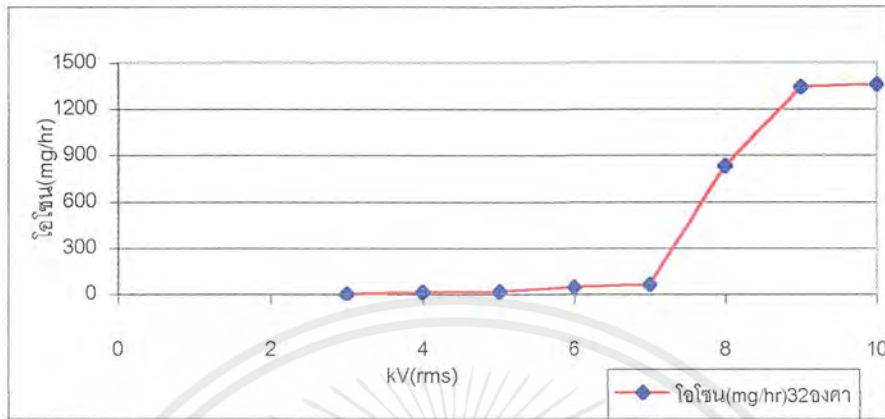
ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต(mL)	โอโซน(mg/hr)	หมายเหตุ
3	0	0	
4	3.2	23.04	
5	6.5	46.8	
6	17	122.4	
7	62.5	450	
8	139.3	1002.24	
9	260.5	1875.6	
10	454	2880	

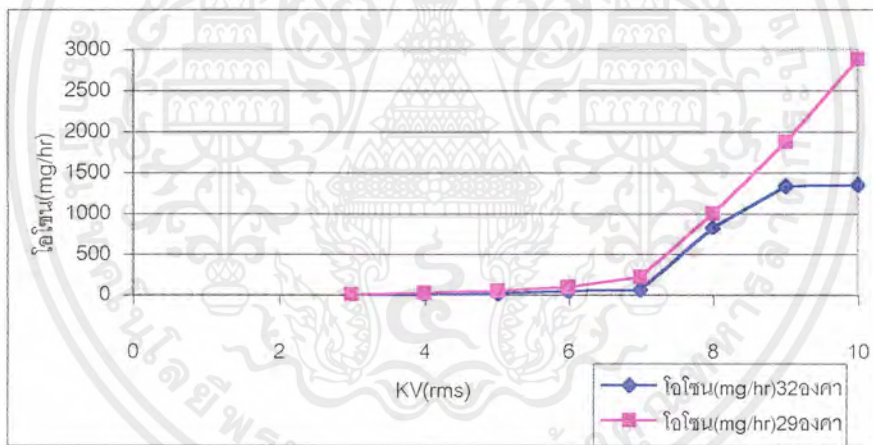


รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิ32องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่อุณหภูมิต่างกัน

จากผลการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาณ โอโซนอย่างมาก โดยอุณหภูมิต่ำกว่า จะทำให้ชุดสร้างโคโรนาที่ออกแบบไว้ให้ปริมาณ โอโซนมากกว่าที่อุณหภูมิสูง

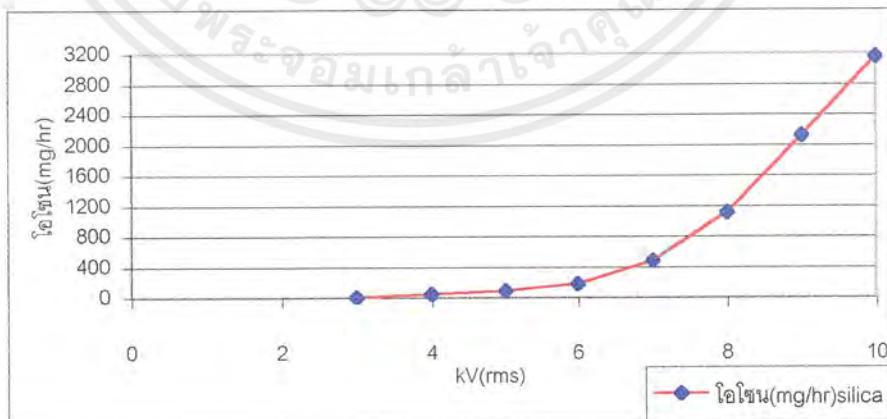
#### 4.9 การทดลองที่ 9 ศึกษาความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมีผลต่อปริมาณ โอโซน

- มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.1 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 5$  ,  $\epsilon_2 = 1$
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz
- วันที่ 22 มกราคม 2543 เวลา 22:00 น. อุณหภูมิ  $27.2^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 63%

#### ผลการทดลอง

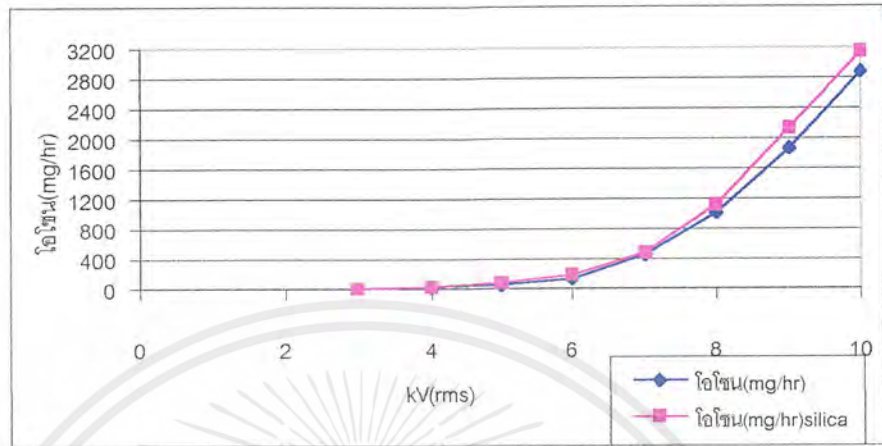
ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีสารดูดความชื้น(ซิลิกาเจล)

kV(rms)	โซเดียมไทโอซัลเฟต(mL)	โอโซน(mg/hr)	หมายเหตุ
3	0	0	
4	5.5	39.6	
5	11.2	80.64	
6	24.7	177.84	
7	66.9	481.68	
8	154.8	1114.56	
9	295	2124	
10	438.6	3157.92	



รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีสารดูดความชื้น(ซิลิกาเจล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณ โอโซนที่เกิดจากชุดสร้างโคโรนาที่มีและไม่มีสารดูดความชื้น

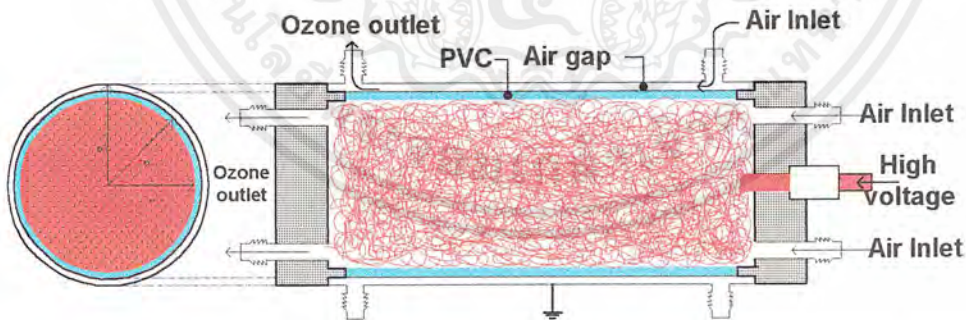
จากผลการทดลอง จะแสดงให้เห็นว่าความชื้นของอากาศมีผลต่อปริมาณ โอโซน โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำจะทำให้ชุดสร้างโคโรนาที่ออกแบบไว้ให้ปริมาณ โอโซนมากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

## บทที่ 5

### สรุปผลและวิจารณ์

1. จากการศึกษาทฤษฎีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์และประยุกต์ใช้ทฤษฎีต่างๆประกอบทำให้สามารถออกแบบและสร้างชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนเบื้องต้นขึ้นมาได้
2. เมื่อนำชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนเบื้องต้นมาทดลองหาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น ทำให้พบว่าปัจจัยต่างๆเช่น จำนวนชั้นของฉนวน ชนิดของฉนวน ความหนาของฉนวนก๊าซ ชนิดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขนาดความยาวของชุดสร้างโคโรนา ลักษณะของแกนใน ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ มีผลต่ออัตราการเกิดปริมาณโอโซนเป็นอย่างมาก
3. โดยจากผลการทดลองทั้ง 8 ผลการทดลอง ทำให้เราสามารถกำหนดลักษณะของชุดสร้างโคโรนาและมีชุดเตรียมอากาศสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนได้ดังนี้

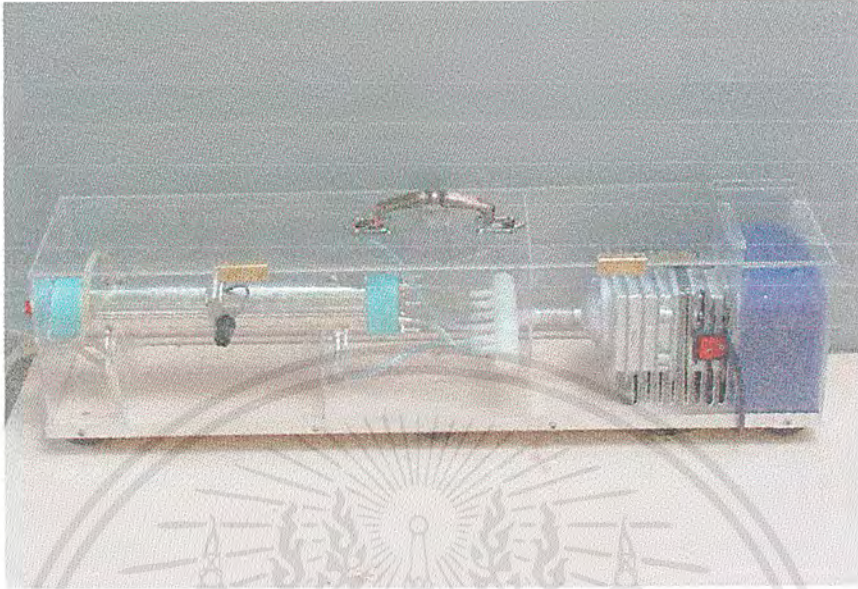
3.1 ชุดสร้างโคโรนามีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีฉนวนสองชั้นคืออากาศและฉนวนพีวีซี แกนกลางทำจากฟอยล์สแตนเลสมีมิติแสดงดังรูป



รูปที่ 5.1 แสดงมิติของชุดสร้างโคโรนาที่พัฒนาแล้ว

โดยพีวีซีมีรัศมี = 2.1 cm ยาว = 20 cm , ท่อสแตนเลสวงนอกมีรัศมี = 2.34 cm

- 3.2 ชุดเตรียมอากาศใช้ซิลิกาเจลเพื่อให้อากาศที่เข้าสู่ชุดสร้างโคโรนามีความชื้นสัมพัทธ์น้อยที่สุดทำให้เราได้ชุดสร้างโคโรนาพร้อมชุดเตรียมอากาศดังแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5.2 ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนที่พัฒนาแล้ว

4. โดยสรุปชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนที่พัฒนาแล้วมีคุณสมบัติดังนี้

- 4.1 ความสามารถในการกำเนิดโอโซนสูงสุดคือ 3157.92 mg/hr
- 4.2 ช่วงแรงดันที่ใช้งานคือ 4-10 kV(rms)
- 4.3 อัตราการไหลของลม(Flow) คือ 4 L/min
- 4.4 ราคาโดยประมาณคือ 2,000 บาท (เฉพาะ อิเล็กทรอนิกส์)

เปรียบเทียบชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนที่สร้างกับอุตสาหกรรม  
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบชุดสร้างโคโรนา

ข้อมูล	เครื่องในอุตสาหกรรม	เครื่องที่สร้างขึ้น
ลักษณะของชุดสร้างโคโรนา	14 cells	1cell
อัตราการเกิดโอโซนสูงสุด	10,000 mg/hr	3,157.92 mg/hr
ช่วงแรงดันที่ใช้งาน	4-10 kV(rms)	4-10 kV(rms)
อัตราการไหลของลม	0.4 L/min	4 L/min
ราคา	98,000 บาท	2,000 บาท

5. จากการเปรียบเทียบข้อมูลอัตราการเกิดโอโซนสูงสุด ทำให้สรุปได้ว่าชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนที่สร้างขึ้นจากการศึกษาและพัฒนาแล้ว สามารถนำไปใช้ได้

เอกสารนี้เป็น **อุตสาหกรรมจริง** สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หมายเหตุ

ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดไอโซนที่สร้างขึ้นมาได้ออกแบบมาให้เหมาะกับการทดลองปัจจัยต่างๆที่ต้องการศึกษา จึงมีข้อจำกัดในทางอุตสาหกรรม เช่น ขนาดของท่อแสดงแสงวงใน เลื่อนมาให้มีขนาดเหมาะกับพีวีซีที่มีจำหน่ายอยู่แล้วในท้องตลาด  
 จำนวนที่เลือกใช้ถูกจำกัดในเรื่องของงบประมาณ โดยจำนวนแก้วมีค่าความคงทนจำนวนสูงกว่าพีวีซีมาก แต่ราคาประมาณ 3,000 บาทซึ่งแพงกว่าพีวีซีมาก

ซึ่งก็คือ ถ้าหากเรานำข้อมูลปัจจัยต่างๆที่ได้ศึกษามาประกอบการสร้างชุดสร้างโคโรนาใหม่ ก็จะได้ชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องกำเนิดไอโซนที่มีความสามารถในการผลิตไอโซนที่สูงกว่าชุดสร้างที่เราสร้างขึ้นมาเพื่อการทดลอง

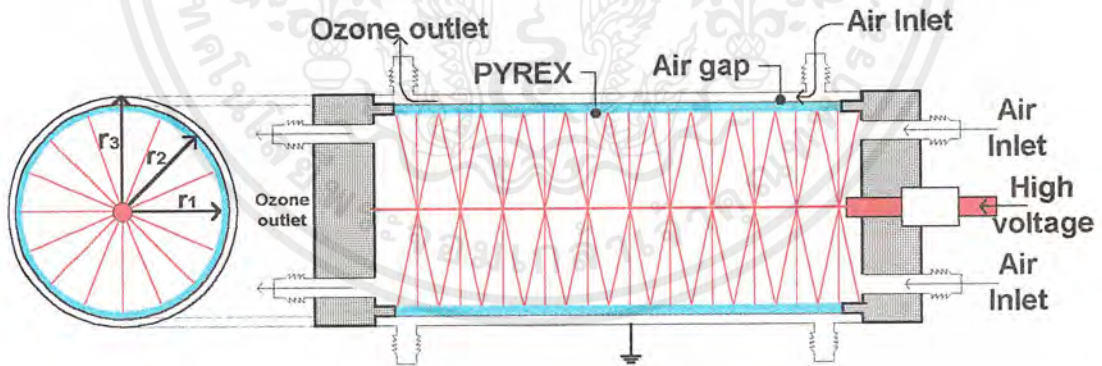


## ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

จากทฤษฎีและผลการทดลองที่ได้ ทำให้เราทราบปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณ โอโซนที่เกิดขึ้นคือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ความชื้น อุณหภูมิ อัตราการไหล และปัจจัยอื่นๆเช่นความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ปริมาณออกซิเจน ปัจจัยต่างๆเหล่านี้ เราสามารถควบคุม และออกแบบเพื่อการพัฒนาต่อไปได้ดังนี้

### 1. ปัจจัยความเครียดสนามไฟฟ้า

จากผลการทดลองทำให้เราทราบว่าโอโซนจะเกิดมากขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งเราสามารถเพิ่มความเครียดสนามไฟฟ้าให้มากขึ้น โดยการใช้แกนของชุดสร้างโคโรนาที่เป็นแปรงลวด แต่เมื่อใช้แปรงลวดแล้วความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมจนวนไฟฟ้าข้อมมากขึ้นด้วย เราจึงควรใช้จนวนไฟฟ้าที่มีค่าความคงทนสนามไฟฟ้าสูงกว่าเดิม จากข้อมูลที่ได้ศึกษามา จนวนไฟฟ้าที่เป็นแก้วชนิดPYREX มีค่าความคงทนสนามไฟฟ้า( $\epsilon_r$ )เท่ากับ9 ซึ่งมีค่าความคงทนสนามไฟฟ้าสูงกว่าพีวีซีมากซึ่งเราจะได้ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาที่เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อดังรูป



มิติของชุดสร้างโคโรนา  $r_1 = 1.9 \text{ cm}$  ,  $r_2 = 2.2 \text{ cm}$  ,  $r_3 = 2.34 \text{ cm}$  ,  $\epsilon_1 = 9$  ,  $\epsilon_2 = 1$

รูปที่ 5.3 แสดงมิติและภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนาเหมาะสมในการพัฒนาต่อ

### 2. ปัจจัยความชื้น

จากผลการทดลองทำให้เราทราบว่าปริมาณ โอโซนจะมากขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์น้อยลง เราจึงใช้ซิลิกาเจล ซึ่งสามารถดูดความชื้นออกจากอากาศได้ดี ทำให้ได้ปริมาณ โอโซนในปริมาณมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกาเจลที่ใช้ควรทำการเปลี่ยน หรือนำมาอบเพื่อไล่ความชื้นเมื่อซิลิกาเจลเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็น สีชมพูหรือสีฟ้าอ่อนๆ

### 3. ปัจจัยอุณหภูมิ

จากผลการทดลอง ทำให้เราทราบว่าปริมาณ โอโซนจะมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของอากาศลดลง เนื่องจาก โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร เราจึงควรออกแบบให้ชุดสร้างโคโรนาอยู่ในห้องที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิที่ต่ำได้

### 4. อัตราการไหล

จากผลการทดลองทำให้เราทราบว่าอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อปริมาณ โอโซน ดังนั้น เราจึงควรออกแบบชุดสร้างโคโรนาให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ โดยการใช้ถึง พัดความดัน และวาล์ว ควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าตามที่ต้องการ

#### ปัจจัยอื่นๆ

-ความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า จากผลงานการวิจัย[6]ทำให้เราทราบว่าเมื่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงขึ้นแล้วจะทำให้ปริมาณ โอโซนสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นถ้าเราต้องการปริมาณ โอโซนมากขึ้นอีกเราควรใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูงจ่ายให้กับชุดสร้างโคโรนาที่เราออกแบบไว้แล้วในเบื้องต้น โดยเราควรเปลี่ยนฉนวนเป็นแบบนอนโพลาร์(Non Polar) เช่น แก้ว เพราะความถี่มีผลกับฉนวนแบบ โพลาร์(Polar)

-ปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศจาก[3]ทำให้เราทราบว่าเมื่อเราใช้บรรยากาศที่มีปริมาณ ก๊าซออกซิเจนที่สูงขึ้นจะช่วยให้ชุดสร้างโคโรนาสามารถสร้างโอโซน ได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าเราต้องการปริมาณ โอโซนมากขึ้นอีกเราควรใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์แทนการใช้อากาศทั่วไป

ทางกลุ่มโครงการงานหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวทางการพัฒนาชุดสร้างโคโรนา และชุดเตรียมอากาศที่ได้ออกแบบไว้นี้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ที่ต้องการศึกษาและพัฒนาเครื่องกำเนิด โอโซนต่อไปในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เอื้อเพื่อเอกสาร คำแนะนำ และ สิ่งอื่นๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการจนสามารถสำเร็จลุล่วงดังต่อไปนี้

รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษาและเอาใจใส่พวกเราเสมอมา  
อาจารย์ กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ อาจารย์ ชมพูนุท ไชยรักษ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและให้ข้อมูลในเรื่องการวัดปริมาณไอโซน

ที่พรพิมล รัตนวิเชียร และ พี่พงษ์เทพ เกิดคอนแฝง ที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลประกอบการทำโครงการมาตลอด

เจ้าหน้าที่ภาควิชาเครื่องกล เทคโนโลยีการวัดคุม และเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ต่างๆ และสถานที่ทดลอง

ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่เอื้อเพื่อสถานที่ทำการทดลอง

เจ้าหน้าที่หน่วยรีเลย์ แผนกซ่อมบำรุงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นนทบุรี ที่เอื้อเพื่อการทดสอบหาค่าความเป็นฉนวน

กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา ที่เอื้อเพื่อข้อมูลสภาพอากาศ

คุณธีรารัตน์ ชมภูหลง บริษัทโพรมิเนนท์ ฟลูอิด คอนโทรลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่พาเข้าชมระบบบำบัดน้ำพร้อมทั้งให้ข้อมูลทางอุตสาหกรรม (เบอร์ติดต่อ 376-0008-12)

ห.จ.ก. สิ้นสิวะโลหะการ ที่ให้ข้อมูลด้านอุปกรณ์ต่างๆ (เบอร์ติดต่อ 552-0414)

พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลงด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hankin Atlas Ozone Systems Limited, "Material Safety Information", [Online] Available : <http://www.hankinozone.com/MSDS.html>.
- [2] Prominent Fluid Controls (Thailand) Limited, "Production,feature and applications of Ozone".
- [3] Brink Deborah R., Langlais Brono and Reckhow David A., "Ozone in Water Treatment, Application and Engineering", Lewis Publishing, Michigan, 1991.
- [4] ตำรวัย ดั่งษ์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [5] พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก, "เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า", ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
- [6] พรพิมล รัตนวิเชียร, "เครื่องผลิตก๊าซโอโซนพลังงานแสงอาทิตย์", ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [7] เขมรัฐ วงศ์ทิมารัตน์, ทนงฤทธิ์ จิโรจน์กุล, บวร อังคนาวิสัยย์และบัณฑิต ปั้นประไพ, ปรินญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [8] S.Potivejkul, V.Kinnares, P Rattanavichien, "Design of Ozone Generator using Solar Energy", APCCAS IEEE Conference on Circuit and System, Vol.28, No.3, pp.wp2-10, Nov 1992.

## ภาคผนวก

### 1. การหาค่า Node Max, Element Max และ Potential Max เพื่อใช้กรอกค่าโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์

#### 1.1 วิธีคำนวณหาค่า Node Max

1. สมมติว่าอิเล็กโตรดประกอบไปด้วยจำนวน 2 ชั้น  $r_1 = 1.9$  ,  $r_2 = 2.1$  ,  $r_3 = 2.34$  cm

2. คิดจนวนชั้นที่ 1

จนวนมีความหนา =  $r_2 - r_1 = 2.1 - 1.9 = 0.2$  cm

หลักการ หาระยะห่างแต่ละชั้นให้เป็นเลขลงตัว (ทศนิยมรู้อยบ)

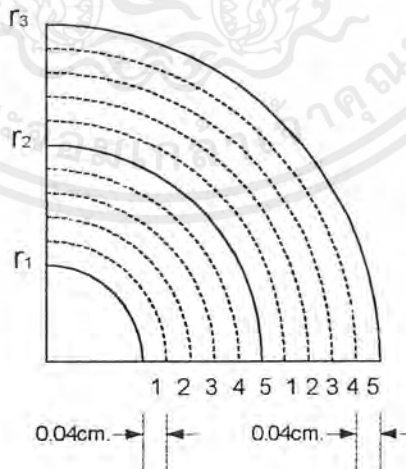
เลือก ให้แต่ละชั้นหนา 0.04 cm ได้ 5 ชั้น

คิดจนวนชั้นที่ 2

จนวนมีความหนา =  $r_3 - r_2 = 2.34 - 2.1 = 0.24$  cm

หลักการ หาระยะห่างแต่ละชั้นให้เป็นเลขลงตัว (ทศนิยมรู้อยบ)

เลือก ให้แต่ละชั้นหนา 0.04 cm ได้ 6 ชั้น



รูปแสดง การแบ่งชั้นของจนวนเพื่อการคำนวณในหัวข้อ 1.1

### 3. แบ่งช่อง

เนื่องจาก Program Finite Element กำหนดให้ใช้ Element Max ได้ไม่เกิน 3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Element  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการ นำ 3000 หาร จำนวนเส้นทั้งหมด (r1 ถึง r2) แล้วหาร 2

ได้  $(3000 \div 12)2 = 125$  ดังนั้น สามารถเลือกจำนวนได้ 0-125 ช่อง (ถ้าต้องการละเอียดมาก

ก็เลือกจำนวนช่องมาก) เลือก 50 ช่อง

#### 4. หาจำนวน node

จากการเลือก 50 ช่อง จะได้ชั้นละ 51 node

คิดณวนชั้นที่ 1

มี 5 ชั้น แต่มี 6 เส้น (นับเส้นแรกวงในด้วย)

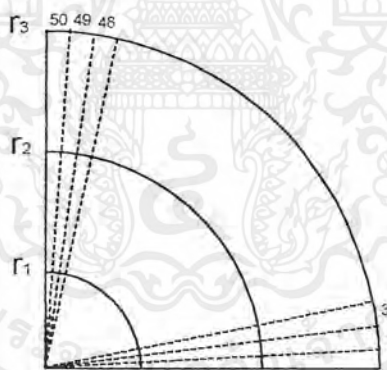
ได้  $51 \times 6 = 306$  node

คิดณวนชั้นที่ 2

มี 6 ชั้น มี 6 เส้น (นับต่อจากเส้น r2)

ได้  $51 \times 6 = 306$  node

รวม Node Max =  $306 + 306 = 612$  node



รูปแสดง การแบ่งช่องของฉนวนเพื่อการคำนวณในหัวข้อ 1.2

#### 1.2 วิธีคำนวณหาค่าelement max

จากการ แบ่ง element (เป็นรูปสามเหลี่ยม) จำนวนช่องจะได้เป็น 2 เท่า

ได้ ช่อง =  $50 \times 2 = 100$  ช่อง

คิดณวนชั้นที่ 1

คิดณวนชั้นที่ 2

มี 5 ชั้น

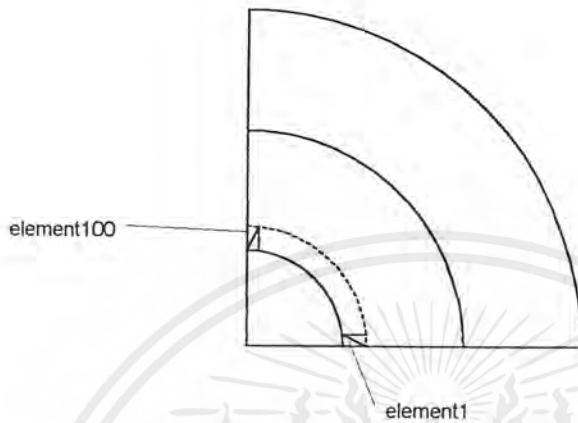
มี 6 ชั้น

ได้  $5 \times 100 = 500$  element

ได้  $6 \times 100 = 600$  element

รวม Element Max =  $500 + 600 = 1100$  element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดง การแบ่ง element ของฉนวน

### 1.3 วิธีคำนวณหาค่า Potential Max

หลักการ นำจำนวน node ของเส้น  $r1+r2$

ได้  $51+51=102$

### 2. การแทนค่าลงโปรแกรมปascalเพื่อหาค่า $x,y$ ของแต่ละ node

เราสามารถนำไปเขียนเป็น source code ได้โดยป้อน

$$1. n1 := ((n-1) \text{ mod } 51) + 1;$$

$$n2 := ((n-1) \text{ div } 51) + 1;$$

ตำแหน่ง \_\_\_ ให้แทนด้วย จำนวน node ในแต่ละชั้น

$$2. x: (1.9+0.04*(n2-1))* \cos(\text{pi}*(n1-1)/100);$$

$$y: (1.9+0.04*(n2-1))* \sin(\text{pi}*(n1-1)/100);$$

คิดจนวนชั้นที่ 1

คิดจนวนชั้นที่ 2

ตำแหน่ง \_\_\_ แทนด้วย  $r1$  (cm)

ตำแหน่ง \_\_\_ แทนด้วย  $r2$  + ระยะห่างของชั้น

$$3. x: (1.9+0.04*(n2-1))* \cos(\text{pi}*(n1-1)/100);$$

$$y: (1.9+0.04*(n2-1))* \sin(\text{pi}*(n1-1)/100);$$

ตำแหน่ง \_\_\_ ให้แทนด้วย ระยะห่างของชั้น

4. for j:= 0 to 0 do

ตำแหน่ง \_\_\_ ให้แทนด้วย จำนวนชั้นหาร 4 (เศษเท่าไรให้ปัดทิ้งหมด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดค้นวนชั้นที่ 1

ตัวอย่าง

$5/4 = 1.25$  เศษปิดทั้งหมดได้ 1

ได้ for j:= 0 to 1 do

5. for i:= 0 to 51 do

ตำแหน่ง \_\_\_ ให้แทนด้วยจำนวน node แต่ละชั้น

6. for k:= 0 to 3 do print(51 \* 4 \* j + 1, 51 \* k);

ตำแหน่ง \_\_\_ แทนด้วยจำนวน node ในแต่ละชั้น

ตัวอย่าง ของ source code ที่ได้

```
program node;
uses crt,printer;
var i,j,k:integer;
    a,b:real;
procedure cal(n:integer;var x,y:real);
var n2,n1:integer;
begin
n1:=((n-1)mod 51)+1;
n2:=((n-1)div 51)+1;
x:=(1.9+0.04*(n2-1))*cos(pi*(n1-1)/100);
y:=(1.9+0.04*(n2-1))*sin(pi*(n1-1)/100);
end;
procedure print1(n,k:integer);
begin
cal(n+K,a,b);
write(1st,"n+k:4","a:5:3","b:5:3");
end;
begin
```

คิดค้นวนชั้นที่ 2

ตัวอย่าง

$6/4 = 1.50$  เศษ ปิดทั้งหมดได้ 1

ได้ for j:= 0 to 1 do

```

for j:=0 to do
begin
writeln(lst,'node x y node x y node x y');
for I:=1 to 51 do
begin
for k=0 to 3 do printl(51*4*j+i,51*k);
writeln(lst);
end;
write(lst,#12);
readln
end;
end.

```

### 3. การแทนค่าลงโปรแกรมพลาสติกเพื่อหาค่า N1-N3 ในแต่ละ element

เราสามารถเขียนเป็น Source code ได้โดยป้อน

1.  $n1 := ((n-1) \text{div} - 100);$

ตำแหน่ง\_\_ แทนด้วย จำนวนช่อง \*2

2.  $y := 52 + n1 + (n \text{ div} 2);$

ตำแหน่ง\_\_ แทนด้วย จำนวนช่อง +2

3. for j: = 0 to 4 do

ตำแหน่ง\_\_ แทนด้วย ( จำนวน element หาร จำนวน ช่อง หาร 4 ) (เศษปัดขึ้นหมด)

แล้วลบ 1

4. for l:= 1 to 50 do

ตำแหน่ง\_\_ แทนด้วย จำนวน ช่อง

5. for k:= 0 to 3 do print 1(200\*j+l,50\*k);

ตำแหน่ง\_\_ แทนด้วย จำนวน ช่อง \* 4

6. for k:= 0 to 3 do print 1(200\*j+l,50\*k);

ตำแหน่ง\_\_ แทนด้วย จำนวน ช่อง

ตัวอย่าง Source code ที่ได้

```
program element;
uses crt,printer;
var ij,k,a,b,c:integer;
procedure cal(n:integer; var x,y,z:integer);
var n1 :integer;
begin
n1:=((n1-1) div 100);
x:((n+1) div 2)+n1;
y:52+n1+(n div 2);
if (n mod 2)=0 then z:=x+1 else z:=y+1
end;
procedore print1(n,k:integer);
begin
cal(n+k,a,b,c);
write(1st,"n+k:',a:4,",b:4,",c:4);
end;
begin
clrscr;
for j:= 0 to 4 do
begin
writeln(1st,'element no1 no2 no3 element no1 no2 no3 element no1 no2
no3');
for I:= 1 to 50 do
begin
for k:=0 to 3 do print1(200*j+i,50*k);
writeln(1st);
end;
write(1st,#12);

```

readln

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

end;

end.

#### 4. ค่าใช้จ่ายในการวัดปริมาณโอโซน

สารเคมีที่ใช้มีราคาดังต่อไปนี้

1. โปตัสเซียมไอโอไดด์ ปริมาณ 500 กรัม ราคา 920 บาท
2. โซเดียมไทโอซัลเฟต ปริมาณ 1,000 กรัม ราคา 450 บาท
3. น้ำแข็ง ปริมาณ 1,000 กรัม ราคา 15 บาท
4. กรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาณ 2,500 mL ราคา 700 บาท
5. สารเคมีอื่นๆ ใช้ปริมาณในการวัดน้อยมากจึงไม่จำเป็นต้องนำมาคิดรวม

ปริมาณและราคาของสารเคมีที่ใช้วัดปริมาณโอโซนแต่ละครั้ง

1. โปตัสเซียมไอโอไดด์ ปริมาณขวดละ 100 mL จำนวน 3 ขวด รวม 300 mL คิดเป็นราคารวม 11.04 บาท
2. โซเดียมไทโอซัลเฟต ปริมาณ 5-250 mL คิดเป็นราคารวม 0.003 - 0.2 บาท
3. น้ำแข็ง ปริมาณ 3 mL คิดเป็นราคารวม 0.03 บาท
4. กรดซัลฟูริก ปริมาณ 5 mL คิดเป็นราคารวม 0.03 บาท

รวมค่าใช้จ่ายในการวัดแต่ละครั้ง 11.1 - 11.3 บาท

#### 5. วิธีการแปลงปริมาณโมล เป็น ค่าปริมาตร

จากสมการแวนเดอวาลส์

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \dots\dots\dots 1$$

จากออกซิเจนมีค่า  $T_c = 154.6^\circ K$   $P_c = 5,043 kPa$

$R = 8,314.3 Pascal.M^3 / (Kilomol.^{\circ}K)$  และที่บรรยากาศ  $P = 101.5 \times 10^3 Pa$

จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{27(8,314.3)^2(154.6)^2}{64 \times 5.043 \times 10^6}$$

$$= 138,218$$

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

$$= \frac{(8,314.3)(154.6)}{8 \times 5.043 \times 10^6}$$

$$= 0.0318$$

แทนค่า a และ ค่า b ลงในสมการ 1

จะได้

$$\left(101.5 \times 10^3 + \frac{138.218}{V^2}\right)(V - 0.0318) = 2,494,290 \dots\dots\dots 2$$

จาก

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{8,314.3 \times 300}{101.5 \times 10^3} = 24.57 \text{ m}^3 / \text{kmol}$$

จากวิธีลองผิดลองถูก (Trial and error)

ถ้าให้  $V=24.5$   $2,494,290 = (101,730)(24.4682) = 2,489,149$

ถ้าให้  $V=24.6$   $2,494,290 = (101,728)(24.5682) = 2,499,273$

ถ้าให้  $V=24.55$   $2,494,290 = (101,729)(24.5180) = 2,494,212$

จะเห็นว่าค่า 2,494,212 มีค่าใกล้เคียง 2,494,290 มาก

ฉะนั้นที่  $P=101.5 \text{ kPa}$   $T=300^\circ\text{K}$

จะได้ว่า  $V=24.55 \text{ m}^3/\text{kmol}$

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

## 6. การวัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow rate) ด้วยวิธีแทนที่น้ำ

### อุปกรณ์ที่ใช้

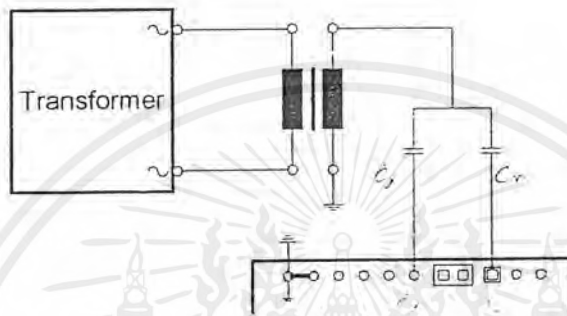
1. บีกเกอร์ขนาด 1,000 mL หรือ 500 mL
2. ภาชนะใส่น้ำ
3. นาฬิกาจับเวลา

### วิธีการวัด

1. เติมน้ำใส่อ่างให้ได้ความสูงมากกว่าความสูงบีกเกอร์ที่ใช้
2. คว่ำบีกเกอร์ลงในภาชนะ ระวังอย่าให้มีอากาศในบีกเกอร์
3. ใส่นาฬิกาจับเวลาพร้อมกับอุปกรณ์ที่จะวัดเข้าไปในบีกเกอร์
4. เปิดอุปกรณ์พร้อมกับจับเวลา อากาศจะเข้าไปแทนที่น้ำทำให้ระดับน้ำลดลงเรื่อยๆ
5. หยุดจับเวลาเมื่อระดับน้ำลดลงถึงขีดบอกปริมาตรสุดท้าย ( 1,000 mL หรือ 500 mL ขึ้นกับปริมาตรบีกเกอร์ที่ใช้)
6. คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเป็นหน่วย ปริมาตรต่อเวลา

## วิธีและขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบ ไฟเลี้ยงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียต่อไอไดโอดคริกของ Tettex รุ่น 2805 ว่ามีหรือไม่โดยปรับไปที่สวิทช์ปรับค่าความแม่นยำการวัด (Sensitivity switch) โดยหมุนไปที่ตำแหน่งเซ็คเบคเตอร์ ถ้ามีไฟเลี้ยงเพียงพอ เข็มบนหน้าปัดนิวตริคเคเตอร์จะเคลื่อนไปที่ค่า 100
2. ต่อวงจรดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรการทดลอง

3. ปรับสวิทช์ค่าแฟคเตอร์ผลคูณของค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบให้อยู่ที่ค่า  $I_{max} = 50$  A (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถทนได้โดยไม่ทำความเสียหายแก่เครื่องมือวัด)
4. ปรับสวิทช์ปรับค่าความแม่นยำการวัดให้มาอยู่ที่เสต็ปแรกซึ่งมีระดับความแม่นยำต่ำสุด (สวิทช์ปรับค่าความแม่นยำมี 7 เสต็ป)
5. ป้อนโวลต์แดงเข้าวงจรทดสอบที่ค่า 0.5 kV
6. ปรับสวิทช์แฟคเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบและสวิทช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุทดสอบ รวมทั้งปรับสวิทช์แฟคเตอร์ตัวคูณของแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอไดโอดคริกและสวิทช์ปรับค่าแฟคเตอร์ตัวคูณของแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอไดโอดคริกโดยปรับให้เข็มบนนิวตริคเคเตอร์ชี้ที่ 0
7. เพิ่มระดับค่าความแม่นยำในการวัดไปยังเสต็ปที่ 2 และปรับค่าคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอไดโอดคริกตามข้อ 6 จนถึงระดับค่าความแม่นยำในการวัดเสต็ปสุดท้าย (เสต็ปที่ 7)
8. บันทึกค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอไดโอดคริกที่อ่านได้จากผลการปรับจากข้อ 7 ไปคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไอไดโอดคริกของวัตถุทดสอบ
9. ป้อนโวลต์แดงเข้าวงจรทดลองที่ค่า 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5 kV แล้วทำตามขั้นตอนข้อ 6-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An electrode system for measuring dissolved oxygen. *Anal. Chem.* 31:5.

19. MANCY, K.H. & W.C. WESTGARTH. 1962. A galvanic cell oxygen analyzer. *J. Water Pollut. Control Fed.* 34:1037.

20. MANCY, K.H., D.A. OKUM & C.N. REILLEY. 1962. A galvanic cell oxygen analyzer. *J. Electroanal. Chem.* 4:65.

21. WEISS, C.M. & R.T. OGLESPY. 1963. Instrumentation for monitoring water quality in reservoirs. American Water Works Ass. 83rd Annual Conf., New York, N.Y.

22. CLEARY, E.J. 1962. Introducing the ORSANCO robot monitor. *Proc. Water Qual.*

*by Meas. Instrum. Publ. No. 108, U.S. Public Health Serv., Washington, D.C.*

23. MACKERLITZ, F.H.L. 1964. An improved galvanic cell for determination of oxygen concentrations in fluids. *J. Sci. Instrum.* 41:38.

24. SUTZUK, F. & W.M. WESTGARTH. 1962. Continuous D.O. recording in activated sludge. *Water Sewage Works* 109:376.

25. DUKURBY, A.C. 1963. Calibration and use of a galvanic type oxygen electrode in field work. *Limnol. Oceanogr.* 8:443.

26. LITTELL, H.J., L.R. WITHERSPOON & V.C. CHAMPEAUS. 1964. Adaptation of a galvanic cell for microanalysis of oxygen. *Anal. Chem.* 36:204.

## 422 OZONE (RESIDUAL)\*

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

### I. General Discussion

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

\*Approved by Standard Methods Committee, 1981.

dium thiosulfate ( $Na_2S_2O_3$ ) with starch indicator.

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

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

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

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

### 2. Apparatus

The following are required for sample collection:

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

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

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

### 3. Reagents

*a. Potassium iodide solution:* Dissolve 8 KI, free from iodine, iodate, and reduced agents, in 1 L freshly boiled and cooled distilled water. Store in a brown bottle in refrigerator. Store at least 1 d before using.

*b. Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ , 1N.*

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

*d. Standard sodium thiosulfate titrant, 0.005M:* Dilute proper volume (approximately 50 mL) of 0.1M  $Na_2S_2O_3$  to 10 mL. For accurate work, standardize the solution daily, using either 0.005M potassium bi-iodate or potassium dichromate solution. Standardize as described in 408B below; 1.00 mL standard  $Na_2S_2O_3$  titrant, 0.005M = 120  $\mu g O_3$ .

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

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

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

*g. Standard iodine, 0.005M:* Dissolve 8 KI in a little distilled water in a 1-volumetric flask, add proper volume (approximately 50 mL) of 0.1M iodine solution, and dilute to mark. For accurate work, standardize daily. Store solution

Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)  
August 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
Date											
1	81	84	77	68	66	77	73	75	75	84	66
2	78	79	87	76	69	72	91	91	80	91	69
3	89	90	87	77	62	72	84	73	79	90	62
4	77	79	83	68	62	65	63	70	71	83	62
5	77	81	80	68	63	71	79	80	75	81	63
6	81	81	82	89	86	74	80	83	82	89	74
7	81	82	81	60	62	74	79	86	76	86	60
8	79	78	78	61	60	63	76	84	72	84	60
9	68	72	77	61	61	60	96	93	74	96	60
10	90	79	79	67	57	59	75	75	73	90	57
11	72	76	81	73	63	68	66	75	72	81	63
12	70	76	77	70	63	60	72	81	71	81	60
13	69	79	83	63	56	59	73	84	71	84	56
14	65	74	77	58	63	62	74	76	69	77	58
15	81	78	81	59	52	61	73	77	70	81	52
16	80	81	78	60	54	62	66	95	72	95	54
17	93	93	87	63	67	69	68	88	79	93	63
18	78	81	77	60	52	50	66	92	70	92	50
19	87	77	77	63	56	64	73	77	72	87	56
20	76	96	97	78	69	67	75	81	80	97	67
21	81	83	85	69	62	67	73	79	75	85	62
22	81	86	82	65	57	56	68	76	71	86	56
23	81	82	84	76	64	66	76	90	77	90	64
24	92	88	96	85	68	71	77	86	83	96	68
25	89	93	94	69	68	70	71	82	80	94	68
26	73	77	83	61	56	61	71	83	71	83	56
27	84	86	83	67	59	72	72	89	77	89	59
28	93	94	95	78	68	72	77	82	82	95	68
29	78	80	79	62	64	64	75	97	75	97	62
30	97	97	97	71	70	60	71	76	80	97	60
31	77	90	87	63	58	56	72	92	74	92	56
MEAN	81	83	84	68	62	65	74	83	75	89	61
Max.	97	97	97	89	86	77	96	97			
Min.	65	72	77	58	52	50	63	70			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)  
September 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
Date											
1	95	92	89	65	61	62	76	73	77	95	61
2	78	81	78	67	62	60	69	95	74	95	60
3	89	93	90	66	61	62	65	75	75	93	61
4	83	77	78	65	59	62	69	83	72	83	59
5	86	82	81	66	56	77	85	92	78	92	56
6	92	87	95	77	81	93	90	90	88	95	77
7	96	96	91	77	91	75	76	96	87	96	75
8	97	98	98	68	66	65	76	86	82	98	65
9	80	84	88	64	58	61	72	81	74	88	58
10	85	91	92	66	54	63	72	86	76	92	54
11	80	83	89	65	63	72	77	92	78	92	63
12	95	92	90	75	66	70	87	87	83	95	66
13	90	89	86	64	56	56	60	85	73	90	56
14	81	86	79	59	56	52	71	73	70	86	52
15	75	80	79	60	61	64	77	71	71	80	60
16	71	79	72	61	59	62	73	78	69	79	59
17	77	80	80	63	63	63	74	72	72	80	63
18	70	77	81	62	58	60	90	84	73	90	58
19	85	86	87	65	54	61	70	79	73	87	54
20	83	82	79	64	59	52	75	79	72	83	52
21	84	85	90	75	68	94	88	92	85	94	68
22	91	90	88	69	65	78	81	81	80	91	65
23	89	82	92	66	64	73	81	85	79	92	64
24	89	93	93	72	77	72	95	96	86	96	72
25	97	93	93	75	79	71	95	93	87	97	71
26	90	94	93	68	59	73	80	85	80	94	59
27	88	89	90	77	63	87	87	91	84	91	63
28	91	93	92	74	66	71	77	85	81	93	66
29	85	87	89	70	66	59	73	88	77	89	59
30	89	89	88	73	63	65	86	85	80	89	63
MEAN	86	87	87	68	64	68	78	85	78	91	62
Max.	97	98	98	77	91	94	95	96			
Min.	70	77	72	59	54	52	60	71			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)  
October 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
Date											
1	88	96	97	84	74	86	96	93	89	97	74
2	94	96	95	69	62	61	68	83	79	96	61
3	86	89	90	74	64	97	99	98	87	99	64
4	97	97	96	76	67	58	72	83	81	97	58
5	82	90	95	69	55	73	81	82	78	95	55
6	90	91	92	71	54	74	78	79	79	92	54
7	81	86	79	75	64	56	69	85	74	86	56
8	87	92	90	66	61	52	75	74	75	92	52
9	81	85	88	75	78	73	83	82	81	88	73
10	88	92	93	67	59	48	69	74	74	93	48
11	80	89	90	73	58	62	75	79	76	90	58
12	84	88	90	66	55	66	84	90	78	90	55
13	90	89	86	71	61	68	96	92	82	96	61
14	87	93	91	74	66	65	94	97	83	97	65
15	97	96	96	73	61	67	75	92	82	97	61
16	96	97	96	77	97	78	83	84	89	97	77
17	93	96	93	78	68	97	93	97	89	97	68
18	97	84	82	58	55	52	64	67	70	97	52
19	73	71	75	63	49	58	61	64	64	75	49
20	74	77	76	60	62	61	66	75	69	77	60
21	78	84	82	67	58	63	74	78	73	84	58
22	80	84	84	67	63	62	70	76	73	84	62
23	81	87	88	66	59	62	68	65	72	88	59
24	68	69	71	69	65	66	77	93	72	93	65
25	95	93	90	93	97	95	96	97	95	97	90
26	97	96	97	97	86	79	97	97	93	97	79
27	96	98	96	78	64	62	79	86	82	98	62
28	87	91	90	69	64	61	79	83	78	91	61
29	87	94	95	75	74	69	80	83	82	95	69
30	86	91	93	79	74	79	83	83	84	93	74
31	87	85	94	72	60	80	87	96	83	96	60
MEAN	87	89	89	73	66	69	80	84	80	92	63
Max.	97	98	97	97	97	97	99	98			
Min.	68	69	71	58	49	48	61	64			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)  
November 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
Date											
1	98	94	93	81	68	74	93	93	87	98	68
2	96	97	97	95	77	91	90	96	92	97	77
3	96	96	90	74	73	90	95	96	89	96	73
4	96	96	97	83	67	73	79	76	83	97	67
5	78	79	79	67	61	63	63	77	71	79	61
6	84	80	83	62	57	59	73	82	73	84	57
7	82	82	82	63	63	68	72	82	74	82	63
8	84	92	88	65	63	65	76	87	78	92	63
9	91	91	91	72	62	61	77	80	78	91	61
10	88	88	94	79	66	63	81	88	81	94	63
11	87	93	92	73	63	67	76	83	79	93	63
12	88	94	93	73	60	66	75	81	79	94	60
13	88	92	94	67	75	90	93	94	87	94	67
14	93	95	95	75	62	57	87	85	81	95	57
15	89	92	92	66	56	43	63	66	71	92	43
16	69	78	76	55	44	46	59	64	61	78	44
17	70	74	68	56	58	61	63	67	65	74	56
18	72	74	68	54	51	52	63	72	63	74	51
19	75	76	76	56	53	53	66	62	65	76	53
20	71	77	71	54	53	48	61	72	63	77	48
21	76	81	74	59	52	53	61	67	65	81	52
22	71	69	70	57	44	56	65	66	62	71	44
23	66	66	67	67	65	66	75	78	69	78	65
24	85	84	75	68	54	52	74	74	71	85	52
25	82	85	82	64	50	63	81	75	73	85	50
26	82	87	83	67	49	55	63	75	70	87	49
27	78	90	86	53	45	45	64	70	66	90	45
28	77	73	64	49	44	41	53	64	58	77	41
29	65	67	67	54	55	51	59	60	60	67	51
30	63	66	70	57	57	48	53	62	60	70	48
MEAN	81	84	82	66	58	61	72	76	73	85	56
Max.	98	97	97	95	77	91	95	96			
Min.	63	66	64	49	44	41	53	60			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)  
December 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
Date											
1	68	68	69	59	52	51	57	63	61	69	51
2	64	73	76	55	46	30	52	61	60	76	46
3	66	65	67	57	55	64	68	70	69	70	55
4	73	74	80	72	62	62	68	78	71	80	62
5	82	79	75	64	61	63	75	70	74	83	61
6	74	74	72	65	62	64	66	76	69	76	62
7	72	71	71	61	57	55	63	67	63	72	53
8	71	72	69	57	51	51	62	59	62	72	51
9	67	66	70	52	53	47	55	57	58	70	47
10	69	64	70	53	52	50	60	67	60	70	50
11	68	70	71	60	56	54	63	68	64	71	54
12	76	64	67	58	45	45	51	49	57	76	43
13	57	57	62	55	48	54	61	65	57	75	43
14	68	72	75	64	60	59	67	67	67	75	59
15	72	75	68	52	47	45	58	68	61	75	45
16	79	73	72	48	47	45	61	68	62	79	45
17	69	77	79	57	51	49	55	58	62	79	49
18	59	64	64	48	45	46	53	55	54	64	45
19	58	62	60	48	46	44	55	55	54	62	44
20	60	61	58	46	43	44	59	57	54	61	43
21	68	71	69	56	45	44	53	62	59	71	44
22	64	67	68	53	47	42	47	47	50	68	42
23	53	65	64	47	43	41	49	48	51	65	41
24	49	60	64	43	42	46	34	49	47	64	34
25	43	49	56	45	33	33	45	53	43	56	33
26	53	51	66	45	38	37	51	54	49	66	37
27	67	63	66	50	38	40	53	65	55	67	38
28	78	70	57	38	38	44	54	48	53	78	38
29	52	57	58	50	42	43	54	57	52	68	42
30	60	65	70	55	45	50	61	64	59	70	45
31	62	69	72	50	43	43	62	72	59	72	43
MEAN	65	67	68	54	48	49	57	61	59	70	47
Max.	82	79	80	72	62	63	75	78			
Min.	43	49	56	38	33	33	34	47			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stations: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)  
January 2000

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
Date											
1	75	81	84	49	44	38	56	67	62	88	38
2	72	78	71	53	47	47	60	62	62	78	47
3	67	68	71	55	45	48	61	61	60	71	46
4	63	72	76	48	44	44	61	72	60	78	44
5	80	77	78	54	45	42	57	67	63	80	45
6	82	87	85	72	57	56	75	81	74	87	56
7	86	92	90	73	55	55	69	82	75	92	55
8	88	91	89	78	60	59	75	85	78	91	59
9	87	90	91	82	56	58	74	85	78	91	56
10	89	91	92	74	59	58	67	80	75	92	58
11	87	92	91	74	64	60	71	81	72	92	60
12	87	87	90	70	55	53	71	83	75	90	55
13	88	90	90	67	62	64	77	85	75	91	62
14	88	91	93	69	57	63	78	85	78	93	57
15	90	90	92	72	60	57	71	84	77	92	57
16	88	87	92	71	52	61	73	84	76	92	52
17	86	92	88	79	46	49	65	71	72	92	46
18	87	88	88	70	61	60	72	83	76	88	60
19	86	87	88	75	65	57	66	71	74	88	57
20	72	76	70	57	50	47	55	66	62	76	47
21	67	65	67	51	45	47	57	65	58	67	45
22	66	74	82	53	43	39	50	64	59	82	39
23	69	81	86	58	39	31	55	63	60	86	31
24	63	63	77	52	32	35	56	53	54	77	32
25	72	66	59	62	52	51	56	58	60	72	51
26	71	68	72	57	48	47	52	55	59	72	47
27	55	61	63	52	48	49	54	52	54	63	48
28	59	64	62	57	44	44	53	62	56	64	44
29	69	66	69	49	42	40	51	58	56	69	40
30	90	55	65	51	45	49	51	57	58	90	45
31	67	71	69	47	44	46	51	50	56	71	44
MEAN	77	79	80	62	51	50	63	70	67	82	49
Max.	90	92	93	82	68	64	78	85			
Min.	55	55	59	47	32	31	50	50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Dry bulb temperature (Celsius)  
August 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean
Date									
1	27.0	26.0	26.3	30.1	30.8	28.7	28.1	27.9	28.1
2	27.5	27.4	26.8	28.8	30.0	30.0	25.6	26.0	27.8
3	26.4	26.4	26.5	28.5	31.6	29.5	27.0	27.6	27.9
4	27.1	26.7	26.1	29.1	30.6	30.1	29.2	27.8	28.3
5	27.0	26.4	27.1	29.1	30.8	29.6	28.6	28.2	28.4
6	28.1	27.9	27.9	25.6	26.0	28.5	27.5	27.2	27.3
7	27.0	26.5	27.0	31.8	31.6	29.5	28.5	28.2	28.8
8	28.0	27.5	27.5	31.5	32.2	32.1	29.6	29.1	29.7
9	28.9	27.7	27.3	31.5	32.2	33.0	25.5	26.1	29.0
10	26.5	27.2	27.2	31.0	32.7	33.2	29.3	29.3	29.6
11	28.6	27.8	26.9	29.5	31.0	31.1	29.5	28.4	29.1
12	27.9	27.2	27.5	29.2	31.4	30.4	29.2	28.0	28.9
13	27.5	26.3	26.6	31.1	32.6	31.9	29.4	28.5	29.2
14	28.3	27.3	27.5	31.5	31.5	31.8	29.0	28.9	29.5
15	28.5	27.4	27.0	32.4	33.5	32.5	29.0	28.5	29.9
16	28.2	27.0	27.1	32.3	34.1	32.1	30.7	24.5	29.5
17	24.9	24.9	25.6	30.6	31.1	31.0	31.0	26.5	28.2
18	27.0	26.5	26.5	29.9	33.0	34.2	31.8	26.0	29.4
19	26.7	27.3	27.0	31.5	34.6	33.0	30.6	29.7	30.1
20	29.0	24.9	25.5	29.2	31.4	32.0	30.0	28.7	28.8
21	27.3	26.7	26.6	31.0	33.5	32.9	30.3	29.5	29.7
22	29.0	28.4	28.4	31.8	34.2	34.5	31.1	29.8	30.9
23	29.0	28.4	28.5	30.9	32.5	32.5	29.8	27.9	29.9
24	27.4	26.9	26.0	28.2	31.8	30.6	29.2	26.2	28.3
25	26.6	26.5	26.7	30.5	30.7	30.4	29.5	28.6	28.7
26	28.2	27.2	26.4	31.4	33.1	32.9	30.0	27.1	29.5
27	27.0	26.7	26.6	30.5	33.0	30.4	30.2	26.1	28.8
28	26.1	25.5	25.1	28.6	31.1	29.9	28.6	27.5	27.8
29	27.0	26.5	26.4	30.6	31.1	31.1	29.5	24.5	28.3
30	24.6	24.3	24.8	29.1	30.0	31.6	29.7	28.8	27.9
31	27.6	25.2	25.4	30.5	32.1	32.9	28.8	25.5	28.5
MEAN	27.4	26.7	26.7	30.2	31.8	31.4	29.2	27.6	28.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Dry bulb temperature (Celsius)  
September 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean
Date									
1	25.6	25.2	25.4	29.5	31.5	31.7	27.8	28.1	28.1
2	27.4	26.5	26.5	31.1	31.5	31.1	28.5	25.6	28.5
3	25.8	26.2	26.5	30.0	32.4	33.3	30.3	29.0	29.2
4	28.7	27.6	27.1	31.0	32.3	32.9	30.5	29.0	29.9
5	27.5	27.6	27.0	30.5	34.0	29.8	28.5	28.0	29.1
6	27.0	24.6	24.6	29.3	28.8	26.4	25.4	25.5	26.5
7	25.5	25.5	25.8	29.1	27.2	29.9	26.6	25.1	26.8
8	25.1	24.6	24.6	30.0	31.2	31.3	28.8	28.0	28.0
9	27.0	26.0	25.2	31.4	32.9	32.5	29.7	29.1	29.2
10	27.4	26.2	26.6	30.6	33.4	32.5	29.5	26.0	29.0
11	26.5	26.6	26.4	31.1	31.8	30.3	29.0	25.0	28.3
12	25.0	25.0	25.1	28.4	30.8	29.9	25.7	25.8	27.0
13	25.5	25.4	25.8	30.6	32.4	33.5	31.5	26.9	29.0
14	27.4	26.0	26.5	30.8	32.3	33.8	30.4	28.0	29.4
15	27.4	26.6	26.7	32.0	32.1	31.7	29.3	28.6	29.3
16	27.6	27.2	27.7	30.8	32.0	31.0	29.5	29.0	29.4
17	28.0	27.1	27.3	31.5	31.8	32.1	29.6	29.0	29.6
18	28.1	27.0	26.6	32.0	33.6	33.3	26.5	27.1	29.3
19	27.0	26.7	26.6	31.1	33.4	33.4	30.9	29.8	29.9
20	26.7	27.3	27.4	30.9	32.5	34.0	29.7	29.1	29.7
21	29.1	28.0	26.0	30.1	32.0	25.8	27.5	27.6	28.3
22	27.7	27.5	27.3	31.0	31.9	29.6	29.1	29.0	29.1
23	28.1	27.3	27.0	31.6	32.0	29.3	29.6	25.7	28.8
24	25.5	26.0	26.4	30.8	30.1	31.0	25.7	26.0	27.7
25	25.8	25.6	25.7	30.5	29.0	31.0	26.1	26.2	27.5
26	26.6	26.2	26.4	31.0	33.0	30.1	28.5	27.6	28.7
27	27.3	26.6	26.7	30.2	32.5	27.3	27.7	26.8	28.1
28	26.5	26.5	25.8	30.1	31.8	30.6	28.5	27.9	28.5
29	26.9	25.6	25.6	30.0	31.7	32.7	28.3	26.0	28.4
30	26.0	26.0	26.0	30.9	32.7	32.6	27.5	27.5	28.7
MEAN	26.9	26.3	26.3	30.6	31.8	31.1	28.5	27.4	28.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Dry bulb temperature (Celsius)  
October 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean
Date									
1	27.1	24.0	24.5	27.0	29.0	27.9	25.0	25.8	26.3
2	25.7	25.0	25.5	31.2	31.9	32.0	29.5	27.6	28.6
3	26.7	26.0	26.2	29.9	32.0	24.4	23.5	24.0	26.6
4	24.0	23.9	24.8	28.8	32.0	32.6	29.9	28.2	28.0
5	27.6	26.4	26.7	31.6	34.5	29.2	28.0	27.5	28.9
6	26.6	26.2	26.0	31.5	34.5	30.5	30.0	29.4	29.3
7	28.6	28.0	27.5	29.8	32.1	33.5	30.7	27.4	29.7
8	27.2	25.0	25.2	30.9	32.7	34.6	30.5	29.0	29.4
9	28.0	27.7	27.9	30.6	29.9	30.5	29.5	29.2	29.2
10	27.4	26.0	26.4	31.2	33.0	33.7	30.2	29.6	29.7
11	26.5	26.4	26.3	30.1	32.8	32.1	29.5	29.2	29.1
12	27.4	26.6	26.6	31.9	33.5	32.3	29.4	26.2	29.2
13	26.8	27.0	26.9	31.2	32.4	29.9	24.5	26.0	28.1
14	26.5	25.3	25.5	28.8	31.2	31.4	26.2	25.2	27.5
15	24.8	24.8	25.3	29.7	32.0	30.5	28.5	25.6	27.7
16	24.5	24.8	25.0	29.6	25.0	28.4	27.2	27.4	26.5
17	25.4	25.0	25.6	29.5	30.9	25.5	25.5	25.0	26.6
18	25.2	25.2	25.4	29.8	32.0	31.6	29.6	28.1	28.4
19	26.9	26.3	25.5	29.8	31.5	30.5	28.4	27.4	28.3
20	25.4	24.3	25.1	29.1	29.5	29.5	27.9	26.4	27.2
21	25.1	24.0	23.9	28.3	31.5	29.7	28.0	27.0	27.2
22	26.5	25.5	25.2	30.0	31.5	30.6	29.2	28.4	28.4
23	27.5	26.5	26.1	30.6	32.5	32.1	30.8	30.2	29.5
24	29.0	28.3	27.1	28.3	29.5	28.9	27.9	25.4	28.1
25	25.0	25.0	25.3	25.4	25.0	26.0	26.1	25.3	25.4
26	24.8	24.5	24.4	25.2	27.5	28.2	25.4	25.0	25.6
27	24.6	24.6	25.0	28.6	31.4	31.3	28.3	27.6	27.7
28	26.4	25.7	26.0	31.0	32.0	32.0	28.8	28.2	28.8
29	27.3	25.7	25.1	30.5	30.0	31.5	28.2	27.8	28.3
30	27.4	26.2	25.8	29.4	30.3	29.1	28.4	28.2	28.1
31	27.3	26.5	25.6	29.6	32.4	29.0	27.6	26.0	28.0
MEAN	26.4	25.7	25.7	29.6	31.2	30.3	28.1	27.2	28.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Dry bulb temperature (Celsius)  
November 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean
Date									
1	24.2	24.7	24.9	28.0	31.1	29.8	25.5	25.4	26.7
2	24.2	24.7	24.0	25.1	26.4	24.0	23.9	23.0	24.4
3	22.8	23.0	23.0	25.5	26.7	23.8	22.5	22.4	23.7
4	22.7	21.8	21.8	24.6	27.6	27.0	25.8	25.0	24.5
5	25.0	24.5	24.0	26.5	29.0	28.7	28.7	25.4	26.5
6	24.8	24.7	24.6	28.9	31.4	30.5	27.2	25.8	27.2
7	25.5	25.2	25.1	30.2	30.0	29.1	28.2	26.6	27.5
8	26.0	24.9	25.0	30.4	30.8	30.0	28.2	26.6	27.7
9	26.0	26.0	26.0	30.2	32.0	32.3	29.8	29.0	28.9
10	27.6	27.5	27.0	30.0	32.3	33.1	28.8	27.0	29.2
11	24.6	24.5	25.0	30.8	32.3	31.5	29.5	28.6	28.4
12	27.7	26.8	27.3	30.4	32.6	29.2	29.3	28.6	29.0
13	27.6	27.0	26.6	31.5	29.5	25.2	25.7	25.6	27.3
14	25.2	24.9	25.2	29.7	32.5	32.0	27.0	27.5	28.0
15	26.9	26.0	26.0	31.0	32.8	33.4	30.1	28.6	29.4
16	27.1	25.9	25.6	30.7	32.6	32.4	29.8	28.2	29.0
17	27.0	26.9	26.6	29.5	30.6	29.2	28.5	27.1	28.2
18	25.6	24.6	23.9	28.0	30.5	30.2	27.5	26.7	27.1
19	25.5	24.0	23.5	29.0	30.5	30.4	27.9	26.8	27.2
20	25.0	23.6	23.5	27.4	29.2	30.4	27.5	26.0	26.6
21	24.5	23.0	22.7	27.5	30.4	29.8	27.4	26.2	26.4
22	24.6	23.6	23.4	27.7	30.3	29.6	27.6	27.0	26.7
23	26.0	25.1	25.0	28.1	29.0	30.1	27.9	26.9	27.3
24	26.1	25.8	26.5	30.0	33.4	33.2	30.0	28.8	29.2
25	28.0	27.6	27.5	31.4	34.0	31.5	28.5	29.1	29.7
26	27.9	27.2	27.2	30.0	34.1	33.0	30.2	29.1	29.8
27	28.4	26.4	26.3	32.1	34.0	33.8	30.5	29.1	30.1
28	27.7	26.5	26.8	31.6	34.0	34.0	31.4	30.0	30.3
29	28.6	27.6	26.5	29.9	31.3	31.0	29.6	28.5	29.1
30	26.5	24.4	23.7	27.4	29.6	30.0	27.6	25.5	26.8
MEAN	26.0	25.3	25.1	29.1	31.0	30.3	28.1	27.0	27.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: BANGKOK METROPOLIS

Dry bulb temperature (Celsius)  
December 1999

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean
Date									
1	23.9	23.4	22.1	26.1	28.6	29.3	27.2	25.6	25.8
2	24.5	22.7	22.2	27.0	29.1	29.6	28.0	25.9	26.1
3	24.5	23.5	23.4	26.8	28.6	27.6	28.0	24.5	25.5
4	24.1	23.5	22.9	24.5	27.0	27.3	26.0	25.4	25.1
5	24.7	24.1	24.0	27.0	29.3	26.2	28.9	26.0	28.9
6	24.8	24.5	24.3	26.5	27.1	27.6	26.1	24.5	25.7
7	23.9	23.6	23.1	25.3	28.8	28.0	28.9	24.8	25.4
8	24.0	23.1	22.2	26.0	28.7	28.7	26.7	25.4	25.5
9	23.5	22.0	21.0	26.0	26.7	28.2	28.9	24.0	26.5
10	22.8	21.2	20.1	24.9	25.9	26.2	24.5	23.5	23.7
11	22.8	22.5	21.0	24.5	27.3	28.7	26.0	25.2	24.9
12	24.4	23.7	23.4	25.5	30.1	28.7	26.8	26.2	26.1
13	24.5	24.0	23.8	26.0	30.5	29.5	27.8	26.6	26.6
14	25.9	24.5	24.2	27.1	28.6	29.0	27.4	26.4	26.6
15	25.0	23.9	23.0	26.6	30.6	30.7	27.8	26.0	26.7
16	24.5	23.5	22.8	27.8	30.0	30.5	27.8	26.6	26.7
17	25.4	23.6	22.8	28.2	30.1	31.4	29.1	28.0	27.4
18	26.8	25.5	24.5	28.4	30.0	30.3	28.0	26.0	27.4
19	24.2	22.6	21.3	25.5	29.3	29.5	26.6	24.7	25.5
20	23.3	21.4	20.8	24.3	27.5	27.6	25.0	23.3	24.2
21	21.7	20.2	19.0	23.0	26.8	27.2	24.7	22.2	23.0
22	21.0	19.1	17.2	20.1	24.4	25.5	24.1	20.1	21.7
23	18.6	15.2	14.9	19.7	23.0	22.5	21.0	17.7	19.7
24	17.8	15.4	14.8	18.5	22.5	23.4	20.2	17.5	18.4
25	16.6	15.0	13.6	19.4	22.4	23.6	20.5	18.5	18.7
26	17.2	16.0	14.1	19.9	23.8	25.2	20.9	19.5	19.6
27	17.4	17.0	13.8	21.1	26.2	27.0	23.1	20.9	21.1
28	18.2	17.9	17.7	23.0	26.8	27.4	24.5	23.5	22.4
29	22.5	21.6	21.2	24.0	28.3	29.5	23.8	24.8	24.8
30	23.5	22.2	21.6	26.6	31.4	31.2	27.6	26.4	26.3
31	25.4	24.3	23.4	30.0	33.0	32.4	28.8	26.5	28.0
MEAN	22.8	21.7	20.9	24.8	27.8	28.1	25.5	24.1	24.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Station: ๙๐๙๙๐๐ (๙๙๙๙๙๙)

Day: ๒๕/๑๒/๒๕๖๓  
 Hour: ๙:๐๐

Time	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	2500
Date									
1	25.4	24.3	24.5	30.5	37.5	33.5	27.7	27.2	28.4
2	26.1	24.5	24.0	40.4	32.1	33.0	29.5	28.5	28.2
3	27.3	27.0	24.3	30.1	34.4	32.5	36.0	27.0	29.5
4	27.5	25.5	24.7	31.5	34.4	33.5	30.2	28.0	29.3
5	26.6	26.0	23.3	31.9	35.0	34.2	30.4	28.5	29.7
6	24.9	25.9	23.6	28.5	32.0	31.8	27.8	27.0	28.4
7	23.3	25.9	23.8	29.2	32.6	32.3	29.4	28.9	28.4
8	26.5	26.0	26.9	28.2	32.0	31.8	28.0	28.0	28.7
9	26.4	26.0	26.9	27.9	32.6	32.7	28.0	28.0	28.7
10	26.4	25.7	26.0	29.5	32.7	33.4	28.7	28.0	28.0
11	27.0	26.3	26.5	30.0	31.9	32.7	29.4	28.0	28.7
12	26.7	26.1	25.8	29.8	32.6	32.7	28.4	28.5	28.7
13	27.0	26.5	26.5	29.5	31.3	30.2	28.5	28.0	28.0
14	26.5	26.5	26.4	27.9	31.0	32.7	28.0	28.0	28.0
15	26.4	25.7	26.5	30.0	31.0	32.5	28.0	28.0	28.0
16	26.4	25.4	26.8	29.0	32.0	32.0	28.0	28.0	28.0
17	26.4	25.1	27.0	27.3	32.4	32.0	28.0	28.0	28.0
18	26.7	26.1	26.0	30.4	31.0	31.0	28.0	28.0	28.0
19	27.2	25.2	26.0	27.0	29.0	30.5	27.0	28.0	27.0
20	24.0	22.8	22.5	26.5	29.6	31.3	28.5	26.5	26.5
21	25.5	25.0	24.8	27.0	30.0	31.7	28.5	28.0	28.5
22	25.6	24.2	24.0	28.5	31.3	32.2	27.0	28.0	27.0
23	26.0	23.8	23.1	29.0	33.4	33.5	28.0	28.5	28.0
24	25.8	24.9	23.5	28.5	32.0	34.4	28.5	29.0	26.5
25	27.5	27.1	28.0	29.2	32.7	32.3	31.7	29.3	29.6
26	27.9	26.7	26.8	29.5	32.2	32.2	30.0	28.0	29.0
27	26.1	23.7	23.1	34.6	28.5	29.4	26.0	25.2	26.0
28	23.6	22.0	21.6	24.0	28.7	29.3	24.5	24.5	26.0
29	22.5	21.5	21.0	25.0	29.8	30.3	27.7	25.5	23.9
30	24.5	23.6	23.2	25.3	29.9	28.7	27.1	25.5	26.8
31	23.6	22.2	23.1	27.0	30.2	30.5	28.0	26.5	26.0
MEAN	26.1	25.1	24.2	29.6	31.3	32.0	29.8	27.1	28.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้