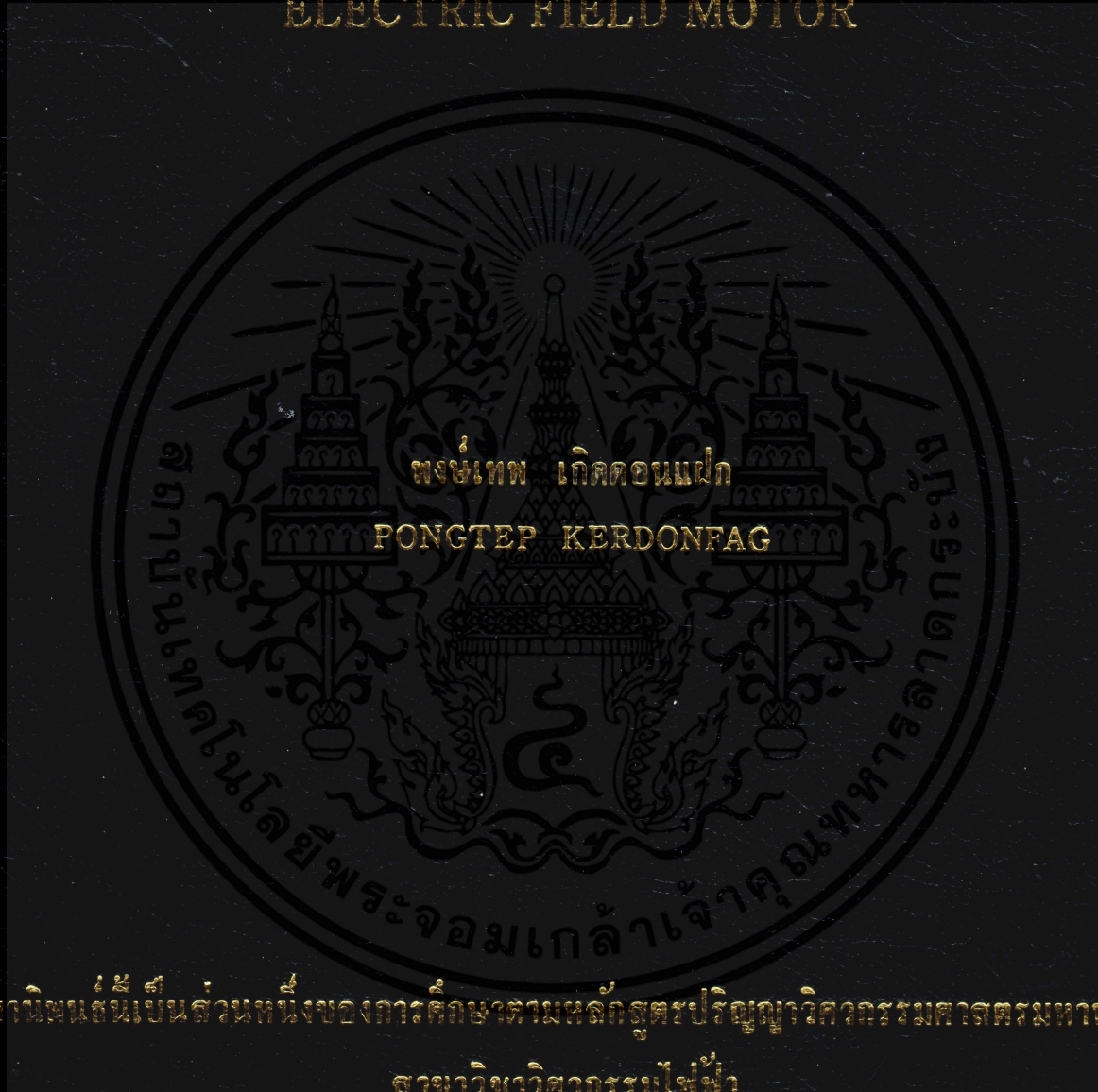


เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า

HIGH VOLTAGE MEASUREMENT TECHNIQUE USING  
ELECTRIC FIELD MOTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-385-2

เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า

HIGH VOLTAGE MEASUREMENT TECHNIQUE USING  
ELECTRIC FIELD MOTOR



พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก  
PONGTEP KERDONFAG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่  
เลขทะเบียน 32864  
วัน, เดือน, ปี 14 ส.ย. 2542

ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ก.ศ.2542 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า  
ถ้ามีการใช้ทางอื่น กรุณาแจ้งให้คัดแปลงเนื้อ ISBN 974-622-385-2 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**HIGH VOLTAGE MEASUREMENT TECHNIQUE USING  
ELECTRIC FIELD MOTOR**



**PONGTEP KERDONFAG**

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

**1999**

**ISBN 974-622-385-2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์      เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า  
HIGH VOLTAGE MEASUREMENT TECHNIQUE USING ELECTRIC  
FIELD MOTOR

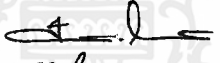

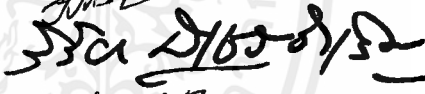


ชื่อนักศึกษา            นายพงษ์เทพ เกิดดอนแฝก

รหัสประจำตัว            38621214

ปริญญา                    วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ศิริวัฒน์      โทธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศิริวัฒน์	โทธิเวชกุล	
ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ดร.วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ	
ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	

วัน/เดือน/ปี 11 มีนาคม 2541 เวลา 10.00 – 12.00 น.

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



วันที่ 26 เดือน เมษายน พ.ศ. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้า
นักศึกษา	นายพงษ์เทพ เกิดดอนแฝก
รหัสประจำตัว	38621214
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่วัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงโดยใช้หลักการของมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ ดังนั้นเมื่อทำการวัดความเร็วรอบหมุนของมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้าที่ได้จะทำให้สามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนเข้าสู่มอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้า ช่วงระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดสามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับระดับความดันและชนิดของก๊าซที่บรรจุในมอดูเลเตอร์ จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้ามีความสำคัญต่อผลการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคที่นำเสนอนี้เป็นอย่างมาก จึงสร้างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อมาช่วยคำนวณหาค่าการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะช่วยในการออกแบบโครงสร้างมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ความเร็วรอบหมุนของตัวมอดูเลเตอร์สนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนและทนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้ เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่นำเสนอนี้จะทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่ต้องลดทอน น้ำหนักเบา ขนาดกระทัดรัด เคลื่อนย้ายได้ง่าย สะดวกในการติดตั้ง ต้นทุนการสร้างต่ำและสามารถสร้างได้ภายในห้องทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	High Voltage Measurement Technique Using Electric Field Motor
<b>Student</b>	Mr.Pongtep Kerdonfag
<b>Student ID.</b>	38621214
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	1999
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

### ABSTRACT

This thesis presents a high voltage measurement technique that can be used for both AC and DC systems based on the principle of electric field motor. The speed of an electric field motor depends on its input voltage. Therefore, the input voltage of the electric field motor can be measured by detecting the speed of the electric field motor. The voltage level range that can be measured depends on the pressure and type of gases in the electric field motor. This can be seen that the electric field motor structure is very important for the results of this technique. Therefore, the Finite Element Program will be used to compute the voltage level and electric field distribution at any point of the electric field motor. The calculated results will be used to design the appropriate structure of the electric field motor that has the linear relation between the speed of motor input voltage and can withstand the measured voltage level. The advantages of this technique are light, compact, portable, easy to install, low cost, without dividers and can be constructed in a laboratory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาและ ดร.วิจิตร กิณเรศ ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์เป็นแนวทางในการทำวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ อ.จักราวุธ เศรษฐวิเศษ, คุณค่อมพงษ์ ขววงวนิช, คุณธีระศักดิ์ สุขวงศ์, คุณขวัญ ประชาขาวไร่, คุณนิติพล ฤมลพจน์, คุณสุมิตร ศรีสุทธิ, คุณชัยวัฒน์ เหล่าศิริถาวร, คุณสุรวิติ พิทักษ์วงศาภรณ์, คุณคารม คุชวงษ์, คุณปิยฉัฐ อภัยศรี ตลอดจนทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์บางประการแก่ผู้เขียน ซึ่งถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเช่นนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่จงกลณี คุณพ่อ ไกรพจน์ คุณนิวัต เกิดคอนแฝก ที่เป็นผู้สนับสนุนและให้กำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจ

พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 โครงงานวิจัยทดลอง.....	1
1.2.1 มอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	2
1.2.2 ชุดวัดแรงดัน ไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนาม ไฟฟ้า.....	2
1.3 บทสรุปและวิเคราะห์ผล.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 สนามไฟฟ้า.....	3
2.2.1 ความคงทนจนวนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	3
2.2.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	4
2.2.3 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	5
2.3 ไอออนไนเซชัน.....	7
2.3.1 ไอออนไนเซชันโดยการชน.....	8
2.3.2 โฟโตไอออนไนเซชัน.....	8
2.3.3 เทอร์มัลไอออนไนเซชัน.....	8
2.3.4 การเกิดไอออนลบ.....	9
2.4 การปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวโลหะ.....	9
2.4.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ โดยการชนของไอออนบวก.....	9
2.4.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ โดยพลังงานโฟตอน.....	9
2.4.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ โดยพลังแสง.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแบบสงวนสิทธิ์ และเรื่องอื่น ๆ โปรดแจ้งเจ้าของสิทธิ์ บริษัทกรังทิมกรุ๊ป จำกัด

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.4.4 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ โดยความร้อน.....	10
2.4.5 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ โดยสนามไฟฟ้า.....	10
2.5 กลไกการเกิดเบรคดาวน์.....	10
2.5.1 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ของทาว์นเซนต์.....	11
2.5.2 กลไกการเกิดเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์.....	15
2.6 เบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	17
2.6.1 แรงดันเริ่มต้นช้าลงต่ำกว่าช้าวก.....	17
2.6.2 ผลของประจุค้างต่อแรงดันเบรคดาวน์ต่างชั่ว.....	19
2.6.3 ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเบรคดาวน์.....	20
2.7 เบรคดาวน์ในก๊าซลบ.....	22
2.8 การประยุกต์ใช้งาน FEM ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า.....	22
2.8.1 การแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นอิเลิเมนต์.....	22
2.8.2 การหาสมการของแต่ละอิเลิเมนต์.....	23
2.8.3 การรวบรวมอิเลิเมนต์เป็นขอบเขตของปัญหาค้างเดิม.....	27
2.8.4 การแก้ระบบสมการเพื่อหาผลลัพธ์.....	29
บทที่ 3 มอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 การทดลอง.....	32
3.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	32
3.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ.....	32
3.2.3 โครงสร้างตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	34
3.2.4 วิธีการทดลอง.....	36
3.3 การพัฒนาโครงสร้างตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	37
3.3.1 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 1.....	37
3.3.2 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 2.....	38
3.3.3 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3.....	38
3.4 การพัฒนารูปลักษณะของตัวหมุนและลักษณะการหมุน ของมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแบบสงวนสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
3.5 บทสรุปและวิเคราะห์ผล.....	42
บทที่ 4 คุณลักษณะของมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	45
4.1 การเคลื่อนที่ของตัวหมุน.....	45
4.1.1 อิเล็กโตรคตัวหมุนอะ โนค.....	46
4.1.2 อิเล็กโตรคตัวหมุนกะ โดค.....	46
4.2 ความเร็วรอบหมุนของอิเล็กโตรคตัวหมุนอะ โนคและกะ โดค.....	47
4.2.1 ความเร็วรอบหมุนที่ระดับแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนเดียวกัน.....	47
4.2.2 ความเร็วรอบหมุนสูงสุด.....	48
4.2.3 ความเร็วรอบหมุนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
4.2.4 ความเร็วรอบหมุนที่ก๊าซต่างๆ.....	65
4.2.5 ความเร็วรอบหมุนที่ความดันต่างๆ.....	67
4.3 ทิศทางและขนาดของแรงที่ทำให้อิเล็กโตรคตัวหมุนเคลื่อนที่.....	68
4.3.1 ลักษณะการกระจายของระดับแรงดัน ไฟฟ้าของมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	69
4.3.2 ทิศทางแนวแรงที่มากกระทำที่อิเล็กโตรคตัวหมุน.....	71
4.3.3 ขนาดแรงที่มากกระทำที่อิเล็กโตรคตัวหมุน.....	71
4.4 บทสรุปและวิเคราะห์ผล.....	73
บทที่ 5 ชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	75
5.1 บทนำ.....	75
5.2 โครงสร้างของชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	75
5.2.1 มอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	75
5.2.2 ภาคส่งสัญญาณ.....	79
5.2.3 ภาครับสัญญาณ.....	80
5.2.4 ภาคเปลี่ยนสัญญาณความถี่เป็นแรงดัน.....	80
5.2.5 ภาคแสดงผล.....	82
5.3 การทดสอบชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	82
5.3.1 การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงเทียบกับ ชุดตัวความต้านต่ออันดับ.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
5.3.2 การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเทียบกับ ชุดตัวความเก็บประจุต่ออันดับ.....	84
5.4 บทสรุปและวิเคราะห์ผล.....	85
บทที่ 6 บทสรุป.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและกระแสสลับ.....	92
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดสอบมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	96
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดสอบชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	114
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	130
ประวัติผู้เขียน.....	149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.5.....	48
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.7.....	51
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.9.....	52
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.11.....	54
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.13.....	55
4.6 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.15.....	57
4.7 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.17.....	58
4.8 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.19.....	60
4.9 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.21.....	61
4.10 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.23.....	63
4.11 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.24.....	64
4.12 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.25.....	65
4.13 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.26.....	66
4.14 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.27.....	68
ผ.3.12 อิเล็กโตรดตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ ทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแขน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 17.5 ซม.....	97
ผ.3.13 อิเล็กโตรดตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ ทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแขน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. แขนตัวหมุนแบบแบริ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. แขนตัวหมุนแบบเข็มทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแขน 2.6 มม. ยาว 6.0 ซม. ....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่	หน้า
ผ.4.4	อิเล็กโตรดตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ ทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแขน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมของตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. แกนตัวหมุนแบบเข็มนาฬิกาด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแขน 2.6 มม. ยาว 6.0 ซม. ....99
ผ.4.5	ตัวหมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างเหมือนกันแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวมอเตอร์เป็น AC และ DC ที่ระดับแรงดันอากาศ 3 bar เพื่อพิจารณาหาผล ความแตกต่างของความเร็วรอบหมุน โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขน ปลายแหลม โค้งงอแขนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจาก จุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 2.0 ซม. ระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแก๊ป 6.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรด ระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัว หมุนทำด้วยลวดทองเหลือง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....100
ผ.4.7	โครงสร้างเหมือนกัน แต่จำนวนแขนของตัวหมุนแตกต่างกัน เพื่อพิจารณา หาจำนวนแขนของตัวหมุน ที่ให้สมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ ป้อนที่ดีที่สุด โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอแขน ของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาว แขนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.8 ซม. ระยะปลายแหลมถึง กราวด์มีค่าระยะแก๊ป 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวด ทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....101
ผ.4.9	ลักษณะ โครงสร้างของตัวหมุนที่ปลายแหลม 2 แขน เป็นแขนปลายแหลม โค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแกนตัวหมุนเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดความยาวแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 4.0 และ 4.8 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงชื่อของเอกสารที่นำมาใช้

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่	หน้า
	มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหุมนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. โดยน้ำหนักของตัวหุมนเท่ากับ ทั้ง 2 แบบ คือ 5.4 กรัม.....102
ผ.4.11	แขนที่ทำจากลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6, 3.0 และ 3.2 มม. ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของแขนถึงปลายแขนเท่ากับ 4.4 ซม. โดยระยะระหว่างปลายแหลมกับกราวด์เท่ากับ 4.19 ซม. มวลของแขนคือ 2.0, 2.4 และ 3.1 กรัม แกนเพลลาตัวหุมนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....103
ผ.4.13	โครงสร้างเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอทำด้วยทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง แขน 2.64 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.8 ซม. เท่ากันทุกแขนแต่ความยาวส่วนปลายแขนต่างกัน 3 แบบ คือยาว 1.5 ซม., 2.0 ซม., 2.5 ซม. ผลการทดลองที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหุมนถึงกราวด์ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหุมนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....104
ผ.4.15	โครงสร้างของตัวหุมนเป็นปลายแหลมโค้งงอ ที่มีความโค้งงอต่างกัน แขนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลาง ถึงปลายยาว 5 ซม. เท่ากันทุกแขนจำนวนแขนของตัวหุมนมีรัศมีความโค้งต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.0, 1.45 และ 1.75 ซม. ผลการทดลองที่ให้ระยะห่างปลายแหลมของตัวหุมนถึงกราวด์ 3.59 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหุมนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....105
ผ.4.17	ลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลาย 4.8 ซม. องศาความโค้งตรงส่วนปลายแขนคือ 58, 90, และ 113 องศา 2 แขน ผลการทดลองให้ระยะห่างปลายแหลมของตัวหุมนถึงกราวด์ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็น วงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหุมนทำด้วยลวดทองเหลือง

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่	หน้า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....	106
ผ.4.19 ลักษณะ โครงสร้างเหมือนกัน เพื่อพิจารณาหาความแหลมของแกนที่ทำให้ ความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่ดีที่สุดโดยแกนของตัวหมุนทำ ด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ความยาวแกนวัดจาก จุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมของแกนยาว 4.5 ซม. ความแหลมของแกน พิจารณาเป็นมุมแหลมคี่มุมแหลม 6.1, 9.1 และ 17.74 องศา ระหว่าง ระหว่างปลายแหลมของแกนกับกราวด์ 4.09 ซม. ลักษณะของ อิเล็กโตรด ระนาบเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลา ตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....	107
ผ.4.21 ลักษณะ โครงสร้างที่ต่างกันเพื่อพิจารณาหาขนาดของแกนตัวหมุนที่ เหมาะสมเพื่อให้ได้ความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนดีที่สุดโดยใช้ ตัวหมุนที่มีความยาว 4.8 ซม. สำหรับขนาดของแกนตัวหมุนมีมวลเป็น 1.6, 2.7 และ 3.5 กรัม ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมี เส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวด ทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....	108
ผ.4.23 เปรียบเทียบชนิดของแกน โดยได้แบ่งชนิดของแกนตัวหมุนออกเป็น 2 แบบ คือ ตัวหมุนชนิดน้ำมันและแกนตัวหมุนชนิดเข็ม โดยแกน ตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.6 มม. ลักษณะของ อิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....	109
ผ.4.24 เปรียบเทียบที่ขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ 2.5, 3.5, 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม.มีความยาว 6 ซม. ....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

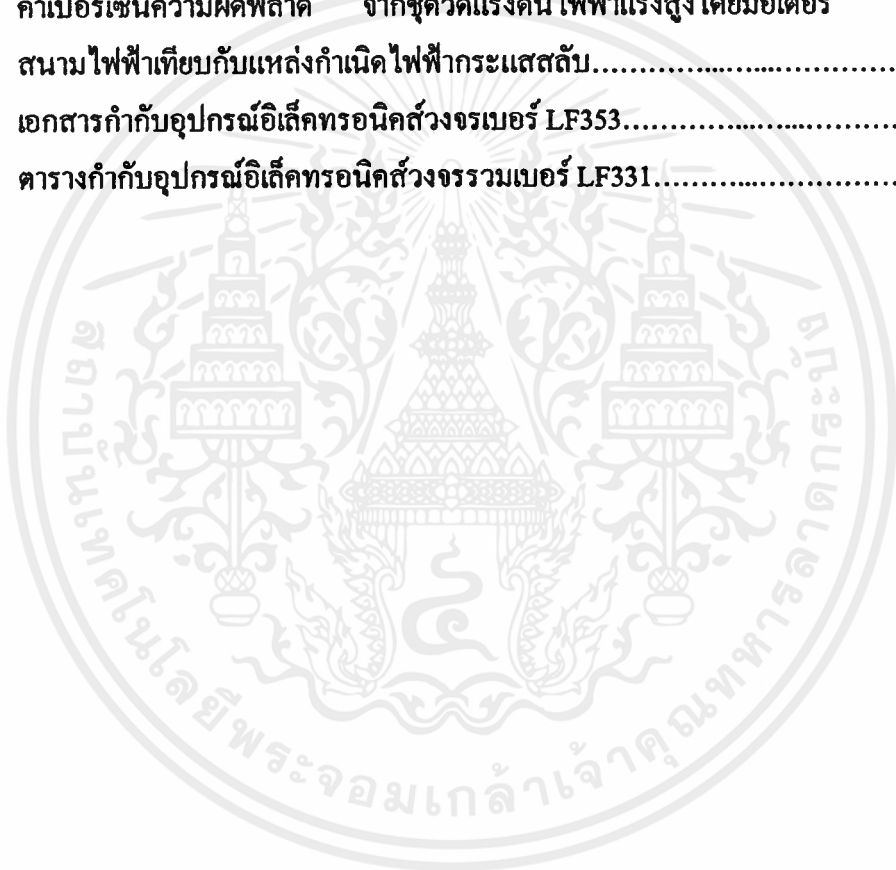
ตารางที่

หน้า

- ผ.4.25 โครงสร้างเหมือนกัน โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอแขนของตัวหมุน ทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. อุณหภูมิการทดลอง 21, 24, 27, 30, 33, 35 องศา โดยทำการทดลองที่บรรยากาศปกติ และระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแก๊ป 4.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....111
- ผ.4.26 โครงสร้างของตัวหมุน ที่ปลายแหลม 2 แขน โดยมีโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแขนตัวหมุนเปลี่ยนแปลง ให้มีขนาดความยาว 2.0 ซม. และ ระยะปลายแหลมถึงกราวด์ มีค่าระยะแก๊ป 6.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ทดสอบที่ อากาศและก๊าซ SF<sub>6</sub> 3 bar .....112
- ผ.4.27 โครงสร้างของตัวหมุนที่ปลายแหลม 2 แขน โดยมีโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแขนตัวหมุนเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดความยาว 2.0 ซม. และ ระยะปลายแหลมถึงกราวด์ มีค่าระยะแก๊ป 6.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ....113
- ผ.5.8 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า ชุดที่ 1 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงตั้งแต่ 15 กิโลโวลต์ ถึง 50 กิโลโวลต์.....115
- ผ.5.9 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า ชุดที่ 2 วัดแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงตั้งแต่ 50 กิโลโวลต์ ถึง 115 กิโลโวลต์.....116
- ผ.5.10 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า ชุดที่ 1 วัดแรงดันไฟสลับตั้งแต่ 15 กิโลโวลต์ ถึง 40 กิโลโวลต์.....117

## สารบัญตาราง ( ต่อ )

ตารางที่	หน้า
ผ.5.11 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า ชุดที่ 2 วัดแรงดันไฟสถับตั้งแต่ 40 กิโลโวลต์ ถึง 80 กิโลโวลต์.....	118
ผ.5.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์ สนามไฟฟ้าเทียบกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	119
ผ.5.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์ สนามไฟฟ้าเทียบกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสถับ.....	120
ค-1 เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สว่างจรมเบอร์ LF353.....	125
ค-2 ตารางกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สว่างจรรวมเบอร์ LF331.....	127



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....	4
2.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....	5
2.3 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	6
2.4 ก) อิเล็กโตรดแผ่นระนาบในอากาศ ข) ลักษณะกราฟกระแส – แรงดัน.....	11
2.5 อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน.....	12
2.6 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระ โดยขบวนการ $\gamma$ .....	14
2.7 การสร้างอะวาลานซ์ใหม่.....	15
2.8 กลไกการเกิดเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์.....	16
2.9 ระยะเวลาวิกฤติของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน.....	17
2.10 ระยะเวลาอะวาลานซ์วิกฤติในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	18
2.11 ผลประจุค้างของปลายแหลมข้าวบวก.....	19
2.12 ผลประจุค้างของปลายแหลมข้าวลบ.....	20
2.13 (a) ขอบเขตพื้นที่ของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ (b) การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย.....	22
2.14 อิทธิพลรูปสามเหลี่ยม : แสดงการวนโหนด 1-2-3 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	24
2.15 แสดงShape Function $\alpha_1, \alpha_2$ และ $\alpha_3$ ของอิทธิพลรูปสามเหลี่ยม.....	25
2.16 การรวม 3 อิทธิพลเข้าด้วยกัน ; i - j - k เป็นการระบุโหนด.....	28
3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 300 kV <sub>DC</sub> .....	33
3.2 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสลับ.....	33
3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ 0 – 125 kV <sub>max</sub> .....	34
3.4 ตัวหมุนทองแดงที่มีจำนวนแกนหมุนต่างกัน.....	34
3.5 อิเล็กโตรดระนาบทองแดง.....	35
3.6 แกนตัวหมุนชนิดแบริ่ง.....	35
3.7 แกนตัวหมุนชนิดเข็ม.....	35
3.8 การต่อสายวงจรทดลอง.....	36
3.9 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 1.....	37
3.10 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 2.....	38
3.11 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3.....	39

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
3.12 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบ(rpm) ของโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	40
3.13 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบ(rpm) ของแกนตัวหมุนช่วยลดความผิด.....	41
3.14 โครงสร้างของมอเตอร์สนาม ไฟฟ้าแรงสูง.....	43
3.15 ลักษณะของแกนตัวหมุน.....	43
4.1 โครงสร้างของมอเตอร์สนาม ไฟฟ้า.....	45
4.2 แรงกระทำของอิเล็คตรอนและ ไอออนลบต่ออิเล็ค โตรคตัวหมุนอะ โนด.....	46
4.3 แรงกระทำของอิเล็คตรอนและ ไอออนบวกต่ออิเล็ค โตรคตัวหมุนคะ โถด.....	46
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของอิเล็ค โตรคอะ โนดและอิเล็ค โตรคคะ โถด.....	47
4.5 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่มีแรงดัน ไฟฟ้า AC และ DC.....	49
4.6 ตัวหมุนที่มีจำนวนแกนต่างกัน.....	50
4.7 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า-กิโล โวลท์กับความเร็วยรอบ-รอบต่อนาที ของตัวหมุนที่มีจำนวนแกนต่างกัน.....	50
4.8 ตัวหมุนที่มีความยาวต่างกัน.....	51
4.9 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า-กิโล โวลท์กับความเร็วยรอบ-รอบต่อนาที ของตัวหมุนที่มีความยาวแกนต่างกัน.....	52
4.10 ตัวหมุนที่มีมวลต่างกัน.....	53
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า-กิโล โวลท์กับความเร็วยรอบ-รอบต่อนาที ของตัวหมุนที่มีมวลต่างกัน.....	53
4.12 ตัวหมุนที่มีความยาวส่วนปลายแกนต่างกัน.....	55
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า-กิโล โวลท์กับความเร็วยรอบต่อนาที ของตัวหมุนที่มีความยาวส่วนปลายแกนต่างกัน.....	55
4.14 ตัวหมุนที่ความยาวของแกนเท่ากันแต่รัศมีส่วน โคง์ต่างกัน.....	56
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่รัศมีความ โคง์ต่างกัน.....	56

## สารบัญญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.16 ตัวหมุนที่มีมุมความโค้งส่วนปลายต่างกัน .....	57
4.17 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่มีมุมความโค้งส่วนปลายต่างกัน .....	58
4.18 ความแหลมส่วนปลายแขน.....	59
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของความแหลมส่วนปลายแขน.....	59
4.20 น้ำหนักของแกนตัวหมุนต่างกัน.....	60
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของน้ำหนักแกนตัวหมุนต่างกัน.....	61
4.22 ชนิดของแกนตัวหมุนแบบเข็มและเบริงน้ำมัน.....	62
4.23 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของชนิดของตัวหมุน.....	62
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของ ขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน.....	63
4.25 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุน 4.0 ซม. ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	65
4.26 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุน 3 ซม. เปรียบเทียบอากาศและก๊าซ SF <sub>6</sub> ที่ความดัน 3 bar.....	66
4.27 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนยาว 2.0 เซนติเมตร ที่ความดัน และชนิดก๊าซต่างกัน.....	67
4.28 บล็อกโคอะแกรมของโปรแกรมคำนวณ วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์.....	69
4.29 (ก) การแบ่งโครงสร้างมอเตอร์สนาม ไฟฟ้าช่วงที่แรกเพื่อวิเคราะห์ด้วยFEM.....	69
4.29 (ข) การแบ่ง โครงสร้างมอเตอร์สนาม ไฟฟ้าช่วงที่สองเพื่อวิเคราะห์ด้วยFEM.....	70
4.30 การกระจายของระดับแรงดันในมอเตอร์สนาม ไฟฟ้า.....	70
4.31 ทิศทางของแรงที่เกิดจากสนาม ไฟฟ้า.....	71
4.32 มุม โค้งงอของแขนปลายแหลม 90° .....	72
4.33 มุม โค้งงอของแขนปลายแหลม 135° .....	72
4.34 มุม โค้งงอของแขนปลายแหลม 180° .....	73

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
5.1 ชุดเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	76
5.2 โฟซาร์ทของชุดเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	77
5.3 ตัวถังส่วนครึ่งวงกลมของมอเตอร์สนามไฟฟ้า.....	77
5.4 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์แบบแกนเข็ม.....	78
5.5 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์.....	78
5.6 ฐานรองรับตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงและยึดตัวส่งและตัวรับแสง.....	79
5.7 ภาคส่งสัญญาณ.....	79
5.7_1 ภาครับสัญญาณ.....	80
5.7_2 ค่าความต้าน ( $R_p$ ) ที่สำหรับย่านการวัดของชุดเทคนิคที่นำเสนอ.....	81
5.7_3 ชุดวงจรเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	82
5.8 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วเวลาช่วง 15 – 50 kV.....	83
5.9 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วเวลาช่วง 50 – 115 kV.....	83
5.10 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับช่วง 15 – 40 kV <sub>rms</sub> .....	84
5.11 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับช่วง 40 – 80 kV <sub>rms</sub> .....	85
5.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วเวลา.....	86
5.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ.....	86
ก-1 เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงและชุดควบคุมของ PASSON VILLA รุ่น 75021.....	92
ก-2 ชุดเทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้ในการวัดเทียบ.....	94
ก-3 การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วเวลาโดยชุดเทคนิคการวัดที่นำเสนอ.....	95
ก-4 การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับโดยชุดเทคนิคการวัดที่นำเสนอ.....	95
ค-1 วงจรของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	121
ค-2 การจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาทำเป็นชุดวงจร ของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	122
ค-3 ลายพิมพ์ของวงจรเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	123
ค-4 เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรเบอร์ LF353.....	124
ค-5 เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เบอร์ LM311.....	126
ค-6 การประยุกต์นำเอาวงจรรวมเบอร์ LM311 ไปใช้งาน (ในที่นี้เราเลือกใช้ตาม Figure5).....	129

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับในปัจจุบันจะวัดโดยใช้การวัดแรงดันผ่านอุปกรณ์ลดระดับแรงดันประเภทที่สร้างจากตัวความต้านทานหรือตัวเก็บประจุและหม้อแปลงแรงดัน (PT) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอุปกรณ์ลดระดับแรงดันแต่ละประเภทที่กล่าวมาสามารถนำไปใช้ในการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงหรือแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ได้ถูกต้องจนเป็นที่ยอมรับได้เพียงชนิดเดียว ส่วนขนาดของอุปกรณ์ลดระดับแรงดันจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากเมื่อต้องการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงมากๆ ไม่สะดวกในการติดตั้งและเคลื่อนย้าย ดังนั้นจึงทำให้ผู้ที่ต้องการวัดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สูงมากๆเกิดความไม่สะดวกในการใช้งานและอาจวัดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงคลาดเคลื่อนจากค่าจริงมากหรืออาจวัดค่าไม่ได้เมื่อทำการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงไม่เหมาะสม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น โครงการทดลองวิจัยการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยการใช้เทคนิควัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้าทำให้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ซึ่งอาศัยจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนให้กับมอเตอร์สนามไฟฟ้า ทำให้เมื่อสามารถวัดความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปความถี่จากนั้นนำความถี่ที่ได้ป้อนวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะส่งต่อไปยังส่วนแสดงผล ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แสดงที่ส่วนแสดงผลจะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนให้มอเตอร์ สนามไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อต้องการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงก็ทำได้โดยการนำแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการทราบค่าไปป้อนให้กับมอเตอร์สนามไฟฟ้า ส่วนระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับมอเตอร์สนามไฟฟ้า ถ้าหากต้องการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นก็สามารถทำได้โดยการปรับระดับแรงดันก๊าศที่บรรจุในมอเตอร์สนามไฟฟ้าหรือเปลี่ยนชนิดของก๊าศที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (SF<sub>6</sub>)

### 1.2 โครงการทดลองวิจัย

ในการทดลองวิจัยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อมูลต่างๆเพียงพอในการสร้างชุดที่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง จึงได้แบ่งโครงการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็น

### 1.2.1 ส่วนมอเตอร์สนามไฟฟ้า

ในส่วน โครงการวิจัยเพื่อหารูปแบบลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ให้ความเร็วรอบที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้กับการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ได้นำเสนอส่วนในโครงการงานวิจัยได้ทำการวิจัยหาค่าประกอบและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบ โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้า เช่น อุณหภูมิ, ความดันของก๊าซ, ชนิดของก๊าซและตัวแปรอื่นๆ รวมทั้งยังทำการหา ลักษณะการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้า ขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าพร้อมทั้งทิศทางของแนวแรงที่มากกระทำให้มอเตอร์สนามไฟฟ้าหมุน ( บทที่ 4 )

### 1.2.2 ส่วนชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

เป็นส่วน โครงการงานวิจัยเพื่อสร้างชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ซึ่งอาศัยจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้าโดยชุดวัดแรงดันไฟฟ้าที่จัดสร้างขึ้นจะมี องค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญ 5 ส่วน คือ 1) ส่วนมอเตอร์สนามไฟฟ้า 2) ภาคส่งสัญญาณ 3) ภาครับสัญญาณ 4) ภาคเปลี่ยนสัญญาณ 5) ภาคแสดงผล ( บทที่ 5 )

### 1.3 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากข้อมูลผลการทดลองทดสอบทั้งหมดจากโครงการงานวิจัยทดลองทำให้สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยหลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นผลมาจากหลายๆส่วนประกอบกัน เช่น อุณหภูมิ ชนิดของก๊าซ ความดันของก๊าซ เป็นต้น อีกทั้งยังทำการวิเคราะห์องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดที่มีผลกับมอเตอร์สนามไฟฟ้าความคลาดเคลื่อนในการวัดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบสร้างชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคที่น่าเสนอจากนั้นยังนำไปวัดทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างจากหลักการอื่นเพื่อยืนยันและหาข้อสรุปของทาง ประสิทธิภาพ ขนาด น้ำหนัก และราคา ( บทที่ 6 )

## บทที่ 2

# ทฤษฎีทั่วไป

### 2.1 บทนำ

เนื่องจากในโครงการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการค้นคว้าทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยอาศัยหลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งต้องอาศัยการอ้างอิงทฤษฎีในการออกแบบโครงสร้างชุดวัดแรงดันไฟฟ้าและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในบทนี้จึงเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีที่ใช้ในการอ้างอิงของโครงการวิจัยนี้โดยละเอียด เพื่อให้เข้าใจในวิทยานิพนธ์ ได้สะดวกขึ้น จึงได้แบ่งหัวข้อทฤษฎีออกตามลำดับของการอ้างอิงผลตั้งแต่ลักษณะของสนามไฟฟ้า รูปร่างของอิเล็กโทรด การกระจายรังสีในก๊าซ (gaseous) ขบวนการไอออไนเซชัน (ionization) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ (electron emission from metallic surface) กลไกการเบรคดาวน์ (breakdown) ผลการเกิดเบรคดาวน์ในสภาวะต่างๆและการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในวิเคราะห์แก้ปัญหา

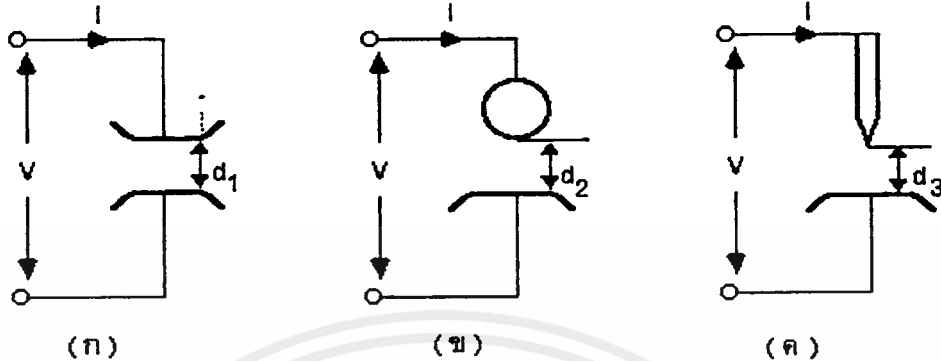
### 2.2 สนามไฟฟ้า

ก๊าซเป็นฉนวนอย่างหนึ่งทางไฟฟ้า ในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงๆ และที่มีว่างจำกัดการเป็นฉนวนจะแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซ แรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้า สภาพของฉนวนจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี เมื่อเกิดการสปาร์คหรือวาบไฟหรือมีการเบรคดาวน์ผ่านฉนวนในก๊าซหรือของเหลวหลังจากสภาพฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าและจะคงอยู่ถ้าแรงดันนั้นสูงพอ และจะกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนดั้งเดิม หลังจากการเบรคดาวน์หรือสปาร์คได้ผ่านพ้นไปแล้ว ซึ่งแตกต่างไปจากฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากการเกิดเบรคดาวน์แล้วสภาพการเป็นฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร

#### 2.2.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า ( Dielectric Strength )

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรคดาวน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด เป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร ( V / cm ) หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ( kV / cm ) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วๆ ไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ( Uniform Field ) ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ หลาย

ประการ อาทิเช่น รูปลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ลักษณะสมบัติของ ไดอิเล็กตริก (Dielectric) , เวลา เป็นต้น



รูปที่ 2.1 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ( Uniform Field )
- (ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ( Slightly Nonuniform Field )
- (ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง ( Highly Nonuniform Field )

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.1 จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$  ,  $d_2$  และ  $d_3$  เป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่าง อิเล็กโตรดในขณะที่การเบรคดาวน์เริ่มเกิดขึ้นซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

### 2.2.2 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆจุดในช่วงระหว่างอิเล็กโตรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 2.1 ( ก ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V_b}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด หน่วย โวลท์ หรือกิโลโวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสาร d : ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด หน่วย เซนติเมตร อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น  $E_{av}$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด หน่วย โวลท์ต่อ

เซนติเมตรหรือ กิโลโวลท์ ต่อ เซนติเมตร

$E_{max}$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรคควาน์ทันที่ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งจะเท่ากันทุกจุดถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสก่อนจะเกิดเบรคควาน์นั้นจะวัดไม่ได้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรคควาน์นี้ก็คือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

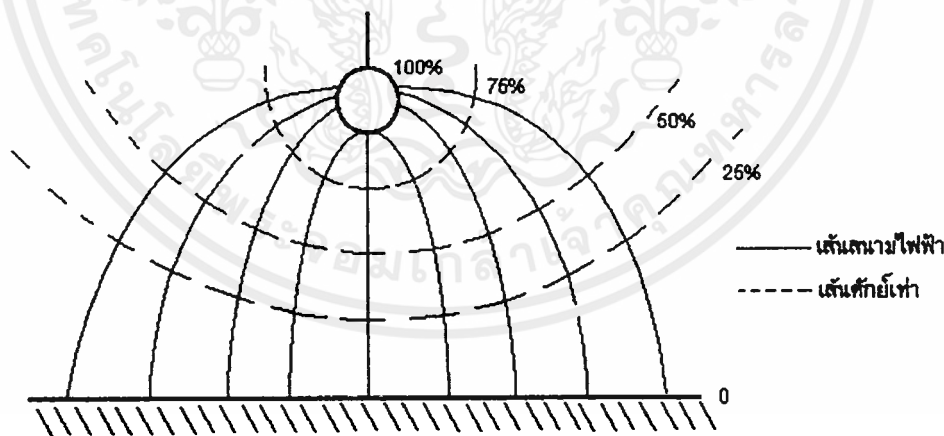
$$E_b = \frac{V_b}{d} \tag{2.2}$$

เมื่อ  $V_b$  : แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคควาน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$E_b$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคควาน์ หรือความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

### 2.2.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุด จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.1 (ข) ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมอาจคำนวณได้จาก

$$E_{max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \tag{2.3}$$

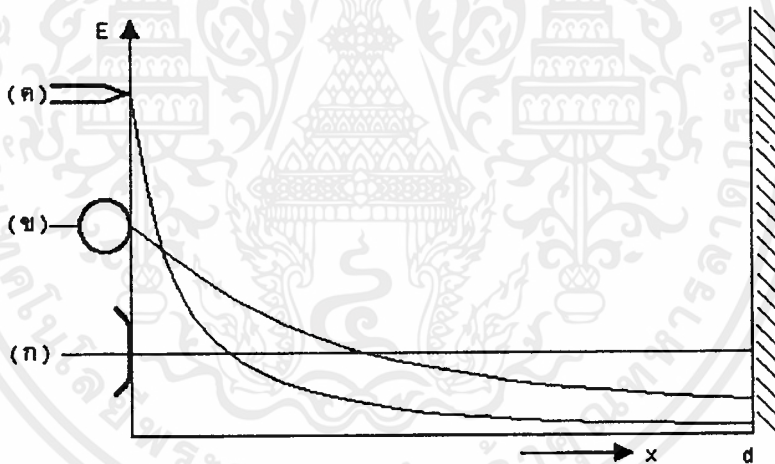
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\eta^*$  : แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ( Field Utilization Factor ) นิยามว่า  $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}}$  ; ซึ่ง

โดยทั่วๆ ไปจะมีค่า  $\leq 1$  ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  คือดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงสามารถคำนวณหาความเครียดเบรคความของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

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

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรน่า(Corona)หรือพรีดิสชาร์จ (Predischarge ) เกิดก่อนเบรคความดังอิเล็กโตรดในรูปที่ 2.1 ( ข ) กล่าวคือก่อนการเบรคความจะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรดเลยและลักษณะสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_b$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจะเกิดเบรคความทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดสูงถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ

ในกรณีทีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเช่นปลายแหลมดังรูปที่ 2.1 (ค) ทีระยะห่างออกจากผิว อิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.3 ซึ่งอิเล็กโตรดแบบนี้แม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะยังไม่เกิดการเบรคความแต่จะเกิดโคโรน่าพรีดิสชาร์จขึ้นในบริเวณผิวอิเล็กโตรดคือบริเวณที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรน่า ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดการดิสชาร์จ ( Discharge ) ที่ไม่สมบูรณ์ คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด

เรียกว่าการคายประจุบางส่วน (Partial Discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดกระแสแต่นี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเบรคความเรียกว่า กระแสโคโรนา (Colona Circuit) หรือกระแสพรีดิคชันการเกิดโคโรนาเป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (Space Charge) แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ ( 2.3 ) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรคความจะคำนวณจากสมการ ( 2.4 ) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ ( 2.4 ) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

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

เมื่อ  $E_i$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด

$V_i$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด ( Colona Inception Voltage )

โดย  $E_i$  และ  $V_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิดฉะนั้นจึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรดหรือกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage , Threshold Voltage , Inception Voltage ) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรด อาจจะเป็นเบรคความในกรณีทีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและอาจจะเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิดในกรณีที่เป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรคความจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปว่า

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

เมื่อ  $V_i$  : แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  : ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $V_i$

## 2.3 ไอออนเซชัน

ขบวนการที่แยกอิเล็กตรอนให้หลุดออกอะตอมหรือ โมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอและทำให้เกิด ไอออนบวกเพิ่มขึ้นเรียกว่าไอออนเซชันหรือการแตกตัวของอิเล็กตรอน จากโมเลกุล ส่วนขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง ( Solid ) เรียกว่าการปล่อยอิเล็กตรอน ( Electron Emission ) ซึ่งในที่นี้จะเน้นขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก

อิเล็กโตรด ซึ่งเป็นขบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้ การเพิ่มทวิคูณ จำนวนอิเล็กตรอนและไอออนในก๊าซมีเนื่องจากขบวนการไอออไนเซชันมีอยู่หลายวิธี ซึ่งจะขอกกล่าวเพียงบางวิธีที่สำคัญๆ พอสังเขป

### 2.3.1 ไอออไนเซชันโดยการชน ( Collision Ionization )

เมื่ออนุภาคมีมวล  $m$  ( อิเล็กตรอน , ไอออนหรืออะตอมเป็นกลาง ) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  และชนกับอะตอมมีมวล  $m$  จะมีการถ่ายทอดพลังงานจลน์ ถ้าไม่มีผลทำให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือทำให้เกิด ไอออไนเซชันเรียกรวมกันว่าชนแบบยืดหยุ่น ( Elastic Collision ) แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชน เกิดตื่นกระตุ้นหรือไอออไนเซชันขึ้นเรียกรวมกันว่าชนแบบไม่ยืดหยุ่น ( Inelastic Collision ) นั้นหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานศักย์ไอออไนเซชันเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ โดยที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาอะโนด พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งถ้ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน ( Ionization Energy ) ของโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด ก็จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้น ถ้าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการไอออไนเซชันก็อาจจะเป็ผลทำให้โมเลกุลที่ถูกชนนั้นอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้นได้ พลังงานที่ทำให้โมเลกุลตื่นกระตุ้นได้พอดีเรียกว่า พลังงานตื่นกระตุ้น ( Excitation Energy )

### 2.3.2 โฟโตไอออไนเซชัน ( Photoionization )

เมื่ออะตอมของธาตุบางชนิด เช่น อะตอมไฮโดรเจนได้รับพลังงานจากภายนอกจะทำให้วงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสลดหย่อนห่างออกมามากกว่าปกติ แต่ยังคงโคจรอยู่รอบนิวเคลียสในวงโคจรที่แน่นอนวงหนึ่ง โดยไม่หลุดออกมา ซึ่งลักษณะเช่นนี้เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้น พลังงานจะคงสภาพอยู่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ประมาณ  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-7}$  วินาทีเท่านั้นแล้วอะตอมก็จะกลับเข้าสู่สภาพปกติขณะเดียวกันก็จะปล่อยพลังงานที่ได้รับในตอนแรกกลับคืนมาในรูปของโฟตอน ( Photon ) ถ้าวิ่งไปกระทบเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลเป็นกลางอาจทำให้เกิดการตื่นกระตุ้นหรือไอออไนเซชันได้

### 2.3.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน ( Thermal Ionization )

เทอร์มัลไอออไนเซชัน เป็นการไอออไนเซชันอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยพลังงานความร้อน ในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ไอออไนเซชันอาจเกิดขึ้นได้จาก

- ไอออไนเซชันโดยการชนกันเองของโมเลกุล หรือ อะตอมเนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้มีความเร็วสูง จึงให้พลังงานจลน์สูง ทำให้เกิดไอออไนเซชันได้

- ก๊าซร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมาและเกิดโฟโตไอออไนเซชันขึ้นได้
- การชนของอิเล็กตรอน ที่มีพลังงานจลน์สูง จากข้อข้างต้น

### 2.3.4 การเกิดไอออนลบ ( Negative ion formation )

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ไอออนในเซชันเป็นขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซและที่เหลือเป็นไอออนบวก ในโอกาสเดียวกันไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้โดยถ้าอิเล็กตรอน มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะชนให้อะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางของก๊าซบางชนิดแตกตัวออกได้ แต่อิเล็กตรอนอาจจับหรือเกาะบนโมเลกุล (Electron Attachment) ทำให้กลายเป็นอนุภาคที่มีมวลเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เคลื่อนที่ได้ช้า นั่นคือ ไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า น้อยโอกาสจะเกิดไอออนในเซชันโดยการวิ่งชนของไอออนลบจึงมีน้อยเท่ากับเป็นการหน่วงการเกิดไอออนในเซชัน การหน่วงนี้มีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นในบริเวณใกล้ๆ โดคอันเป็นที่เริ่มต้นของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นผลให้อิเล็กตรอนอิสระที่เป็นตัวเริ่มจะตกลงไป โมเลกุลของก๊าซประเภทฮาโลเจนคือพวกที่มีองค์ประกอบของ F , Cl , Br , I และ At รวมทั้งพวก O<sub>2</sub> , CO<sub>2</sub> , SF<sub>6</sub> เป็นต้น จะจับอิเล็กตรอนได้ง่ายคายและเป็นไอออนลบที่มั่นคงก๊าซที่มีอะตอมหรือโมเลกุลเหล่านี้รวมอยู่ด้วยเรียกว่าก๊าซ ไฟฟ้าลบ ( Electronegative gases ) ในก๊าซอื่นๆหากมีก๊าซไฟฟ้าลบเจือปนแม้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซนั้นเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด

## 2.4 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ

การที่อิเล็กตรอนวิ่งชน โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุล ซึ่งจัดเป็นขบวนการเบื้องต้นที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณนั้น แต่ตามลำพังขบวนการเบื้องต้น ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเบรคดาวนได้ จำเป็นต้องมีขบวนการอื่นมาช่วยเสริมจำนวนอิเล็กตรอนด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะถือได้ว่าเป็นขบวนการที่สำคัญในการช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเบรคดาวนได้ ซึ่งมีหลากหลายวิธีแต่การจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าที่ผิวของโลหะเป็นสำคัญ ซึ่งจะกล่าวถึงกลวิธีต่าง ๆ พอสังเขปดังนี้

### 2.4.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะโดยการชนของไอออนบวก

ไอออนบวกซึ่งเกิดจากขบวนการเบื้องต้นที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเหลือไอออนบวกวิ่งเข้าหาอะโนด โดยเหตุที่ไอออนบวกมีมวลมากจึงเคลื่อนที่ได้ช้าพลังงานจลน์ที่ไอออนบวกได้จากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อยไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเซชันโดยการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลของก๊าซได้แต่ไอออนบวกมีพลังงานศักย์พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกมาจากผิวโลหะได้เมื่อไอออนบวกวิ่งกระทบ

### 2.4.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะโดยพลังงานโฟตอน(Photo - Emission)

โมเลกุลที่อยู่ในสภาพคืนกระตุ้นปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน ( Ground State ) โดยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่วง โดจรเดิมพลังงานโฟตอนตกลง

บนคะ โลด ทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาจากคะ โลดหรือ โมเลกุลที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (Metastable) นั้นอาจแพร่กระจายกลับไปหาคะ โลดแล้วทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาได้ เมื่อโมเลกุลนั้นวิ่งเข้าไปประกบคะ โลด

#### 2.4.3 การปล่อยไอเล็กตรอนออกจากคะ โลดโดยพลังงานแสง

ไอเล็กตรอนอาจหลุดหรือกระจายออกจากผิวโลหะได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงมากพออาจมีพลังงานเหลือเพื่อและเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์วิ่งเข้าหาอะ โนด ได้ถึงแม้จะ ไม่มีสนาม ไฟฟ้าก็ตาม

#### 2.4.4 การปล่อยไอเล็กตรอนออกจากผิวโลหะด้วยความร้อน (Thermionic Emission)

ที่อุณหภูมิสูงๆไอเล็กตรอนที่ผิวของ โลหะจะมีพลังงานพอที่จะเอาชนะหรือข้ามกำแพงศักย์ (Potential Barrier) ที่ผิวของ โลหะ ไปได้และมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิของผิว โลหะซึ่งการหลุดของไอเล็กตรอนจากผิวของ โลหะ โดยไม่มีแหล่งพลังงานใด ๆ จากภายนอกนี้เรียกว่า การปล่อยไอเล็กตรอนด้วยความร้อน

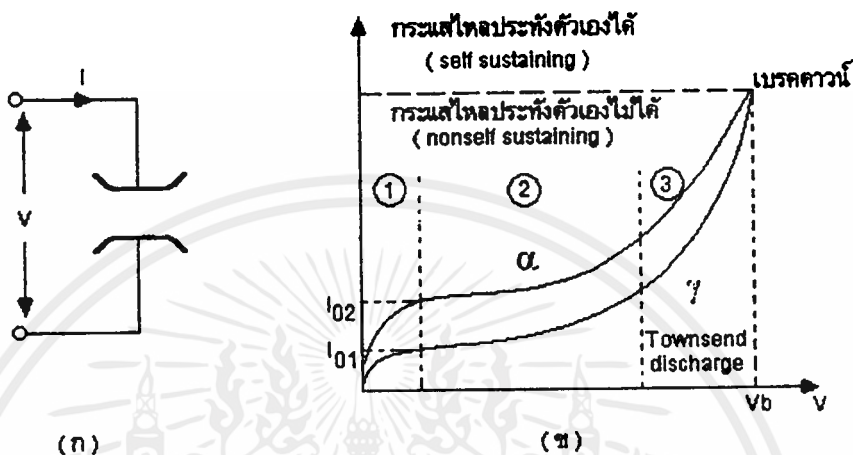
#### 2.4.5 การปล่อยไอเล็กตรอนออกจากคะ โลดโดยสนามไฟฟ้า ( Field Emission )

ผลจากสนาม ไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกเข้าไปจะทำให้ไอเล็กตรอนหลุดหรือปล่อยออกมาจากผิวโลหะ ได้นั้นต้องมีพลังงานมากพออย่างน้อยมีพลังงานมากกว่าการปล่อยออกด้วยพลังงานความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของ โลหะลักษณะของอิเล็ก โตรดเป็นต้น โดยการป้อนแรงดัน ไฟฟ้าให้มีความเข้มของสนาม ไฟฟ้าสูงมาก อาศัยแรงดึงดูดของสนาม ไฟฟ้าดึงไอเล็กตรอนให้หลุดออกจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอม ซึ่งผลของขบวนการปล่อยไอเล็กตรอนออกจากคะ โลด โดยสนาม ไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดความหนาแน่นของไอเล็กตรอนครบบริเวณหัวอิเล็ก โตรดสูงมาก ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญมากใน โคโรนาดีสชาร์จของปลายแหลมขั้วลบ( Negative Point Co-rona Discharge )

### 2.5 กลไกการเกิดเบรคดาวน์

การเกิดเบรคดาวน์ในก๊าซหมายถึงการเปลี่ยนสภาพการจนวน ไปสู่สภาพการนำไฟฟ้าเป็นช่วงที่เปลี่ยนแปลงจากสภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ไปสู่สภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ ซึ่งจะเกิดได้เมื่อในช่วงอิเล็ก โตรดมีจำนวนไอเล็กตรอนหรือ ไอออนอะวาลานซ์ (Avanlanche) มากพอจนทำให้มีสภาพการนำไฟฟ้าสูง โดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์คือกระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรถ่ายนอกเท่านั้น และกระแสที่ไหลนี้จะไหลต่อไปได้ถึงแม้ว่าจะตัดต้นกำเนิดที่สร้างจำนวนไอเล็กตรอนเริ่มต้น  $N_0$  และกระแสเริ่มต้น  $I_0$  ออกก็ตาม เช่น ต้นกำเนิดรังสีต้องคะ โลดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์คงเดิม ไม่ว่า  $N_0$  หรือ  $I_0$  จะต่างกันก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) จะเห็นได้ว่าระดับกระแสอิมพัลส์  $I_{01}$  ,  $I_{02}$  มีระดับต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีต้องคะ โลด ที่ระดับกระแสอิมพัลส์  $I_0$  ค่าหนึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนไม่มีผลต่อค่ากระแส

ที่ไหลจนถึงค่าแรงดันหนึ่งกระแสจะเริ่มเพิ่มเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล ในย่านนี้เรียกว่า ทาวน์เซนต์ ดิสชาร์จ (Townsend Discharge) ถ้าเพิ่มแรงดันต่อ ไปอีกกระแสจะเพิ่มขึ้นเกินเอ็กซ์โปเนนเชียล จนถึงแรงดันค่าหนึ่งเรียกว่า แรงดันเบรคดาวน์ เกิดขึ้นที่แรงดันเดียวกันไม่ว่า  $I_0$  จะเป็นเท่าใด และ กระแสที่ไหลในช่วงอิเล็กโตรดจะสามารถประทั้งตัวเองได้



รูปที่ 2.4 ก) อิเล็กโตรดแผ่นระนาบในอากาศ ข) ลักษณะกราฟกระแส - แรงดัน

จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทั้งตัวเองได้นั้น เกิดจากขบวนการที่สำคัญได้แก่

- 1) อิเล็กตรอนขั้นที่สอง ( Secondary Electron ) เป็นอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคะโทดโดยการวิ่งชนของไอออนบวก
- 2) ไอออนไนเซชันในก๊าซเนื่องจากพลังไฟตอน
- 3) ปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโทดโดยไฟตอนไฟฟ้า ( Photoelectric Emission )

**2.5.1 กลไกการเกิดการเบรคดาวน์ของทาวน์เซนต์(Townsend Breakdown Mechanism)**

ทฤษฎีกลไกเบรคดาวน์ของทาวน์เซนต์นั้น เกิดจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดและเชื่อว่าขบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดจากขบวนการขั้นต้น (Primary Process,  $\alpha$  process )และ ไอออนไนเซชันขบวนการขั้นสอง(Secondary Process) อันเกิดจากการ ไอออนไนเซชัน โดยไอออนบวกชนโมเลกุลของก๊าซ (  $\beta$  - Process ) แต่จากการศึกษาทดลองพบว่าขบวนการ  $\beta$  นั้นไม่มีความหมายในการกำหนดให้เกิดเบรคดาวน์ ขบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อการเบรคดาวน์คือ ขบวนการ  $\gamma$  (  $\gamma$  - Process ) อันเป็นขบวนการเพิ่มทวีคูณอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากคะโทด โดยการวิ่งชนของ ไอออนบวกการวิเคราะห์ทฤษฎีกลไกการเกิดเบรคดาวน์นี้ พิจารณาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมออิเล็กโตรดแผ่นระนาบวางขนานกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ( ก ) ซึ่งทุกจุดในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดมีความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเท่ากัน

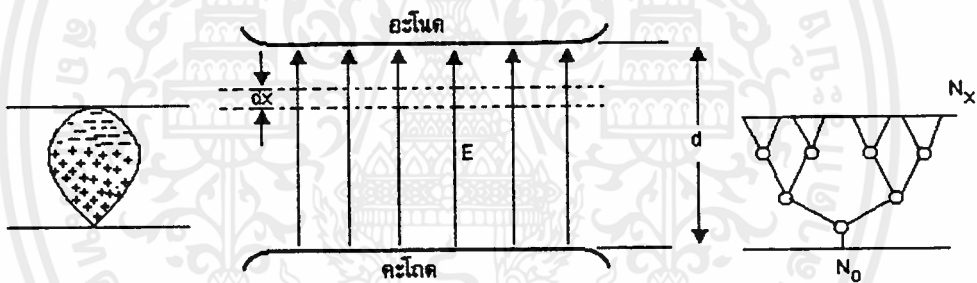
ทุกจุด ดังนั้นสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชัน (Townsend Ionization Coefficient) มีค่าคงตัวและผลของประจุค้าง (Space Charge) ที่มีต่อสนามไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยจึงไม่คำนึงถึง

### 1. กระบวนการขั้นต้น

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า  $E$  จะถูกเร่งให้วิ่งไปหาอะโนดพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ซึ่งถ้าสูงมากพอจะทำให้เกิดไอออไนเซชัน เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซดังที่ได้กล่าวมาแล้วจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นกลางที่เหลือจะเป็น ไอออนบวกอิเล็กตรอนตัวใหม่จะวิ่งไปชนโมเลกุลเกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นต่อไปจนกระทั่งเป็นอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน (Electron Avalanche) ขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ในช่องแคบ  $dx$  ห่างจากแคโทดเป็นระยะ  $x$  จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น

$$dN_x = \alpha \cdot N_x dx \quad (2.7)$$

ที่  $x = 0$  มีจำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้น  $N_0$   
ที่ระยะ  $x$  มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็น  $N_x$



รูปที่ 2.5 อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน

แต่เนื่องจาก  $E$  มีค่าเท่ากัน ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวซ์เซนด (First Order Townsend Ionization Coefficient) ;  $\alpha$  จึงมีค่าคงตัว ที่ระยะ  $x$  จะมีจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์เป็น  $N_x$  คือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (2.8)$$

จำนวนอิเล็กตรอนและ ไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล อิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนดจะมีจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_d = N_0 e^{\alpha_d x} \quad (2.9)$$

เมื่อคูณด้วยค่าประจุของอิเล็กตรอน ( Electron Charge ) จะได้ค่ากระแส

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสเริ่มต้น เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่หลุดมาจากคะ โดดอาจเรียกว่ากระแสโฟโต ( Photo Current )

ตามลำพังของขบวนการนี้ยังไม่สามารถทำให้เกิดการเบรคดาวนได้ หากจะต้องมีขบวนการชั้นสองมาเสริม ซึ่งเป็นขบวนการต่อเนื่องจากขั้นแรกโดยไอออนบวกที่เกิดจากอิเล็กตรอนแยกตัวออกจากโมเลกุลที่เป็นกลางจะวิ่งไปชนอะตอมของก๊าซหรือคะ โดด ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิด ไอออนในเซชันในก๊าซ เรียกว่าขบวนการ  $\beta$  ซึ่งจะพบว่าโอกาสที่เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ต้องใช้พลังงานสูงมากมีโอกาสที่เกิดน้อยมากและถ้าหากขบวนการ  $\beta$  เป็นผลสืบเนื่องทำให้เกิดการเบรคดาวน ชนิดของโลหะและรูปลักษณะผิวของโลหะของคะ โดดจะ ไม่มีผลต่อแรงดันเริ่มเบรคดาวน แต่จากที่กล่าวมาแล้วพบว่าชนิดของโลหะที่ทำคะ โดดมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรคดาวน ฉะนั้นขบวนการชั้นสองที่มีความสำคัญต่อการสร้างอิเล็กตรอนเพื่อทำให้เกิดการเบรคดาวนจึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนคะ โดดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากคะ โดด

## 2. ขบวนการชั้นสอง แบบ $\gamma$

ถ้าให้  $N'_0$  เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากขบวนการชั้นสองที่คะ โดดคือ  $x = 0$  ต่อวินาที

$N''_0$  เป็นจำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากคะ โดด ต่อวินาที  
ดังนั้น

$$N''_0 = N_0 + N'_0$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคะ โดดจะชนไอออนในเซเท่ากับ  $e^{\alpha d} - 1$  ครั้ง

จำนวนครั้งของการชนไอออนในเซในช่องว่างทั้งหมดเป็น  $N''_0 (e^{\alpha d} - 1)$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากขบวนการทั้งสองของคะ โดดเป็น

$$N'_0 = \gamma N''_0 (e^{\alpha d} - 1)$$

เมื่อ  $\gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์การไอออนในเซชันที่สองของทาวน์เซนด (Second Order Townsend Ionization Coefficient )

เอกสารนี้เป็นเอกสาร คัดค้าน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง  $N''_0 = N_0 + \gamma N''_0 (e^{\alpha d} - 1)$  สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N''_0 = \frac{N_0}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)}$$

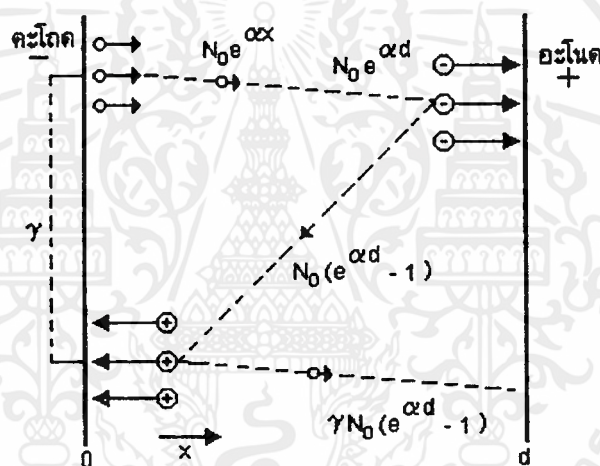
จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนดจึงเป็น

$$N_d = N''_o e^{\alpha d}$$

$$N_d = \frac{N_o e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.11)$$

ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 จึงได้สมการของกระแสเป็น

$$\frac{N_d}{N_o} = \frac{I_d}{I_o} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.6 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยขบวนการ  $\gamma$

ดังนั้นเงื่อนไขที่เกิดเบรคความถี่เกิดเมื่อกระแสเพิ่มเป็นอนันต์คือตัวส่วนในสมการ ( 2.12 ) เป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.13)$$

ในขณะที่ใกล้เบรคความถี่  $e^{\alpha d} \gg 1$  จะได้สมการ (2.12) เป็น

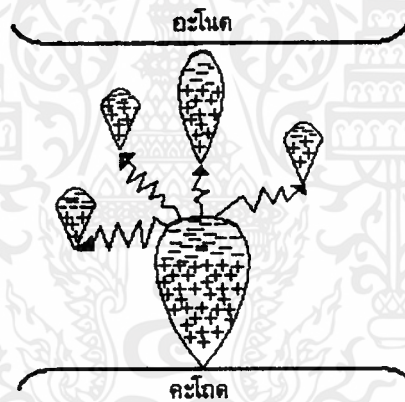
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหานี้และต้นฉบับอ้างอิงเชิงวิชาการของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเงื่อนไขในสมการ (2.13) ก็จะได้เป็น

$$\gamma e^{\alpha t} = 1$$

### 2.5.2 กลไกการเกิดเบรคดาวน์ แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown Mechanism)

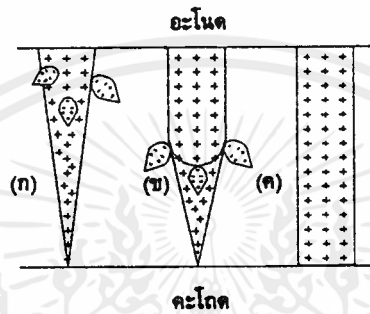
เนื่องจากกลไกการเบรคดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรคดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวานตานซ์ในช่องว่างกว้างๆระหว่างอิเล็กโทรด เวลาของการเบรคดาวน์มีเวลาน้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทด เพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้รวมทั้งไม่สามารถจะอธิบายถึงผลของประจุค้างที่อยู่เบื้องหลังอิเล็กตรอนอะวานตานซ์ก่อน ๆ มีหลายกรณีที่ทำให้สนามไฟฟ้าเคมีมีแนวโน้มไปในแนวทางที่มีความเครียดสูงขึ้นและทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดไอออนในเซชันขึ้นได้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ปลายแหลมกับระนาบ ดังนั้นจึงได้มีการค้นหาทฤษฎีใหม่ขึ้นมาอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ ซึ่งมีเหตุผลและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันคือ ทฤษฎี สตรีมเมอร์ (Streamer Theory) โดย Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก ส่วน rather เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ



รูปที่ 2.7 การสร้างอะวานตานซ์ใหม่

กลไกสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์คคิสซาร์จากอะวานตานซ์เดี่ยวซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจาก อะวานตานซ์เองเปลี่ยนจากอะวานตานซ์ไปเป็น พลาสมาสตรีมเมอร์ (Plasma Streamer) ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรคดาวน์ขึ้นในแนวนี้ หลักการของการเกิดเบรคดาวน์ตามทฤษฎีกลไกสตรีมเมอร์ เป็นผลสืบเนื่องจากขบวนการไอออนไนเซชัน ( $\alpha$  - Process) ของทาวน์เซนด์ จะมีการไอออนไนเซชันจำนวนมากจากพลังโฟตอน เรียกว่าโฟตอนไอออนไนเซชันของโมเลกุลที่ส่วนหน้าของสตรีมเมอร์กลุ่มประจุค้างของ ไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิด ไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งข้ามช่องว่าง ไปสู่อะโนด เกิดหมอกอิเล็กตรอนเป็นคำระหว่างอิเล็กโทรดปล่อยให้ไอออนบวกอยู่ด้านหลังรวมกันเป็นหมอก

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวานตานซ์เพิ่มสูงขึ้นแต่ในบริเวณอิเล็กทรอนิกส์รอบนอกไอออนความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออนในเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดอะวานตานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 หมอกประจุเพิ่มขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอะโนดกับคะโทดและเกิดเบรคดาวน์ตามแนวนี้นี้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถอธิบายถึงลำดับการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์นี้ได้โดย

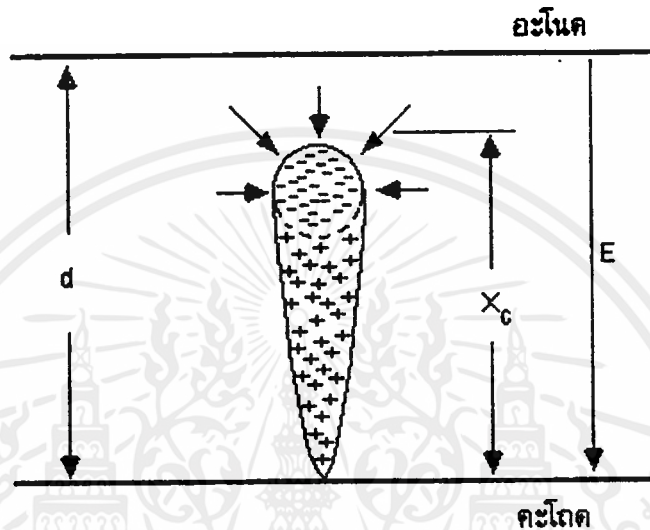


รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์

- (ก) แสดงสถานะเมื่ออะวานตานซ์ข้ามช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรด
- (ข) เมื่อสตรีมเมอร์สร้างขึ้นถึงครึ่งหนึ่งของความกว้างของช่องว่าง
- (ค) เมื่อสตรีมเมอร์สร้างเป็นแนวตรงสมบูรณ์ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าตามแบบแนวนี้นี้เป็นการเกิดเบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์ที่เสนอโดย Meek และ Loeb แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงจากอิเล็กทรอนิกส์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้า เนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวานตานซ์มีค่าประมาณเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก ในขณะที่ Rather เสนอเงื่อนไขสตรีมเมอร์เบรคดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน โดยไม่เกี่ยวข้องกับ Meek และ Loeb และกำหนดอีกด้วยว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวานตานซ์มีจำนวนอิเล็กทรอนิกส์หรือไอออนบวกตามขบวนการชนไอออนในเซชัน  $e^{\alpha x}$  ประมาณ  $10^8$  โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซหรือระดับความนำไฟฟ้าตามเงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรคดาวน์ที่เสนอ โดย Rather ซึ่งสมมุติว่าอิเล็กทรอนิกส์อยู่ส่วนหัวของอะวานตานซ์มีลักษณะทรงกลมและมีจำนวนเท่ากับ  $e^{\alpha x}$  เมื่อ  $x$  เป็นความยาวของอะวานตานซ์ในสนามไฟฟ้า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสถานะจากอะวานตานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่หัวอะวานตานซ์มีค่าใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ดังนั้นจึงสามารถหาจำนวน

อิเล็กตรอนในอะวานตานซ์วิกฤตซึ่งจะมีค่าประมาณ  $10^6$  และจะให้ความยาวของอะวานตานซ์เป็นความยาววิกฤต  $x = x_c$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และชี้ให้เห็นว่าตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ สปาร์คอาจเกิดขึ้นที่  $x_c > d$  แต่ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์จะได้  $x_c < d$  ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอการเปลี่ยนจากอะวานตานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ เมื่ออะวานตานซ์ข้ามช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดนั่นคือ อะวานตานซ์จะมีความยาวเท่ากับ  $d$  หรือ  $x_c = d$  นั่นเอง



รูปที่ 2.9 ระยะวิกฤตของอะวานตานซ์อิเล็กตรอน

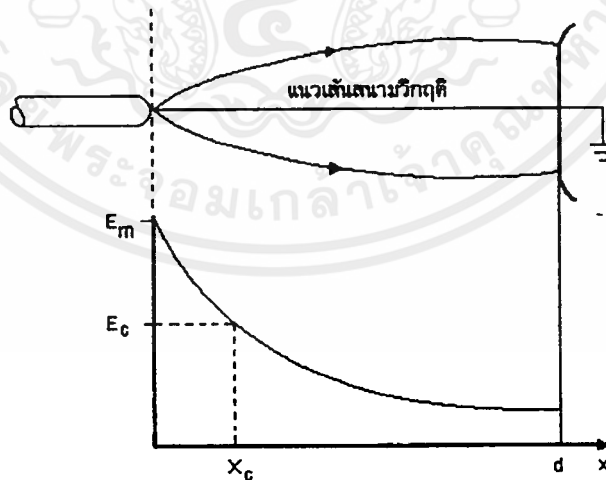
### 2.6 เบรคดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ( Breakdown in Nonuniform Field )

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วปรากฏการณ์เบรคดาวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากกรณีการเบรคดาวนในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ โดยจะมีโคโรน่าเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงและเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรคดาวน โคโรน่ายังคงสภาพอยู่ได้ในบางจุดโดยไม่เกิดเบรคดาวน จากการวิจัยลักษณะเบรคดาวนในสนามไฟฟ้าเราพบว่าขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า ( $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}}$ ) พิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มี  $\eta^*$  ยิ่งต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ที่ผิวอิเล็กโทรดมีน้อยจะยิ่งมีค่ามากและความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นไอออนในเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้น ที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไปที่จะเกิดไอออนในเซชัน จึงไม่อาจเกิดการเบรคดาวนและจัดเป็นเบรคดาวนแบบโคโรน่า

#### 2.6.1 แรงดันเริ่มต้นชั่วพลตกกว่าชั่วบวก

แรงดันเริ่มต้น ( Threshold Voltage ,Starting Voltage ) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดถ้าอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็ก

น้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันเบรคควาน์โดยตรง ( Direct Breakdown ) กล่าวคือ เมื่อมีเงื่อนไขการเกิดเบรคควาน์จะเกิดเบรคควาน์ทันทีในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงในย่านเบรคควาน์แบบโคโรน่า แรงดันเริ่มต้นก็คือแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด ( Corona Inception ) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นชั่วลบบนอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าแบบชั่วคราว ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.10 สมมุติว่าเป็นช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดรีด ( Rod ) กับแผ่นระนาบ ถ้าที่รีดเป็นขั้วลบอิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายรีดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะมีโอกาสเกิดไอออนในเซชันจากการชนได้มากจึงสามารถสร้าง อะวาลานซ์วิกฤติของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรคควาน์จึงต่ำ แต่ถ้ารีดเป็นขั้วบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในช่องว่างที่ห่างจากผิวอิเล็กโทรดรีดไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด คือแนวที่มีความยาวของสนามไฟฟ้าที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรดไปเป็นระยะอย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤติ  $x_c$  เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิเล็กตรอนอิสระ ( $N_c = 10^8$ ) เพิ่มทวีคูณจนถึงจำนวนวิกฤติได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤติอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ  $x_c$  ตามเงื่อนไขการเบรคควาน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎีสตรีมเมอร์แต่มีระยะ  $x_c$  จากปลายรีดเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำลง โอกาสที่จะเกิดการไอออนในเซชันเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยากหรือเป็นไปได้ ถ้าจะให้เกิดการไอออนในเซชันที่ระยะ  $x_c$  บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นไปนั่นก็คือ จะเกิดเบรคควาน์ได้จะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ด้วยเหตุผลนี้เองแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของชั่วลบบจึงต่ำกว่าของชั่วคราว คือ  $V_i^- < V_i^+$



รูปที่ 2.10 ระยะอะวาลานซ์วิกฤติในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและรูปภาพให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และหากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและรูปภาพให้นำไปใช้

ถ้าเป็นแบบเบรคควาน์โดยตรงซึ่งเกิดขึ้นในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยซึ่งมี  $V_i = V_0$  จะได้ว่า  $V_0^- < V_0^+$  แต่ถ้าเบรคควาน์เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะมีโคโรน่าเกิด

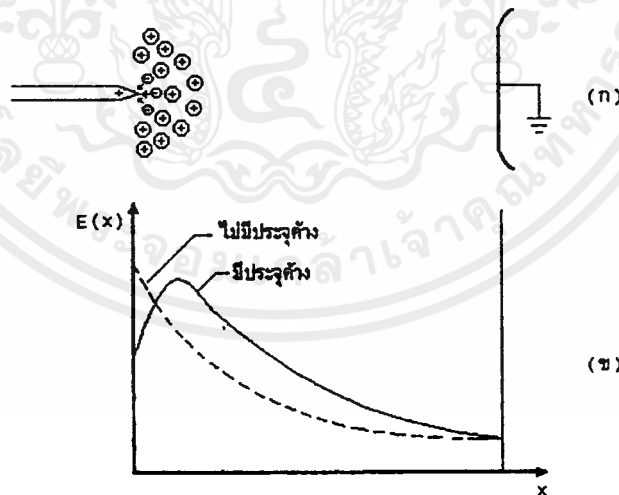
ขึ้นก่อนเบรคความถี่ของโคโรน่าจะทำให้เกิดประจุค้าง ค่าแรงดันเบรคความถี่จะสูงกว่า  
 ขั้วบวกโดยรายละเอียดจะกล่าวในตอนต่อไป

## 2.6.2 ผลของประจุค้างต่อแรงดันเบรคความถี่ต่อขั้ว

ประจุค้าง (Space Charge) ที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงเป็นผลทำให้แรงดัน  
 เบรคความถี่  $V_b$  มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด  $V_i$  และผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรคความถี่  
 ของขั้วบวกและขั้วลบต่างกัน ในทางตรงกันข้ามกับแรงดันเบรคความถี่โดยตรง กล่าวคือแรงดัน  
 เบรคความถี่โดยตรงหรือแรงดันเริ่มต้นของขั้วลบจะต่ำกว่าของขั้วบวกเสมอแต่ผลของประจุค้างทำ  
 ให้แรงดันเบรคความถี่ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวกซึ่งเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงของอิเล็กโทรด  
 แบบไม่สมมาตรดังตัวอย่างเช่นปลายแหลมกับแผ่นระนาบการอ้างอิงถึงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบ  
 หมายถึงขั้วแรงดันบนอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด

### 1. ปลายแหลมขั้วบวก

ที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบดังรูปที่ 2.11 ( ก ) เมื่อแรงดันสูงถึงค่า  
 แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิด จะเกิดไอออนในเขตรอบของก๊าซรอบ ๆ ปลายแหลมอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้  
 เร็วจะวิ่งเข้าหาอะโนดคือปลายแหลมและรวมตัวเป็นกลางปล่อยให้ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้า  
 ค้างออกันอยู่หน้าปลายแหลมเป็นผลให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดน้อยลง แต่  
 ความเครียดของสนามไฟฟ้าทิศทางเข้าหาอะโนดคือแผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.11 ( ข )

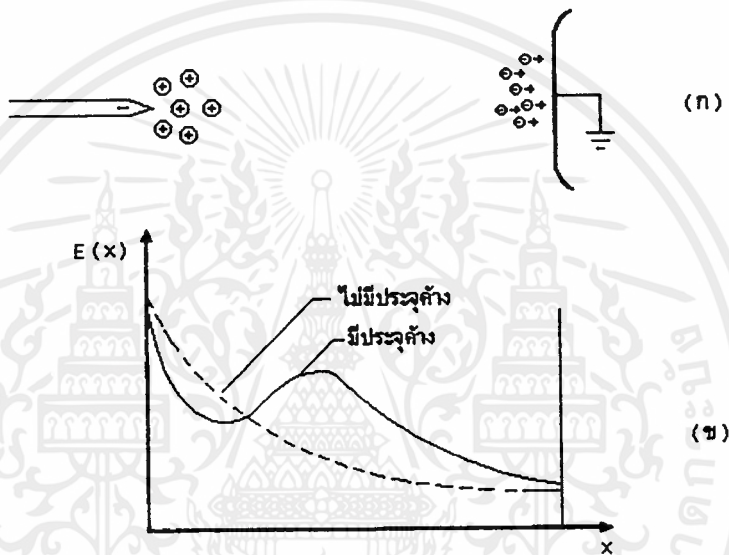


รูปที่ 2.11 ผลประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวก

ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเหมือนหนึ่งว่าทำให้อิเล็กโทรดยาวขึ้นเมื่อระยะเก็บประจุ  
 ลงและเวลาเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าเก็บเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดเบรคความถี่ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ  
 ประจุค้างทำให้แรงดันเบรคความถี่ขั้วบวกต่ำลง

## 2. ปลายแหลมข้าวลบ

ปลายแหลมข้าวลบตามรูปที่ 2.12 อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออไนเซชันเคลื่อนที่ไปหาระนาบอะโนดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจจะเกาะตัวบนโมเลกุลได้และรวมตัวเป็นตัวเป็นกลางที่อะโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาคะโถปลายแหลมจะค้างอยู่บริเวณปลายแหลมทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.12 (ข) แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค้างกับอะโนดแผ่นระนาบจะกลับสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากประจุค้างจึงทำให้เบรคคาวน์ได้ยากขึ้น ฉะนั้นผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรคคาวน์ข้าวลบมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 ผลประจุค้างของปลายแหลมข้าวลบ

### 2.6.3 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรคคาวน์

มีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมหลายประการที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรคคาวน์ เช่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด , รัศมีมีความโค้ง , ลักษณะผิว, ช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน , ความถี่ , รูปคลื่น , แรงดัน, อุณหภูมิ , ชนิดของก๊าซ รวมทั้งข้าวแรงดันบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เสนอไปแล้ว ดังนั้นจะขอกล่าวถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีความสำคัญต่อระดับแรงดันเบรคคาวน์ของก๊าซ โดยกำหนดระยะห่างของอิเล็กโตรดคงที่พอสังเขปดังนี้

#### 1. รูปลักษณะอิเล็กโตรด

รูปลักษณะอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรคคาวน์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ, ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือ ไม่สม่ำเสมอมาก ในกรณีไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มากนักค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรคคาวน์เป็นค่าเดียวกัน กล่าวคือ เมื่ออะวาลานชันวิกฤติได้ตามเงื่อนไข ก็จะเกิดเบรคคาวน์ทันที จะไม่มีโคโรน่าเกิดขึ้นก่อนเบรคคาวน์จึงเรียกลักษณะเบรคคาวน์โดยตรงเช่นเบรคคาวน์บนช่องว่าง

ระหว่างทรงกลมที่มีระยะห่าง ไม่มากนักเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางความแตกต่างของขั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรคความถี่เล็กน้อย ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรคความถี่อย่างเห็นได้ชัดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น แท่งกลม - แท่งกลมมีปลายเหมือนกัน รูปลักษณะอิเล็กโทรด ไม่มีผลต่อแรงดันเบรคความถี่ จะมีผลในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบไม่สมมาตรมาก ๆ เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบ และจะเกิดโคโรน่านำก่อนเบรคความถี่

## 2. ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ลักษณะของแรงดันเบรคความถี่ในทอมของความดันก๊าซ จะมีลักษณะสูงสุด-ต่ำสุด กล่าวคือความดันต่ำๆจะมีโคโรน่านำเกิดขึ้นก่อนจะเกิดเบรคความถี่และเรียกว่าเบรคความถี่ตามโคโรน่านำ ถ้าเป็นแบบโคโรน่านำคงสถานะ (Stabilized Corona) จะทำให้แรงดันเบรคความถี่สูงกว่าแรงดันโคโรน่านำเริ่มเกิดมาแต่เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้นโคโรน่านำคงสถานะจะลดน้อยลงและทำให้ค่าแรงดันเบรคความถี่ลดต่ำลงด้วย จนกระทั่งแรงดันเบรคความถี่และค่าแรงดันโคโรน่านำเริ่มเกิดมีค่าเท่ากัน และเป็นความดันที่แรงดันมีค่าต่ำ หลังจากจุดนี้หากเพิ่มความดันก๊าซต่อไปอีก ค่าแรงดันเบรคความถี่จะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันก๊าซอีกในช่วงหลังแรงดันต่ำสุดเบรคความถี่จะเป็นแบบเบรคความถี่โดยตรง ปรากฏการณ์ลักษณะแรงดันเบรคความถี่ในทอมของความดันก๊าซที่มีลักษณะสูงสุด - ต่ำสุดนี้จะเห็นชัดในกรณีของก๊าซประจุไฟฟ้าลบ เช่น SF<sub>6</sub>

## 3. ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของ H<sub>2</sub>O ในอากาศมีลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆเพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศมีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้นตรงเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ ผลของความชื้นที่มีผลต่อแรงดันเบรคความถี่น้อยมากเลยได้ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่มีอิเล็กตรอนก่อนความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรคความถี่และมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสตรง แรงดันเบรคความถี่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความชื้นสมบูรณ์ในอากาศ

## 4. ผลของความถี่

จากสมการการแตกตัวของก๊าซจากผลของความถี่สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{Yield} = k_e (f_e V^2) / d$$

เมื่อ  $f$  : ความถี่

$V$  : แรงดัน

$e$  : dielectric constant

$d$  : ความหนาของไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อบกพร่องข้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากสมการข้างต้นจะพบว่าระดับแรงดันเบรคดาวน์จะเปลี่ยนแปลงตามผลความถี่ดังนี้

$$V_b = \sqrt{\frac{1}{f}}$$

## 2.7 เบรคดาวน์ในก๊าซไฟฟ้าลบบ

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าในก๊าซอาจเกิด ไอออนลบขึ้นได้โดยอิเล็กตรอนที่แยกตัวเป็นอิสระจาก ไอออนในเซชันและมีพลังงานที่พอเหมาะไปเกาะติดอยู่กับ โมเลกุลเป็นกลางของก๊าซกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุลบในรูปแบบต่าง ๆ กัน ก๊าซที่คุณสมบัติที่โมเลกุลจับอิเล็กตรอนได้ เรียกว่า ก๊าซไฟฟ้าลบบ ในก๊าซอื่นหากมีก๊าซไฟฟ้าลบบเจืออยู่แม้เล็กน้อยก็จะทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซนั้นเปลี่ยนแปลง ไปอย่างเห็นได้ชัด โดยเหตุที่โมเลกุลของก๊าซประเภทนี้สามารถจับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออน ในเซชันและจะจับเป็นตัวเริ่มต้นสร้างอะวานตานซ์ได้จึงเท่ากับเป็นการหน่วงหรือระงับการสร้างอะวานตานซ์ของอิเล็กตรอนและนั่นก็หมายถึงการระงับการเกิดเบรคดาวน์มิให้เกิดขึ้นจะเกิด เบรคดาวน์ได้ก็ต่อต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติเพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นี้ให้หลุดออกมาเพื่อสร้างอะวานตานซ์ไปตามขบวนการเกิดเบรคดาวน์ นั่นก็คือก๊าซไฟฟ้าลบบจะมีความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซธรรมดาที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ในทางเทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจึงใช้ลักษณะสมบัติเด่นนี้ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในด้านการฉนวนของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าก๊าซจัดเป็นก๊าซไฟฟ้าลบบได้แก่  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SF_6$ ,  $CCl_2$ ,  $F_2$  ( Arcton - 12 ) และอากาศซึ่งมี  $O_2$  รวมอยู่ด้วยเป็นต้น ก๊าซไฟฟ้าลบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันได้แก่  $SF_6$  เพราะมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนครบถ้วนทุกประการ

## 2.8 การประยุกต์ใช้งาน FEM ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า

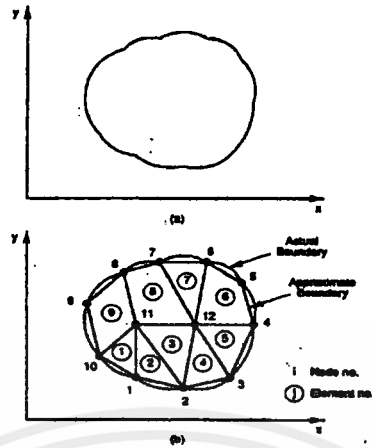
### 2.8.1 การแบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นอิเลเมนต์

ทำการแบ่งบริเวณของปัญหาที่พิจารณาออกเป็นส่วนย่อยหรือ อิเลเมนต์ที่รู้จำนวนคงแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งบริเวณของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นอิเลเมนต์ 9 ชิ้นซึ่งไม่ซ้อนทับกัน (ตามเหลี่ยม 6 ชิ้นและสี่เหลี่ยม 3 ชิ้น) และประกอบด้วย 12 โหนด เมื่อทำการหาค่าศักดาไฟฟ้าโดยประมาณภายในอิเลเมนต์ คือ  $V_e$  แล้วทำการเชื่อมโยงการกระจายศักดาไฟฟ้าภายในอิเลเมนต์หลายๆอิเลเมนต์จะทำให้ศักดาไฟฟ้ามีความต่อเนื่องภายในขอบเขตของอิเลเมนต์ (interelement boundary) คำตอบโดยประมาณของบริเวณทั้งหมดของปัญหาที่พิจารณาคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.14) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนอิเลเมนต์ที่บริเวณของปัญหาถูกทำการแบ่ง



รูปที่ 2.13 (a) ขอบเขตพื้นที่ของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์  
(b) การแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนย่อย

รูปแบบทั่วไปที่ใช้ในการประมาณค่า  $V$  ภายในอิเลเมนต์ เป็น Polynomial Approximation สมการที่ 2.15 ใช้ในกรณีที่เป็นอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \quad (2.15)$$

สมการที่ 2.16 ใช้ในกรณีที่เป็นอิเลเมนต์รูปสี่เหลี่ยม

$$V_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (2.16)$$

ค่าศักดาไฟฟ้า  $V_e$  โดยปกติแล้วภายในอิเลเมนต์จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ส่วนภายนอกจะเท่ากับศูนย์โดยข้อเท็จจริงจะพบว่าอิเลเมนต์รูปที่นิยมใช้มากจะเป็นอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมเนื่องจากการปรับแต่งรูปร่างของอิเลเมนต์ให้เข้ากับขอบเขตของปัญหาทำได้ง่ายกว่าอิเลเมนต์รูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นในโครงการนี้จะใช้อิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมในการพิจารณาสังเกตว่าการตั้งสมมติฐานให้ linear variation ของ  $V_e$  ภายในรูปสามเหลี่ยมเป็นดังสมการที่ 2.15 เหมือนกับเป็นการสมมติว่าสนามไฟฟ้าภายในอิเลเมนต์เป็นแบบสม่ำเสมอ

$$\vec{E}_e = -\nabla V_e = -(b\vec{a}_x + c\vec{a}_y) \quad (2.17)$$

### 2.8.2 การหาสมการของแต่ละอิเลเมนต์

พิจารณาอิเลเมนต์พื้นฐานรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.14 ค่าศักดาไฟฟ้า ณ โหนด 1, 2, 3 คือ  $V_{e1}, V_{e2}, V_{e3}$  ตามลำดับ จากสมการที่ 2.15 จะได้ว่า

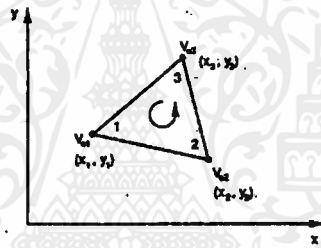
$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ค่า  $a, b, c$  สามารถหาได้จาก

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

แทนค่าลงในสมการที่ 2.15

$$\begin{aligned} V_e &= [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \\ &= [1 \ x \ y] \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.14 อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม: แสดงการวนโหนด 1-2-3 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

หรือ

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

เมื่อ

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (2.21) \text{ a.}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (2.21) \text{ b.}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (2.21) \text{ c.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
และ A เป็นพื้นที่ของอิลิเมนต์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หวังสนับสนุนให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2A = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1y_2 - x_2y_1) + (x_3y_1 - x_1y_3) + (x_2y_3 - x_3y_2)$$

หรือ

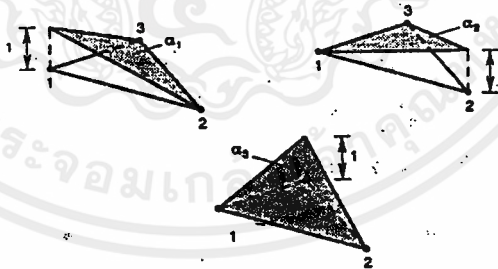
$$A = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (2.22)$$

ค่าของ A จะเป็นบวกถ้าการวนโหนดมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (เริ่มต้นจากโหนดใดก็ได้) ดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 2.14 สังเกตว่าสมการที่ 2.20 ให้ค่าศักดาไฟฟ้า ณ จุด  $(x, y)$  ใดๆ ภายในอิเลเมนต์ที่รู้ค่าศักดาไฟฟ้าที่มุมของมัน สิ่งนี้เองที่ต่างจาก finite difference method เนื่องจากรู้ค่าเฉพาะ grid point เท่านั้น และข้อสังเกตอีกอย่างคือ ค่า  $\alpha$  เป็นฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเชิงเส้น เรียกว่า element shape function ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$\alpha_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2.23) a.$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (2.23) b.$$

ตัวอย่างของ Shape Function แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดง Shape Function  $\alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ของอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม

พลังงานต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่สัมพันธ์กับอิเลเมนต์ e คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $w_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |\bar{E}|^2 ds = \frac{1}{2} \int \epsilon |\nabla V_e|^2 ds$  นำไปใช้ประโยชน์ (2.24) ถ้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสมมติให้บริเวณของปัญหาในลักษณะสองมิติที่พิจารณาไม่มีประจุอิสระ ( $\rho_s = 0$ ) แต่จาก สมการที่ 2.20 พบว่า

$$\nabla V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} \nabla \alpha_i \quad (2.25)$$

แทนสมการที่ 2.25 ลงในสมการที่ 2.24

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon V_{ei} \left[ \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j ds \right] V_{ej} \quad (2.26)$$

ถ้านิยามให้เทอมที่อยู่ในวงเล็บเป็น

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j ds \quad (2.27)$$

จะสามารถเขียนสมการที่ 2.26 ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์คือ

$$W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V_e]^T [C^{(e)}] [V_e] \quad (2.28)$$

สับสคริปต์ T คือการทรานสโพสค์เมตริกซ์และ

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (2.29) a.$$

และ

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^{(e)} & C_{12}^{(e)} & C_{13}^{(e)} \\ C_{21}^{(e)} & C_{22}^{(e)} & C_{23}^{(e)} \\ C_{31}^{(e)} & C_{32}^{(e)} & C_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (2.29) b.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ถูกต้องและเป็นไปตามที่ระบุไว้ในเอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตริกซ์  $[C^{(e)}]$  นี้จะเรียกว่า เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์ (stiffness matrix) สมาชิก  $C^{(e)}_{ij}$  ของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์อาจจะถูกพิจารณาเป็นการจับคู่ระหว่างโหนด  $i$  และ  $j$  โดยหาค่าได้จากสมการที่ (2.21) และ (2.27) ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} C^{(e)}_{12} &= \int \nabla \alpha_1 \cdot \nabla \alpha_2 \, dS \\ &= \frac{1}{4A^2} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \int dS \\ &= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \end{aligned} \quad (2.30) \text{ a.}$$

$$C^{(e)}_{13} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)] \quad (2.30) \text{ b.}$$

$$C^{(e)}_{23} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)] \quad (2.30) \text{ c.}$$

$$C^{(e)}_{11} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2] \quad (2.30) \text{ b.}$$

$$C^{(e)}_{22} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2] \quad (2.30) \text{ d.}$$

$$C^{(e)}_{33} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] \quad (2.30) \text{ e.}$$

และ

$$C^{(e)}_{21} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] \quad (2.31)$$

### 2.8.3 การรวมอิลิเมนต์เป็นขอบเขตของปัญหาดังเดิม

จากการเริ่มพิจารณาในอิลิเมนต์พื้นฐานดังกล่าวข้างต้นขั้นตอนต่อไป คือการรวมอิลิเมนต์เหล่านั้นกลับเป็นปัญหาทั้งหมดที่พิจารณาในตอนเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง พลังงานที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการรวมอิลิเมนต์ คือ

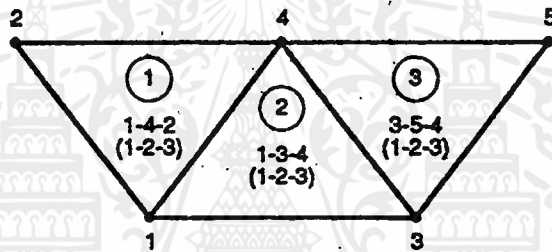
$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V_e]^T [C] [V] \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ [V] ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.33) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n$  เป็นจำนวนโหนด ,  $N$  เป็นจำนวนอิเลเมนต์และ  $[C]$  เรียกว่า global coefficient matrix ซึ่งเป็นการรวมของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลเมนต์ย่อยๆเข้าด้วยกัน กระบวนการซึ่ง element coefficient matrix แต่ละตัวถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้าง global coefficient matrix นั้นจะแสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 2.16 พิจารณา finite element mesh ซึ่งประกอบด้วย อิเลเมนต์ 3 ชิ้นดังรูป ตัวเลข node 1,2,3,4 และ 5 เป็น global node และ node i-j-k เรียกว่า local node ซึ่งก็คือ node 1-2-3 ในรูปที่ 2.14 นั่นเอง แบบ local numbering ซึ่งคือ 1 - 2 - 3 ในรูปที่ 2.14 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.16 ในอิเลเมนต์ ที่ 3 การนับแบบ local numbering คือ 3 - 5 - 4 เทียบกับ 1 - 2 - 3 ในรูปที่ 2.14 สังเกตว่า local numbering จะลำดับ โดยเริ่มจากโหนดใด ๆ ของอิเลเมนต์แล้วนับทวนเข็มนาฬิกา สำหรับอิเลเมนต์ที่ 3 สามารถเลือก 4 - 3 - 5 แทน 3 - 4 - 5 ก็ได้ ดังนั้นจะเห็นว่า การลำดับตัวเลขไม่ได้มีลักษณะเดียว แต่มีข้อจำกัดว่าต้องเป็นการลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สมมุติให้ใช้ตัวเลขดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การรวม 3 อิเลเมนต์เข้าด้วยกัน ; i - j - k เป็นการระบุโหนด

จะได้ global coefficient matrix จาก

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \quad ( 2.34 )$$

ซึ่งจะได้เมตริกซ์  $5 \times 5$  เนื่องจากรูปที่ 2.16 มีโหนดทั้งหมด 5 โหนด ( $n=5$ ) เนื่องจากดังกล่าวมาแล้วว่า  $C_{ij}$  เป็นการจับคู่ระหว่างโหนด  $i$  และ โหนด  $j$  ค่าของ  $C_{ij}$  สามารถหาได้เนื่องจากข้อเท็จจริงที่ว่า การกระจายของศักดาไฟฟ้าต้องมีค่าต่อเนื่องตลอด interelement boundary องค์ประกอบที่ตำแหน่ง  $i, j$  ใดๆ ใน  $[C]$  มาจากทุกๆ อิเลเมนต์ที่มีโหนด  $i, j$  ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.16 อิเลเมนต์ที่ 1 และ 2 มีโหนดที่ร่วมกันอยู่คือ โหนด 1 ดังนั้น

$$C_{11} = C^{(1)}_{11} + C^{(2)}_{11}. \quad (2.35) a.$$

ส่วน โหนด 2 เป็นของอิติเม้นต์ 1 เท่านั้น

$$C_{22} = C^{(1)}_{33}. \quad (2.35) b.$$

โหนด 4 ประกอบด้วยอิติเม้นต์ 1, 2, 3 ดังนั้น

$$C_{44} = C^{(1)}_{22} + C^{(2)}_{22} + C^{(3)}_{33} \quad (2.35) c.$$

โหนด 1 และ 4 เป็นอิติเม้นต์ 1 และ 2 พร้อมๆ กัน

$$C_{14} = C_{41} = C^{(1)}_{12} + C^{(2)}_{13} \quad (2.35) d.$$

เมื่อไม่มีการจับคู่(หรือต่อถึงกันโดยตรง) ระหว่าง โหนด 2 และ 3

$$C_{23} = C_{32} = 0 \quad (2.35) e.$$

ทำเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป จะได้เทอมต่างๆ ใน global coefficient matrix จากรูปที่ 2.16 คือ

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

สังเกตว่า element coefficient matrix มีการทับกัน ณ โหนดที่เชื่อมต่อกับอิติเม้นต์ และใน global coefficient matrix [C] มี 27 เทอม (ทุกๆ 3 อิติเม้นต์จะประกอบด้วย 9 เทอม) และมีคุณสมบัติของ [C] มีดังต่อไปนี้

- 1) จะเป็นเมตริกซ์สมมาตร ( $C_{ij} = C_{ji}$ ) เหมือน element coefficient matrix
- 2) เมื่อ  $C_{ij} = 0$  ถ้าไม่มีการจับคู่กันของ โหนด i และ j เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ากรณีที่อิติเม้นต์มีจำนวนมากๆ [C] จะเบาบางลงเนื่องจากเทอมที่เป็นศูนย์มากขึ้น
- 3) เป็น singular ( $\det = 0$ )

#### 2.8.4 การแก้ระบบสมการเพื่อหาผลลัพท์

สมการ Laplace's (หรือ Poisson's) จะสามารถหาคำตอบที่สอดคล้องได้เมื่อ พลังงานรวมที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหาที่พิจารณามีค่าน้อยที่สุดด้วยเหตุนี้ เมื่อเราทำการ partial derivatives ค่า W เทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าที่ทุกๆ โหนดจะได้ว่า

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

หรือ

$$\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.36)$$

ตัวอย่างเช่น การทำให้  $\frac{\partial W}{\partial V_k} = 0$  จะแทนสมการที่ 2.32 ลงในสมการที่ 2.36 แล้วทำการ partial derivative W เทียบกับ  $V_1$  พบว่า

$$0 = \frac{\partial W}{\partial V_1} = 2V_1C_{11} + V_2C_{12} + V_3C_{13} + V_4C_{14} + V_5C_{15} + V_2C_{21} + V_3C_{31} + V_4C_{41} + V_5C_{51}$$

หรือ

$$0 = V_1C_{11} + V_2C_{12} + V_3C_{13} + V_4C_{14} + V_5C_{15} \quad (2.37)$$

โดยทั่วไปแล้ว  $\frac{\partial W}{\partial V_k}$  นำไปสู่

$$0 = \sum_{i=1}^n V_i C_{ik} \quad (2.38)$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนโหนดภายใน mesh

สมการที่ 2.38 เป็นสมการสำหรับทุกๆ โหนด  $k = 1, 2, \dots, n$  เราจะได้เซตของสมการที่เป็นคำตอบของปัญหาสามารถหาค่าของ  $[V]^T = [V_1, V_2, \dots, V_n]$  ได้ มีวิธีหา 2 วิธีเหมือนกับที่ใช้ในการแก้ปัญหา Finite Difference Equation ได้จาก สมการลาปลาซ (หรือ ปัวซองส์)

A) Iteration Mothod : สมมติโหนด 0 ต่อเชื่อมกับ  $m$  โหนดซึ่งใช้แนวคิดจากสมการ 2.37

$$0 = V_0C_{00} + V_1C_{01} + V_2C_{02} + \dots + V_mC_{0m}$$

หรือ

$$V_0 = \frac{-1}{C_{00}} \sum_{k=1}^m V_k C_{0k} \quad (2.39)$$

ดังนั้นถ้ารู้ค่าศักดาไฟฟ้าที่โหนดที่ต่อกับโหนด 0 จะสามารถหาค่า  $V_0$  ได้ด้วยสมการที่ 2.39 กระบวนการทำซ้ำ (iteration) เริ่มต้นโดยการตั้งค่าศักดาไฟฟ้าที่ Free Node (ตำแหน่งที่ไม่รู้ค่าศักดาไฟฟ้า) ให้เท่ากับ 0 หรือเท่ากับค่าเฉลี่ยของศักดาไฟฟ้า

$$V_{ave} = \frac{1}{2}(V_{min} + V_{max}) \quad (2.40)$$

เมื่อ  $V_{\max}$  เป็นค่าศักดาไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดที่ Fixed Node (ตำแหน่งที่รู้ค่าศักดาไฟฟ้า) ตามลำดับ ด้วยค่าเริ่มต้นเหล่านี้เอง ค่าของศักดาไฟฟ้าที่ free node จะถูกคำนวณโดยสมการที่ 2.39 เมื่อจบการ iteration ครั้งแรกเมื่อค่าใหม่จะถูกคำนวณออกมาเพื่อหาทุกๆ free node ค่าในตอนแรกจะกลายเป็นค่าเก่าสำหรับการ iteration ครั้งที่ 2 ขั้นตอนจะทำซ้ำไปจนกระทั่ง ค่าที่เปลี่ยนไประหว่างลำดับย่อยของการทำซ้ำมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

B) Band Matrix Method : ถ้า free node ทั้งหมดถูกนับเป็นอันดับแรกแล้วจึงทำการนับ fixed node สมการที่ 2.32 สามารถเขียนเป็น

$$W = \frac{1}{2} \mathcal{E} [V_f, V_f] \begin{bmatrix} C_f & C_{fp} \\ C_{fp} & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

เมื่อ f และ p คือ free node และ fixed node ตามลำดับ,  $V_p$  เป็นค่าคงที่(ศักดาไฟฟ้าที่รู้ค่า) จะทำการดิฟโดยเทียบกับ  $V_f$  เท่านั้น จากสมการที่ 2.36 ถึง 2.41 จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} C_f & C_{fp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_p \end{bmatrix} = 0$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} C_f \end{bmatrix} [V_f] = - \begin{bmatrix} C_{fp} \end{bmatrix} [V_p] \quad (2.42)$$

สมการที่ 2.42 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$[A][V] = [B] \quad (2.43) a.$$

หรือ

$$[V] = [A]^{-1}[B] \quad (2.43) b.$$

เมื่อ  $[V] = [V_f]$ ,  $[A] = [C_f]$ ,  $[B] = -[C_{fp}][V_p]$  เมื่อ  $[A]$  เป็น nonsingular ศักดาไฟฟ้าที่ free node สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2.43 ค่าของ  $[V]$  ในสมการที่ 2.43a สามารถหาได้โดยใช้ Gaussian elimination technique นอกจากนี้  $[V]$  ในสมการที่ 2.43b ยังสามารถหาได้จากการใช้ matrix inversion ถ้าขนาดของเมตริกซ์ที่จะทำการอินเวอร์สไม่ใหญ่เกินไป สังเกตว่าตั้งแต่สมการที่ 2.25 เป็นต้นมา คำตอบจำกัดใช้กับปัญหาสองมิติที่เกี่ยวข้องกับสมการลาปลาซ  $\nabla^2 v = 0$  แนวคิดพื้นฐานที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปสู่การใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสมการปัวซองส์ ( $\nabla^2 v = -\rho/\epsilon$ ,  $\nabla^2 \bar{A} = -\mu \bar{J}$ ) หรือสมการของคลื่น ( $\nabla^2 \phi - y^2 \phi = 0$ )

## บทที่ 3

# มอเตอร์สนามไฟฟ้า

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลอง เพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์หารูปแบบ โครงสร้างของ มอเตอร์สนามไฟฟ้า ที่มีลักษณะ โครงสร้างที่ให้ประสิทธิภาพความเร็วรอบที่เหมาะสม โดยเริ่มทำการ ทดลองหารูปร่างลักษณะของแกนตัวหมุน ทำให้ตัวหมุนสามารถเคลื่อนหมุนที่ได้ ทดลองหา จำนวนแกนของตัวหมุน ความเหลื่อมของตัวหมุน ความโค้งงอของตัวหมุน ความยาวของแกนตัว หมุน ความกว้างของอเล็กโตรดตัวหมุน และมวลของตัวหมุน ที่ทำให้ตัวหมุนมีความเร็วรอบหมุน ที่ดีที่สุด โดยพิจารณาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน เพื่อนำมาวิเคราะห์สรุปหารูปแบบ โครงสร้างของตัวหมุนที่เหมาะสมต่อไป

### 3.2 การทดลอง

ทำการทดลองป้อนแรงดัน ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ให้กับ ตัวหมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างต่างๆแล้วทำการบันทึกผลการทดลองระหว่างความเร็วรอบหมุนกับ แรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนและนำผลการทดลองที่ได้เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบกันของตัว หมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางที่จะสรุปวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบ โครงสร้างของ ตัวหมุนที่ต้องการต่อไป

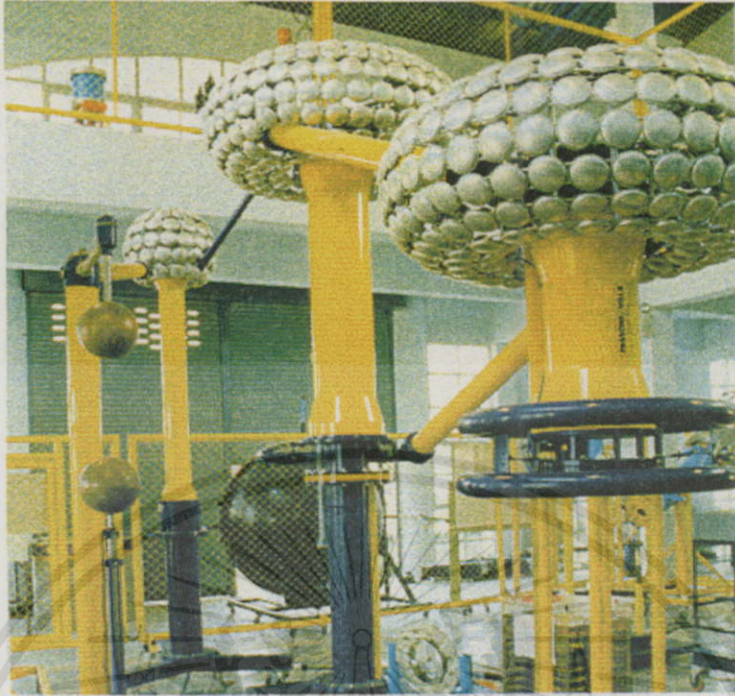
#### 3.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC. High voltage generator)

อุปกรณ์ที่ป็นแหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าในการทดลองเป็นเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแรงสูงกระแส ตรงแบบลบบและแบบบวก ที่มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 0 – 330 kV ที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 โวลต์จนกระทั่งถึงพิกัด 330 kV โดยมีชุดควบคุมทำหน้าที่ในการปรับจ่ายแรงดันไฟฟ้า

#### 3.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC. High voltage generator)

อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าในการทดลองเป็นเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแรงสูงกระแส สลับที่มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 0 – 125 kV<sub>rms</sub> ที่สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 โวลต์จนกระทั่งถึงพิกัด 125 kV<sub>rms</sub> โดยมีชุดควบคุมทำหน้าที่ในการปรับจ่ายแรงดันไฟฟ้า สำหรับชุดควบคุมดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 330 kV<sub>DC</sub>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ



รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 0 – 125 kV<sub>rms</sub>

### 3.2.3 โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

ในการทดลองได้ทำการสร้างตัวหมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างหลายๆรูปแบบที่มีความแตกต่างกันไป ลักษณะความแตกต่างของจำนวนแขนของตัวหมุน ความแหลมของตัวหมุน ความโค้งงอของตัวหมุน ความยาวของแขนตัวหมุน ความกว้างของอิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุน มวลของตัวหมุนของตัวหมุนดังรูปด้านล่าง

2.6 มม.



2 แขน

4 แขน

6 แขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 ตัวหมุนทองแดงที่มีจำนวนแขนหมุนต่างกัน

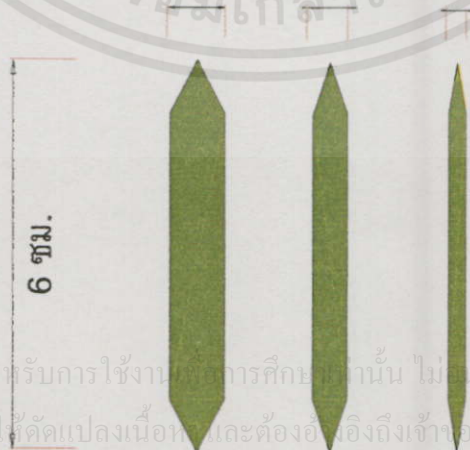


รูปที่ 3.5 อิเล็กโตรดระนาบทองแดง



รูปที่ 3.6 แกนตัวหมุนชนิดเบร้ง

4.0 มม. 3.2 มม. 2.0 มม.



3.5 กรัม. 2.7 กรัม. 1.6 กรัม.

รูปที่ 3.7 แกนตัวหมุนชนิดเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 วิธีการทดลอง

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ทดลองและทำการต่อสายป้อนแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยจ่ายไฟลบให้กับอิเล็กโทรดตัวหมุนดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การต่อสายวงจรทดลอง

2. ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดทดลอง โดยเริ่มปรับตั้งตั้งแต่ 0 V เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งตัวหมุนเริ่มเคลื่อนที่และเพิ่มจนกระทั่งถึงจุดเบรคความถี่ จดบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบหมุนลงในตารางผลการทดลอง

3. ทำการทดลองโดยหาแฟลคเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันป้อนและความเร็วรอบที่เหมาะสม สามารถแบ่งการทดลองแบบต่างๆ ได้ดังนี้

- เปรียบเทียบที่แกนหมุนแบบเบร็งและแบบเซ็ม
- เปรียบเทียบที่สเตเตอร์ขนาดความกว้าง.
- เปรียบเทียบที่แรงดัน DC และแรงดัน AC
- เปรียบเทียบที่ก๊าศ SF<sub>6</sub> กับอากาศ และความดันที่ค่าต่างๆ
- เปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างกัน
- เปรียบเทียบที่จำนวนแกนต่างกัน
- เปรียบเทียบที่ความยาวแกนต่างกัน.
- เปรียบเทียบที่มวลของแกนต่างกัน
- เปรียบเทียบที่รัศมีความยาวแกนต่างกัน
- เปรียบเทียบที่รัศมีส่วนโค้งต่างกัน
- เปรียบเทียบที่มุมของแกนต่างกัน
- เปรียบเทียบที่ความแหลมส่วนปลายแกน
- เปรียบเทียบที่มวลของแกนตัวหมุนแบบเซ็มต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

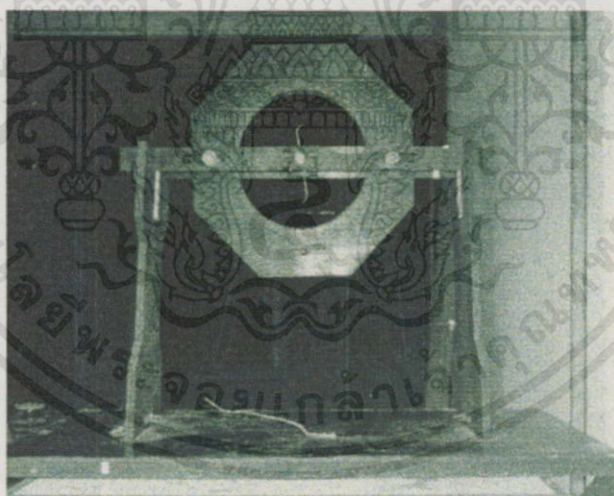
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้เป็นลิขสิทธิ์ของอาจารย์ผู้สอน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุปและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลอง เพื่อนำมาพัฒนาปรับปรุงลักษณะโครงสร้างของตัวหมุนต่อไป

### 3.3 การพัฒนาโครงสร้างตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้า

จากแนวความคิดที่ว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ขึ้นในก๊าซที่คั่นอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ทำให้เกิดขบวนการไอออไนเซชันในก๊าซ และทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรดคะโทด เป็นต้น ซึ่งถ้าให้อิเล็กโทรดขั้วหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยที่อิเล็กโทรดอยู่นิ่งกับที่แล้วนั้น ผลจากปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นน่าจะก่อให้เกิดแรงกระทำที่จะทำให้อิเล็กโทรดที่เคลื่อนที่ได้นั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกให้อิเล็กโทรดคะโทดเป็นอิเล็กโทรดที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยการหมุนในขณะที่อิเล็กโทรดอะโนดถูกยึดอยู่กับที่และทำการทดลองในอากาศและในก๊าซ  $SF_6$  โดยได้ทำการพัฒนาออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้า สามารถแบ่งโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าออกเป็น 3 แบบ

#### 3.3.1 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 1



รูปที่ 3.9 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 1

โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.9 เป็นโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 1 มีรายละเอียดโครงสร้างดังต่อไปนี้

1. ฐานรองรับทำจากไม้อัดหนา 20 มิลลิเมตร
2. สเตเตอร์ทำจากแผ่นทองแดงกว้าง 35 มิลลิเมตร หนา 1.0 มิลลิเมตร ม้วนเป็นวงกลม
3. แกนรองสเตเตอร์ทำจากแบ็คคาไลท์หนา 10 มิลลิเมตร
4. น็อตพลาสติกที่ยึดสเตเตอร์กับแกนรองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

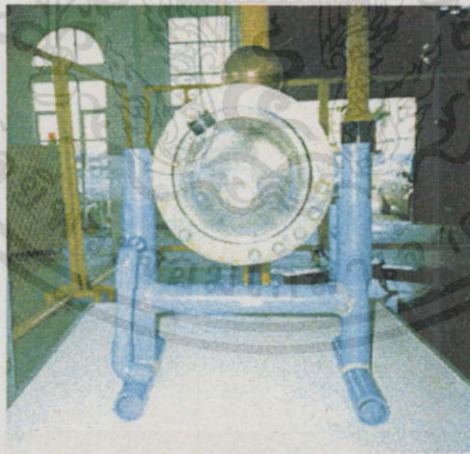
5. โรเตอร์ทำจากลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตรเป็นปลายแหลมโค้งงอทั้งสองข้าง

6. จุดต่อสายกราวด์ทำจากสายไฟทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ตารางมิลลิเมตร

### 3.3.2 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 2

โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.10 มีรายละเอียดโครงสร้างดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้เป็นพลาสติกใสและหนาประเภทอะครีลิก มีความหนา 1.0 เซนติเมตร
2. ขึ้นรูปเป็นครึ่งวงกลมสองใบมาประกอบเข้าเป็นรูปทรงกลม โดยแต่ละครึ่งวงกลมมีปีกโดยรอบมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกยาว 30 เซนติเมตร
3. เจาะรูที่ปีกของครึ่งวงกลมทั้งสอง โดยรอบ สำหรับใส่สกรูยึดครึ่งวงกลมทั้งสอง
4. เจาะรูบริเวณด้านข้างของทรงกลม เพื่อเตรียมไว้สำหรับติด Pressure Gauge สำหรับวัดความดันของก๊าซ ที่บรรจุอยู่ภายใน และติด Valve สำหรับทำสุญญากาศและอัดก๊าซ
5. โครงสร้างอิเล็กโตรดตัวหมุนเป็นลวดทองเหลืองขนาด 3 มิลลิเมตร ปลายแหลมโค้งงอทั้งสองข้าง โดยมีแบริ่งเป็นตัวลดแรงเสียดทานระหว่างตัวหมุนกับเพลลา
6. อิเล็กโตรดระนาบเป็นแผ่นทองแดง 35 มิลลิเมตร หนา 1.0 มิลลิเมตรม้วนเป็นวงกลม
7. ฐานรองรับทำจากท่อ PVC ขนาด 1.5 นิ้ว

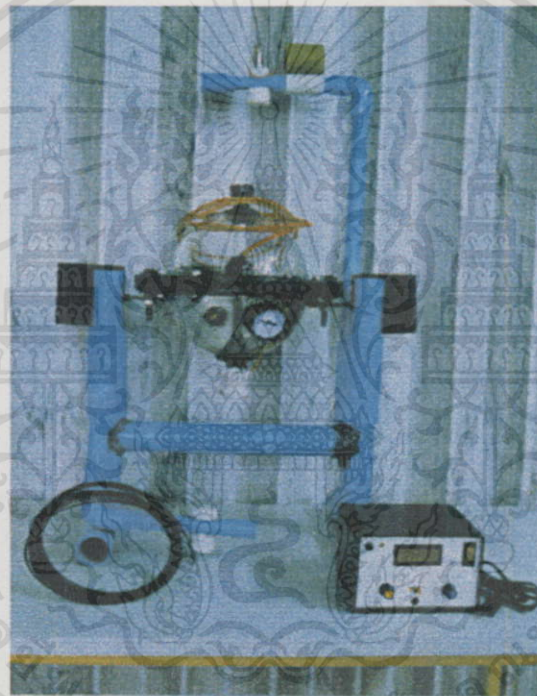


รูปที่ 3.10 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 3.3.3 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3  
 โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.11 มีรายละเอียดโครงสร้างดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้เป็นพลาสติกใสและหนาประเภทอะครีลิก มีความหนา 1.0 เซนติเมตร

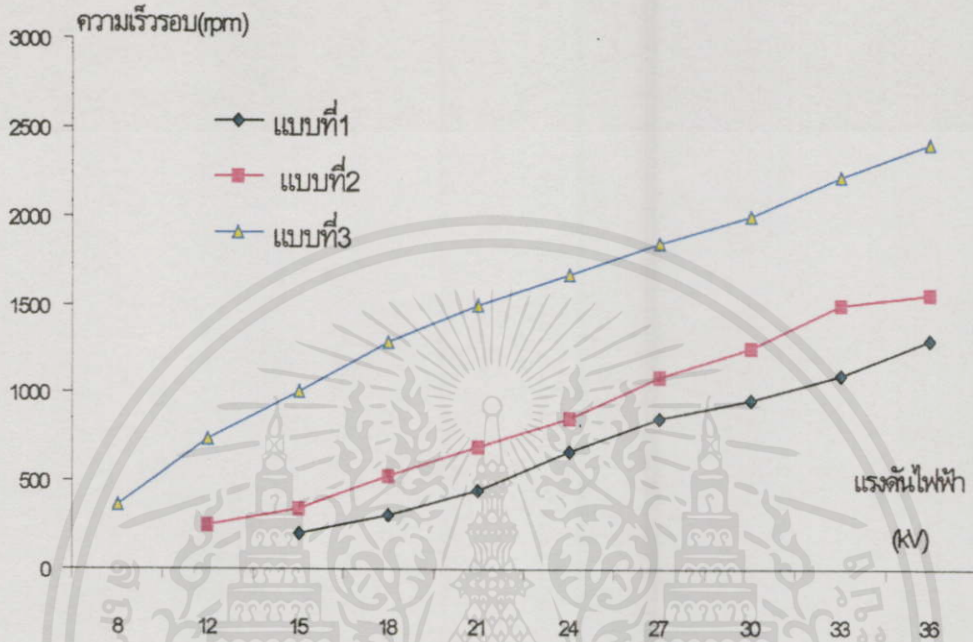
2. ขึ้นรูปเป็นครึ่งวงกลมสองใบมาประกอบเข้าเป็นรูปทรงกลม โดยแต่ละครึ่งวงกลมมีปีก โดยรอบมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกยาว 30 เซนติเมตร
3. เจาะรูที่ปีกของครึ่งวงกลมทั้งสองโดยรอบ สำหรับใส่สกรูยึดครึ่งวงกลมทั้งสอง
4. เจาะรูบริเวณด้านข้างของทรงกลม เพื่อเตรียมไว้สำหรับติด Pressure Gauge สำหรับวัดความดันของก๊าซ ที่บรรจุอยู่ภายใน และติด Valve สำหรับทำสุญญากาศและอัดก๊าซ
5. โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุนเป็นลวดทองเหลืองขนาด 3 มิลลิเมตร ปลายแหลมโค้งงอ ทั้งสองข้างยึดติดกับแกนเพลากลางที่มีลักษณะคล้ายเข็มเป็นตัวลดความยืดของตัวหมุน
6. อิเล็กทรอนิกส์เป็นแผ่นทองแดง 35 มิลลิเมตรหนา 1.0 มิลลิเมตรม้วนเป็นวงกลม
7. รุานรองรับทำจากท่อ PVC ขนาด 1.5 นิ้ว



รูปที่ 3.11 โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ เพื่อทำการหาลักษณะของ โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยนำผลการทดลอง ที่ได้เปรียบเทียบกัน กำหนดให้อิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเป็นแกนปลายแหลม โค้งงอทำด้วยทองแดงเส้นผ่าศูนย์กลางแกน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลม ยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุน เป็น วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. สามารถแสดงดังรูปที่ 3.12 จากกราฟผลการทดลองพบว่า ลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3 แรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำกว่าแบบที่ 1 และแบบ ที่ 2 เมื่อพิจารณาทางด้านความเร็วรอบจะพบว่าลักษณะ โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้า แบบที่ 3

จะมีความเร็วรอบที่สูงที่สุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเดียวกันและมีความเร็วก่อนเกิดเบรคคาวน์สูงที่สุด ดังนั้นจากกราฟผลการทดลองเลือกขนาดของมอเตอร์สนามไฟฟ้าจึงสรุปได้ว่าลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3 มีคุณสมบัติที่ดีกว่าแบบที่ 1 และแบบที่ 2



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วมอเตอร์สนามไฟฟ้า

### 3.4 การพัฒนารูปลักษณะของตัวหมุนและลักษณะการหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

จากที่ได้ทำการทดลองในหัวข้อที่ 3.3 เราจะพบว่าโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแบบที่ 3 ซึ่งแกนตัวหมุนช่วยลดความฝืดแบบเข็ม และในหัวข้อนี้เราจะทำการพิจารณาลักษณะของแกน ตัวหมุนที่มีอุปกรณ์ช่วยลดความฝืดต่างกัน โดยทำการออกแบบทดลองเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน โดยสามารถที่จะแบ่งผลการทดลองของตัวหมุนที่มีอุปกรณ์ช่วยลดความฝืดออกเป็น 3 ชนิดด้วยกัน

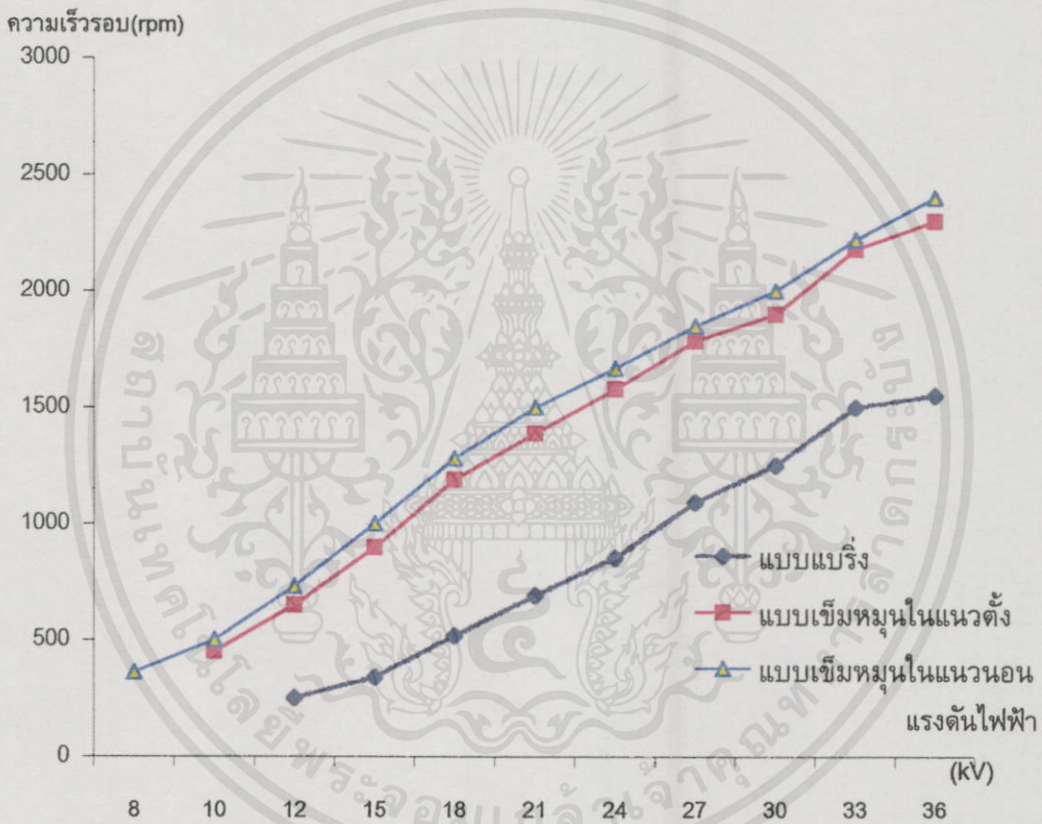
1. แกนตัวหมุนที่มีเบริงเป็นตัวช่วยลดความฝืด
2. แกนตัวหมุนแบบเข็มเป็นตัวช่วยลดความฝืด หมุนในแนวตั้ง
3. แกนตัวหมุนแบบเข็มเป็นตัวช่วยลดความฝืด หมุนในแนวนอน

เอกสารนี้ โครงสร้างของตัวหมุน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 1. แขนปลายแหลมโค้งงอทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลางแกน 2.6 มม. มีการนำไปใช้

2. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม.
3. ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม.

4. ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม.
5. อิเล็กทรอนิกส์กว้าง 4.5 ซม.
6. แกนตัวหมุนที่มีแบริ่งเป็นตัวช่วยลดความฝืดขนาดแบริ่งเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ซม.
7. แกนตัวหมุนแบบเข็มเป็นตัวช่วยลดความฝืด หมุนในแนวตั้ง ลวดทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลางแกน 2.6 มม.ยาว 6.0 ซม.
8. แกนตัวหมุนแบบเข็มเป็นตัวช่วยลดความฝืด หมุนในแนวอนลวดทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลางแกน 2.6 มม.ยาว 6.0 ซม.



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบ(rpm) ของแกนตัวหมุนช่วยลดความฝืด

จากการทดลองแกนตัวหมุนช่วยลดความฝืด รูปที่ 3.12 พบว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวหมุนจนกระทั่งถึงแรงดันเบรคดาวน จะพบว่าแกนตัวหมุนแบบเข็มช่วยลดความฝืดหมุนในแนวอนจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ตัวหมุน เริ่มหมุนมีค่าต่ำกว่าอุปกรณ์ช่วยลดความฝืดชนิดอื่น เมื่อทำการพิจารณาความเร็วรอบหมุนจะพบว่าแกนตัวหมุนแบบเข็มช่วยลดความฝืดหมุนในแนวอนจะมีความเร็วรอบสูงที่สุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกันและมีความเร็วรอบสูงที่สุดก่อนเกิดการเบรคดาวน ทั้งนี้เนื่องจากว่าอุปกรณ์ช่วยลดความฝืดชนิดนี้มีลักษณะการหมุนที่สมดุล มีความฝืด

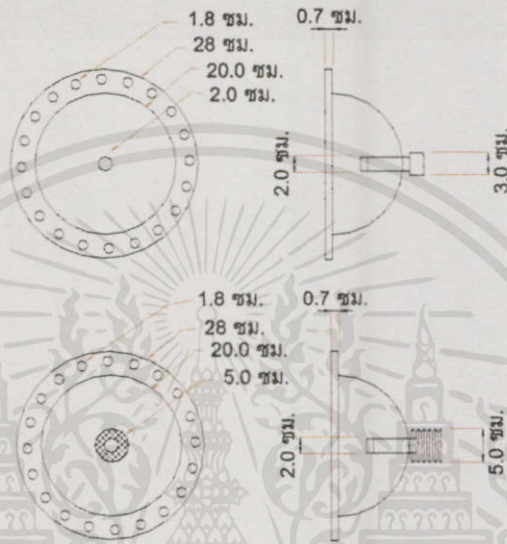
น้อย ลักษณะของแกนตัวหมุนชนิดนี้ดังรูปที่ 13.11 แกนตัวหมุนแบบเข็มช่วยลดความฝืดหมุนในแนวตั้ง พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ตัวหมุนเริ่มหมุนในช่วงเริ่มแรกจะมีค่าสูงกว่าชนิดเข็มในแนวนอนแต่เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงมากขึ้นความเร็วรอบหมุนจะมีค่าใกล้เคียงกับชนิดเข็มในแนวนอน ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวหมุนมีลักษณะทิศทางตั้งฉากกับแรงดึงดูดของโลกจึงเป็นผลทำให้แรงที่กระทำที่ตัวหมุนๆ ไปได้คืออาศัยแรงกระทำที่มากกว่าแรงดึงดูดของโลกและความต้านทานของตัวหมุน และในส่วนของที่มีตัวหมุนที่มีช่วยลดความฝืดชนิดแบร์ริง จากรูปที่ 3.12 ตัวหมุนจะมีแรงดันเริ่มหมุนที่สูงและมีความเร็วรอบต่ำที่สุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากอุปกรณ์ช่วยลดความฝืดชนิดใช้แบร์ริงจะมีค่าความฝืดสูงทำให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนมีค่าสูงและความเร็วรอบหมุนต่ำ

### 3.5 บทสรุปและวิเคราะห์ผล

การพัฒนาโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูง จากผลการทดสอบที่ผ่านมาในข้างต้นเพื่อหารูปแบบโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ที่ได้ลักษณะสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่เหมาะสม ซึ่งจะนำมาใช้กับชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่นำเสนอ ดังนั้น รูปร่างลักษณะของชิ้นส่วนต่างๆ ของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นแบบที่ 3 แสดงได้ต่อไปนี้

- ตัวถัง ในการออกแบบตัวถังของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงได้ทำการศึกษาข้อมูลและสร้างให้สอดคล้องกับจุดมุ่งหมายของการนำไปใช้งานและความเป็นไปได้ โดยการพิจารณา เเง้ววัสดุที่ใช้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมีขั้วอิเล็กโตรดอยู่ภายใน ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำตัวถังจึงควรจะเป็นวัสดุที่มีค่าความคงทนฉนวนสูง จำพวกพลาสติก แก้ว หรือแบ็คคาไลท์ เป็นต้น ซึ่งในการวัดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าแรงดัน อุปกรณ์เครื่องมือวัดความเร็วรอบเป็นแบบที่ใช้แสง ดังนั้นตัวถังจึงควรจะทำจากวัสดุที่มีเนื้อโปร่งใสที่สามารถให้แสงผ่านทะลุได้และเนื่องจากจุดมุ่งหมายหลักของการทำตัวถังก็เพื่อต้องการให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ โดยสามารถควบคุมระดับความดันของก๊าซภายในและสามารถเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในเพื่อปรับระดับของช่วงการวัดของชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่นำเสนอ รูปทรงที่ดีที่สุดและพอที่จะสามารถสร้างขึ้นได้ก็คือทรงกลม ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจากวัสดุที่ใช้เป็นพลาสติกใสหนา มีความหนา 7 มม. ขึ้นรูปเป็นครึ่งทรงกลม 2 ใบประกอประกกันเข้าเป็นรูปทรงกลม โดยแต่ละครึ่งทรงกลมจะมีปีกโดยรอบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 200 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 280 มม. เจาะรูที่ปีกของครึ่งทรงกลมโดยรอบสำหรับใช้สกรูเหล็กยึดครึ่งทรงกลมสองใบเข้าด้วยกัน เจาะรูตรงกลางของครึ่งทรงกลมทั้งสองเพื่อเตรียมไว้สำหรับยึดแกนเพลลาของอิเล็กโตรดตัวหมุนแบบเข็มครึ่งทรงกลม ด้านท่อก๊าซทำจากทองเหลืองต่อออกมาภายนอกไว้สำหรับการสูบลมออกและการอัดก๊าซเข้าไปภายใน ครึ่งทรงกลมด้านจุดต่อกราวด์ จะมีส่วนของขั้วต่อสายดินอยู่ด้วย เพื่อต่อสายกราวด์เข้าอิเล็กโตรด

ระนาบที่อยู่ภายในครึ่งทรงกลมด้านจุดต่อไฟจะมีส่วนของขั้วสายติดอยู่ด้วย เพื่อต่อสายไฟเข้าที่ อิเล็กโตรดตัวหมุนที่อยู่ภายในระยะห่างของขั้วสายกราวด์และสายไฟมีระยะห่าง 150 มม. แกนของตัวถังทำด้วยแผ่นพลาสติกหนา 5 มม. ไว้สำหรับยึดตัวถังกับฐานรองรับ อุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของก๊าซตามจุดต่าง ๆ ใช้วงยางใส่กันไว้ที่รอยต่อ ซึ่งตัวถังที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปใช้งานในการทดลองได้แสดงไว้ใน รูปที่ 4.25



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูง

- อิเล็กโตรดระนาบ มีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่นระนาบซึ่งถูกยึดอยู่กับที่ โลหะที่ใช้เป็นแผ่นทองเหลืองขนาดความกว้าง 450 มม. หนา 1 มม. ซึ่งจะยึดอยู่กับที่ที่เป็นรูปวงกลมติดอยู่กับผนังด้านในของตัวถังในแนวการหมุนของอิเล็กโตรดตัวหมุน โดยทำการต่อเข้ากับขั้วสายในครึ่งทรงกลมด้านจุดต่อกราวด์ของตัวถัง ซึ่งได้ออกแบบเตรียมไว้

- อิเล็กโตรดตัวหมุน เป็นลวดทองเหลืองขนาด 3 มิลลิเมตร ปลายแหลม โค้งงอทั้งสองข้างยึดติดกับแกนเพลากลางที่มีลักษณะคล้ายเข็มเป็นตัวยึดความฝืดของตัวหมุน ซึ่งพบว่าตัวหมุนแบบเข็มลดความฝืดจะมีค่าความเร็วรอบมากกว่าและมีค่าแตกต่างในการทดลองแต่ละครั้งจะน้อยกว่าเมื่อทำการทดลองซ้ำ จากรูปที่ 4.26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 6.0 ซม.

รูปที่ 3.15 ลักษณะของแกนตัวหมุน

- ฐานรองรับ ฐานที่ใช้รองรับตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีขนาดพอเหมาะ สามารถรับน้ำหนักของชุดทดสอบได้และจะต้องมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดี ในการทำฐานรองรับต้นแบบจึงได้ใช้ท่อพีวีซี 1.5 นิ้ว ซึ่งเป็นวัสดุพอจะจัดหาและสร้างได้ง่าย โดยที่ปลายแขนของ ฐานรองรับเขาจะเป็นร่องสำหรับวางยึดแขนพลาสติก หนา 5 มม. ของตัวถัง



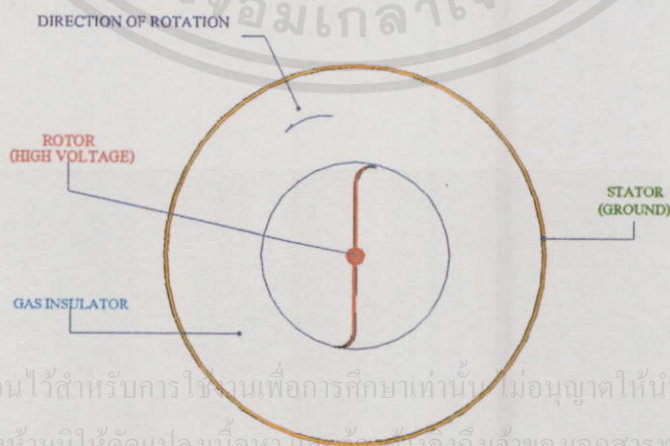
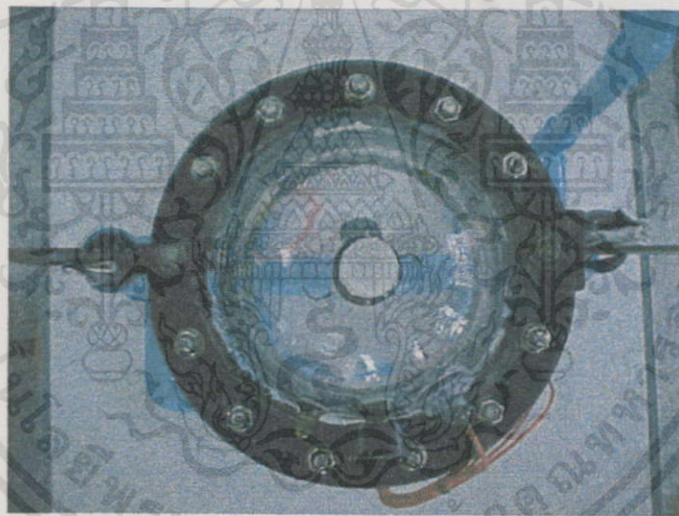
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# คุณลักษณะของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

### 4.1 การเคลื่อนที่ของตัวหมุน

เนื่องจากการการที่อิเล็คโตรดตัวหมุนสามารถเคลื่อนที่ได้ นั้น จะต้องมีแรงมากระทำกับตัวหมุนที่มากพอที่จะเอาชนะแรงบิดเริ่มต้นของตัวหมุนได้ จากการทดลองโดยการป้อนสนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้กับมอเตอร์ที่มีลักษณะอิเล็คโตรดตัวหมุนปลายแหลมกับระนาบให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงระหว่างอิเล็คโตรดทั้งสอง โดยมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณปลายแหลมของแกนตัวหมุนผลทำให้ตัวหมุนสามารถเคลื่อนที่ได้ถ้าหากแรงมากระทำมากพอที่จะเอาชนะแรงบิดเริ่มต้นได้ ด้านสาเหตุนี้จึงได้ตั้งสมมติฐานการหมุนเนื่องจากผลของแรงกระทำได้ดังนี้

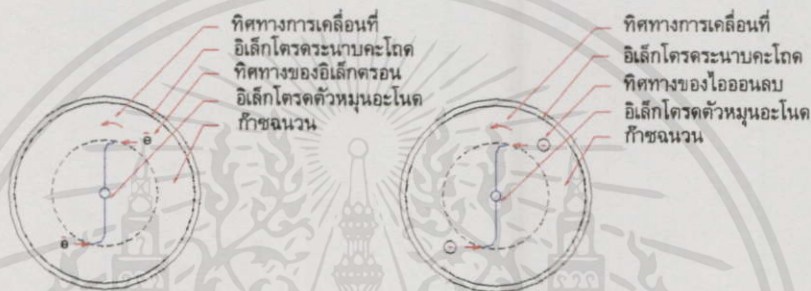


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และที่ของยังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

#### 4.1.1 อิเล็กโตรดตัวหมุนอะโนด

อิเล็กโตรดตัวหมุนอะโนด เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอจะทำให้เกิดขบวนการไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวก โดยไอออนบวกจะเคลื่อนเข้าหาอิเล็กโตรดกระนาบแคโทด ในขณะที่กลุ่มอิเล็กตรอนอิสระและไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโตรดตัวหมุนอะโนด โดยจะพุ่งชนปลายแหลมที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ถ้าหากมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากพอก็จะมีแรงกระทำพอที่จะผลักให้อิเล็กโตรดตัวหมุนอะโนดสามารถเคลื่อนหมุนได้



รูปที่ 4.2 แรงกระทำของอิเล็กตรอนและไอออนลบต่ออิเล็กโตรดตัวหมุนอะโนด

#### 4.1.2 อิเล็กโตรดตัวหมุนแคโทด

อิเล็กโตรดตัวหมุนแคโทด เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ ทำให้เกิดขบวนการไอออไนเซชัน กลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโตรดระนาบอะโนด ในขณะที่ไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าชนปลายแหลมของอิเล็กโตรดตัวหมุนแคโทด ซึ่งไอออนบวกจะมีมวลมากและเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งถ้าหากไอออนบวกมีจำนวนมากพอก็จะมีแรงกระทำผลักให้อิเล็กโตรดตัวหมุนแคโทดเคลื่อนหมุนได้



รูปที่ 4.3 แรงกระทำของอิเล็กตรอนและไอออนบวกต่ออิเล็กโตรดตัวหมุนแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

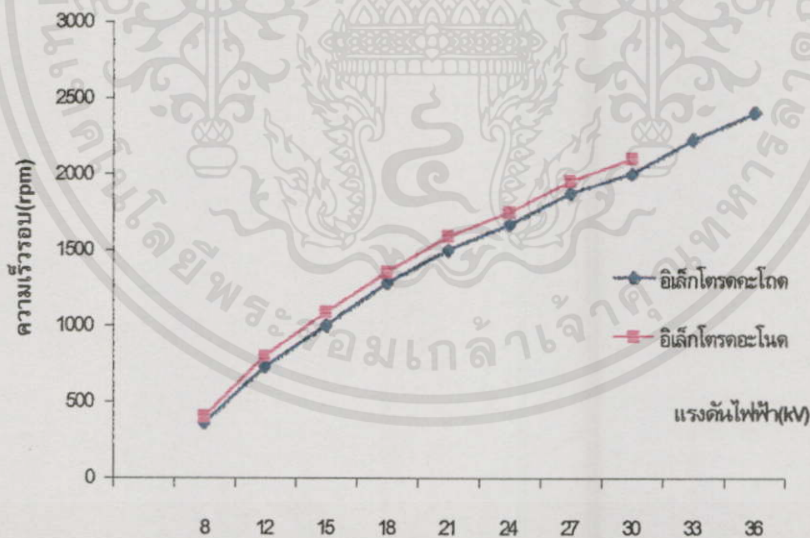
## 4.2 ความเร็วรอบหมุนของอิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุนอะโนดและคะโอด

ส่วนนี้จะเป็นการทดลองวิเคราะห์ องค์ประกอบและแฟลคเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของความเร็วรอบหมุนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนของมอเตอร์สนามไฟฟ้า เพื่อพัฒนาให้ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบหมุนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเป็นเชิงเส้นมีช่วงกว้างที่สุดและความเร็วรอบหมุนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนสูงสุด ซึ่งจะได้สามารถนำไปใช้กับชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่นำเสนอสำหรับองค์ประกอบและแฟลคเตอร์ต่างๆที่ทดลองวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังลำดับต่อไป

### 4.2.1 ความเร็วรอบหมุนที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเดียวกัน

โครงสร้างของของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

1. แขนปลายแหลมโค้งงอทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลางแขน 2.6 มม.
2. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม.
3. ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม.
4. ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม.
5. อิเล็กทรอนิกส์กว้าง 4.5 ซม.
6. แกนตัวหมุนแบบเข็มเป็นตัวช่วยลดความฝืด หมุนในแนวนอนลวดทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลางแขน 2.6 มม.ยาว 6.0 ซม.



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของอิเล็กทรอนิกส์อะโนดและอิเล็กทรอนิกส์คะโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ผลการทดลอง ไม่ว่าจะผิดเพี้ยนหรือทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลการทดลองและกราฟแสดงสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าใน

รูปที่ 4.4 จะเห็นว่าตัวหมุนที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกันทุกประการ แต่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า

ที่ชั่วตัวหมุนต่างกัน พบว่าที่อเล็กโตรคอะโอดจะมีแรงดันเริ่มหมุนที่ต่ำกว่าอเล็กโตรคอะโนด เมื่อทำการพิจารณาจากกราฟจะพบว่าอเล็กโตรคอะโนดจะมีความเร็วรอบสูงที่สุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเดียวกัน อเล็กโตรคอะโนดจะเกิดการเบรคควาน์ก่อนอเล็กโตรคอะโอด ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าสาเหตุที่อเล็กโตรคอะโอดมีแรงดันเริ่มหมุนที่ต่ำ ความเร็วรอบต่ำกว่าอเล็กโตรคอะโนดและมีแรงดันไฟฟ้าเบรคควาน์ที่สูงกว่าอเล็กโตรคอะโนดเป็นผลมาจากประจุค้างซึ่งจะอยู่ที่บริเวณปลายแหลมของอเล็กโตรคตัวหมุน

#### 4.2.2 ความเร็วรอบหมุนสูงสุด

จากผลของการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 พบว่าตัวหมุนอเล็กโตรคอะโอดจะมีแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนที่ต่ำ ความเร็วรอบหมุนสูงและแรงดันเบรคควาน์สูงกว่าตัวหมุนอเล็กโตรคอะโนดทั้งนี้เป็ผลจากประจุค้างบริเวณปลายแหลมของอเล็กโตรคตัวหมุน ดังนั้นในหัวข้อการทดลองนี้จึงได้ทำการทดลองเฉพาะตัวหมุนอเล็กโตรคอะโอด โดยทำการทดลองถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลทำให้อเล็กโตรคตัวหมุนมีความเร็วรอบสูงสุด ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนดังต่อไปนี้

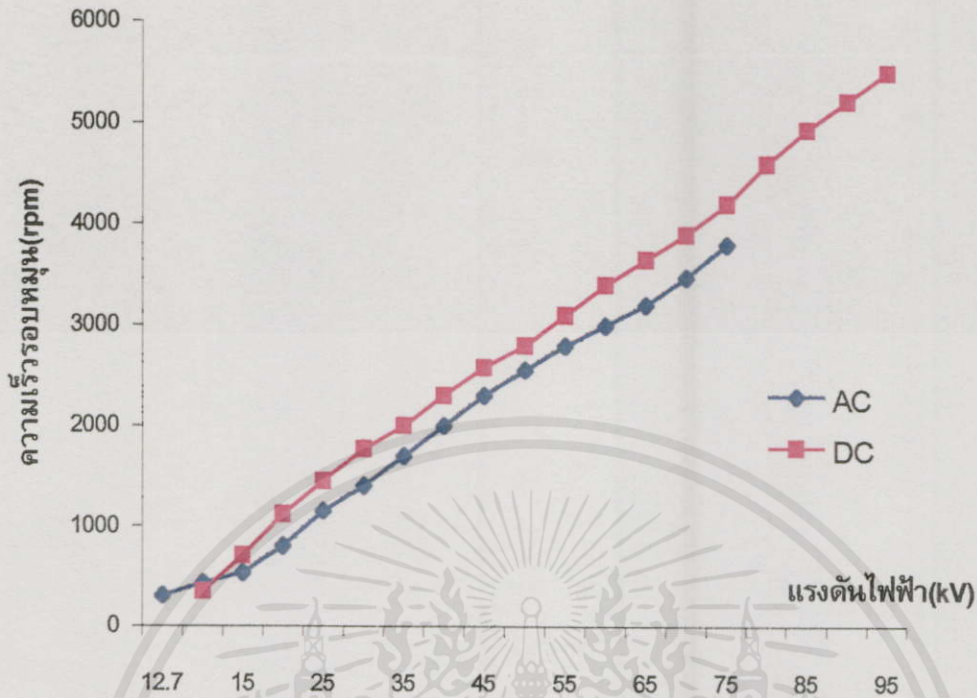
##### - ความถี่

ในทดลองได้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าแรงสูง AC ( $f = 50 \text{ Hz}$ ) และ DC เพื่อหาความสัมพันธ์ของสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเปรียบเทียบกัน สำหรับตัวหมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างเหมือนกันที่ระดับแรงดันอากาศ 3 bar เพื่อพิจารณาหาผลความแตกต่างของความเร็วรอบหมุน โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลม ใ้้งงอแขนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 2.0 ซม. ระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะเก็บ 6.6 ซม.

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.5

แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน	แรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ยเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูงสุดก่อนเกิดการเบรคควาน์ (%) rpm
AC	อ้างอิง(12.7)	อ้างอิง(300)	245 รอบ	อ้างอิง(3802)
DC	เพิ่มขึ้น 7.87%	เพิ่มขึ้น 16.67%	268 รอบ	เพิ่มขึ้น 44.66%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังประชาชนโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ลักษณะของอเล็กโตรคอะโนดเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.5

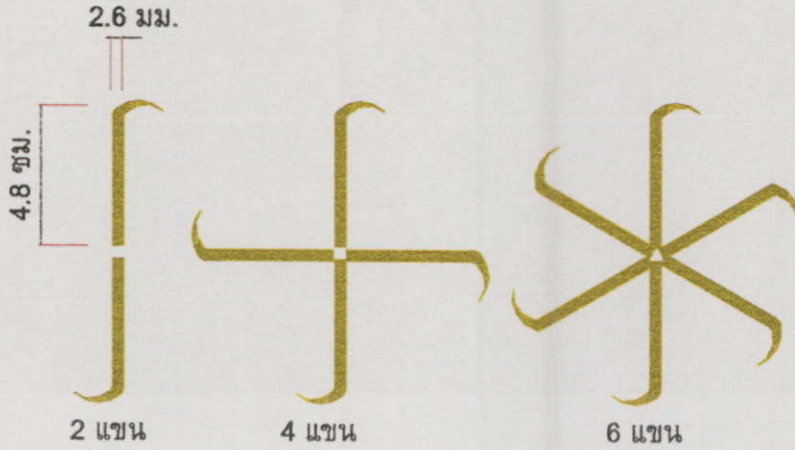


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่มีแรงดันไฟฟ้า AC และ DC

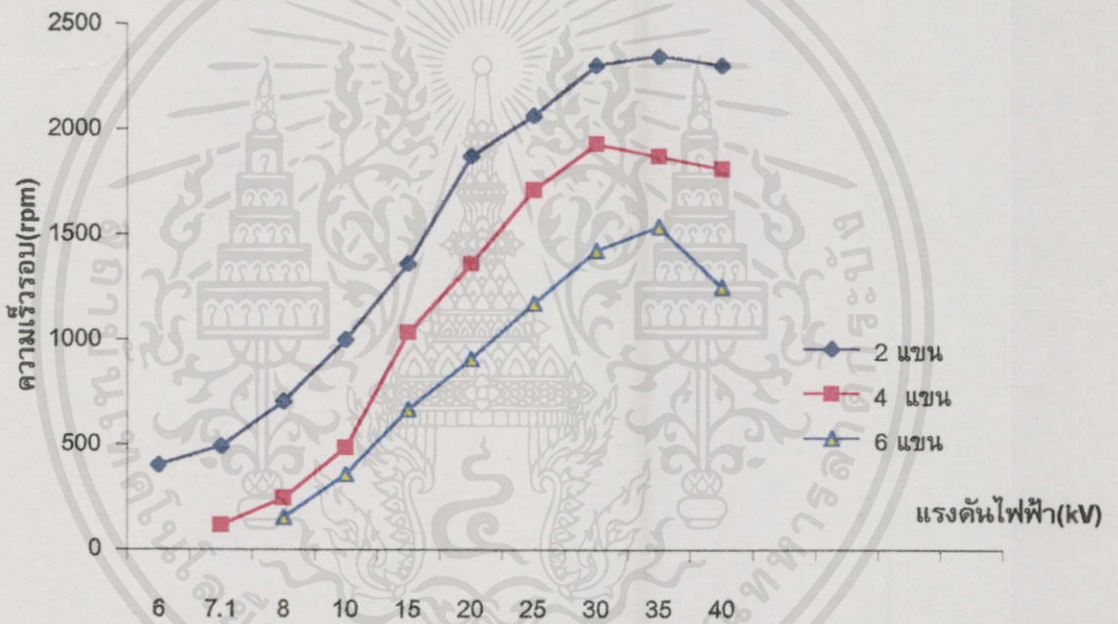
จากผลการทดลองระหว่างแรงดันที่ป้อน AC และ DC จะพบว่าแรงดัน AC จะมีการเริ่มหมุนก่อนแรงดัน DC โดยเริ่มหมุนที่ 12.7 kV กับ 13.7 kV ตามลำดับ แต่ที่ระดับแรงดัน ไฟฟ้าเดียวกัน เช่น ที่ 45 kV แรงดัน ไฟฟ้า DC จะมีความเร็วรอบที่สูงกว่า AC คือ 2580 rpm กับ 2300 rpm ตามลำดับ และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรคความถี่ที่สูงกว่าคือ 95 kV ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้า AC มีการเกิดขบวนการไอออไนเซชันก่อน DC เนื่องจากผลของความถี่ตามทฤษฎีข้างต้นซึ่งทำให้มีแรงดันเริ่มหมุนก่อนและเบรคความถี่ก่อน DC เสมอ

#### - จำนวนแกนของตัวหมุน

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนเปรียบเทียบกัน สำหรับตัวหมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างเหมือนกันแต่จำนวนแกนของตัวหมุนแตกต่างกันดังรูปที่ 4.6 เพื่อพิจารณาหาจำนวนแกนของตัวหมุนที่ให้สมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนที่ดีที่สุด โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลม โค้งงอแกนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแกนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 5.5 ซม. ระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแก่ป 4.5 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. โดยน้ำหนักของตัวหมุนเท่ากันทั้ง 3 แบบ คือ 17.4 กรัม สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ตัวหมุนที่มีจำนวนแขนต่างกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) - ความเร็วรอบหมุน (rpm) ของตัวหมุนที่มีจำนวนแขนต่างกัน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบจำนวนแขนของตัวหมุนต่างกัน จะพบว่าแขนตัวหมุนขนาด 2 แขน จะมีความเร็วรอบเริ่มหมุนที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนต่ำและมีความเร็วรอบสูงที่สุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน เช่นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 40 kV ตัวหมุน 2 แขน, 4 แขน และ 6 แขนจะมี

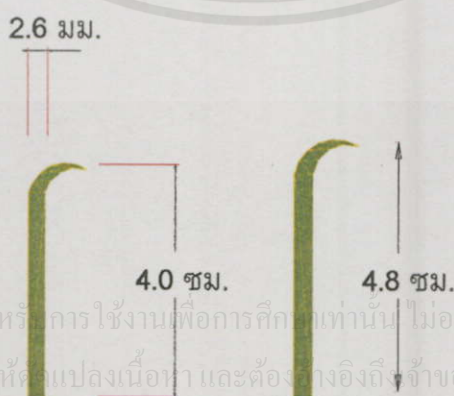
ความเร็วรอบหมุน 2308, 1818 และ 1250 rpm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวหมุนที่มีจำนวนแขน 2 แขน จะมีความสนามไฟฟ้าแบบที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงที่สุด ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดแรงจากไม่ว่ากรณีใดทางอื่น อีกทั้งยังมีให้ดูแปลงที่เอาไว้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ขบวนการ ไอออไนเซชันสูงที่สุดตามไปด้วยและการต้านอากาศในการหมุนจะน้อยตามจำนวนแขน

## ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.7

จำนวน แขน	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบ เริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ย เมื่อแรงดันไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคดาวน์ (%) rpm
2	อ้างอิง (6)	อ้างอิง (400)	221.8 รอบ	อ้างอิง (2353)
4	เพิ่มขึ้น 18.3%	ลดลง 71.3%	244.7 รอบ	ลดลง 17.8 %
6	เพิ่มขึ้น 33.3%	ลดลง 61.5%	238.8 รอบ	ลดลง 34.6%

### - ความยาวแขนของตัวหมุน

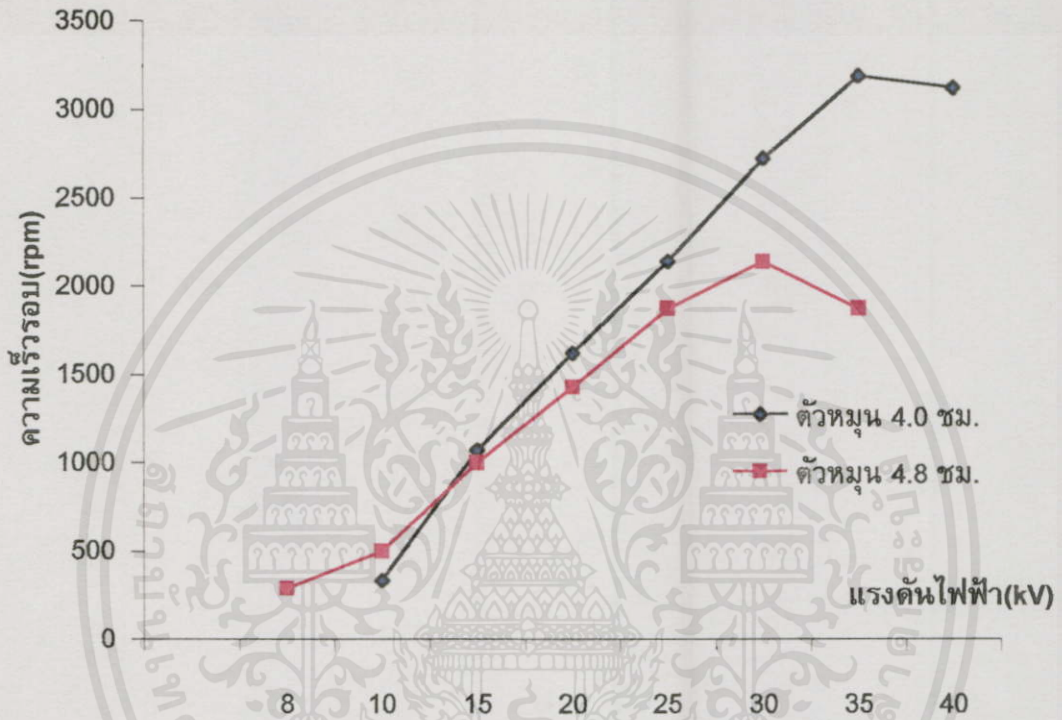
จากผลการทดลองในเรื่องตัวหมุนที่มีจำนวนแขนต่างกัน ในหัวข้อนี้ได้ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่เปรียบเทียบกันสำหรับรูปลักษณะโครงสร้างของตัวหมุนที่ปลายแหลม 2 แขน ที่มีความยาวแขนต่างกัน เพื่อพิจารณาความยาวของแขนตัวหมุนที่ให้คุณสมบัติความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนดีที่สุด โดยมีโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแขนตัวหมุนเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดความยาวแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 4.0 และ 4.8 ซม. ดังรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนกับความเร็วรอบหมุนเปรียบเทียบกันของตัวหมุน 2 แขน ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. โดยน้ำหนักของตัวหมุนเท่ากันทั้ง 2 แบบ คือ 5.4 กรัม สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 ตัวหมุนที่มีความยาวต่างกัน

จากการพิจารณาผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเริ่มหมุนของแชนต์วหมุนที่มีความยาวมากกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเริ่มหมุนต่ำคือ เมื่อเราทำการพิจารณาความเร็วรอบของตัวหมุนสูงสุด จะพบว่าที่แชนต์วสั้นกว่าจะมีความเร็วรอบสูงสุดมากกว่า ซึ่งจากรูปแบบโครงสร้างของตัวหมุนแชนต์วปลายแหลม 2 แชนต์วที่มีความยาวแชนต์วสั้นจะเหมาะที่จะใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้าสูงๆและใช้แชนต์วหมุนแบบยาวกับระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ



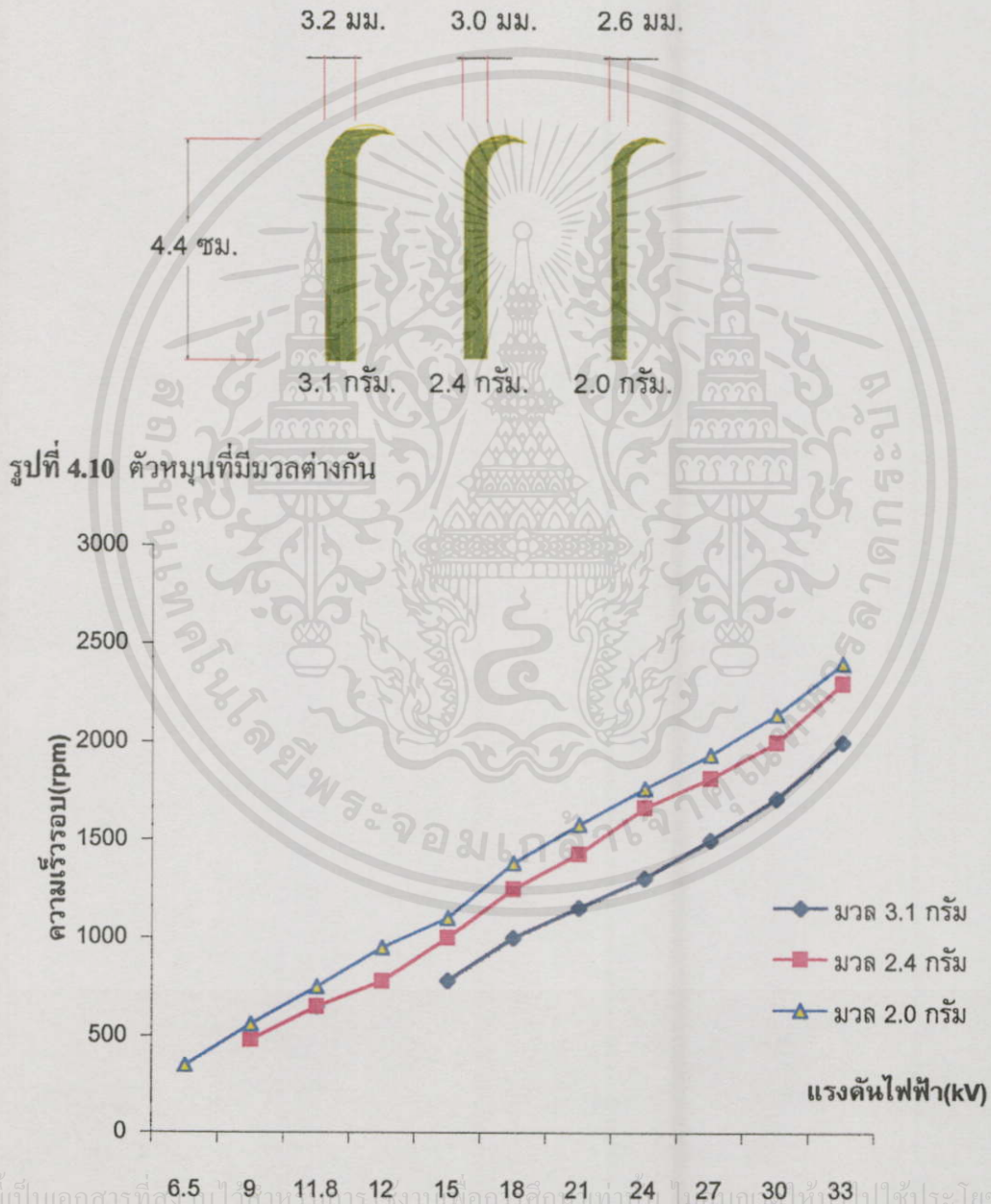
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่มีความยาวแชนต์วต่างกัน

ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.9

ความยาว แชนต์ว cm.	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่ม หมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ย เมื่อแรงดันไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูงสุด ก่อนเกิดการเบรค ดาวน์ (%) rpm
4.0	อ้างอิง (10)	อ้างอิง (333)	487 รอบ	อ้างอิง (3191)
4.8	ลดลง 20%	ลด 13.51%	312 รอบ	ลดลง 27.7%

### - น้ำหนักของตัวหมุน

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเปรียบเทียบตัวหมุน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของตัวหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน โดยใช้แกนที่ทำจากลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6, 3.0 และ 3.2 มม. ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของแกนถึงปลายแกนเท่ากับ 4.4 ซม. โดยระยะระหว่างปลายแหลมกับกราวด์เท่ากับ 4.19 ซม. มวลของแกนคือ 2.0, 2.4 และ 3.1 กรัม แสดงดังรูปที่ 4.10 แกนเพลตตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับบริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งาน และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่มีมวลต่างกัน

#### ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.11

มวลของแกน cm.	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่ม หมุน (%) rpm	ความเร็วรอบ เฉลี่ยเมื่อแรงดัน ไฟฟ้าเปลี่ยน; แปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคคาวน์ (%) rpm
3.1	เพิ่มขึ้น 81.54%	เพิ่มขึ้น 85.71%	230.14 รอบ	ลดลง 16.67%
2.4	เพิ่มขึ้น 53.84%	เพิ่มขึ้น 37.14%	216.67 รอบ	ลดลง 4.167%
2.0	อ้างอิง(6.5)	อ้างอิง(350)	200 รอบ	อ้างอิง(2400)

จากการทดลองจะพบว่าตัวหมุนที่มีมวลน้อยกว่าจะมีความเร็วรอบสูงกว่าเปรียบเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน เช่น ที่ 24 kV ตัวหมุนมวล 3.1, 2.4 และ 2.0 กรัม จะมีความเร็วรอบ หมุน 1304, 1667 และ 1764 rpm ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาความความเร็วรอบสูงสุดจะเห็นว่า แกนที่แกนมวล 2.0 กรัม จะมีความเร็วรอบสูงสุดคือ 2400 rpm และมีค่าระดับแรงดันเริ่มหมุนต่ำ คือ 6.5 kV เพราะมีน้ำหนักเบา

#### - ความยาวส่วนปลายแกนของตัวหมุน

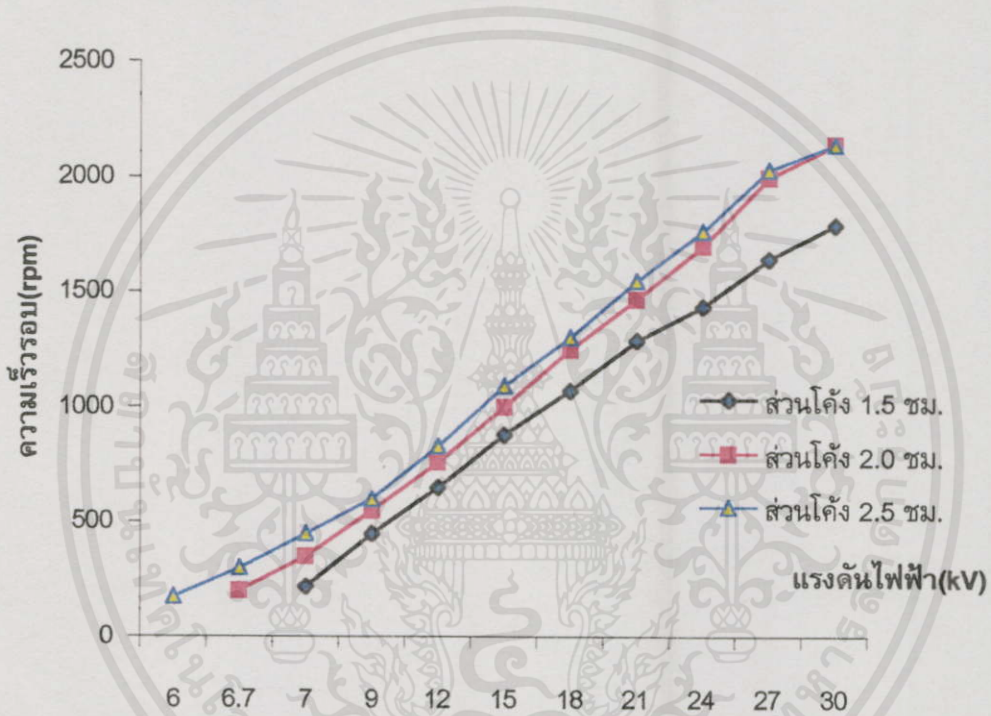
ในการทดลองหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของตัวหมุนกับแรงดัน ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเหมือนกันแต่มีรัศมีความยาวส่วนปลายแกนต่างกัน เพื่อพิจารณาหารัศมีของแกนที่เหมาะสมที่ให้คุณสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันที่ปลอดภัยที่สุด โดยโครงสร้างเป็นแกนปลายแหลม โค้งงอทำด้วยทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.64 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.8 ซม. เท่ากันทุกแกนแต่รัศมีตรงส่วน โค้งถึงปลายแกนต่าง กัน 3 แบบ คือยาว 1.5 ซม., 2.0 ซม., 2.5 ซม. ดังรูปที่ 4.12 ผลการทดลอง ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.13

จากผลการทดลองแสดงคุณสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ปลอดภัย จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวหมุนที่มีรัศมีความยาวส่วนปลาย 2.5 ซม. ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ปลอดภัยจะมีความเร็วรอบหมุนที่สูงกว่าและจะเริ่มหมุนที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 6 kV และยังมีความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ตัวหมุนที่มีความยาวของส่วนปลายแขนต่างกัน



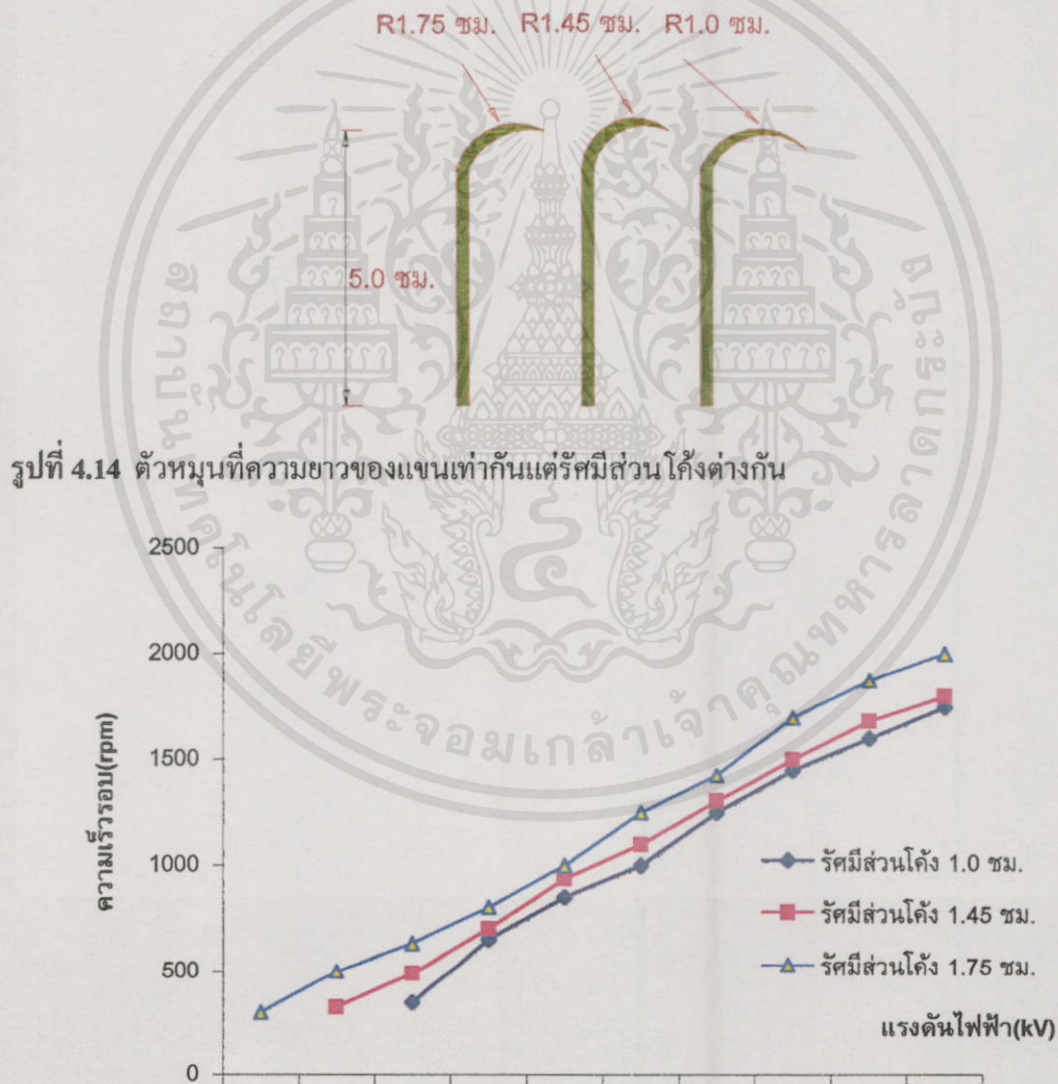
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm)ของตัวหมุนที่มีความยาวส่วนปลายแขนต่างกัน

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.13

ความยาวปลายแขน (cm.)	แรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ยเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 5 kV rpm	ความเร็วรอบสูงสุดก่อนเกิดการเบรคดาวน์ (%) rpm
1.5	เพิ่มขึ้น 16.67%	เพิ่มขึ้น 25.7%	222 รอบ	ลดลง 16.38%
2.0	เพิ่มขึ้น 11.67%	เพิ่มขึ้น 14.28%	381 รอบ	ลดลง 1.82%
2.5	อ้างอิง(6)	อ้างอิง(175)	214 รอบ	อ้างอิง(2142)

### - รัศมีส่วนโค้งตัวหมุน

การทดลองเรื่องรัศมีความโค้งของแกนตัวหมุนที่มีความยาวแกนเท่ากัน โครงสร้างของตัวหมุนเป็นปลายแหลมโค้งงอที่มีความโค้งต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.14 แกนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแกนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายยาว 5 ซม. และความยาวส่วนปลายแกนเท่ากันทุกแกน จำนวนแกนของตัวหมุนมี 2 แกน รัศมีความโค้งต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.0 ,1.45 และ 1.75 ซม. ระยะห่างปลายแหลมของตัวหมุนถึงกราวด์ 3.59 ซม. ลักษณะของ อิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดัง กราฟรูปที่ 4.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของ  
 ตัวหมุนที่รัศมีความโค้งต่างกัน

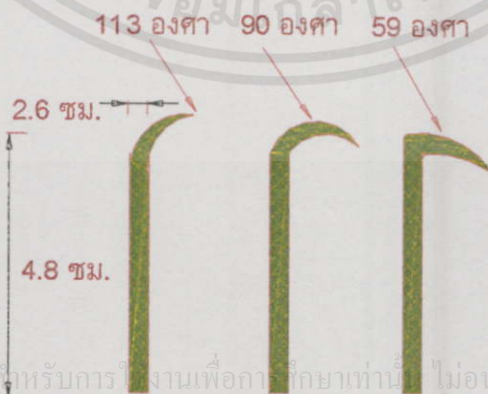
ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.15

รัศมีความ โค้งแกน (cm.)	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่ม หมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ย เมื่อแรงดันไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูงสุด ก่อนเกิดการเบรค ดาวน์ (%) rpm
1.0	เพิ่มขึ้น 8.75%	เพิ่มขึ้น 16.67%	250.67 รอบ	ลดลง 12.5%
1.45	เพิ่มขึ้น 5.0%	เพิ่มขึ้น 8.33%	221 รอบ	ลดลง 10.0%
1.75	อ้างอิง(8)	อ้างอิง(300)	222.3 รอบ	อ้างอิง(2000)

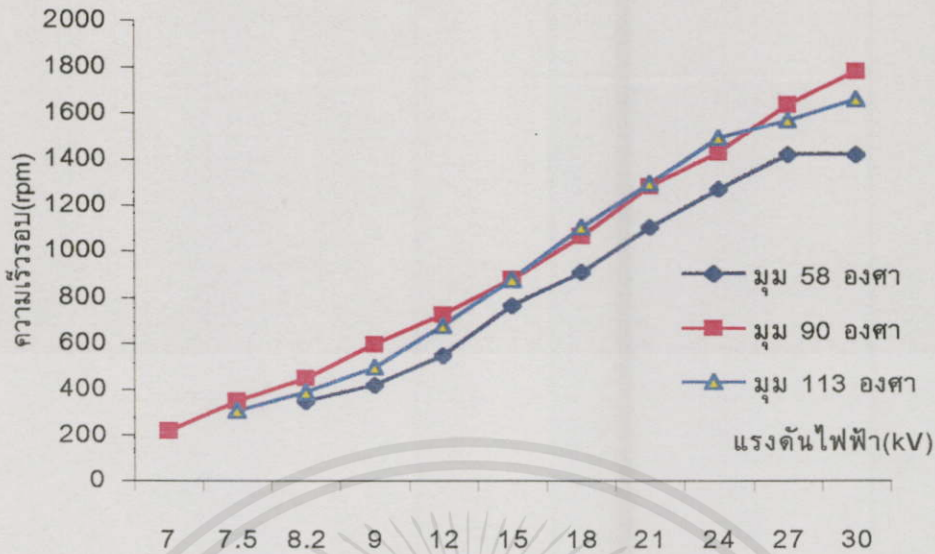
จากผลการทดลองตัวหมุนที่มีรัศมีความโค้ง 1.75 ซม. จะมีระดับแรงดันช่วงเริ่มแรกของการเริ่มหมุนต่ำสุดคือ 8 kV และมีความเร็วรอบหมุนสูงสุดคือ 2000 rpm ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะความโค้งของแกนตัวหมุนจะทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้าจะสูงสุดตรงจุดที่บริเวณยอดของปลายแหลม ซึ่งจะทำให้แรงลัพท์ที่กระทำกับตัวหมุนมากตาม

- มุมระหว่างปลายแหลมกับแกนของตัวหมุน

การทดลองในเรื่องมุมระหว่างปลายแหลมกับแกนของตัวหมุน โครงสร้างของแกนตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแกนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลาย 4.8 ซม. องศาความโค้งตรงส่วนปลายแกนคือ 58, 90 และ 113 องศา แสดงดังรูปที่ 4.16 จำนวนแกนตัวหมุน 2 แกน ระยะห่างปลายแหลมของตัวหมุนถึงกราวด์ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรครีนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังกล่าวรูปที่ 4.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 4.16 ตัวหมุนที่มีมุมความโค้งส่วนปลายต่างกัน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุนที่มีมุมความโค้งส่วนปลายต่างกัน

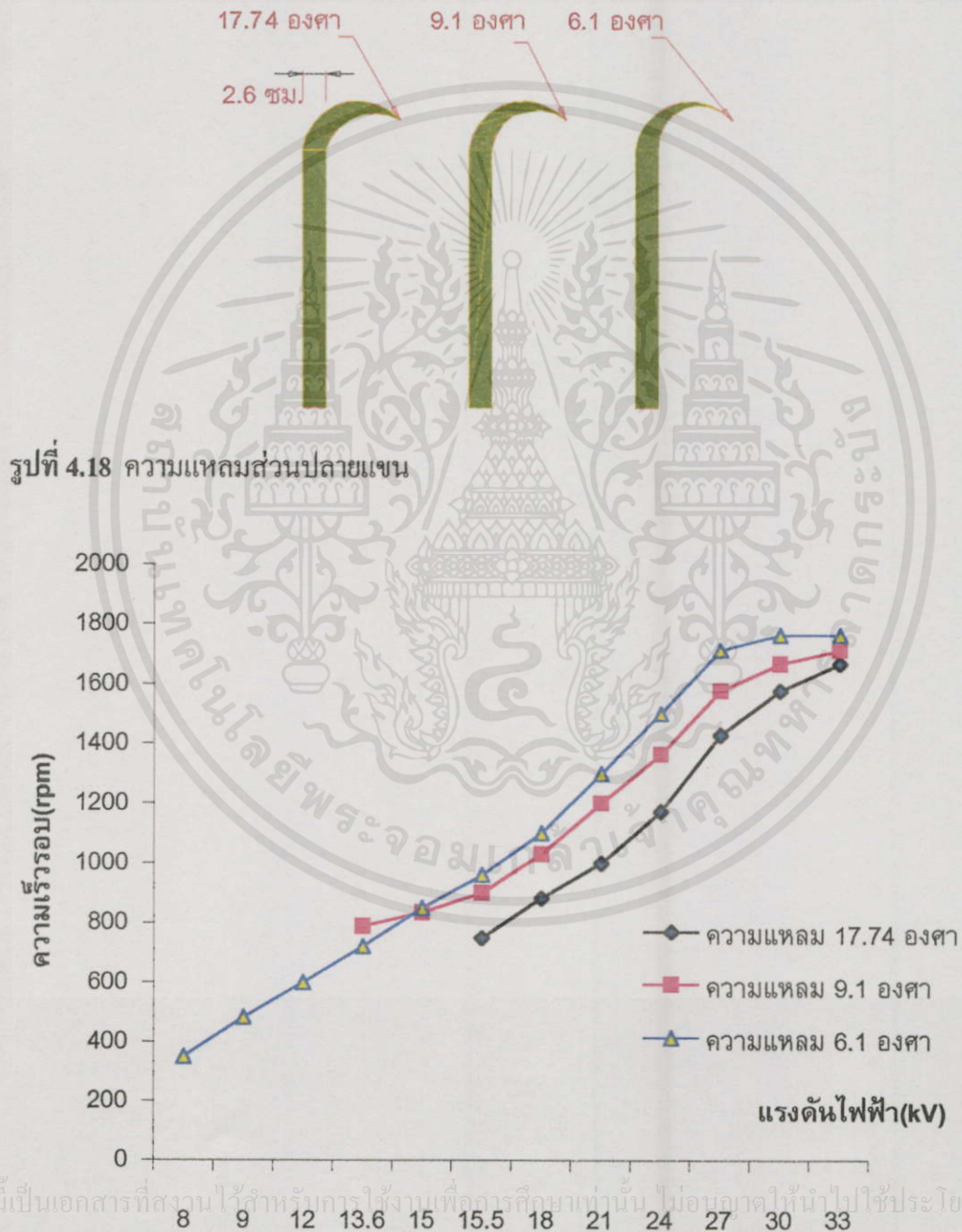
ตารางที่ 4.7 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.17

มุมความโค้ง แขน (องศา)	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบ เริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ย เมื่อแรงดันไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคดาวน์ (%) rpm
58	เพิ่มขึ้น 31.89%	เพิ่มขึ้น 8.08%	159.75 รอบ	ลดลง 20.26%
90	อ้างอิง(11.6)	อ้างอิง(730)	190.55 รอบ	อ้างอิง(1791)
113	เพิ่มขึ้น 3.45%	ลดลง 6.71 %	174 รอบ	ลดลง 6.93%

จากกราฟผลการทดลองแสดงสมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน จะเห็นว่า เป็นรูปแบบ โครงสร้างของตัวหมุนแขนปลายแหลม 2 แขน ซึ่งจะเห็นว่าที่มุมความโค้ง 90 องศา ความเร็วรอบที่มีลักษณะความเป็นเชิงเส้น, ความเร็วรอบเริ่มหมุนต่ำคือ 11.6 kV และมีความเร็วรอบ หมุนสูงสุดคือ 1791 rpm ทั้งนี้ถ้าพิจารณาที่ลักษณะการหมุนของตัวหมุนจะเห็นว่าแนวแรงที่จะทำให้ ตัวหมุนเคลื่อนที่ได้จะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับแขนตัวหมุน ดังนั้นเมื่อมุมของส่วนปลายแหลมเป็น องศา 90 องศา ก็จะเป็นการบังคับให้เกิดแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับแขนตัวหมุน นำไปใช้ประโยชน์ด้านการก้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ความแหลมส่วนปลายแหลม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การทดลองผลความแหลมส่วนปลายของแขนที่มีลักษณะ โครงสร้างเหมือนกัน เพื่อ ศึกษาค้นหาความแหลมของแขนที่ทำให้ความเร็วรอบหมุนกับแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนที่ดีที่สุด โดย

แขนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมของแขนยาว 4.5 ซม. ความแหลมของแขนพิจารณาเป็นมุมแหลมดังนี้ มุมแหลม 6.1, 9.1 และ 17.74 องศา แสดงดังรูปที่ 4.18 ระยะห่างระหว่างปลายแหลมของแขนกับกราวด์ 4.09 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรกระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) – ความเร็วรอบหมุน (rpm) ของความแหลมส่วนปลายแขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

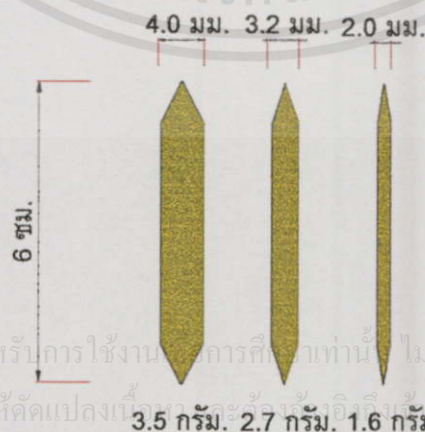
ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.19

ความ แหลม ของแกน (องศา)	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบ เริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบ เฉลี่ยเมื่อแรงดัน ไฟฟ้าเปลี่ยน แปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคควอร์น (%) rpm
6.1	อ้างอิง(8)	อ้างอิง(352)	205.17 รอบ	อ้างอิง(1764)
9.1	เพิ่มขึ้น 70.0 %	เพิ่มขึ้น 124%	166.8 รอบ	ลดลง 2.83%
17.74	เพิ่มขึ้น 93.75%	เพิ่มขึ้น 113%	48.57 รอบ	ลดลง 5.5%

จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่าตัวหมุนมุมแหลม 6.1 องศา ที่มีความแหลมมากมากที่สุดจะมีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนต่ำคือ 8 kV และความเร็วรอบหมุนสูงที่สุดคือ 1764 rpm ทั้งนี้เนื่องมาจากรูปร่างลักษณะของตัวหมุนจะทำให้ค่า  $\eta^*$  ของตัวหมุนมุมแหลม 6.1 องศา มีค่าที่สูงสุดจึงส่งผลให้ที่ระดับแรงดันเดียวกันจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดและทำให้เกิดแรงผลักตัวหมุนมากตามไปด้วย

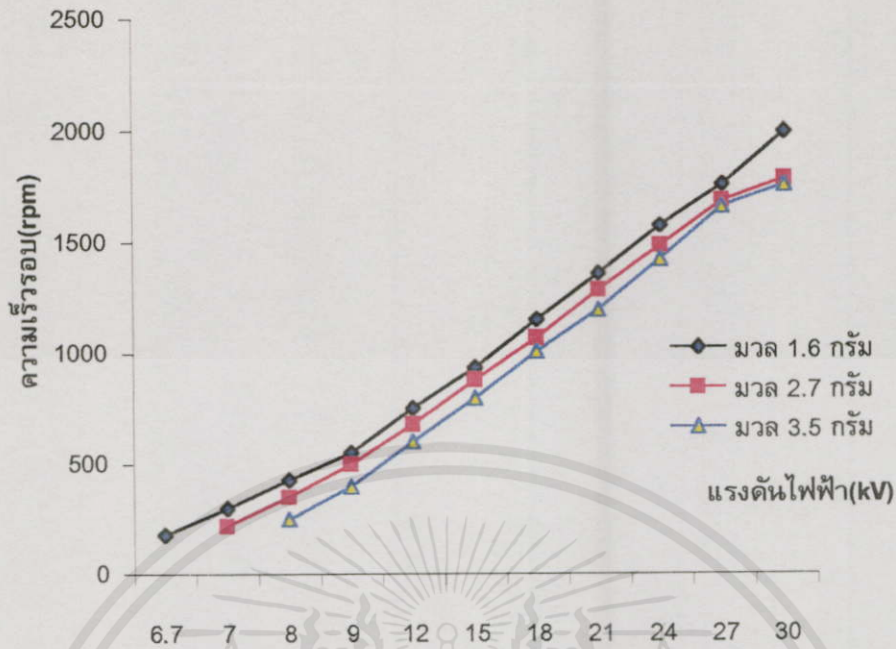
- น้ำหนักของแกนตัวหมุนต่างกัน

ในการทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเปรียบเทียบกับที่ขนาดแกนหมุนต่างกัน เพื่อพิจารณาหาขนาดของแกนตัวหมุนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนดีที่สุดโดยใช้ตัวหมุนที่มีความยาว 4.8 ซม. สำหรับขนาดของแกนตัวหมุนมีมวลเป็น 1.6, 2.7, และ 3.5 กรัม ดังรูปที่ 4.20 ลักษณะของ อิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหานี้เพื่อเผยแพร่ขึ้นบนสื่ออิเล็กทรอนิกส์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.20 น้ำหนักของแกนตัวหมุนต่างกัน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของน้ำหนักแกนตัวหมุนต่างกัน

ตารางที่ 4.9 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.21

น้ำหนักแกนตัวหมุน (กรัม)	แรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ยเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูงสุดก่อนเกิดการเบรคดาวน์ (%) rpm
3.5	เพิ่มขึ้น 19.4%	ลดลง 38.89%	212.6 รอบ	ลดลง 11.8%
2.7	เพิ่มขึ้น 4.47%	เพิ่มขึ้น 22.2%	181.8 รอบ	ลดลง 10.45%
1.6	อ้างอิง (6.7)	อ้างอิง (180)	196.4 รอบ	อ้างอิง(2000)

จากผลการทดลองรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน จะพบว่าแกนมวล 1.6 กรัม ที่มีมวลน้อยที่สุดจะมีความเร็วรอบสูงสุดคือ 2000 rpm และมีระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำสุดคือ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 6.7 kV ทั้งนี้เพราะเมื่อน้ำหนักน้อยจะทำให้แรงกดที่จุดหมุนน้อยและความฝืดก็จะลดลง

#### - ชนิดของตัวหมุน

ในการทดลองเปรียบเทียบชนิดตัวหมุน ได้แบ่งชนิดของแกนตัวหมุนออกเป็น 2 แบบ คือ ตัวหมุนชนิดเบริงน้ำมันและแกนตัวหมุนชนิดเข็ม โดยแกนตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง



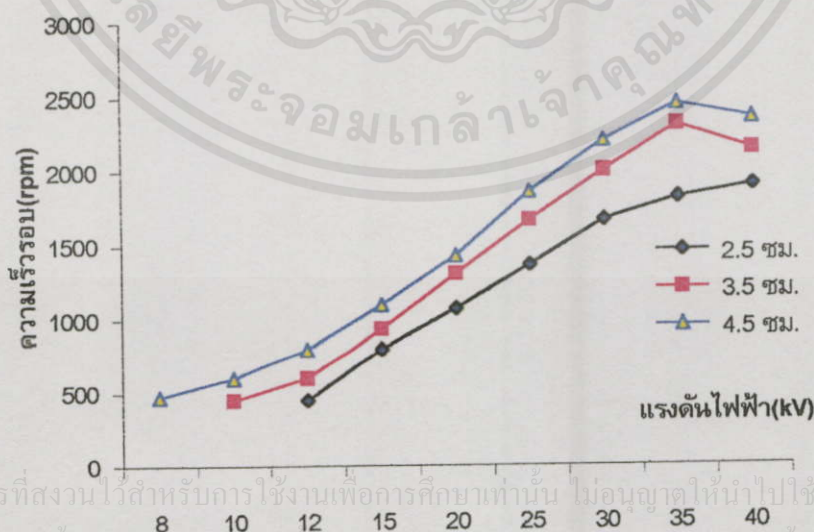
ตารางที่ 4.10 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.23

ชนิดของแกน ตัวหมุน	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่ม หมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ย เมื่อแรงดันไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคควาน์ (%) rpm
ชนิดเข็ม	ลดลง 44.88%	เพิ่มขึ้น 11.11%	170.83 รอบ	เพิ่มขึ้น 28%
ชนิดแปรง	อ้างอิง(12.7)	อ้างอิง(315)	173.33 รอบ	อ้างอิง(1875)

จากผลการทดลองจะพบว่าตัวหมุนชนิดเข็มจะมีความเร็วรอบหมุนสูงที่ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเดียวกันเช่นที่ ระดับแรงดันไฟฟ้า 18 kV ตัวหมุนแบบเข็มกับตัวหมุนแบบแปรงจะมีความเร็วรอบหมุน 1280 rpm และ 650 rpm ตามลำดับ ส่วนระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนตัวหมุนแบบเข็มต่ำจะมีค่าต่ำกว่าคือเริ่มหมุนที่ 7 kV ทั้งนี้เพราะมีจุดสัมผัสระหว่างส่วนตัวหมุนกับส่วนที่อยู่กับที่น้อยมากทำให้ความฝืดก็จะลดตาม

- ขนาดสเตเตอร์ต่างกัน

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ ซึ่งทำการเปรียบเทียบที่ขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน โดยแบ่งเป็น 3 ขนาด คือ 2.5, 3.5, 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม.มีความยาว 6 ซม. เพื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้ในการพิจารณาเลือกขนาดสเตเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะพัฒนาให้มีความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนดีที่สุด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน (rpm)

ของ ขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน

ตารางที่ 4.11 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.24

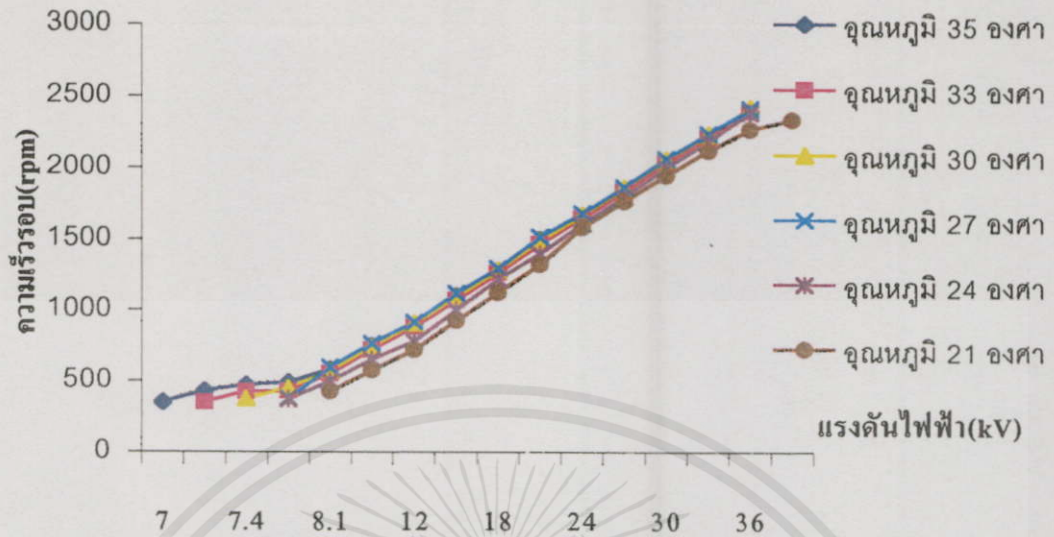
ขนาดความกว้าง ของสเตเตอร์ (cm.)	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบ เริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบ เฉลี่ยเมื่อแรงดัน ไฟฟ้าเปลี่ยน แปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคควาน์ (%) rpm
2.50	อ้างอิง(12)	อ้างอิง(450)	220 รอบ	อ้างอิง(1900)
3.5	ลดลง 16.67%	เพิ่มขึ้น 0.0%	343 รอบ	เพิ่มขึ้น 12.79%
4.5	ลดลง 33.33%	เพิ่มขึ้น 4.46%	362 รอบ	เพิ่มขึ้น 23.89%

จากผลการทดลองจะพบว่าขนาดความกว้างของสเตเตอร์ที่มีขนาดกว้างสุด (4.5 cm) จะมีแรงดันเริ่มหมุนต่ำคือเริ่มหมุนที่ 8 kV และมีความเร็วรอบสูงสุดคือ 2450 rpm ที่ระดับแรงดันเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่าสเตเตอร์ที่มีความกว้างมากจะส่งผลให้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเกิดขบวนการ ไอออไนเซชันมากขึ้นทำให้แรงที่กระทำกับอิเล็กโตรดตัวหมุนมากทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำและมีความเร็วรอบสูง

#### 4.2.3 ความเร็วรอบหมุนที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลองความสัมพันธ์ของสมบัติความเร็วรอบหมุนที่อุณหภูมิต่างๆกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเปรียบเทียบกันโดยใช้ลักษณะ โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าเหมือนกัน โครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลม โค้งงอแกนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแกนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 21, 24, 27, 30, 33, 35 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองที่บรรยากาศปกติ และระยะปลายแหลมถึงกราวด์ มีค่าระยะแก๊ป 4.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.25

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิ จะเห็นว่าความเร็วรอบจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  โดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะมีแรงดันเริ่มหมุนที่ต่ำสุดคือเริ่มหมุนที่ 7 kV และความเร็วรอบหมุนสูงสุดคือ 2400 rpm ที่ระดับ แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน ทั้งนี้เพราะระยะอิสระเฉลี่ยของก๊าซ ( $\lambda$ ) ซึ่งเป็นตัวกำหนดพลังงานจลน์ที่เกิดจากการชนกันของโมเลกุลของก๊าซที่จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพราะความหนาแน่นของโมเลกุลของก๊าซ (N) ขึ้นอยู่กับแอมเพดเตอร์นี้โดย N เป็นส่วนกลับกับอุณหภูมิ เป็นผลให้ที่อุณหภูมิต่ำแกนตัวหมุนจึงมีแรงดันเริ่มหมุนที่สูงและแรงดันก่อนเกิดการเบรคควาน์จึงมีค่ามากกว่าอุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm) ของตัวหมุน 4.0 ซม.ที่ขุดหภูมิต่างกัน

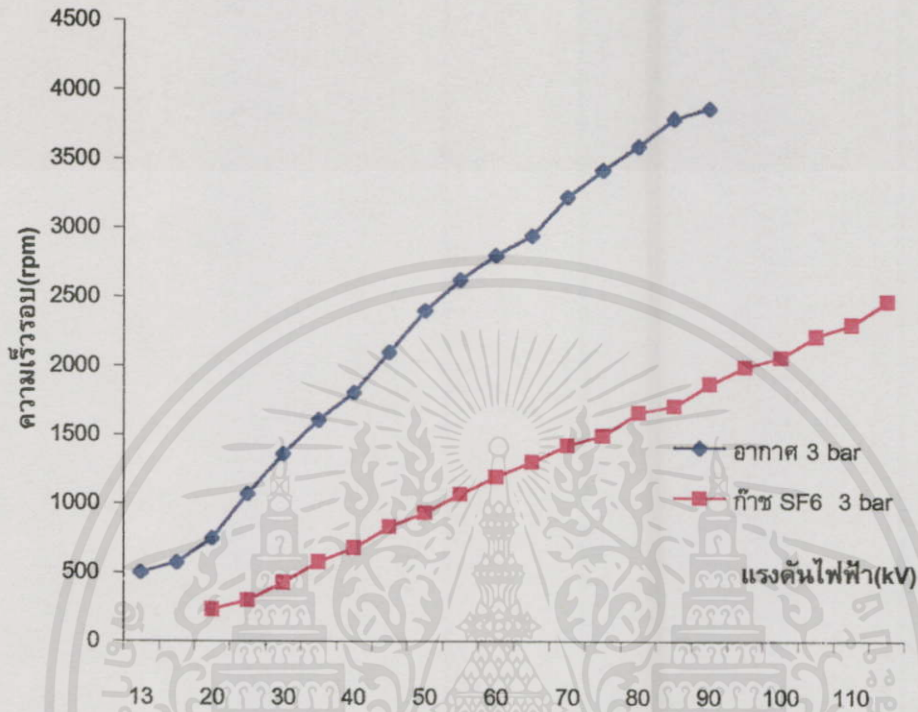
ตารางที่ 4.12 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.25

ขุดหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แรงดันไฟฟ้า เริ่มหมุน (%) kV	ความเร็วรอบ เริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบ เฉลี่ยเมื่อแรงดัน ไฟฟ้าเปลี่ยน แปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูงสุด ก่อนเกิดการเบรค ดาวน์ (%) rpm
21	เพิ่มขึ้น 8 %	เพิ่มขึ้น 13.3 %	188 รอบ	ลดลง 3.14 %
24	เพิ่มขึ้น 0 %	ลดลง 0.53 %	193 รอบ	ลดลง 1.12 %
27	อ้างอิง (7.5)	อ้างอิง (375)	183 รอบ	อ้างอิง (2416)
30	ลดลง 1.3%	ลดลง 0 %	186 รอบ	เพิ่มขึ้น 0.124 %
33	ลดลง 4 %	ลดลง 6 %	186 รอบ	เพิ่มขึ้น 0.828 %
35	ลดลง 6 %	ลดลง 6 %	183 รอบ	เพิ่มขึ้น 0.662 %

#### 4.2.4 ความเร็วรอบหมุนที่ก้าซต่างๆ

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนที่ก้าซต่างๆกับแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อน  
ไม่ว่ากรลแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ป้อนเป็น DC ลักษณะ โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าเดียวกัน โดยมีโครงสร้าง  
ของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลมโค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม.  
ความยาวของแกนตัวหมุน 3.0 ซม. และระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแก๊ป 5.6 ซม. ลักษณะ

ของอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลาตัวหมุนทำด้วย  
 ลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดัง  
 รูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV) – ความเร็วรอบหมุน(rpm)  
 ของตัวหมุน 3ขม. เปรียบเทียบอากาศและก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 3 bar

ตารางที่ 4.13 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.26

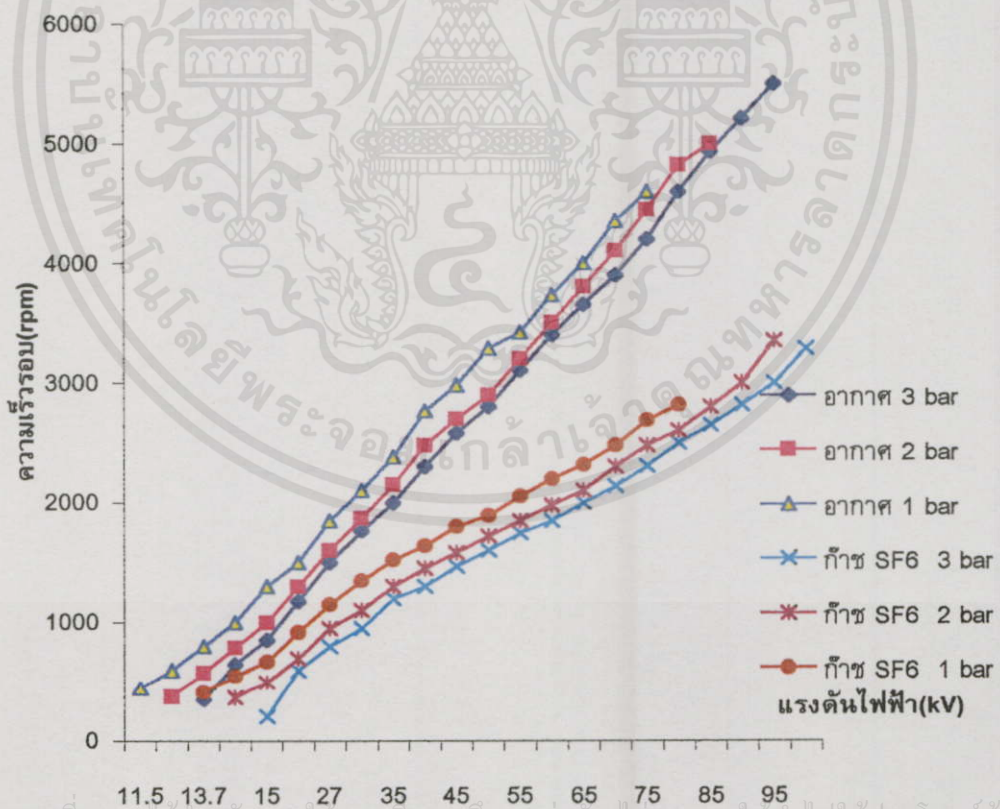
แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน	แรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่มหมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ยเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูงสุดก่อนเกิดการเบรคดาว์น (%) rpm
SF <sub>6</sub>	อ้างอิง(20)	อ้างอิง(230)	118.16 รอบ	อ้างอิง(2475)
อากาศ	ลดลง 35%	เพิ่มขึ้น 117.39%	177.63 รอบ	เพิ่มขึ้น 36.13%

เอกสารนี้เป็นเอกสารทดลองเปรียบเทียบก๊าซอากาศ และ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 3 bar จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการใช้  
 ไม่ว่าการใช้แรงดันเริ่มหมุนที่อากาศจะต่ำกว่าก๊าซ SF<sub>6</sub> คือเริ่มหมุนที่ 20 kV และมีความเร็วรอบที่สูงกว่า  
 คือความเร็วรอบหมุน อากาศกับก๊าซ SF<sub>6</sub> จะมีค่า 3875 rpm และ 2475 rpm ตามลำดับ แต่ค่าแรงดัน

เบรคความถี่ของอากาศจะมีค่าต่ำกว่าก๊าซ SF<sub>6</sub> คือ 90 kV และ 115 kV ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของก๊าซ SF<sub>6</sub> ซึ่งเป็นก๊าซที่ที่เป็นฉนวนที่ดีซึ่งก๊าซ SF<sub>6</sub> จะทำหน้าที่ในการดักจับอิเล็กตรอนและยึดไว้แน่นกับ โมเลกุลของก๊าซ SF<sub>6</sub> จะเหลืออยู่เพียงไอออนลบทำให้ SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติเป็น Electronegative gas ดังนั้นต้องป้อนพลังงานที่มีค่าสูงมากเพื่อทำให้เกิดขบวนการไอออไนเซชันขึ้นจึงเป็นไปได้ว่าแรงดันเริ่มหมุนของ SF<sub>6</sub> จึงมีค่าสูง ความเร็วรอบหมุนต่ำกว่าอากาศและแรงดันก่อนเกิดการเบรคความถี่มีค่าสูง

#### 4.2.5 ความเร็วรอบหมุนที่ความดันต่างๆ

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหมุนที่ความดันต่างๆกัน แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนใช้เป็น DC ลักษณะโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าเดียวกัน โดยมีโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลมโค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแกนตัวหมุน 2.0 ซม. และระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะเก็บ 6.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด" รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า(kV) - ความเร็วรอบหมุน(rpm) รังที่มีการนำไปใช้  
ของตัวหมุนยาว 2.0 เซนติเมตร ที่ความดัน และชนิดก๊าซต่างกัน

ตารางที่ 4.14 วิเคราะห์ผลการทดลองของรูปที่ 4.27

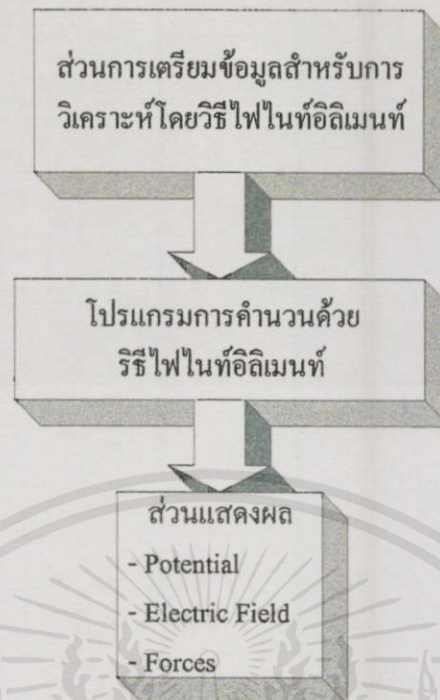
ความดัน (pressure) bar	แรงดันไฟฟ้าเริ่ม หมุน (%) kV	ความเร็วรอบเริ่ม หมุน (%) rpm	ความเร็วรอบเฉลี่ย เมื่อแรงดันไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง 5 kV	ความเร็วรอบสูง สุดก่อนเกิดการ เบรคควาน์ (%) rpm
Air 3 bar	เพิ่มขึ้น 19.13%	ลดลง 20.63%	286 รอบ	เพิ่มขึ้น 19.56%
Air 2 bar	เพิ่มขึ้น 3.04%	ลดลง 14.97%	320 รอบ	เพิ่มขึ้น 8.69%
Air 1 bar	อ้างอิง(11.5)	อ้างอิง(441)	298 รอบ	อ้างอิง(4600)
SF <sub>6</sub> 3 bar	เพิ่มขึ้น 31.30%	ลดลง 52.83%	139 รอบ	ลดลง 28.63%
SF <sub>6</sub> 2 bar	เพิ่มขึ้น 21.74%	ลดลง 16.78%	155 รอบ	ลดลง 27.22%
SF <sub>6</sub> 1 bar	เพิ่มขึ้น 3.04%	ลดลง 6.57%	128 รอบ	ลดลง 38.78%

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบความแตกต่างของความดัน (อากาศ) จะเห็นว่าที่ความดันก๊าซต่ำสุด ( 1 bar ) จะมีแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำคือเริ่มหมุนที่ 11.5 kV และความเร็วรอบหมุนสูงกว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน เช่น ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 35 kV ความเร็วรอบหมุนของก๊าซอากาศความดัน 1, 2 และ 3 bar จะมีค่าความเร็วรอบ 2380, 2150 และ 2000 rpm ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะระยะอิสระเฉลี่ยของก๊าซ( $\lambda$ )ซึ่งเป็นตัวกำหนดพลังงานจลน์ที่เกิดจากการชนกันของโมเลกุลของก๊าซที่จะทำให้เกิดการ ไอออไนเซชันขึ้นอยู่กับความดันเพราะความหนาแน่นของโมเลกุลของก๊าซ (N) ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์นี้ โดย N เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดัน ดังนั้นเมื่อความดัน (pressure) เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานจลน์ที่กระทำต่อโมเลกุลทำได้อำนาจทำให้เกิด ไอออไนเซชันได้ช้า

#### 4.3 ทิศทางและขนาดของแรงที่ทำให้ไอเล็กโตรดตัวหมุนเคลื่อนที่

ในโครงการนี้ได้นำวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ห่ออกแบบโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าโดยจะเป็นการหาการกระจายของระดับแรงดันที่ป้อน, ทิศทางของแนวแรงและขนาดของแรงที่กระทำบนไอเล็กโตรดตัวหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้า สมการที่นำมาใช้จะเป็นแบบ 2 มิติและไม่คำนึงถึงผลของประจุค้ำ ( $\rho_s=0$ ) สามารถแสดงบล็อคโคอะแกรมของโปรแกรมที่สร้างขึ้นได้ดังรูปที่ 4.28

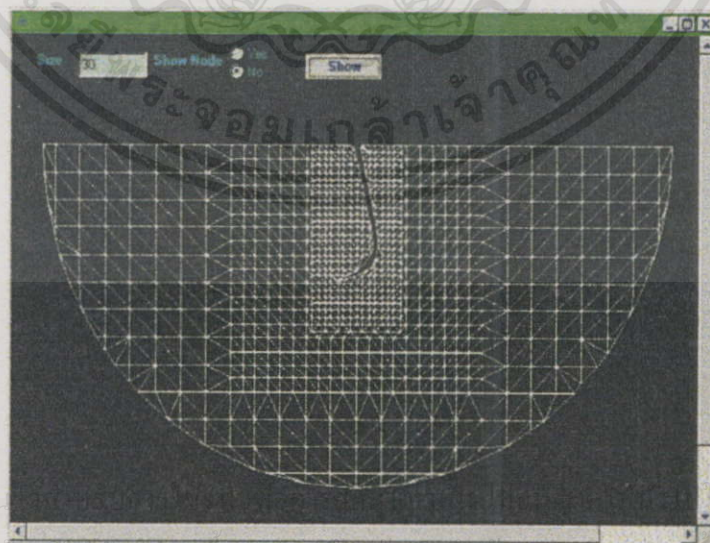
ในการใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ห่ออกแบบโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าได้ทำการแบ่งรูปมอเตอร์สนามไฟฟ้ามาพิจารณาเพียงครึ่งเดียวโดยใช้หลักการแกนสมมาตรกัน(Symmetry)



รูปที่ 4.28 บล็อกโคอะแกรมของโปรแกรมคำนวณ วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4.3.1 ลักษณะการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

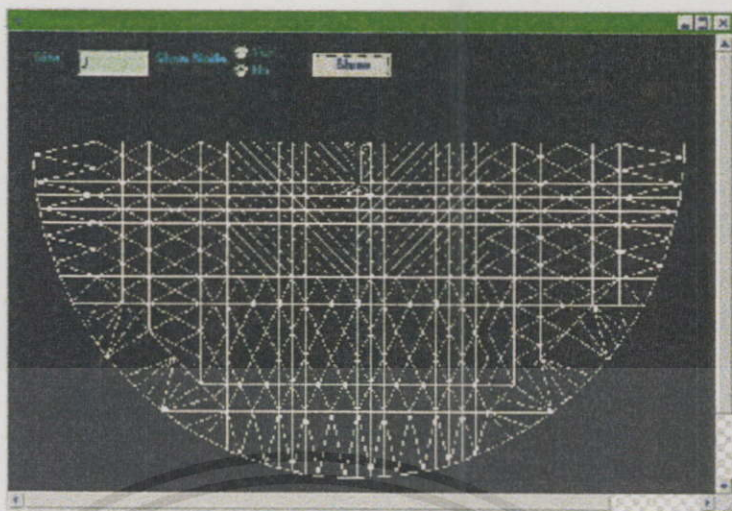
ในการวิเคราะห์หาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าภายในตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อออกแบบให้เหมาะสมกับช่วงการใช้งาน ได้แบ่งโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าออกเป็น โหนดและเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังรูปที่ 4.29 โดยช่วงที่ใช้งานได้แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก 0 – 50 kV , ช่วงที่สอง 50 – 115 kV ดังนั้น โครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าช่วงแรกออกเป็น 559 โหนด 1009 เอลิเมนต์ ช่วงที่สองออกเป็น 914 โหนด 1698 เอลิเมนต์



รูปที่ 4.29 (ก) การแบ่งโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าช่วงที่แรกเพื่อวิเคราะห์ด้วย FEM

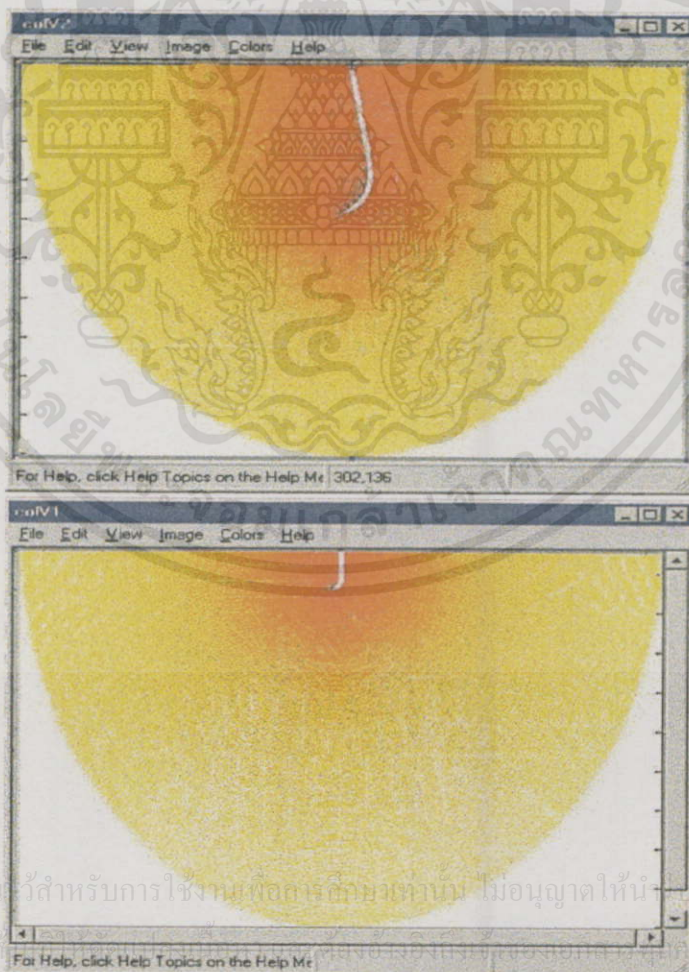
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลไปโดยไม่แจ้งขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 (ข) การแบ่งโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าช่วงที่สองเพื่อวิเคราะห์ด้วยFEM

ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์หาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าภายในตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ป้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.30

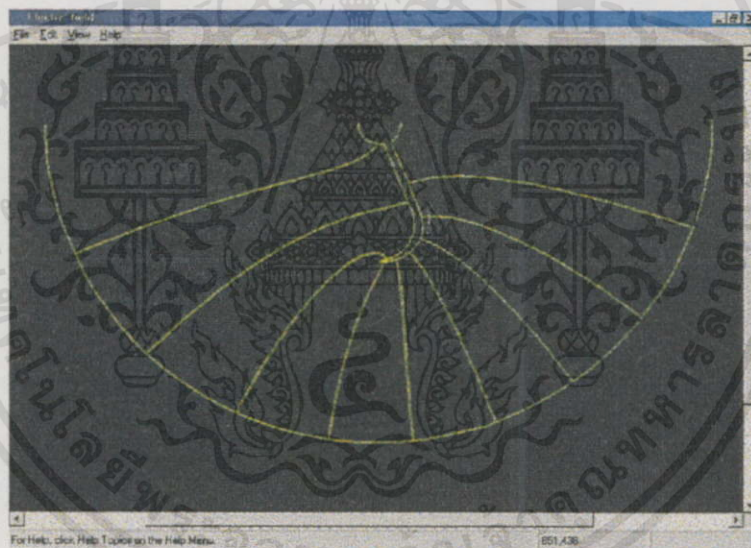


รูปที่ 4.30 การกระจายของระดับแรงดันในมอเตอร์สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้ผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งผู้เผยแพร่เอกสารนี้จะไม่รับผิดชอบต่อการใช้งานที่มิได้มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ทิศทางแนวแรงที่มากกระทำที่อิเล็กโตรดตัวหมุน

จากผลลัพธ์ของการหาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้ในการหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้า [5] และทิศทางของแนวแรงที่กระทำบนอิเล็กโตรดตัวหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงทิศทางของแนวแรงได้ดังรูปที่ 4.31 ส่วนจากผลลัพธ์ของความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าจะถูกนำมาใช้ในหาค่า  $\eta^*$  เพื่อใช้ในการออกแบบ จากต้นแบบของโครงการนี้เป็นมอเตอร์สนามไฟฟ้า 2 แชนที่ต้องการใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงช่วง 0 – 50 kV ซึ่งมีขนาดของความยาวแกน 4 cm ระยะเก็บ  $d = 6$  cm (ระยะจากปลายแหลมแกนมอเตอร์ไปยังสเตเตอร์) เส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์ = 20 cm และช่วง 50 – 115 kV ซึ่งมีขนาดของความยาวแกน 1.5 cm ระยะ  $d = 8.5$  cm (ระยะจากปลายแหลมแกนมอเตอร์ไปยังสเตเตอร์) เส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์ = 20 cm เมื่อทำการคำนวณด้วยโปรแกรมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ค่าคุณสมบัติของอิเล็กโตรด  $\eta^* = 0.1125$  ( $E_{av}/E_{max}$ ) โดยฉนวนอากาศ ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์  $E_b = 25$  kV/cm



รูปที่ 4.31 ทิศทางของแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้า

#### 4.3.3 ขนาดแรงที่มากกระทำที่อิเล็กโตรดตัวหมุน

การหาขนาดแรงที่มากกระทำที่อิเล็กโตรดตัวหมุนในโครงการจะใช้วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนำผลลัพธ์ที่จากการคำนวณหาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าและความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งใช้สมการตาม [7] ในการหาของแรงจะเป็นการหาแรงลัพธ์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าซึ่งมากกระทำบนอิเล็กโตรดตัวหมุนเพื่อทำการปรับรูปทรงของอิเล็กโตรดตัวหมุนในส่วนมุมโค้งของแกนปลายแหลมให้เกิดแรงลัพธ์สูงสุด ซึ่งผลที่ตามมาก็จะทำให้ได้ความเร็วรอบสูงสุด สำหรับโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีขนาดของความยาวแกน 5 cm ระยะ  $d = 5$  cm (ระยะจากปลายแหลมแกนมอเตอร์ไปยังสเตเตอร์)

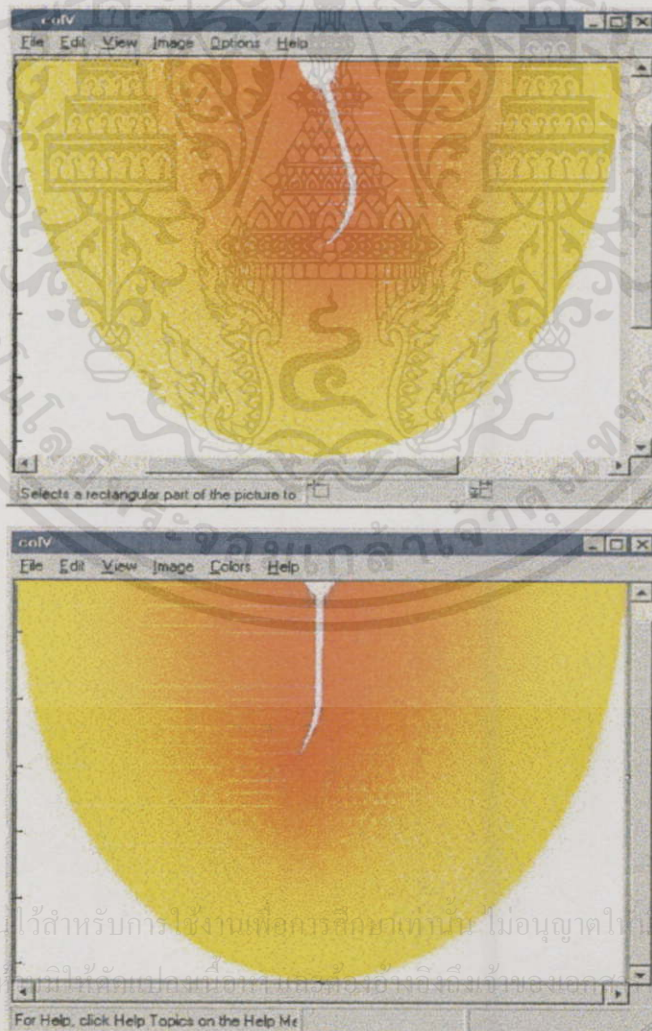
เส้นผ่าศูนย์กลางของ สเตเตอร์ = 20 cm มุมโค้งของแกนปลายแหลมที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  แสดงดังรูปตามลำดับผลจากการคำนวณแรงลัพท์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าซึ่งมากระทำบนอิเล็กโตรดตัวหมุนเมื่อเปลี่ยนมุมโค้งของแกนปลายแหลม ที่แรงดันไฟฟ้าป้อนให้มอเตอร์ 20 kV สามารถแสดงได้ดังนี้

แรงลัพท์เมื่อมุม โค้งของแกนปลายแหลม  $90^\circ$  เท่ากับ  $325.33 \angle 50.3^\circ \text{ N}$

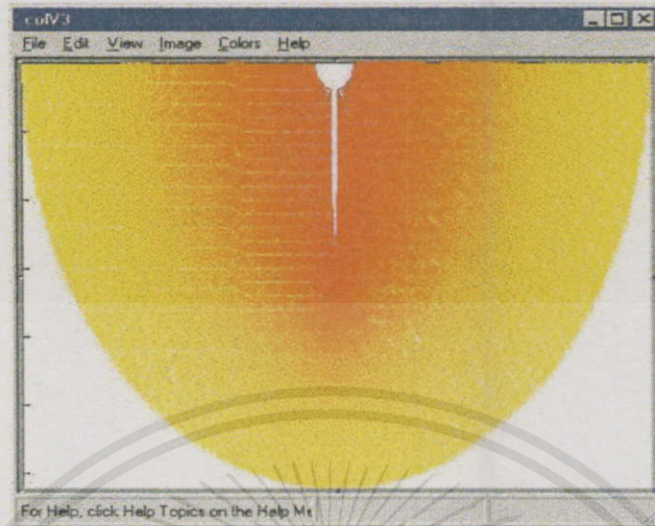
แรงลัพท์เมื่อมุม โค้งของแกนปลายแหลม  $135^\circ$  เท่ากับ  $212.26 \angle 34.1^\circ \text{ N}$

แรงลัพท์เมื่อมุม โค้งของแกนปลายแหลม  $180^\circ$  เท่ากับ  $103.74 \angle 77.4^\circ \text{ N}$

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าแรงลัพท์เมื่อมุม โค้งของแกนปลายแหลมเป็น  $90^\circ$  จะมีค่ามากที่สุดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าค่าเดียวกัน ซึ่งถ้าสังเกตจากลักษณะการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.32 ก็จะพบว่าส่วนที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงจะมีลักษณะการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรมากที่สุด ดังนั้นมุม โค้งของแกนปลายแหลม  $90^\circ$  จะมีความเร็วรอบสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้าค่าเดียวกันซึ่งเหมาะที่จะใช้ในชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 4.32 มุม โค้งของแกนปลายแหลม  $90^\circ$



รูปที่ 4.33 มุมโค้งงอของแขนปลายแหลม  $135^{\circ}$

รูปที่ 4.34 มุมโค้งงอของแขนปลายแหลม  $180^{\circ}$

#### 4.4 บทสรุปและวิเคราะห์ผล

คุณลักษณะของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกับชุดวัดแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอ คือ จะต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV)กับความเร็วรอบหมุน(rpm)เป็นเชิงเส้นที่มีช่วงกว้าง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหมุนต่อการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ซึ่งจากการทดสอบมอเตอร์สนามไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ทั้งชนิดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โดรคตัวหมุน ระดับความดันของก๊าซ และชนิดของก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในเป็นต้น ซึ่งพอจะสรุปผลจากปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มาออกแบบโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่สามารถใช้ชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสมที่สุดได้ดังต่อไปนี้

1. อิเล็กทรอนิกส์ ควรจะเป็นกว้างที่สุดเพื่อจะได้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดและมีความเร็วรอบสูงสุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.24 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน โดยมีข้อมูลผลการทดลองแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข ตารางที่ ผ.4.24

2. อิเล็กทรอนิกส์ ควรเป็นตัวหมุนแบบแกนแข็ง มีแกน 2 แกน มุมระหว่างปลายแหลมกับแกนเป็น  $90$  องศา รัศมีส่วนโค้งกว้างๆ น้ำหนักและมุมปลายแหลมน้อยที่สุดเพื่อจะได้มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV)กับความเร็วรอบหมุน(rpm)เป็นเชิงเส้นที่มีช่วงกว้าง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหมุนต่อการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.23 ,4.7 ,4.17 ,4.15 ,4.21 และ 4.19 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของตัวหมุนแบบแกนต่างกัน จำนวนแขนต่างกัน มุมระหว่างปลายแหลมกับแขนต่างกัน รัศมีส่วนโค้งต่างกัน น้ำหนักต่างกัน มุมปลายแหลมต่างกัน ตามลำดับ โดยมีข้อมูลผลการทดลองแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข ตารางที่ ผ.4.23, ผ.4.7, ผ.4.17, ผ.4.15, ผ.4.21 และ ผ.4.19 ตามลำดับ

3. ชนิดฉนวนก๊าซ สำหรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าช่วงแรงดันต่ำควรใช้ฉนวนอากาศเพราะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำกว่า ราคาถูกกว่าและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหมุนต่อการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ส่วนมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าช่วงแรงดันสูงควรใช้ฉนวน SF<sub>6</sub> เพราะจะทำให้มอเตอร์สนามไฟฟ้ามีขนาดเล็กกว่าฉนวนอากาศเพราะค่าความคงทนฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า ซึ่งสามารถพิจารณาจากผลการทดลองในรูปที่ 4.26 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV)กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของฉนวนก๊าซต่างกันโดยข้อมูลผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ข ตารางที่ ผ.4.26

4. ความดันของฉนวนก๊าซ สำหรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าช่วงแรงดันต่ำควรใช้ความดันของฉนวนก๊าซต่ำเพราะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำและระดับแรงดันไฟฟ้าเบรคความดันต่ำ ส่วนมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าช่วงแรงดันสูงควรใช้ความดันของฉนวนก๊าซสูงเพราะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนสูงและระดับแรงดันไฟฟ้าเบรคความดันสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.27 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของความดันของฉนวนก๊าซต่างกันโดยมีข้อมูลผลการทดลองแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข ตารางที่ ผ.4.27

5. ความยาวแขนตัวหมุน สำหรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าช่วงแรงดันต่ำควรใช้ความยาวแขนมากเพราะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนต่ำและระดับแรงดันไฟฟ้าเบรคความดันต่ำ ส่วนมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าช่วงแรงดันสูงควรใช้ความยาวแขนน้อยเพราะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มหมุนสูงและระดับแรงดันไฟฟ้าเบรคความดันสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของความยาวแขนตัวหมุนต่างกันโดยมีข้อมูลผลการทดลองแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข ตารางที่ ผ.4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า

### 5.1 บทนำ

ในการพัฒนาชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้านั้น มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

1. มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง
2. ส่วนประมวลผลและแสดงผล

สำหรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงนั้น ต้องการคุณสมบัติความสัมพันธ์ของความถี่รอบการหมุนกับระดับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้เป็นอย่างยิ่ง สำหรับส่วนชุดประมวลผลกับส่วนแสดงผล จะทำหน้าที่ในการวัดความถี่รอบการหมุน แล้วแสดงผลออกเป็นแรงดันไฟฟ้า

### 5.2 โครงสร้างของชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง

#### 5.2.1 มอเตอร์สนามไฟฟ้า

สำหรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่สร้างขึ้นนี้ถือว่าเป็นต้นแบบและจะมีส่วนประกอบต่างๆ ของตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าดังนี้

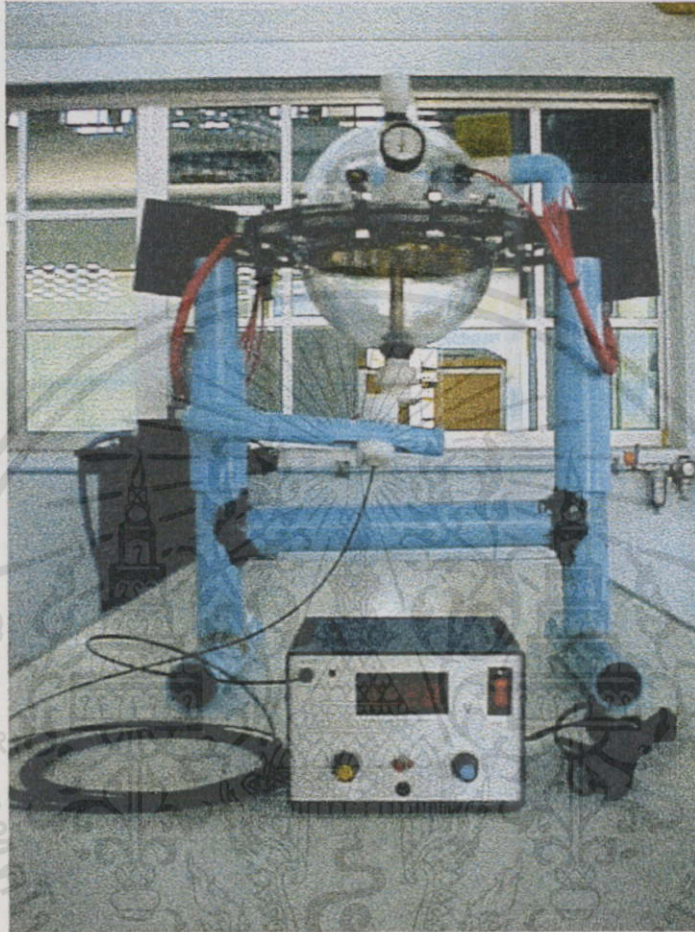
1. ตัวถัง
2. อิเล็กโตรดตัวหมุน
3. อิเล็กโตรดระนาบ
4. ฐานรองรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง

##### 5.2.1.1 ตัวถัง

ในการออกแบบมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาถึงคือ

- วัสดุที่ใช้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นไฟฟ้าแรงดันสูงจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เป็นฉนวนอย่างดี และมีความแข็งแรงคงทนสูง จำพวกพลาสติก แก้ว หรือ เบกาไลต์ เป็นต้น
- การวัดความเร็ว เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ที่ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยการตรวจนับแสงฉะนั้นวัสดุที่ใช้ทำตัวถังมอเตอร์จึงควรมีคุณสมบัติที่มีความโปร่งใส
- รูปทรง เนื่องจากจุดมุ่งหมายหลักของการสร้างตัวถังก็เพื่อที่จะสามารถควบคุมสถานะแวดล้อมต่างๆ ได้ โดยที่สามารถควบคุมความดันก๊าซภายใน และตัวถังนี้ จะต้องทนต่อความกดดันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้เกิดเปลวไฟ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้จากภายในและภายนอก โดยไม่เกิดความเสียหายในขณะที่ภายในเป็นสุญญากาศรูปทรงที่เหมาะสมคือทรงกลม

ที่กล่าวมาเป็นเพียงองค์ประกอบหลักๆ ที่สำคัญในการออกแบบสร้างตัวถังมอเตอร์  
สนามไฟฟ้าแรงดันสูง จากคุณสมบัติที่ต้องการดังกล่าวจึงสามารถสร้างตัวถังมอเตอร์สนามไฟฟ้า  
แรงดันสูงได้ดังรูปที่ 5.1



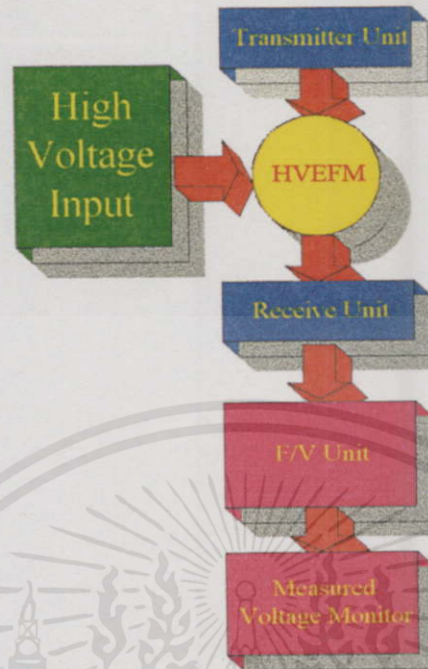
รูปที่ 5.1 ชุดเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า

โดยมีรายละเอียดดังนี้

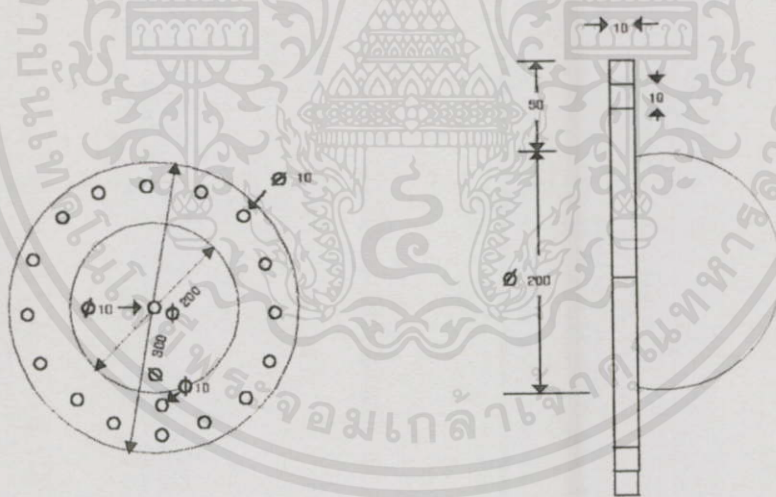
- วัสดุที่ใช้เป็นพลาสติกใส และ หนาประเภทอะคริลิก มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร
- ขึ้นรูปเป็นครึ่งวงกลมสองใบมาประกอบเข้าเป็นรูปทรงกลม โดยแต่ละครึ่งวงกลมจะมีปีก  
โคครอบมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกยาว 30 เซนติเมตร
- เจาะรูที่ปีกของครึ่งวงกลมทั้งสองโคครอบ สำหรับใส่สกรูยึดครึ่งวงกลมทั้งสอง

- เจาะรูตรงกลางของครึ่งวงกลมทั้งสองใบ เพื่อไว้สำหรับยึดแกนเพลาลูกเบี้ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูประกอบเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งมิฉะนั้นไปใช้  
ความดันของก๊าซ ที่บรรจุอยู่ภายในและติด Valve สำหรับทำสุญญากาศและอัดก๊าซเข้าไปภายใน  
ประกอบเป็นชุดเครื่องวัดแรงดัน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.2 โฟซาร์ทของชุดเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า



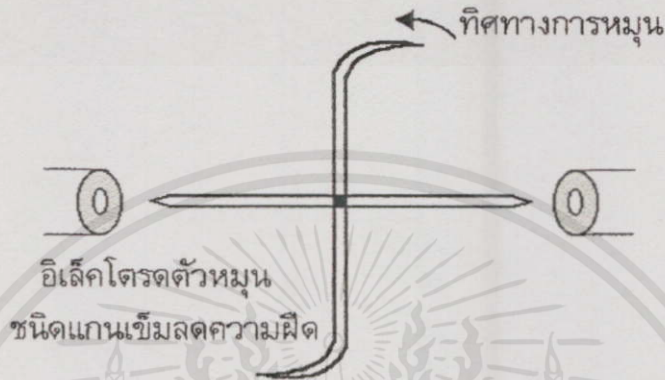
รูปที่ 5.3 ตัวตั้งส่วนครึ่งวงกลมของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

#### 5.2.1.2 อิเล็กโทรดตัวหมุน

อิเล็กโทรดตัวหมุนแสดงไว้ในรูปที่ 5.4 มีรายละเอียดดังนี้

- โลหะที่ใช้เป็นเส้นลวดทองเหลือง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร
- โครงสร้างของตัวหมุนเป็นแขนปลายแหลมและโค้งงอทำมุม 90 องศาที่จุดหมุนทั้งสองข้าง

- ขนาดความยาวของแขนตัวหมุน วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมมี 2 ขนาดคือ 40 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร
- ปลายแหลมโค้งมนทั้งสองขึ้นยึดติดกันกับแกนกลางที่มีลักษณะคล้ายเข็ม
- มีแผ่นกลมเล็กๆ ทำจากทองเหลืองที่ผิวหน้าคว้านเป็นหลุมกลมเล็กๆ สำหรับจับประคอง อิเล็กโตรดตัวหมุน ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ลักษณะอิเล็กโตรดตัวหมุนแบบแกนเข็ม

#### 5.2.1.3 อิเล็กโตรดระนาบ

โครงสร้างอิเล็กโตรดระนาบที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่นระนาบวงกลมวางตัวยึดติดกับตัวถังมอเตอร์ด้านใน มีรายละเอียดดังนี้

- โลหะที่ใช้เป็นแผ่นทองเหลืองความกว้าง 30 มิลลิเมตร
- เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดให้เป็นวงแหวนอยู่ตรงกลางภายในตัวถังมอเตอร์สนามไฟฟ้า
- ทำการเชื่อมต่อสายกราวด์จากวงแหวนนี้
- มีระยะห่างระหว่างปลายแหลมกับผิวของระนาบเท่ากันตลอดตามแนวการหมุน

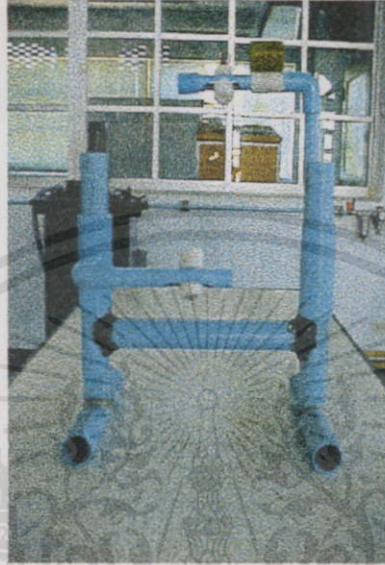


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลและสิ่งของอันสงวนลิขสิทธิ์นี้แก่บุคคลอื่นใดในโอกาสที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 ลักษณะอิเล็กโตรดระนาบ

#### 5.2.1.4 ฐานรองรับมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง

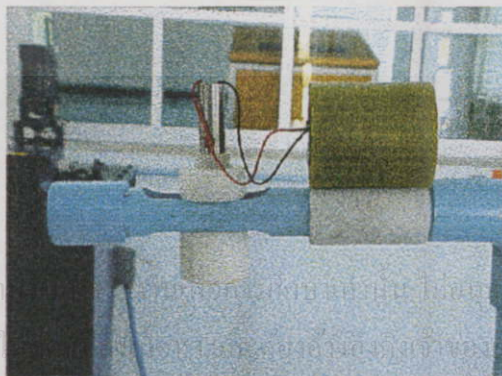
ฐานที่ใช้รองรับตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงมีขนาดพอเหมาะสมควรที่สามารถรับน้ำหนักทั้งหมดของตัวถังมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงได้จากต้นแบบแล้วสร้างจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว รวมทั้งเป็นตัวจับยึดตัวส่งและตัวรับแสงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ฐานรองรับตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงและยึดตัวส่งและตัวรับแสง

#### 5.2.2 ภาคส่งสัญญาณ

ภาคส่งสัญญาณใช้เลเซอร์ไดโอดแสงสีแดง เพราะต้องการความเข้มแสงสูงๆ เพื่อป้องกันการลบกวนจากแสงอื่นๆ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับเลเซอร์คือ 4.5 V(DC) โดยใช้แหล่งจ่ายเป็น Battery 1.5 V จำนวน 3 ก้อน วงจรจะแสดงดังผนวก ค ลักษณะการส่งสัญญาณจะส่งเป็นรูปสัญญาณแสงเรียบๆผ่านมอเตอร์สนามไฟฟ้า เมื่อคอนแทกอิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุนตัดผ่านก็จะกลายเป็นสัญญาณแสงที่มีความถี่ส่งไปยังภาคส่งสัญญาณ ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

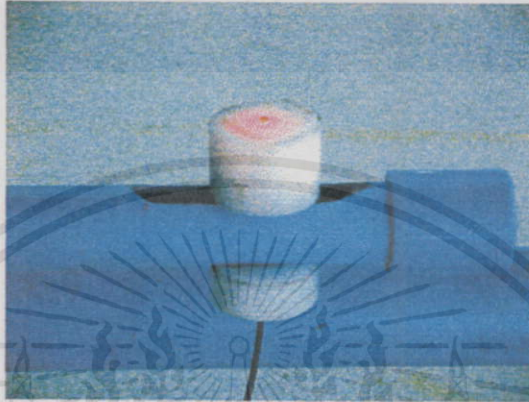


รูปที่ 5.7 ภาคส่งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในของหน่วยงานเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารฉบับนี้ไปเผยแพร่หรือแจกจ่ายเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 ภาครับสัญญาณ

สัญญาณแสงที่มีความถี่เมื่อ โคนแชนอเล็ก์ โตรคตัวหมุนตัดผ่านจะถูกส่งมายังภาครับสัญญาณ โดยผ่านสายใยแสงซึ่งเป็นชนิด Plastic Optic Fiber มายังตัวรับสัญญาณแสง Photo Transistor ซึ่งจะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแล้วส่งเข้า วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ(LF353)เพื่อขยายสัญญาณ แล้วนำไปเข้าวงจรส่วนต่อไป



รูปที่ 5.7\_1 ภาครับสัญญาณ

### 5.2.4 ภาครับสัญญาณความถี่เป็นแรงดัน

ส่วนเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ โดยใช้ LM331 (Frequency to Voltage Conversion) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านนอกจากส่วนนี้กับความถี่ที่เข้าแสดงดัง(4)

$$V_o = 2.09 * R_t C_t * \frac{R_L}{R_s} * f_{in} \quad (5.1)$$

$V_o$  เป็นค่าแรงดันด้านออกจาก LM331

$R_t$  เป็นค่าความต้านทานที่ต่อคร่อมขา 3กับขา 5 ของ LM331

$C_t$  เป็นค่าตัวเก็บประจุที่ต่อกับขา 5 ของ LM331 ลงกราวน์

$R_s$  เป็นค่าความต้านทานที่ต่อกับขา 2 ของ LM331 ลงกราวน์

$R_L$  เป็นค่าความต้านทานที่ต่อกับขา 1 ของ LM331 ลงกราวน์

$f_{in}$  เป็นค่าความถี่ของสัญญาณ

ตัวอย่าง วิธีการคำนวณค่าความต้านทานสำหรับย่านการวัดของชุดเทคนิคที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากสมการ 5.1 สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสำหรับย่านการวัดของชุดเทคนิคที่นำเสนอ ( $R_s$ ) ได้ดังต่อไปนี้

ในการคำนวณเทียบแรงดันส่วนของมอเตอร์สนามไฟฟ้ากับแรงดันของวงจรถือ 115 kV ต่อ 14.2 V เพราะแรงดันสูงสุดของวงจรมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายคือ 15 V และในย่าน

$$15 - 20 \text{ kV} \text{ มีความถี่เท่ากับ } 30.93 \text{ Hz} \text{ และมี } V_{\text{ave}} = \frac{14.2 \times 20}{115} = 2.47 \text{ V}$$

แทนค่าในสูตรจะได้ว่า

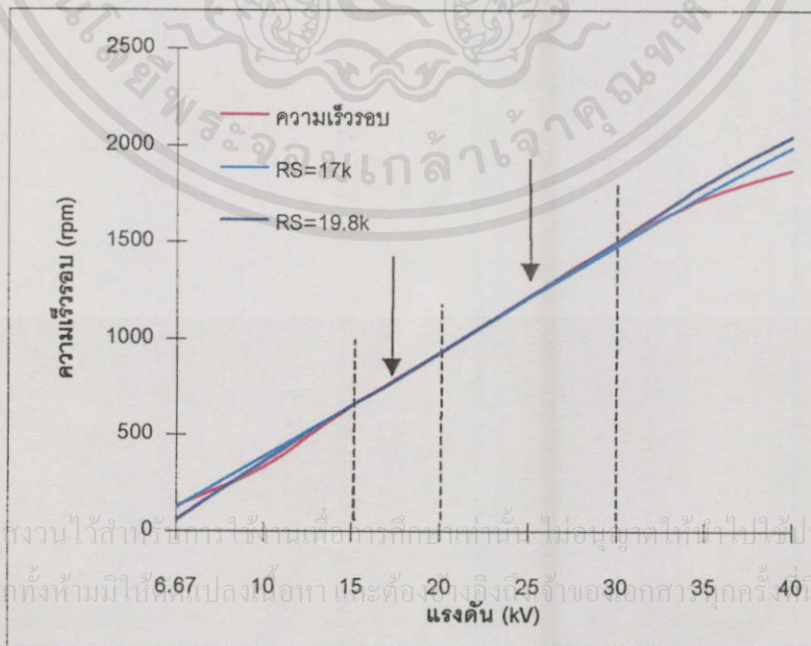
$$R_S = \frac{(30.93 \times 209 \times 100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6})}{2.47} = 17.83 \text{ k}\Omega \text{ ##}$$

และจากย่าน 20 - 30 kV มีความถี่เท่ากับ 50 Hz และมี  $V_{\text{ave}} = \frac{14.2 \times 30}{115} = 3.70 \text{ V}$

แทนค่าในสูตรจะได้ว่า

$$R_S = \frac{(50 \times 2.09 \times 100 \times 10^3 \times 6.81 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6})}{3.70} = 19.21 \text{ k}\Omega \text{ ##}$$

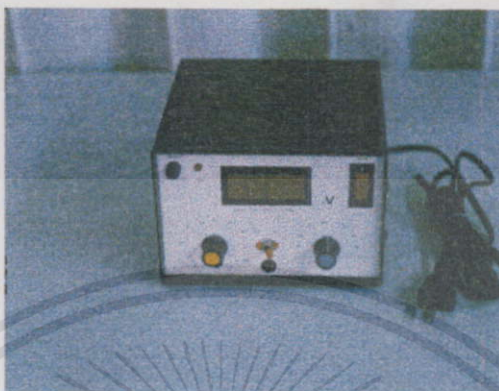
จากผลการทดสอบในช่วง 15 - 20 kV พบว่าเส้นตรงของวงจรถือเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มีค่า  $R_S = 17 \text{ k}\Omega$  ทับกับเส้นกราฟความเร็วรอบมอเตอร์สนามไฟฟ้าพอดี และในช่วง 20 - 30 kV เส้นกราฟความเร็วรอบมอเตอร์สนามไฟฟ้าจะถูกทับสนิทด้วยเส้นตรงของวงจรถือเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มีค่า  $R_S = 19.8 \text{ k}\Omega$  ดังในกราฟ ซึ่งการคำนวณนี้เป็นเพียงแนวทางในการออกแบบหาค่า  $R_S$  เท่านั้น ในทางปฏิบัติพบว่าค่า  $R_S$  อาจจะไม่ตรงกับค่าที่คำนวณได้พอดี แต่จะมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้เนื่องมาจากค่าความผิดพลาดของความต้านทานเองและความผิดพลาดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่ต่อรวมอยู่ในวงจรทั้งหมด



รูปที่ 5.7\_2 ค่าความต้าน ( $R_S$ ) ที่สำหรับย่านการวัดของชุดเทคนิคที่นำเสนอ

### 5.2.5 ภาคแสดงผล

ส่วนของภาคแสดงผล จะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากส่วนเปลี่ยนความถี่มาแสดงผลเป็นตัวเลขได้ตั้งแต่ค่า 0 - 199.9 kV ที่ได้มาประมวลผลและแสดงออกมาในรูปของของตัวเลข



รูปที่ 5.7\_3 ชุดวงจรเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

### 5.3 การทดสอบชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า

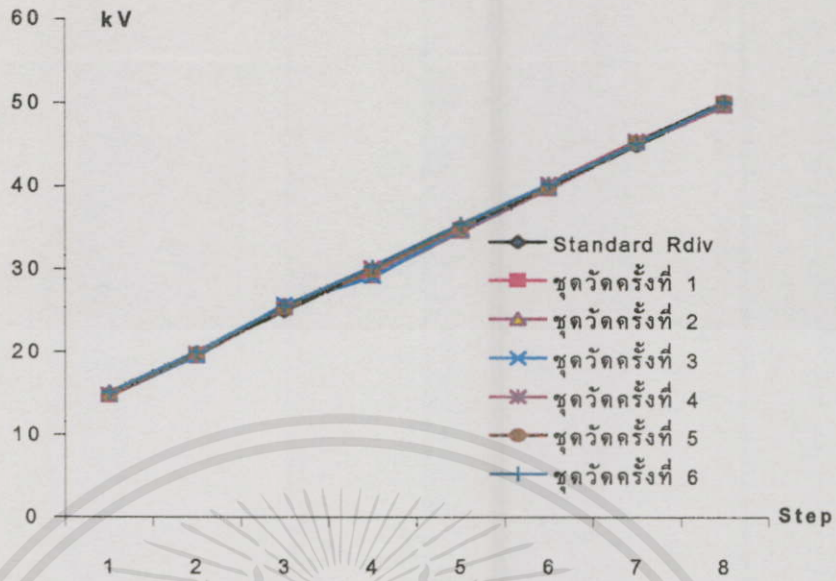
ในการทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงนี้จะใช้มอเตอร์สนามไฟฟ้าช่วยในการวัดจำนวน 2 ชุด มีความสามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบได้ตั้งแต่ 15 ถึง 115 กิโลโวลท์และวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 15 กิโลโวลท์ ถึง 80 กิโลโวลท์ โดยที่มอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 1 มีความยาวของอิเล็กโทรดตัวหมุนวัดจากปลายแหลมถึงจุดกึ่งกลางยาว 40 มิลลิเมตร อัดอากาศความดัน 1.9 bar มีย่านการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 15 กิโลโวลท์ ถึง 50 กิโลโวลท์ และมีย่านการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 15 กิโลโวลท์ ถึง 40 กิโลโวลท์ (ต่อเฟส) และมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 2 มีความยาวของอิเล็กโทรดตัวหมุนวัดจากปลายแหลมถึงจุดกึ่งกลางยาว 15 มิลลิเมตร อัดก๊าซชนิด SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 3.2 Bar มีย่านการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตั้งแต่ 50 กิโลโวลท์ ถึง 115 กิโลโวลท์และมีย่านการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 40 กิโลโวลท์ ถึง 80 กิโลโวลท์ (ต่อเฟส)

#### 5.3.1 การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงเทียบกับชุดตัวความต้านต่ออันดับ

สำหรับการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงเทียบกับชุดตัวความต้านต่ออันดับ จะทำการทดสอบโดยการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบจากแหล่งจ่ายเดียวกันตั้งแต่ 15- 115 kV โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบพิกัดแรงดันที่สามารถจ่ายได้ 0 - 330 kV % ripple

2.5 วิธีทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 15 - 50 kV และ 50 - 115 kV โดยในการวัดเปรียบเทียบ จะทำการปรับระดับแรงดันทีละ 5 kV ทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ช่วง 15- 50 kV ด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 1 วัด ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดัง

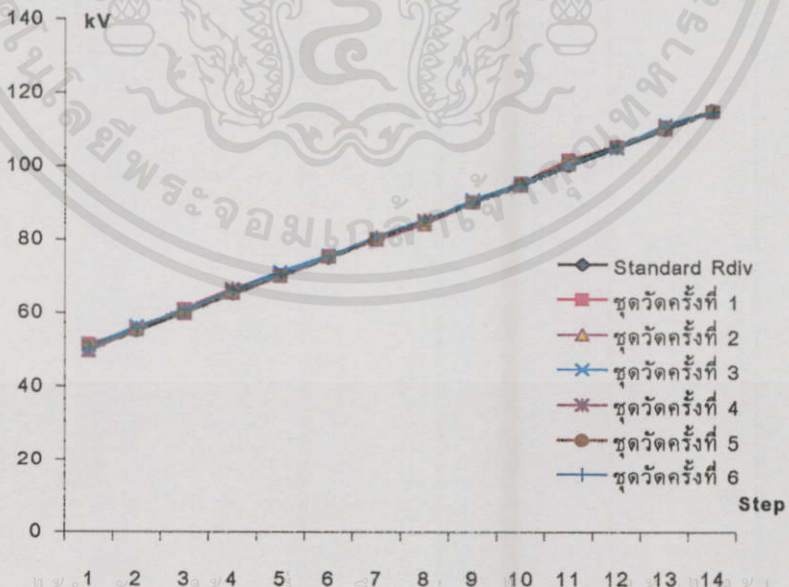
รูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วพลช่วง 15 – 50 kV

จากผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วพลช่วง 15 – 50 kV พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.574 และค่าแรงดันที่อ่านได้จากชุดวัดมีความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ ตั้งแต่ 0.67 เปอร์เซ็นต์ ถึง 1.75 เปอร์เซ็นต์

- การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ช่วง 50 - 115 kV ด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 2 ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านอื่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

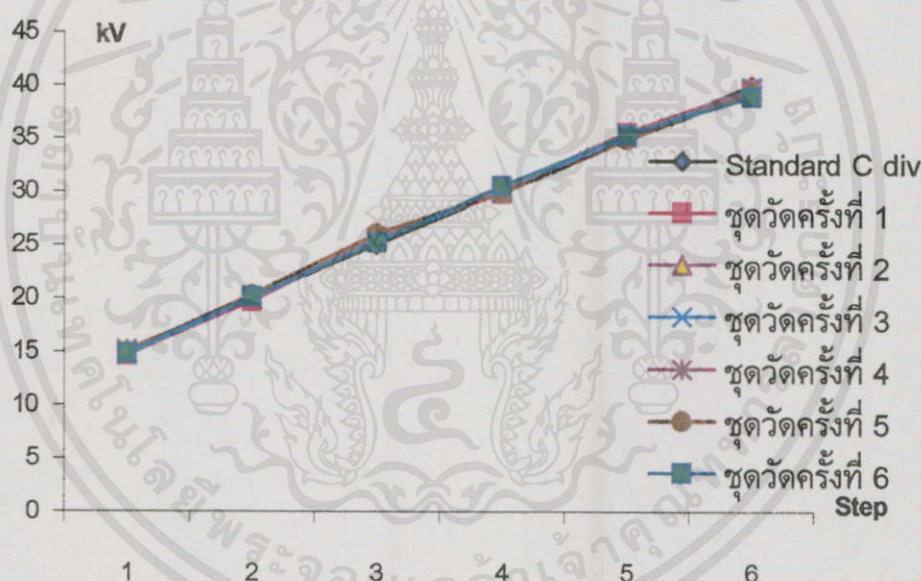
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วพลช่วง 50 – 115 kV การนำไปใช้

จากผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วเวลาช่วง 50 – 115 kV พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.613 และค่าแรงดันที่อ่านได้จากชุดวัดมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณตั้งแต่ 0.4 เปอร์เซ็นต์ ถึง 0.9 เปอร์เซ็นต์

### 5.3.2 การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงเทียบกับชุดตัวความเก็บประจุต่ออันดับ

สำหรับการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเทียบกับชุดตัวความเก็บประจุต่ออันดับทำการทดสอบโดยการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายเดียวกันตั้งแต่ 15–80 kV<sub>rms</sub> (ต่อเฟส) โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดแรงดันที่สามารถจ่ายได้ 0 – 125 kV วิธีทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 15 - 40 kV<sub>rms</sub> (ต่อเฟส) และ 40 - 80 kV<sub>rms</sub> (ต่อเฟส) โดยในการวัดเปรียบเทียบจะทำการปรับระดับแรงดันทีละ 5 kV ทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง

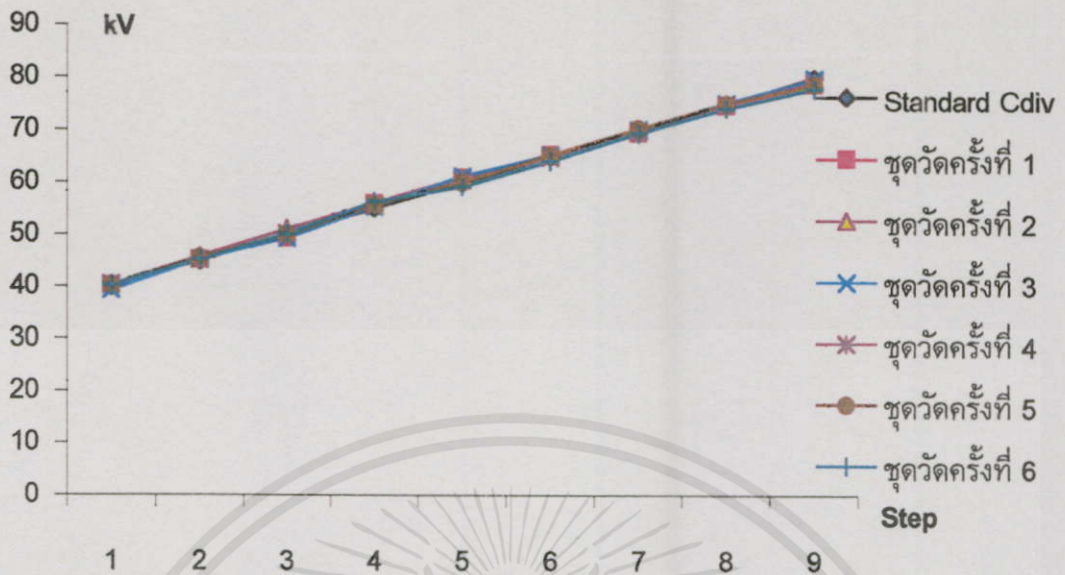
- การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ช่วง 15 - 40 kV<sub>rms</sub> (ต่อเฟส) ด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 1 วัด ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับช่วง 15 – 40 kV<sub>rms</sub>

จากผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ช่วง 15 – 40 kV<sub>rms</sub> (ต่อเฟส) พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.7225 และค่าแรงดันที่อ่านได้จากชุดวัดมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณตั้งแต่ 0.86 เปอร์เซ็นต์ ถึง 1.15 เปอร์เซ็นต์

- การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ช่วง 40 - 80 kV<sub>rms</sub> (ต่อเฟส) ด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 2 วัด ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับช่วง 40 – 80 kV<sub>rms</sub>

จากผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ช่วง 40 - 80 kV<sub>rms</sub> ( ต่อเฟส ) พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.66 และค่าแรงดันที่อ่านได้จากชุดวัดมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณตั้งแต่ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ถึง 1.2 เปอร์เซ็นต์

#### 5.4 บทสรุปและวิเคราะห์ผล

สำหรับชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่นำเสนอต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ 2 ชนิด คือ แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ซึ่งในการสร้างจะแบ่งช่วงระดับแรงดันให้เหมาะสมกับชุดวัดสามารถแสดงรายละเอียดดังนี้

- ชนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดได้ คือ AC , DC

- พิกัดแรงดันไฟฟ้าสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบตั้งแต่ 15 – 115 kV<sub>DC</sub>

สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับตั้งแต่ 15 – 80 kV<sub>rms</sub>/phase

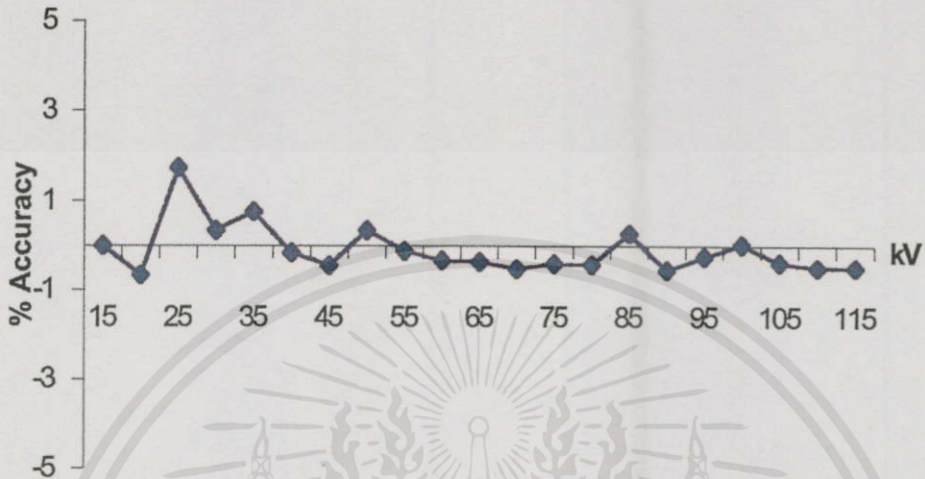
- มอเตอร์สนามไฟฟ้า

มอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 1 มีความยาวของอิเล็กโตรดตัวหมุนวัดจากปลายแหลมถึงจุดกึ่งกลางยาว 40 มิลลิเมตร อัดอากาศความดัน 1.9 bar ใช้วัด แรงดันไฟฟ้า ช่วง 15 – 50 kV<sub>DC</sub> และ ช่วง 15 – 40 kV<sub>rms</sub>/phase

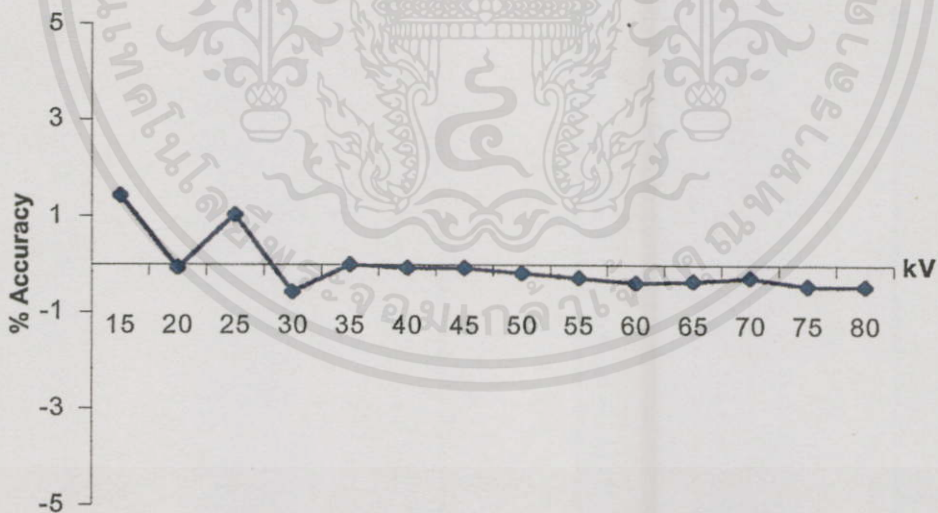
มอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 2 มีความยาวของอิเล็กโตรดตัวหมุนวัดจากปลายแหลมถึงจุดกึ่งกลางยาว 15 มิลลิเมตร อัดก๊าซความดันไฟฟ้า SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 3.2 bar ใช้วัดแรงดันไฟฟ้า ช่วง 50 – 115 kV<sub>DC</sub> และ ช่วง 40 – 80 kV<sub>rms</sub>/phase

- เปรี่เห็นความถูกต้องความถูกต้อง

ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ  $\pm 2\%$  ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบแสดงดัง ภาคผนวก ค ตารางที่ ผ.5.12



รูปที่ 5.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ  $\pm 1.5\%$  ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบแสดงดัง ภาคผนวก ค ตารางที่ ผ.5.13



รูปที่ 5.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# บทสรุปและวิเคราะห์ผล

ในการสร้างชุดเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งมอเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ ดังนั้นเมื่อทำการวัดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้าได้จะทำให้สามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สนามไฟฟ้า ช่วงระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดสามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับระดับความดันและชนิดของก๊าซที่บรรจุในมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้ามีความสำคัญต่อผลการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคที่น่าเสนอนี้เป็นอย่างมากมาก จึงสร้างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อมาช่วยคำนวณหาค่าการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะช่วยในการออกแบบโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ความเร็วรอบหมุนของตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนและทนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้จากการทดลองทั้งหมดในข้างต้นที่ผ่านมาสามารถสรุปดังนี้

### 1. มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง

- หลักการทำงาน การที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงไปถึงค่าๆหนึ่งแล้วอิเล็กโตรดตัวหมุนเกิดการเคลื่อนที่ได้ นั่นจะมีขบวนการการชน ไอออน ในเซชันอะตอมหรือ โมเลกุลของก๊าซเพิ่มทวีคูณ จำนวนอิเล็กตรอนอิสระและ ไอออนบวกขึ้นก่อนจึงจะมีผลทำให้เกิดแรงกระทำผลักให้อิเล็กโตรดตัวหมุนเกิดการเคลื่อนที่หมุน ได้หลังจากแรงกระทำหลักขณะความฝืดที่เกิดจากอิเล็กโตรดตัวหมุน โดยที่ความเร็วรอบหมุนจะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ซึ่งจะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กโตรดตัวหมุนจะมีทิศทางเหมือนกันไม่ว่าจะเป็นอิเล็กโตรดตัวหมุนอะ โนดหรืออิเล็กโตรดตัวหมุนคะ โดด สามารถพิจารณาอุผลผลการทดลองได้จากในรูปที่ 4.4 บทที่ 4

- ตัวถัง ในการออกแบบตัวถังของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงได้ทำการศึกษาข้อมูลและสร้างให้สอดคล้องกับจุดมุ่งหมายของการนำไปใช้งานและความเป็นไปได้ โดยสามารถควบคุมระดับความดันของก๊าซภายในและสามารถเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในเพื่อปรับระดับของช่วงการวัดของชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่น่าเสนอ รูปทรงที่ดีที่สุดและพอที่จะสามารถสร้างขึ้นได้ ก็คือทรงกลม วัสดุที่ใช้ทำตัวถังเป็นพลาสติกที่มีเนื้อ โปร่งใสที่สามารถให้แสงผ่านทะลุได้เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
การทดลอง รายละเอียดตัวถังมอเตอร์สนามไฟฟ้าจากบทที่ 3 และรูปร่างลักษณะของตัวถังมอเตอร์สนามไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 3.13

- อิเล็กโตรครณะนาบ ควรจะเป็นกว้างที่สุดเพื่อจะได้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดและมีความเร็วรอบสูงสุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.24 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (kV) กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน โดยมีข้อมูลผลการทดลองแสดงไว้ในบทที่ 4

- อิเล็กโตรคั่วหมุน จากสร้างโครงสร้างคั่นแบบและใช้โปรแกรมไฟไนท์อิเลิเมนต์ มาช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบอิเล็กโตรคั่วหมุนควรเป็นคั่วหมุนแบบแกนเต็ม มีแกน 2 แกน มุมระหว่างปลายแหลมกับแกนเป็น 90 องศา รัศมีส่วนโค้งกว้างๆ น้ำหนักและมุมปลายแหลมน้อยที่สุดเพื่อจะได้มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(kV)กับความเร็วรอบหมุน(rpm)เป็นเชิงเส้นที่มีช่วงกว้าง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหมุนต่อการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.23 ,4.7 ,4.17 ,4.15 ,4.21และ4.19 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้า (kV) กับความเร็วรอบหมุน (rpm) ของคั่วหมุนแบบแกนต่างกัน จำนวนแกนต่างกัน มุมระหว่างปลายแหลมกับแกนต่างกัน รัศมีส่วนโค้งต่างกัน น้ำหนักต่างกัน มุมปลายแหลมต่างกัน ตามลำดับ ในบทที่ 4

- ฐานรองรับ ฐานที่ใช้รองรับตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีขนาดพอเหมาะสามารถรับน้ำหนักของชุดทดสอบได้และต้องมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีในการทำฐานรองรับคั่นแบบจึงได้ใช้ท่อพีวีซี 1.5 นิ้ว ซึ่งเป็นวัสดุจัดหาและสร้างได้ง่ายโดยที่ปลายแขนของฐานรองรับเซาะเป็นร่องสำหรับวางยึดตัวถังของมอเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 5.6 ในบทที่ 5

## 2. ชุดเทคนิควัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดัน

สำหรับชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่นำเสนอคั่นแบบที่สร้างขึ้นสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ 2 ชนิด คือ แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ซึ่งในการสร้างจะแบ่งช่วงระดับแรงดันให้เหมาะสมกับชุดวัดสามารถแสดงรายละเอียดดังนี้

- ชนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดได้ คือ AC , DC

- พิกัดแรงดันไฟฟ้า

สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบตั้งแต่ 15 –115 kV<sub>DC</sub>

สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับตั้งแต่ 15 – 80 kV<sub>rms</sub>/phase

- มอเตอร์สนามไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชุด โดย

ชุดที่ 1 ใช้วัดแรงดันไฟฟ้า ช่วง 15 – 50 kV<sub>DC</sub> และ ช่วง 15 – 40 kV<sub>rms</sub>/phase

ชุดที่ 2 ใช้วัดแรงดันไฟฟ้า ช่วง 50 – 115 kV<sub>DC</sub> และช่วง 40 – 80 kV<sub>rms</sub>/phase

ซึ่งสามารถพิจารณาข้อมูลผลการทดลองและรายละเอียดต่างๆแสดงไว้ในบทที่ 5

- เปรอร์เซ็นความถูกต้อง

ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ  $\pm 2\%$  ดังรูปที่ 5.12

ความถูกต้องของการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ  $\pm 1.5\%$  ดังรูปที่ 5.13

### 3. ข้อดี

- ไม่มีค่าสูญเสียของในแกนเหล็กและขดลวด
- ไม่ต้องลดทอนระดับแรงดันที่ต้องการวัด
- ขนาดของเครื่องวัดจะมีขนาดเล็ก
- น้ำหนักเบา
- สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง
- สามารถปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้ง่าย
- ต้นทุนการร่ำงค้ำและสามารถร่ำงได้ภายในประเทศ
- สะดวกในการติดตั้งและเคลื่อนย้ายง่าย

### 4. ข้อเสีย

- ความรวดเร็วในการตรวจวัดค่าระดับแรงดันช้ากว่าการวัดแบบเดิม
- อายุการใช้งานแล้วต้องนำมาปรับเทียบให้ได้มาตรฐานสั้นกว่าการวัดแบบเดิม

ในโครงการวิจัยชุดเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่นำไปวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและกระแสสลับ ซึ่งอาศัยพฤติกรรมจากสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงของขั้วอิเล็กโตรดปลายแหลมกับขั้วอิเล็กโตรดระนาบ น่าจะเป็นประโยชน์ในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ถ้าทำการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างมอเตอร์เพื่อเพิ่มอายุเวลาที่จะต้องปรับเทียบของชุดวัดใหม่ อาทิเช่น การเปลี่ยนจากการหมุนเป็นลักษณะการผลักระหว่างขั้วอิเล็กโตรดหรือหัวสคูนิกใหม่มาทำตัวมอเตอร์และปรับปรุงส่วนโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ที่นำมาช่วยในการวิเคราะห์ห้ออกแบบ โดยเปลี่ยนเป็นแบบ 3 มิติ มีการคำนึงถึงผลประจุนิเสธ ความดันของก๊าซ ความชื้น อุณหภูมิ เพื่อที่จะ ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดจะได้ไม่ต้องไปสร้างชิ้นงานจริงทดลอง จะได้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมาก

อย่างไรก็ตามก็ค้ำผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลการทดลองค้ำค้ำของโครงการวิจัยชุดเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้านี้พอจะเป็นประโยชน์และแนวทางต่อผู้อ่านและผู้ทีสนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สามารถนำเอาไปพัฒนาและศึกษาทดลองค้ำค้ำต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] E.Kuff, M.Abddulah. **High-Voltage Engineering**. Oxford : Pergamon Press. 1977.
- [2] L.L. Alston. **High-Voltage Technology**. London : Oxford University Press. 1968.
- [3] W.H. Hayt. **Engineering Electromagnetics**. New York : McGrawHill, 1981.
- [4] ดร.ตำรวจ สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม-  
ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2528.
- [5] ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล. “มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2528.
- [6] Matehew, N.O.Sadiku. “A Simple Introduction to Finite Element Analysis of  
Electromagnetic Problems.” IEEE Trans. Educ., vol. 32, 1989. pp. 85-93.
- [7] H. Yamashita, E. Nakamae, T. Okano and M.S. A.A. Hammam. “A Color Graphics Display  
of The field Intensity Around The Insulator on 13.2 kV Distribution Lines” IEEE Trans.  
On Power Delivery, vol.8, 1993. pp.1696-1702.
- [8] S.potivejkul, V.Kinnares and P.Kerdonfag. “A New Technique for High Voltage  
Measurement Using High Voltage Electric Field Motor” IEEE-APCCAS, Chiangmai,  
Thailand, 1998. pp.193-196.
- [9] พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก, ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล. “เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.” การประชุมวิชา  
การทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, ปีที่ 16, ฉบับที่ 1, พฤศจิกายน 2538. หน้า 131-137.
- [10] พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก, ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล. “เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลัก  
การของมอเตอร์สนามไฟฟ้า.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, ปีที่ 21,  
พฤศจิกายน 2541. หน้า 389-392.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้เป็นอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงของโครงการวิจัยแสดงดังรูปที่ ก-1 ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ตัวเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ตัวเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงและ ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องพอสังเขป ดังนี้

### 1. ตัวเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ภายในอาคาร อุณหภูมิใช้งาน  $-10$  ถึง  $45$  °C มีน้ำมันเป็นตัวระบายความร้อนและมีวงจรทำงานแบบ voltage doubler circuit โดยมีพิกัดเครื่องเป็น

ไฟเข้า ; จำนวนเฟส	3	เฟส
ความถี่	50	Hz
โวลต์เตจ	380	V
ความจุพิกัด	15	kVA
ไฟออก ; ขั้วแรงดันไฟฟ้า	positive and negative	
โวลต์เตจที่พิกัด	330	kV
กระแสที่พิกัด	10	mA
ripple	2.5	%

### 2. ตัวเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูง

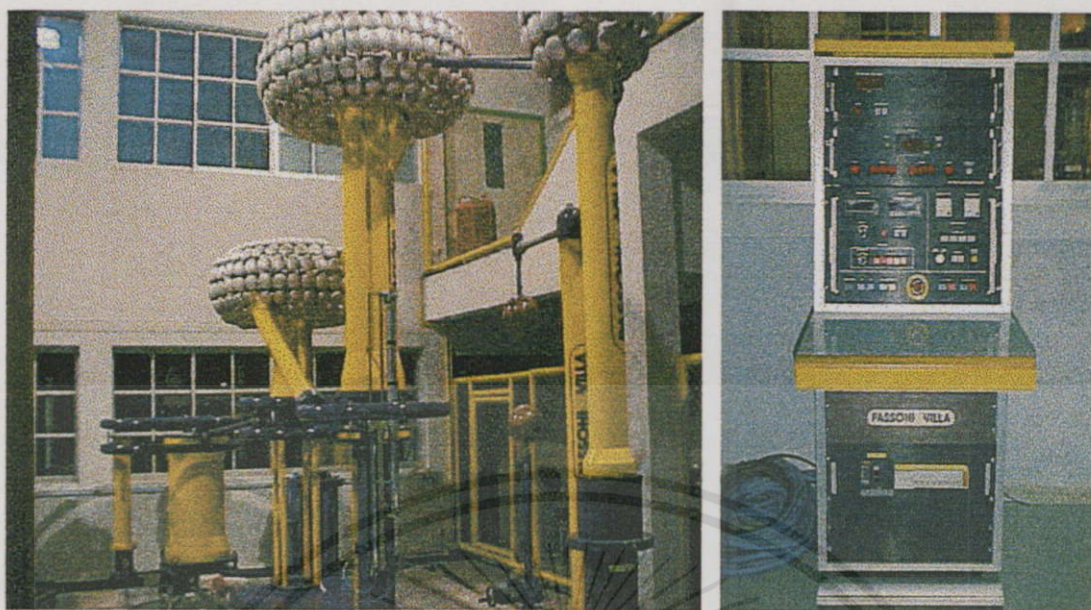
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ภายในอาคารเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ามิน้ำมันระบายความร้อนและมีพิกัดเครื่องเป็น

ไฟเข้า ; จำนวนเฟส	3	เฟส
ความถี่	50	Hz
โวลต์เตจ	380	V
ความจุพิกัด	15	kVA

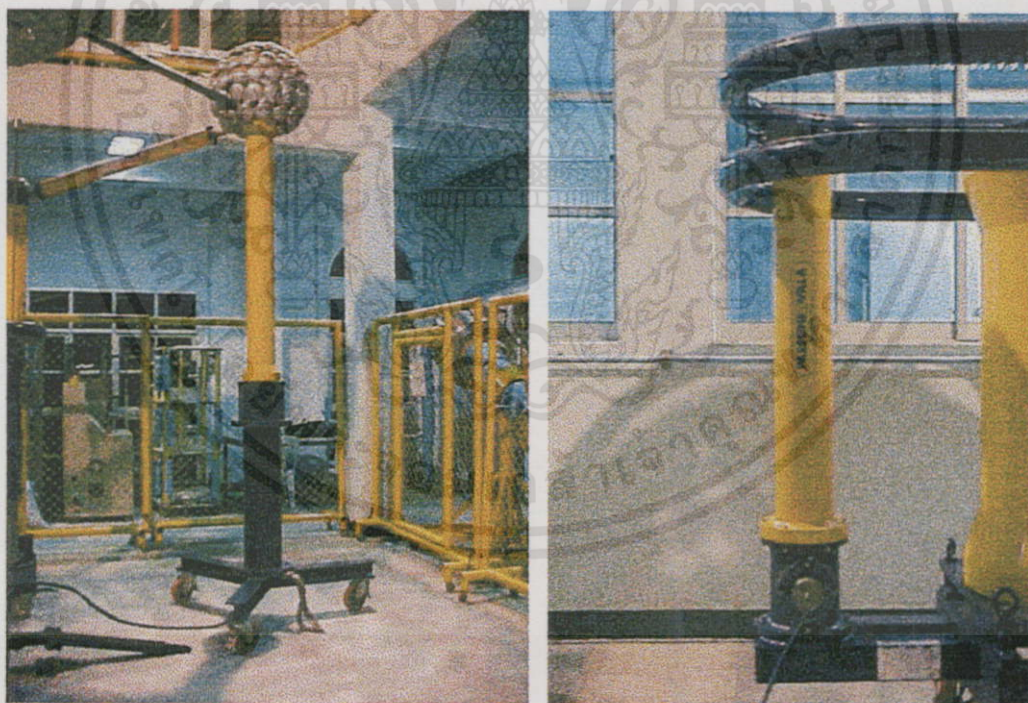
ไฟออก ; โวลต์เตจที่พิกัด 125 kV

กระแสที่พิกัด 10 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปขายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้



รูปที่ ก-1 เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงและชุดควบคุมของ PASSONI VILLA รุ่น 75021  
 $0 \sim 125 \text{ kV}_{\text{ac}} / 330 \text{ kV}_{\text{DC}}, 15 \text{ kVA}$

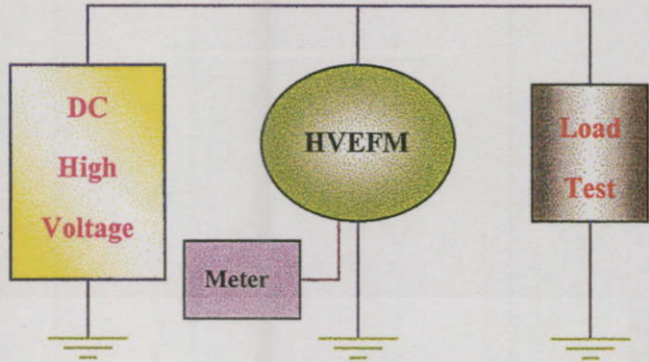


(a)

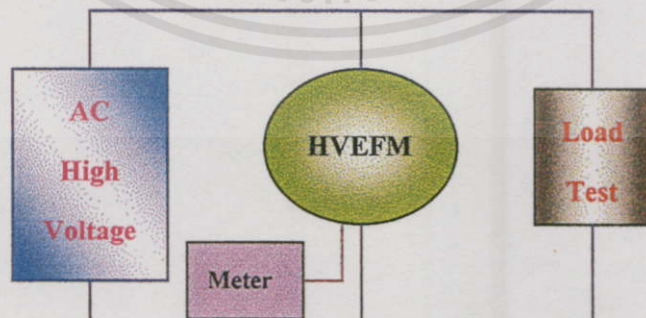
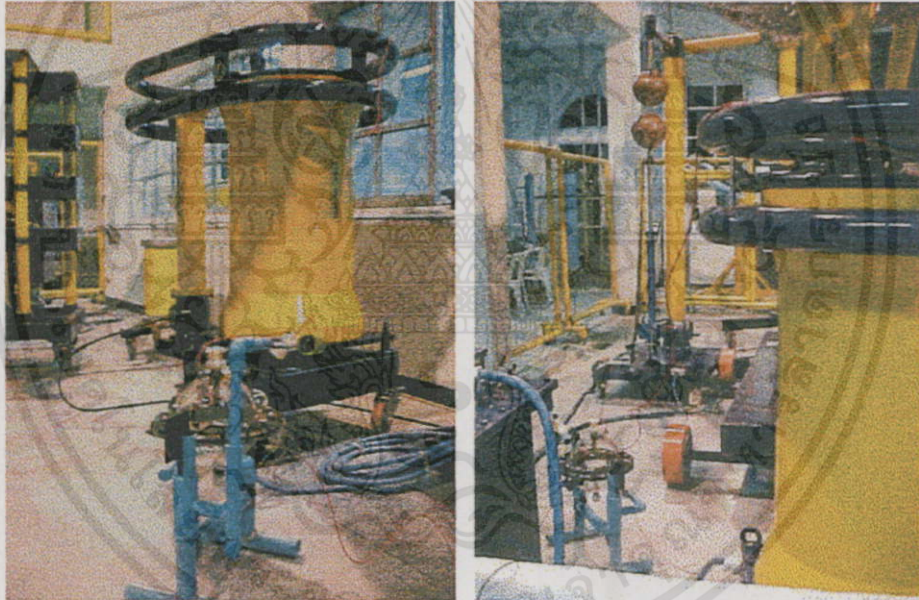
(b)

รูปที่ ก-2 ชุดเทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้ในการวัดเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (a) แบบความต้านทานต่ออันดับ (Standard  $R_{\text{div}}$ ) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง (b) แบบตัวเก็บประจุต่ออันดับ (Standard  $C_{\text{div}}$ ) ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงชั่วพล โดยชุดเทคนิคการวัดที่นำเสนอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-4 การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ โดยชุดเทคนิคการวัดที่นำเสนอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลผลการทดสอบมอเตอร์สนามไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน และความเร็วรอบหมุนภายในอากาศเปิดและอากาศปิด ในลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ตารางที่ ผ.3.12 อิเล็กโตรคตัวหมุนที่มีรูปลักษณะโครงสร้างเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรคระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	โครงสร้างมอเตอร์ สนามไฟฟ้าแบบที่ 1 (rpm)	โครงสร้างมอเตอร์ สนามไฟฟ้าแบบที่ 2 (rpm)	โครงสร้างมอเตอร์ สนามไฟฟ้าแบบที่ 3 (rpm)
8	-	-	360
12	-	250	730
15	200	339	1000
8	300	520	1280
21	445	691	1500
24	670	853	1667
27	850	1091	1850
30	962	1250	2000
33	1100	1500	2222
36	1300	1550	2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.13 อิเล็กโตรดตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดครณะมาเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. แกนตัวหมุนแบบแข็ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. แกนตัวหมุนแบบเข็มทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.6 มม.ยาว 6.0 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	แกนตัวหมุน แบบแข็ง (rpm)	แกนตัวหมุน แบบเข็มหมุนในแนวตั้ง (rpm)	แกนตัวหมุน แบบเข็มหมุนในแนวนอน (rpm)
8	-	-	360
10	-	450	500
12	250	650	730
15	339	897	1000
8	520	1187	1280
21	691	1387	1500
24	853	1578	1667
27	1091	1785	1850
30	1250	1900	2000
33	1500	2179	2222
36	1550	2300	2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.4 อิเล็กโตรดตัวหมุนที่มีรูปลักษณะ โครงสร้างเป็นแกนปลายแหลม ใ้้งงอทำด้วยทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.6 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. ที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 4.25 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. แกนตัวหมุนแบบเข็มนาฬิกาทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.6 มม.ยาว 6.0 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	อิเล็กโตรดอะโอด (rpm)	อิเล็กโตรดอะโนด (rpm)
8	360	400
12	730	800
15	1000	1089
8	1280	1350
21	1500	1590
24	1667	1750
27	1850	1950
30	2000	2100
33	2222	-
36	2400	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.5 ตัวหมุนที่มีลักษณะ โครงสร้างเหมือนกัน แต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวมอเตอร์เป็น AC และ DC ที่ระดับแรงดันอากาศ 3 bar เพื่อพิจารณาหาผลความแตกต่างของ ความเร็วรอบหมุน โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลมโค้งงอแขนของ ตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจาก จุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 2.0 ซม.ระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแก๊ป 6.6 ซม. ลักษณะของอิเล็คโตรคระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลตตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดัน ไฟฟ้า (kV)	อิเล็คโตรคตัวหมุน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ (rpm)	อิเล็คโตรคตัวหมุน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (rpm)
12.7	300	-
13.7	430	350
15	530	700
20	800	1115
25	1150	1450
30	1400	1764
35	1700	2000
40	2000	2300
45	2300	2580
50	2560	2800
55	2800	3100
60	3000	3400
65	3200	3650
70	3475	3900
75	3802	4200
80	-	4600
85	-	4936
90	-	5211
95	-	5500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ อีกทั้งยังมีให้คัดลอกผลงานและต้องขออนุญาตถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.7 โครงสร้างเหมือนกัน แต่จำนวนแกนของตัวหมุนแตกต่างกัน เพื่อพิจารณาหาจำนวนแกนของตัวหมุน ที่ให้สมบัติความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่ดีที่สุด โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลมโค้งงอแกนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแกนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.8 ซม. ระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแคบ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรคระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลตตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	อิเล็กโตรคร ตัวหมุน 2 แกน (rpm)	อิเล็กโตรคร ตัวหมุน 4 แกน (rpm)	อิเล็กโตรคร ตัวหมุน 6 แกน (rpm)
6	400	-	-
7.1	490	115	-
8	705	244	154
10	1000	484	357
15	1364	1064	667
20	1875	1364	909
25	2069	1714	1176
30	2308	1935	1428
35	2352	1875	1538
40	2308	1818	1250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.9 ลักษณะโครงสร้างของตัวหมุนที่ปลายแหลม 2 แขน เป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแขนตัวหมุนเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดความยาวแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 4.0 และ 4.8 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรครระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. โดยน้ำหนักของตัวหมุนเท่ากันทั้ง 2 แบบ คือ 5.4 กรัม

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ตัวหมุน 4.0 cm. (rpm)	ตัวหมุน 4.8 cm. (rpm)
8	-	288
10	333	500
15	1071	1000
20	1622	1428
25	2143	1875
30	2727	2143
35	3191	2308
40	3125	2143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.11 แขนที่ทำจากลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6, 3.0 และ 3.2 มม. ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของแขนถึงปลายแขนเท่ากับ 4.4 ซม. โดยระยะระหว่างปลายแหลมกับกราวด์เท่ากับ 4.19 ซม. มวลของแขนคือ 2.0, 2.4 และ 3.1 กรัม แขนเหล่านี้ทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	อิเล็กทรอนิกส์ มวล 3.1 กรัม (rpm)	อิเล็กทรอนิกส์ มวล 2.4 กรัม (rpm)	อิเล็กทรอนิกส์ มวล 2.0 กรัม (rpm)
6.5	-	-	350
9	-	480	561
11.8	650	650	750
12	-	780	950
15	782	1000	1100
18	1000	1250	1380
21	1153	1426	1578
24	1304	1667	1764
27	1500	1818	1935
30	1714	2000	2142
33	2000	2300	2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.13 โครงสร้างเป็นแกนปลายแหลมโค้งงอทำด้วยทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.64 มม. ความยาววัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.8 ซม. เท่ากันทุกแกนแต่ความยาวส่วนปลายแกนต่างกัน 3 แบบ คือยาว 1.5 ซม., 2.0 ซม., 2.5 ซม. ผลการทดลองที่ให้ระยะห่างปลายแหลมตัวหมุนถึงกราวด์ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรครีนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลาตัวหมุนทำด้วยสวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	ความยาว ส่วนปลายแกน 1.5 ซม. (rpm)	ความยาว ส่วนปลายแกน 2.0 ซม. (rpm)	ความยาว ส่วนปลายแกน 2.5 ซม. (rpm)
6	-	-	175
6.7	-	200	300
7	220	350	450
9	450	550	600
12	650	759	830
15	882	1000	1091
18	1071	1250	1304
21	1290	1470	1550
24	1438	1700	1764
27	1644	2000	2034
30	1791	2142	2142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.15 โครงสร้างของตัวหมุนเป็นปลายแหลมโค้งงอ ที่มีความโค้งงอต่างกัน แขนทำด้วย ลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลาง ถึงปลายยาว 5 ซม. เท่ากันทุกแขนจำนวนแขนของตัวหมุนมีรัศมีความโค้ง ต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.0 ,1.45 และ 1.75 ซม. ผลการทดลองที่ให้ระยะห่างปลาย แหลมของตัวหมุนถึงกราวด์ 3.59 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็นวงกลมมี เส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม.แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	รัศมีส่วนโค้ง 1.0 ซม. (rpm)	รัศมีส่วนโค้ง 1.45 ซม. (rpm)	รัศมีส่วนโค้ง 1.75 ซม. (rpm)
8	-	-	300
8.4	-	325	500
8.7	350	490	630
12	650	700	801
15	850	937	1000
18	1000	1100	1250
21	1250	1304	1428
24	1450	1500	1700
27	1600	1685	1875
30	1750	1800	2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.17 ลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแขนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลาย 4.8 ซม. องศาความโค้งตรงส่วนปลายแขนคือ 58, 90, และ 113 องศา 2 แขน ผลการทดลองให้ระยะห่างปลายแหลมของตัวหมุนถึงกราวด์ 3.79 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็น วงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลตตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	58 องศา (rpm)	90 องศา (rpm)	113 องศา (rpm)
7	-	220	-
7.5	-	350	310
8.2	350	450	390
9	420	600	500
12	550	730	681
15	770	882	822
18	916	1071	1111
21	1111	1290	1304
24	1277	1438	1500
27	1428	1644	1578
30	1426	1791	1667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ผ.4.19** ลักษณะโครงสร้างเหมือนกัน เพื่อพิจารณาหาความแหลมของแกนที่ทำให้ความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่ดีที่สุด โดยแกนของตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ความยาวแกนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมของแกนยาว 4.5 ซม. ความแหลมของแกนพิจารณาเป็นมุมแหลมตั้งนี้มุมแหลม 6.1, 9.1 และ 17.74 องศา ระยะห่างระหว่างปลายแหลมของแกนกับกราวด์ 4.09 ซม. ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์เป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลตตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	6.1 องศา (rpm)	9.1 องศา (rpm)	17.74 องศา (rpm)
8	-	-	352
9	-	-	483
12	-	-	600
13.6	-	789	720
15	-	833	850
15.5	750	900	960
18	882	1030	1100
21	1000	1200	1300
24	1173	1363	1500
27	1428	1578	1714
30	1578	1667	1714

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ พ.4.21 ลักษณะ โครงสร้างที่ต่างกันเพื่อพิจารณาหาขนาดของแกนตัวหมุนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความเร็วรอบหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนดีที่สุดโดยใช้ตัวหมุนที่มีความยาว 4.8 ซม. สำหรับขนาดของแกนตัวหมุนมีมวลเป็น 1.6, 2.7 และ 3.5 กรัม ลักษณะของอิเล็คโตรคระนาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	1.6 กรัม (rpm)	2.7 กรัม (rpm)	3.5 กรัม (rpm)
6.7	180	-	-
7	300	220	-
8	430	350	250
9	550	500	400
12	752	680	602
15	937	882	800
18	1153	1071	1011
21	1363	1290	1200
24	1578	1490	1428
27	1764	1690	1667
30	2000	1791	1764

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.23 เปรียบเทียบชนิดของแกนโดยได้แบ่งชนิดของแกนตัวหมุนออกเป็น 2 แบบ คือ ตัวหมุนชนิดมีขี้น้ำมันและแกนตัวหมุนชนิดเข็ม โดยแกนตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 2.6 มม. ลักษณะของอิเล็กโตรคระนาบเป็นวงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	อิเล็กโตรคร ตัวหมุนแบบใหม่ (rpm)	อิเล็กโตรคร ตัวหมุนแบบเก่า (rpm)
7	350	-
9	600	-
12	780	-
12.7	910	315
15	1100	450
18	1280	650
21	1500	798
24	1667	1034
27	1800	1250
30	2000	1500
33	2222	1850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ผ.4.24** เปรียบเทียบที่ขนาดความกว้างสเตเตอร์ต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ 2.5, 3.5, 4.5 ซม. แกนเพลตั่วหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม.มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	2.5 ซม. (rpm)	3.5 ซม. (rpm)	4.5 ซม. (rpm)
8	-	-	470
10	-	450	600
12	450	600	800
15	800	937	1100
20	1071	1304	1428
25	1363	1667	1856
30	1667	2000	2205
35	1818	2308	2450
40	1900	2143	2354

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.25 โครงสร้างเหมือนกัน โดยโครงสร้างของตัวหมุนเป็นแกนปลายแหลมโค้งงอแบนของตัวหมุน ทำด้วยลวดทองเหลืองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวแบนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 4.0 ซม. อุณหภูมิการทดลอง 21, 24, 27, 30, 33, 35 องศา โดยทำการทดลองที่บรรยากาศปกติและระยะปลายแหลมถึงกราวด์มีค่าระยะแก๊ป 4.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรดระนาบเป็น วงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม.กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า kV	35 องศา (rpm)	33 องศา (rpm)	30 องศา (rpm)	27 องศา (rpm)	24 องศา (rpm)	21 องศา (rpm)
7	350	-	-	-	-	-
7.2	430	350	-	-	-	-
7.4	470	424	375	-	-	-
7.5	490	430	452	375	375	-
8.1	580	550	572	596	500	425
9	750	719.2	741	766	650	575
12	900	883.1	905	916	780	720
15	1100	1069	1091	1116	1000	925
18	1280	1260.9	1283	1296	1218	1122
21	1500	1469.2	1492	1516	1400	1325
24	1667	1648.8	1671	1683	1608	1582
27	1850	1838	1860	1866	1799	1770
30	2050	2034.9	2057	2066	2001	1948
33	2222	2210.9	2233	2238	2186	2122
36	2400	2396.6	2419	2416	2389	2270
38	-	-	-	-	-	2340

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.26 โครงสร้างของตัวหมุน ที่ปลายแหลม 2 แขน โดยมีโครงสร้างของตัวหมุน เป็น แขนปลายแหลม โด้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแขนตัวหมุนเปลี่ยนแปลง ให้มีขนาดความยาว 2.0 ซม. และ ระยะ ปลายแหลมถึงกราวด์ มีค่าระยะแก๊ป 6.6 ซม. ลักษณะของอิล็กโตรรณะนาบ เป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำด้วยลวด ทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม. ทดสอบที่ อากาศ และก๊าซ SF<sub>6</sub> 3 bar

แรงดันไฟฟ้า (kV)	อากาศ 3 bar (rpm)	ก๊าซ SF <sub>6</sub> 3 bar (rpm)
13	500	-
15	572	-
20	750	230
25	1071	300
30	1363	428
35	1607	576
40	1805	681
45	2102	833
50	2400	937
55	2627	1071
60	2807	1200
65	2950	1304
70	3233	1428
75	3429	1500
80	3600	1667
85	3800	1714
90	3875	1875
95	-	2000
100	-	2068
105	-	2222
110	-	2307
115	-	2475

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่มหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.27 โครงสร้างของตัวหมุน ที่ปลายแหลม 2 แขน โดยมีโครงสร้างของตัวหมุน เป็น แขนปลายแหลม โค้งงอ 2 แขน ทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. ความยาวของแขนตัวหมุนเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดความยาว 2.0 ซม. และ ระยะปลายแหลมถึงกราวด์ มีค่าระยะเก็บ 6.6 ซม. ลักษณะของอิเล็กโตรด ระบายเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 ซม. กว้าง 4.5 ซม. แกนเพลลาตัวหมุนทำ ด้วยลวดทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. มีความยาว 6 ซม.

แรงดันไฟฟ้า (kV)	อากาศ	อากาศ	อากาศ	ก๊าซ SF <sub>6</sub>	ก๊าซ SF <sub>6</sub>	ก๊าซ SF <sub>6</sub>
	3 bar (rpm)	2 bar (rpm)	1 bar (rpm)	3 bar (rpm)	2 bar (rpm)	1 bar (rpm)
11.5	-	-	441	-	-	-
13	-	375	600	-	-	-
13.7	350	580	800	-	-	412
14	650	790	1000	-	367	550
15	850	1000	1300	208	500	668
20	1180	1300	1500	600	700	920
25	1500	1600	1850	800	950	1150
30	1764	1875	2100	950	1100	1350
35	2000	2150	2380	1200	1302	1523
40	2300	2480	2765	1300	1450	1642
45	2580	2700	2976	1470	1580	1798
50	2800	2900	3282	1600	1720	1893
55	3100	3200	3420	1750	1850	2050
60	3400	350	3733	1850	1980	2200
65	3650	3800	4000	2000	2100	2316
70	3900	4100	4350	2143	2300	2480
75	4200	4451	4600	2307	2480	2688
80	4600	4826	-	2500	2600	2816
85	4936	5000	-	2650	2800	-
90	5211	-	-	2822	3000	-
95	5500	-	-	3004	3348	-
100	-	-	-	3283	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาภาคใต้ โดยให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามทำคัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลผลการทดสอบชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน และความเร็วรอบหมุน

ตารางที่ ผ.5.8 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 1 วัดแรงดันไฟตรงตั้งแต่ 15 กิโลโวลต์ ถึง 50 กิโลโวลต์

จากเครื่อง กำเนิด (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 1 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 2 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 3 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 4 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 5 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 6 (kV)
15	14.7	15.2	14.8	14.9	14.8	15.1
20	19.5	19.5	19.5	19.9	19.8	20
25	25.6	25.7	25.8	25.3	25.2	25.6
30	29.3	29.3	29.1	30.2	29.8	30.3
35	34.9	34.9	34.8	34.9	35.1	35.5
40	39.7	39.7	39.9	40.3	39.8	40.2
45	45.2	45.2	45.3	45.5	45.3	45.1
50	50.1	49.7	50	49.9	50.2	50.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.9 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้าชุดที่ 2 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงตั้งแต่ 50 กิโลโวลต์ ถึง 115 กิโลโวลต์

จากเครื่อง กำเนิด (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 1 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 2 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 3 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 4 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 5 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 6 (kV)
50	51.5	49.5	50.9	49.5	51	50.2
55	55.2	55.3	56.2	55.6	55.1	55.8
60	60.9	59.8	60.3	60.9	60.1	60.7
65	65.6	65.2	66.2	66.6	65.5	66
70	70.4	69.9	71.2	70.4	70.1	70.4
75	75.5	75.2	75.7	75.2	75.3	75.3
80	80.3	79.8	80.3	80.2	80.2	80.8
85	84.7	84.2	85	85.3	85	85.4
90	90.3	90.1	90.8	90	90.1	90.2
95	95.4	94.6	95.4	94.6	95.2	94.9
100	101.8	100.7	101.1	100.4	101.4	100.3
105	105.3	105.3	104.9	105.2	105.6	105.2
110	110.7	110.2	111.2	110.5	110.5	110.7
115	114.8	114.9	114.8	115.2	114.7	144.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ผ.5.10 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า จุดที่ 1 วัดแรงดันไฟสถับตั้งแต่ 15 กิโลโวลต์ ถึง 40 กิโลโวลต์**

จากเครื่องกำเนิด (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 1 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 2 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 3 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 4 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 5 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 6 (kV)
15	14.6	14.8	14.7	15.1	14.9	14.8
20	19.7	20.2	19.9	19.9	20.3	20.1
25	25.5	25.6	25.4	25.7	26	25.2
30	29.8	30.1	30	30.2	29.8	30.5
35	35.6	35.3	35.2	35.6	34.9	35.3
40	39.7	39.4	39.8	39.7	39.3	38.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.11 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยมอเตอร์สนามไฟฟ้า ชุดที่ 2 วัดแรงดันไฟสถับตั้งแต่ 40 กิโลโวลต์ ถึง 80 กิโลโวลต์

จากเครื่อง กำเนิด (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 1 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 2 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 3 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 4 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 5 (kV)	ทดสอบ ครั้งที่ 6 (kV)
40	40.1	40.2	39.3	40.3	40.2	40.2
45	45.2	45.8	45.2	45.2	45.5	45.2
50	49.3	51	49.3	50.1	49.9	50.1
55	55.9	56	55.4	55.6	55.7	56.3
60	61	61	61.2	60.4	60.1	59.2
65	65.3	65.2	65.2	64.9	65.2	64.1
70	69.5	69.9	70.1	69.9	70.3	69.4
75	74.7	75.1	75.2	75.1	75.1	74.2
80	78.9	79.3	79.9	79.2	78.8	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า  
เทียบกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

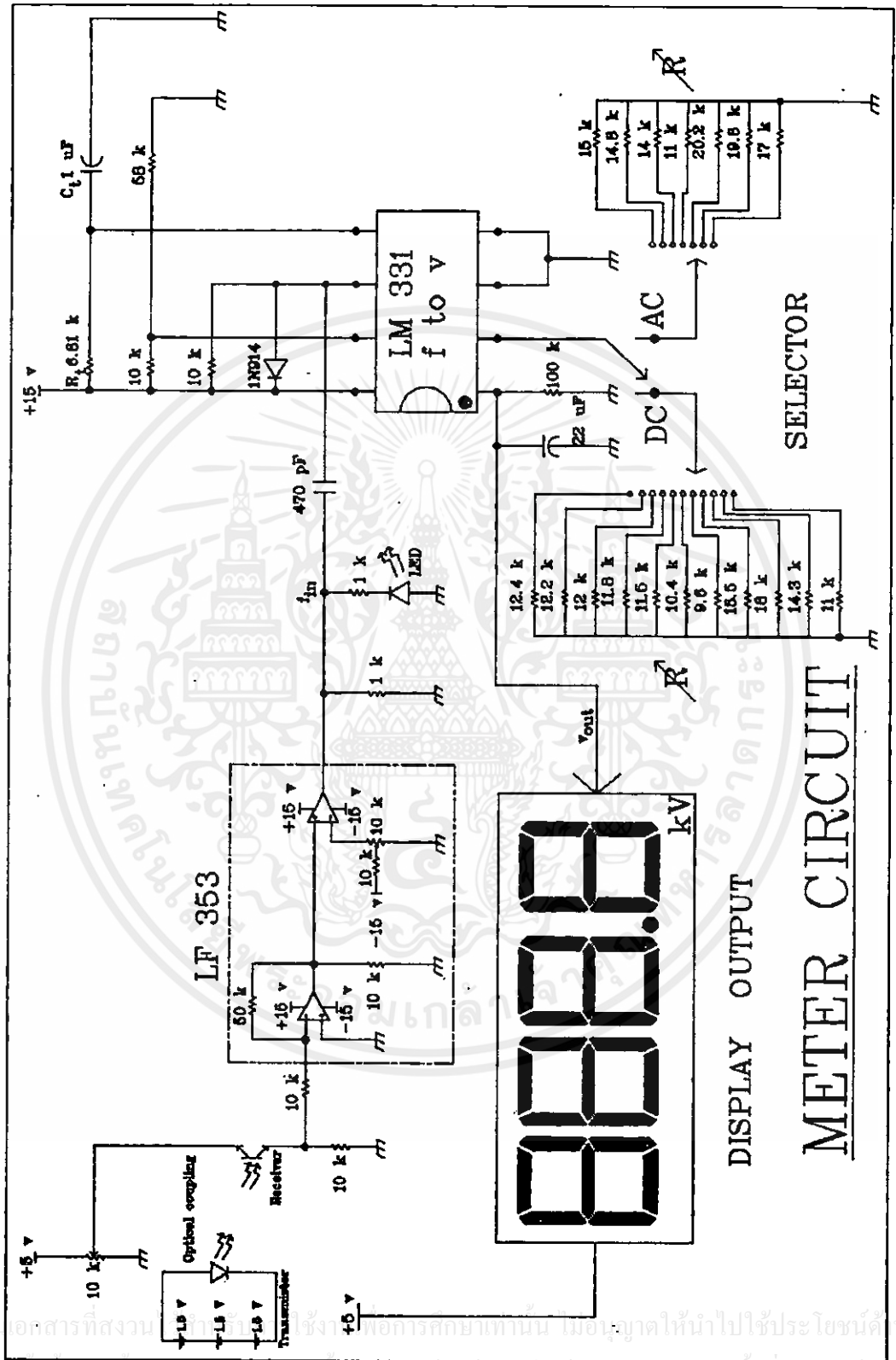
แรงดันไฟฟ้า (kV)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
15	0
20	-0.67
25	1.73
30	0.33
35	0.76
40	-0.17
45	-0.45
50	0.33
55	-1.28
60	-0.337
65	-0.363
70	-0.527
75	-0.404
80	-0.42
85	0.275
90	-0.559
95	-0.249
100	0.025
105	-0.385
110	-0.489
115	-0.496

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.5.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยมอเตอร์สนามไฟฟ้า  
เทียบกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

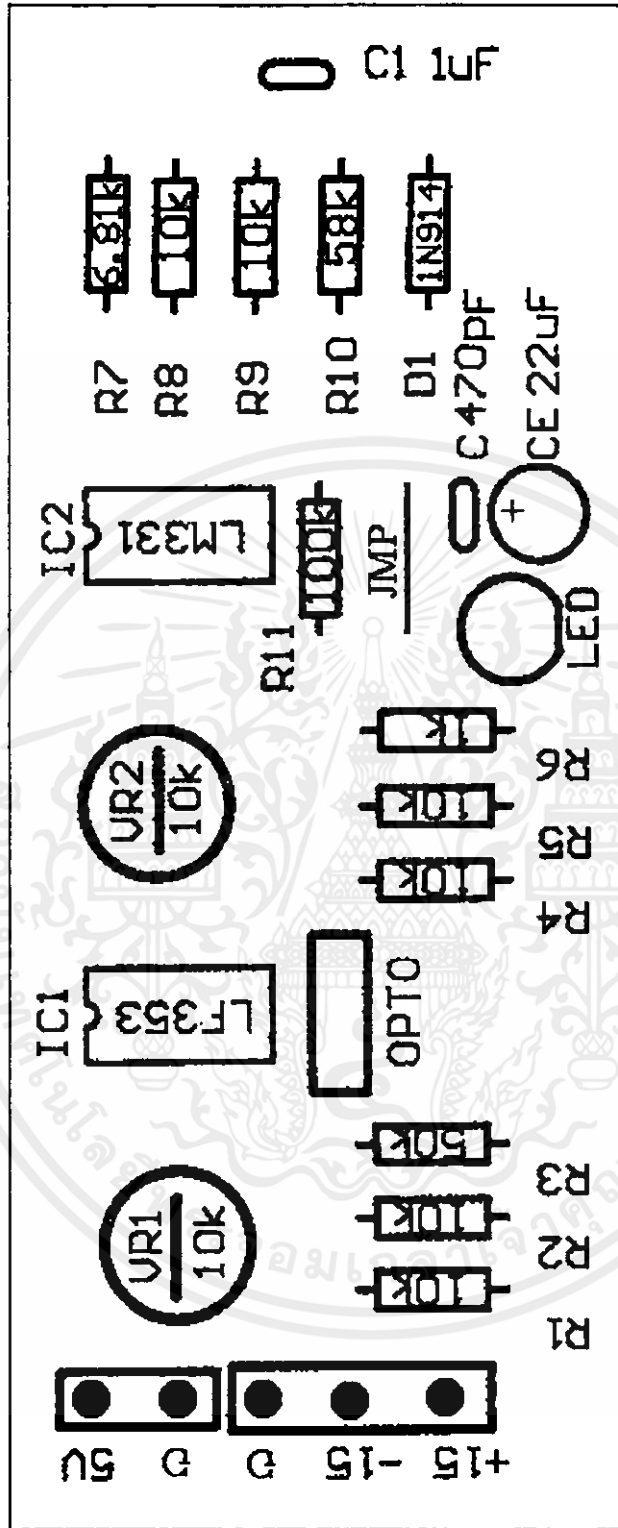
แรงดันไฟฟ้า (kV)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
15	1.43
20	-0.07
25	1.03
30	-0.57
35	0
40	-0.07
45	-0.072
50	-0.17
55	-0.27
60	-0.37
65	-0.34
70	-0.263
75	-0.427
80	-0.437

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

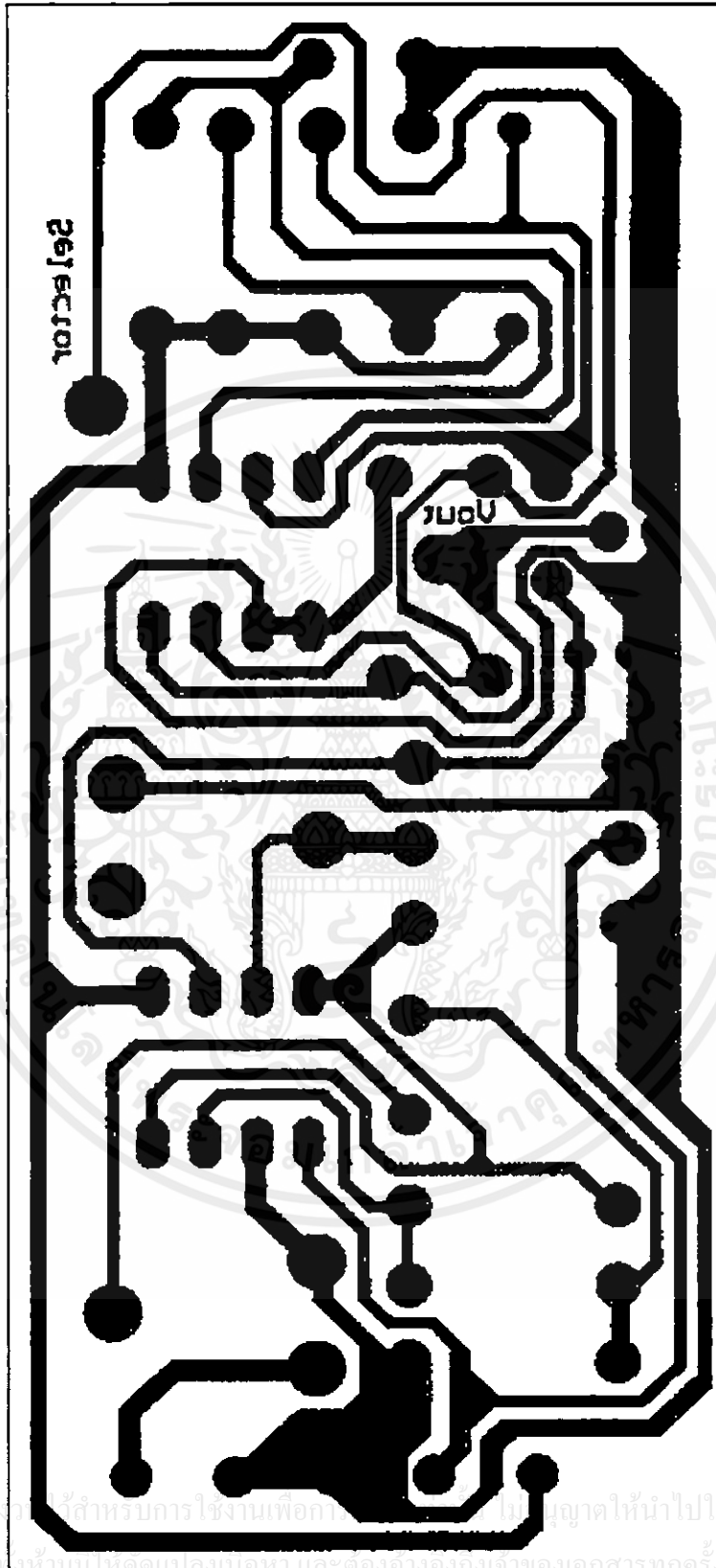


รูปที่ ก-1 วงจรของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทางสน อักทงห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งทหมการนำไปใช้

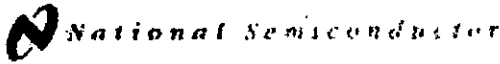


เอกสารนี้เป็นรูปที่ ค-2 การจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาทำเป็นชุดวงจรประโชชน์ด้านการค้าของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์เป็นของตนเองต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-3 ลายพิมพ์ของวงจรเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปประ โยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่มีการนำไปใช้



February 1983

## LF353 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

### General Description

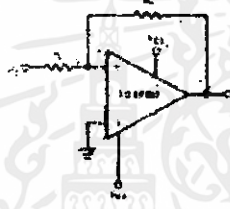
These devices are low cost, high speed dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET™ JFET technology). They require low supply current and maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, wide matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF353 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to seamlessly upgrade the overall performance of existing LM1558 and LM358 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold drivers, and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exceed low-level and offset voltage drift.

### Features

- Internally trimmed offset voltage 10 mV
- Low input bias current 50 pA
- Low input noise voltage 25 nV/√Hz
- Low input noise current 0.01 pA/√Hz
- Wide gain bandwidth 4 MHz
- High slew rate 13 V/μs
- Low supply current 2.5 mA
- High input impedance 10<sup>12</sup> Ω
- Low total harmonic distortion A<sub>v</sub> = 10, R<sub>L</sub> = 30k, V<sub>o</sub> = 20Vp-p, BW = 20 Hz to 20 kHz 0.02%
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%

### Typical Connection



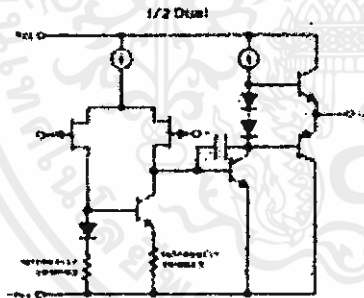
### Connection Diagrams

Metal Can Package (Top View)



Order Number LF353M  
See NS Package Number M98A

### Simplified Schematic



Dual-In-Line Package (Top View)



Order Number LF353N or LF353N  
See NS Package Number M98A or M98E

รูปที่ ค-4 เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรวอร์ LF353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรถอเบอร์ LF353

**Absolute Maximum Ratings**  
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+15V	Lead Time (Soldering, 10 sec)	260°C
Power Dissipation (Note 1)		Reflow Information	
Operating Temperature Range	0°C to 175°C	Dual-In-Line Package	Soldering (10 sec.)
$T_{MAX}$	150°C	Small Outline Package	Wave Soldering (10 sec.)
Differential Input Voltage	±10V	Wedge Pin Package	Reflow (10 sec.)
Input Voltage Range (Note 2)	±15V	Indep. (16 pin)	Indep. (16 pin)
Output Short Circuit Duration	Continuous	See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices	
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	ESD Tolerance (Note 7)	1700V
		QJA M Package	TBD

**DC Electrical Characteristics (Note 4)**

Symbol	Parameter	Conditions	LF353			Units
			Min	Typ	Max	
$V_{OS}$	Input Offset Voltage	$R_{12} = 10k\Omega, T_A = 25^\circ C, \text{Curt. Temperature}$		5	10	mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_{12} = 10k\Omega$			10	$\mu V/^\circ C$
$I_{OS}$	Input Offset Current	$T_A = 25^\circ C, \text{Notes 4, 5}, I_C < 100\mu A$		25	100	$\mu A$
$I_B$	Input Bias Current	$T_A = 25^\circ C, \text{Notes 4, 5}, T_C < 10^\circ C$		50	200	$\mu A$
$R_{12}$	Input Impedance	$T_A = 25^\circ C$		10 <sup>12</sup>		$\Omega$
$A_{VOL}$	Large Signal Voltage Gain	$V_S = +15V, T_A = 25^\circ C, V_{IN} = 10V, R_{12} = 2k\Omega, \text{Curt. Temperature}$	25		100	V/mV
$V_{OL}$	Output Voltage Swing	$V_S = +15V, R_{12} = 10k\Omega$	±12		±13.5	V
$V_{CM}$	Input Common-Mode Voltage Range	$V_S = -15V$	±11		±12	V
CMRR1	Common-Mode Rejection Ratio	$R_{12} < 10k\Omega$	70		100	dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	70		100	dB
$I_S$	Supply Current		3.5		5.5	mA

**AC Electrical Characteristics (Note 4)**

Symbol	Parameter	Conditions	LF353			Units
			Min	Typ	Max	
	Amplifier to Amplifier Coupling	$T_A = 25^\circ C, f = 1Hz - 20kHz, \text{Input Buffered}$		-120		dB
SR	Slew Rate	$V_S = +15V, T_A = 25^\circ C$	0.0		1.0	V/ $\mu s$
GBW	Gain-Bandwidth Product	$V_S = +15V, T_A = 25^\circ C$	2.7		4	MHz
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage	$T_A = 25^\circ C, R_{12} = 100k\Omega, f = 1000Hz$			15	nV/ $\sqrt{Hz}$
$i_n$	Equivalent Input Noise Current	$T_A = 25^\circ C, f = 1000Hz$			0.01	$\mu A/\sqrt{Hz}$

Note 1: For operating at elevated temperatures the device must be derated based on a thermal resistance of 110°C/W up to 175°C and then by the  $\theta_{JA}$  package and  $\theta_{JC/W}$  for conditions in excess of 175°C.  
Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum input voltage is equal to the maximum power supply voltage.  
Note 3: The power dissipation limit, however, cannot be exceeded.  
Note 4: These specifications apply for  $V_S = +15V$  and  $T_C = +175^\circ C$ .  $V_{OL}$  is not specified at  $T_C = 0^\circ C$ .  
Note 5: The input bias current is a common mode effect which approximately doubles for every  $10^\circ C$  increase in the ambient temperature  $T_A$ . Due to the device production lot size, the input bias current measurement is restricted to the ambient temperature. In some instances the input bias current measurement may differ from the ambient temperature as a result of input parasitic capacitance.  $I_{OS}, I_B, T_A = 25^\circ C$  shows the 1000 Hz thermal noise current for a 1000 Hz bandwidth. The value of a loop gain of 100 is assumed if input bias current is to be kept to a minimum.  
Note 6: Supply voltage rejection ratio is measured by both supply voltage increasing or decreasing simultaneously by approximately 10% with constant power.  $V_S = +15V$  or  $-15V$ .  
Note 7: Human body model, 1.5 k $\Omega$  in parallel with 100 pF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ค-2 ตารางกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรรวมเบอร์ LF331

Absolute Maximum Ratings (Notes 1)					
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.					
	LM131A/LM131	LM231A/LM231	LM331A/LM331		
Supply Voltage	40V	40V	40V		
Output Short Circuit to Ground	Continuous	Continuous	Continuous		
Output Short Circuit to $V_{CC}$	Continuous	Continuous	Continuous		
Input Voltage	-0.2V to $+V_S$	-0.2V to $+V_S$	-0.2V to $+V_S$		
Operating Ambient Temperature Range	$T_{MIN}$ $T_{MAX}$ -55°C to +125°C	$T_{MIN}$ $T_{MAX}$ -25°C to +85°C	$T_{MIN}$ $T_{MAX}$ 0°C to +75°C		
Power Dissipation ( $P_D$ at 25°C) and Thermal Resistance ( $\theta_{JA}$ )					
(H Package) $P_D$	810 mW				
$\theta_{JA}$	150°C/W				
(M Package) $P_D$		1.25W		1.25W	
$\theta_{JA}$		100°C/W		100°C/W	
(D Package) $P_D$		1.25W			
$\theta_{JA}$		85°C/W			
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)					
Dist. In-Line Package (Plastic)	260°C	235°C	260°C		
Metal Can Package (TO-8)	260°C				
ESD Susceptibility (Note 4)					
Metal Can Package (TO-5)	2000V				
Other Packages		500V		500V	
<b>Electrical Characteristics</b> $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified (Notes 2)					
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
VFC Non-Linearity (Note 3)	$-4.5V \leq V_S \leq 20V$ $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		$\pm 0.003$	$\pm 0.01$	% Full-Scale % Full-Scale
VFC Non-Linearity in Circuit of Figure 1	$V_S = 15V, f = 10\text{ Hz to }1\text{ MHz}$		$\pm 0.02\%$	$\pm 0.14$	% Full-Scale
Conversion Accuracy Scale Factor (Gain)	$V_{IN} = -10V, R_F = 14\text{ k}\Omega$	0.95 0.90	1.00 1.00	1.05 1.10	V/V V/V
Temperature Stability of Gain	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}, 4.5V \leq V_S \leq 20V$		$\pm 20$ $\pm 20$	$\pm 150$ $\pm 60$	ppm/°C ppm/°C
Change of Gain with $V_S$	$-4.5V \leq V_S \leq 10V$ $10V \leq V_S \leq 20V$		0.07 0.008	0.1 0.05	%/V %/V
Rated Full-Scale Frequency	$V_{IN} = -10V$	10.0			kHz
Gain Stability vs Time (1000 Hrs)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		$\pm 0.07$		% Full-Scale
Overrange (Beyond Full-Scale) Frequency	$V_{IN} = -11V$	10			%
<b>INPUT COMPARATOR</b>					
Offset Voltage	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		$\pm 3$ $\pm 4$ $\pm 3$	$\pm 10$ $\pm 14$ $\pm 10$	mV mV mV
Input Current			-80	-300	nA
Output Current			$\pm 8$	$\pm 100$	nA
Common-Mode Range	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	-0.2		$V_{CC} - 2.0$	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ต่อ ค-2 ตารางกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรรวมเบอร์ LF331

Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified (Note 2) (Continued)					
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>TIMER</b>					
Timer Threshold Voltage, Pin 5		0.83	0.857	0.78	$\times V_B$
Input Bias Current, Pin 5 All Devices (LM131/LM231/LM331 LM131A/LM231A/LM331A)	$V_B = 15\text{V}$ $0\text{V} < V_{\text{out}} < 9.9\text{V}$ $V_{\text{out}} = 10\text{V}$ $V_{\text{in}} = 10\text{V}$		$\pm 40$ 200 200	$\pm 100$ 1000 500	nA nA nA
$V_{\text{out}} \text{ pin 5 (load)}$	$I = 5 \text{ mA}$		0.22	0.5	V
<b>CURRENT SOURCE (Pin 1)</b>					
Output Current LM131, LM131A, LM231, LM231A LM331, LM331A	$R_B = 14 \text{ k}\Omega$ , $V_{\text{out}} = 0$	128 116	135 136	144 150	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
Change with Voltage	$0\text{V} < V_{\text{in}} < 10\text{V}$		0.2	1.0	$\mu\text{A}$
Current Source OFF Leakage LM131, LM131A LM231, LM231A; LM331, LM331A All Devices	$T_A = T_{\text{MAX}}$		0.01 0.02 2.0	1.0 10.0 50.0	nA nA nA
Operating Range of Current (Typical)			110 to 500		$\mu\text{A}$
<b>REFERENCE VOLTAGE (Pin 2)</b>					
(LM131, LM131A, LM231, LM231A LM331, LM331A)		1.76 1.70	1.80 1.85	2.02 2.08	V <sub>DC</sub> V <sub>DC</sub>
Stability vs Temperature			+60		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Stability vs Time, 1000 hours			$\pm 0.1$		%
<b>LOGIC OUTPUT (Pin 3)</b>					
$V_{\text{SAT}}$	$I = 5 \text{ mA}$ $I = 3.2 \text{ mA}$ (2 TTL loads), $T_{\text{MIN}} < T_A < T_{\text{MAX}}$		0.15 0.10	0.50 0.40	V V
OFF Leakage			-2.05	1.0	$\mu\text{A}$
<b>SUPPLY CURRENT</b>					
LM131, LM131A, LM231, LM231A LM331, LM331A	$V_B = 5\text{V}$ $V_B = 40\text{V}$ $V_B = 5\text{V}$ $V_B = 40\text{V}$	2.0 2.5 1.5 2.0	3.0 4.0 3.0 4.0	4.0 6.0 6.0 8.0	mA mA mA mA
<p>Note 1: Separate Maximum Ratings, which include beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.</p> <p>Note 2: All specifications apply to the circuit of Figure 2, with <math>4.0\text{k}\Omega &lt; V_B &lt; 40\text{V}</math>, unless otherwise noted.</p> <p>Note 3: Nonlinearity is defined as the deviation of <math>I_{\text{out}}</math> from <math>V_{\text{in}} \times (10 \text{ nA/V} - 10 \text{ nA/V})</math> when the circuit has been trimmed for zero error at 10 Hz and at 16 kHz, over the frequency range 1 Hz to 11 kHz. For the timing capacitor, <math>C_T</math> and MPD ceramic, polystyrene, or polypropylene.</p> <p>Note 4: <math>V_{\text{out}}</math> is only tested 100 <math>\mu\text{F}</math> discharged through a 1.0 k<math>\Omega</math> resistor.</p>					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Typical Applications (Continued)**

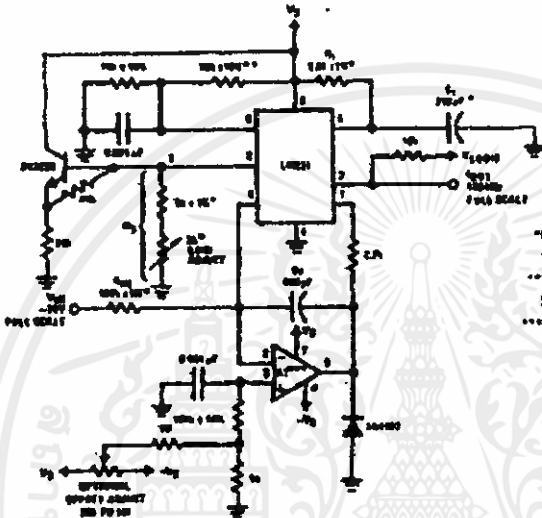
**DETAILS OF OPERATION, FREQUENCY-TO-VOLTAGE CONVERTERS (FIGURES 5 AND 6)**

In these applications, a pulse input at  $I_{IN}$  is differentiated by a C-R network and the negative-going edge at pin 6 causes the input comparator to trigger the timer circuit. Just as with a V-to-F converter, the average current flowing out of pin 1 is  $I_{AVERAGE} = I_{IN} / (1.1 R_1 C_1) \times t$ .

In the simple circuit of FIGURE 5, this current is filtered in the network  $R_L = 100 \text{ k}\Omega$  and  $1 \mu\text{F}$ . The ripple will be less than 10 mV peak, but the response will be slow, with a

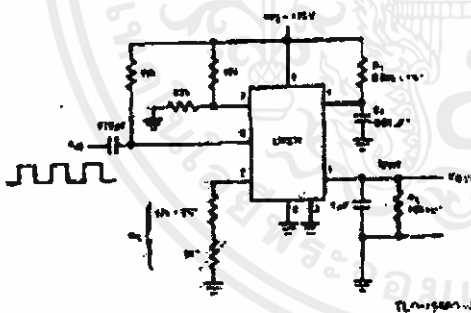
0.1 second time constant, and settling of 0.7 second to 0.1% accuracy.

In the precision circuit, an operational amplifier provides a buffered output and also acts as a 2-pole filter. The ripple will be less than 5 mV peak for all frequencies above 1 kHz, and the response time will be much quicker than in Figure 5. However, for input frequencies below 200 Hz, this circuit will have worse ripple than Figure 5. The engineering of the filter time constants to get adequate response and small enough ripple simply requires a study of the compromises to be made. Inherently, V-to-F converter response can be fast, but F-to-V response can not.



**FIGURE 4. Precision Voltage-to-Frequency Converter, 100 kHz Full-Scale, +0.03% Non-Linearity**

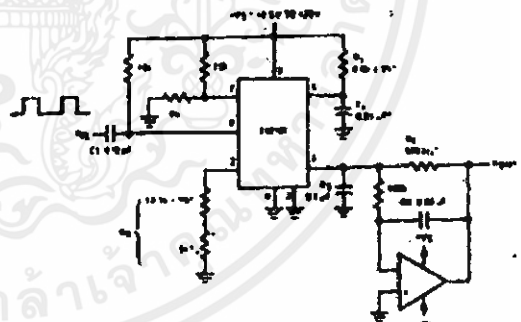
- \*Use stable components with low temperature coefficients. See Typical Applications section.
- \*\*This resistor can be 5 kΩ or 10 kΩ for  $V_{IN} = 0\text{V}$  to 7.7V but must be 10 kΩ for  $V_{IN} = 4\text{V}$  to 8V.
- \*\*\*Use low offset voltage and low offset current op amps for 41-comparators type LF411A or LF366.



$$V_{OUT} = I_{IN} \cdot 2.0V \cdot \frac{R_L}{R_1} \cdot 0.91C_1 t$$

\*Use stable components with low temperature coefficients

**FIGURE 5. Simple Frequency-to-Voltage Converter, 10 kHz Full-Scale, +0.06% Non-Linearity**



$$V_{OUT} = I_{IN} \cdot 2.0V \cdot \frac{R_L}{R_1} \cdot 0.91C_1 t$$

SELECT  $R_L = \frac{(V_{IN} - 2V)}{0.2 \text{ mA}}$

**FIGURE 6. Precision Frequency-to-Voltage Converter, 10 kHz Full-Scale with 2-Pole Filter, +0.01% Non-Linearity Maximum**

**รูปที่ ค-6 การประยุกต์นำเอาวงจรรวมเมอร์ LM311ไปใช้งาน (ในที่นี้เราเลือกใช้ตามFigure5)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรมระดมวิชาการ

# ทางวิศวกรรมไฟฟ้า

คสมท 18\*



จัดโดย - -

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

### HIGH VOLTAGE MEASUREMENT

\* พงษ์เทพ เกิดคอนแปก \*\*ศก. สิริวัฒน์ โพธิ์เวรกุล

#### บทคัดย่อ

เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงนี้ทำงานโดยอาศัยพื้นฐานการทำงานของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงมาทำโดยการสร้างเครื่องมือวัดความเร็วรอบการหมุนแล้วเปลี่ยนความเร็วรอบการหมุนมาเป็นการแสดงระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ โดยในโครงการนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติของอิเล็กโทรดคั่วหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงและคุณสมบัติของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างขึ้นเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานแบบอื่นๆทำการเปรียบเทียบสรุปการทำงานของเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

#### ABSTRACT

This High-Voltage Voltmeter is used basic principle of High-Voltage Electric Field Motor. This principle can produce speed revolution instrument of motor and then speed revolution of rotor can be changed to level voltage in to motor. This paper is tested characteristic of electrode-rotor of High-Voltage electric field motor and characteristic High-voltage voltmeter which are created. It compares to the other standard instrument . The testing of this produced instrument is summarized to be working.

#### 1. บทนำ

ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงในปัจจุบันมักจะทำการวัดระดับศักดาไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสปาร์คของช่อง

\* นักศึกษาปริญญาโท (ทดลองวิจัย)

\*\*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระหว่างอิเล็กโทรด การลดระดับแรงดันลงมาแล้วทำการวัดหรือใช้เครื่องมือทดลองอื่น มาประกอบเข้าด้วยกันแล้วทำการวัดค่าศักดาไฟฟ้าออกมาซึ่งวิธีการเหล่านี้จะต้องผ่านขั้นตอนหรือวิธีการหลายอย่างที่ซับซ้อนพอสมควรจนกว่าที่วัดค่าแรงดันนั้นออกมาเป็นค่าที่ใช้งานได้ ซึ่งผลที่ได้อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้นตามลำดับขั้นตอนของระบบในโครงการทดลองวิจัยนี้ เป็นการสร้างเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงช่วงระดับศักดาไฟฟ้าใช้งานช่วงหนึ่งๆ อาศัยหลักการการทำงานของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงที่ว่าความเร็วรอบหมุนของอิเล็กโทรดคั่วหมุนจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นในการสร้างเครื่องต้นแบบจึงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูง ส่วนประมวลผลและแสดงผล สำหรับสนามไฟฟ้าแรงดันสูงนั้นต้องการคุณสมบัติความสัมพันธ์ของความเร็วรอบการหมุนกับระดับศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้ สำหรับส่วนประมวลผลกับส่วนแสดงผลจะทำหน้าที่ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงแล้วทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วรอบการหมุนแล้วแสดงผลออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า

#### 2. ทฤษฎี

##### 2.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

( DIELECTRIC STRENGTH ) หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นทนได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรคควานหรือทำให้ความเป็นฉนวนเสื่อมคุณภาพมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของแนวหรือระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร(V/cm)หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆหลายประการ อาทิ เช่น รูปปลั๊กกระแสจากชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จะรูตรงกลางไว้ยึดแกนเพลลาของอิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุน มีท่ออากาศที่ทำมาจากท่ออะครีลิคถึงต่อออกมาภายนอก สำหรับสูบและอัดอากาศเข้า มีจุดต่อลงกราวด์อุปกรณ์ป้องกันกราวด์ของก๊าซตามจุดต่างๆใช้วงยาง ( O-RING)

3.1.2 อิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุน เป็นกลไกของห้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นแขนปลายแหลมโค้งงอ 2 ซ้าง มีเบรคเป็นตัวลดแรงเสียดทานระหว่างตัวหมุนกับเพลลาของห้องความยาวของแขนตัวหมุนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายแหลมยาว 100 มิลลิเมตร น้ำหนักตัวหมุน 200 กรัม แกนเพลลาทำด้วยพลาสติกของห้องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร โดยที่ปลายเพลลาข้างหนึ่งมีขั้วต่อสายไฟทะลุออกมาออกตัวถัง

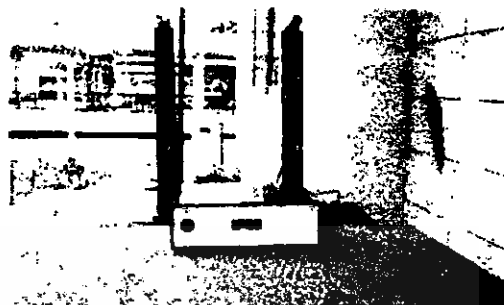


รูปที่ 3 อิเล็กทรอนิกส์ตัวหมุน

3.1.3 อิเล็กทรอนิกส์ระนาบ ลักษณะเป็นแผ่นระนาบแผ่นทองแดงกว้าง 40 มิลลิเมตรทำให้เป็นรูปวงกลมซึ่งถูกยึดติดอยู่กับที่โดยจะสอดเข้ากับขั้วต่อสายในครึ่งทรงกลมด้านจุดต่อกราวด์

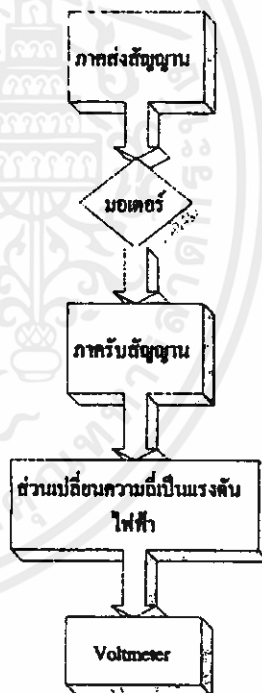
3.1.4 ฐานรองรับ ในการสร้างฐานรองรับต้นแบบนี้ใช้ไม้สร้างมา

3.2 ส่วนประมวลผลและแสดงผล มีลักษณะดังรูปที่ 4 ในการออกแบบส่วนประมวลผลและแสดงผลต้องคำนึงถึงผลกระทบจากมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ส่วนประมวลผล และแสดงผล

3.2.1 ภาคส่งสัญญาณ จะใช้การส่งแสงอินฟราเรดเป็นพัลส์ความถี่ 10 MHz โดยใช้ออปโตคัปเลอร์ และใช้LEDเป็น ตัวส่งเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากด้านแสงเบรคควานซ์ของมอเตอร์ ดังวงจรรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงหลักการการทำงานของตัววัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

3.2.2 ภาครับสัญญาณ จะใช้ตัวรับเป็นDiode Infrared และใช้วงจร High pass and Band pass filter ทำการกรองสัญญาณรบกวนอื่นเพื่อให้มีเสถียรภาพมากขึ้นแล้วนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านขมิพทริกเกอร์ 7414 ปรับแรงดันสัญญาณใหม่และผ่าน  
ทริกเกอร์เปิด 74123 เพื่อให้ได้รูปสัญญาณที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์  
รคตัวหมุนของมอเตอร์วัดค่าผ่าน ดังรูปวงจรที่ 6

3.2.3 ส่วนแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า ส่วนนี้  
เราจะใช้ IC LM2917 เพื่อเปลี่ยนความถี่ที่เกิดจากการตัด  
ของอิเล็กทรอนิกส์เป็นแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 7  
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับค่าแปรต่างๆ แสดง  
ดังสมการที่ 2

$$N \text{ (rpm)} = 60 f / W \text{ .....(2)}$$

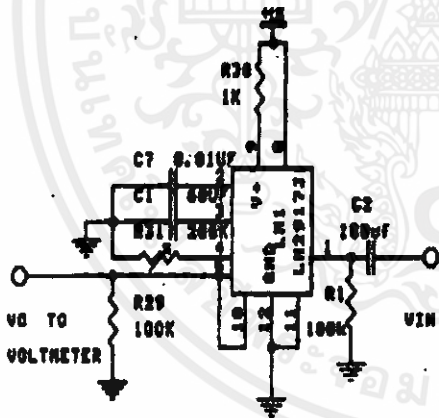
โดย  $f$  = ความถี่ของขบวนการพัลส์ (เฮิรตซ์)

$W$  = จำนวนพัลส์ในหนึ่งรอบการหมุน (พัลส์/รอบ)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุท แสดงดังสมการที่ 3

$$V_{out} = V_{cc} \times f \times C_1 \times R_1 \times k \text{ .....(3)}$$

ค่า  $k$  เป็นค่าคงที่โดยปกติจะมีค่า 1 ทว่าค่าที่แท้จริงควร  
กำหนดจากผลการทดลอง



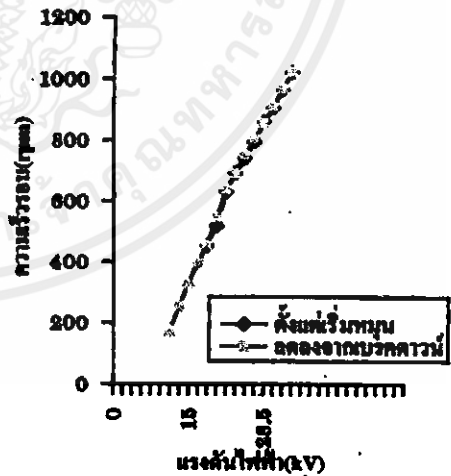
รูปที่ 7 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดย IC LM 2917N

3.2.4 ส่วนแสดงผล จะใช้ IC 7107 ซึ่งใช้สำหรับทำ  
Voltmeter Digital โดยจะทำให้การผิดพลาดของ  
หน้าปัดของเครื่องจะใช้ LED 7 SEGMENT เป็นตัว  
แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสามารถแสดงค่าได้ตั้งแต่ 0-199.9 kV  
แต่ในที่นี้จะให้แสดงค่าตั้งแต่ช่วงใช้งาน

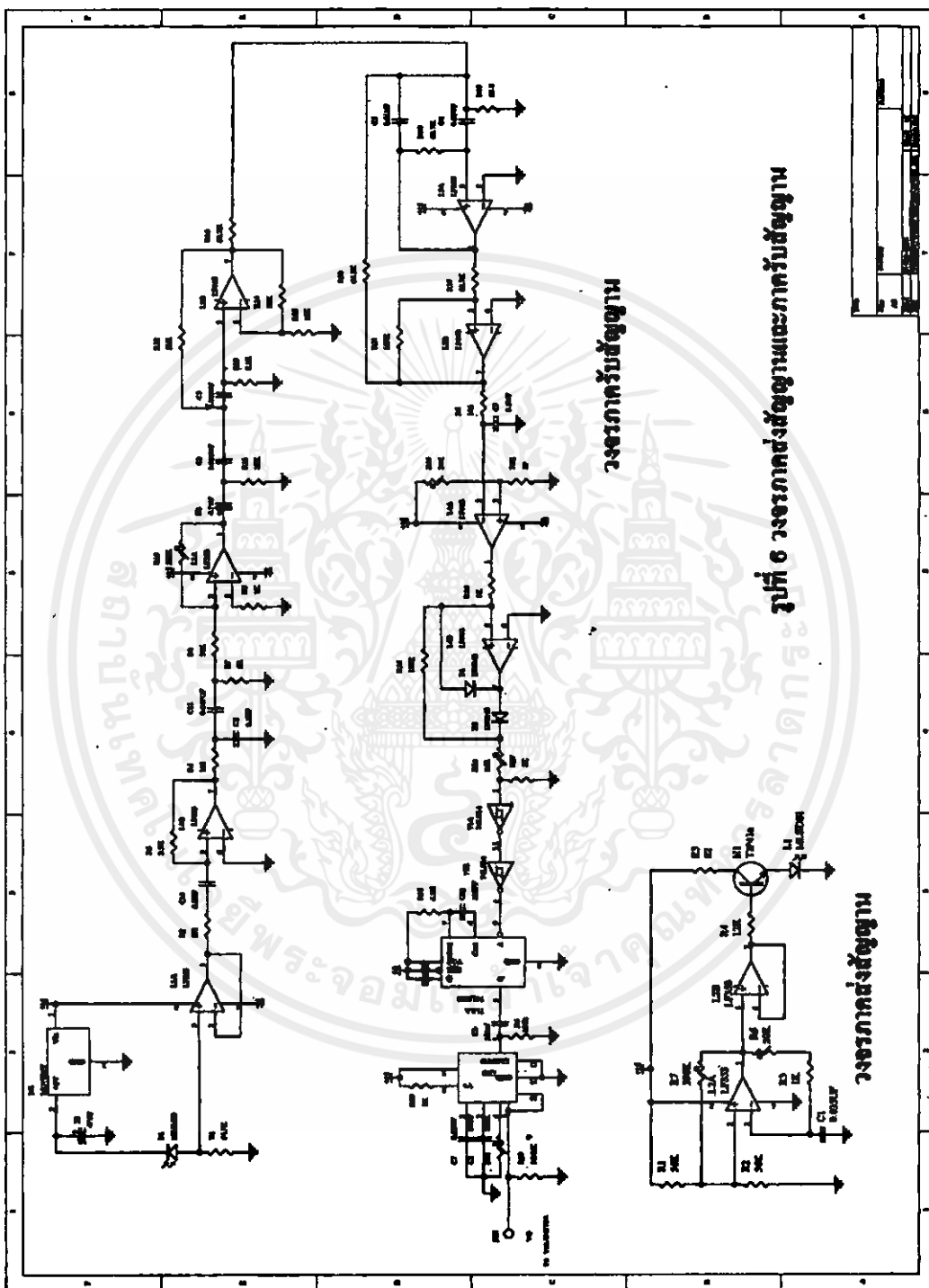
#### 4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเป็นปลายแหลม  
ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายอิสระ โดยที่ลักษณะของการ  
ออกแบบคั้งที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 3 แล้วนำมาประกอบรวม  
กับอิเล็กทรอนิกส์และตัวดึงนำมาทดสอบป้อน แรงดัน  
ไฟฟ้าแรงดันสูง โดยบันทึกข้อมูลในลักษณะที่พิมพ์ ค่าแรงดัน  
จนเกิดการเบรคความถี่แล้วทำการวัดระดับลงมาจนอิเล็กทรอนิกส์  
หลุดหมุน เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์จะ  
ได้ดังรูปที่ 8 จากการทดลองอิเล็กทรอนิกส์ในขณะ  
อากาศจะเริ่มหมุนที่ 19.5kV เบรคความถี่ประมาณ 33 kV  
และเมื่อทำการลดแรงดันไฟฟ้าที่ค่าลงมาถึง 12 kV อิเล็กทรอนิกส์  
ตัวหลุดหมุนจะมีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้า ที่ทำให้เกิด  
การหมุนอาจเนื่องมาจากผลของการแตกตัวของโมเลกุล  
อากาศและจำนวนอิเล็กทรอนิกส์ มีจำนวนเพียงพอที่จะ  
ผลิตปลายแหลมของอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ออกไปนอกจากนี้ยัง  
อาจเกิดความถี่ออกอีกด้วย

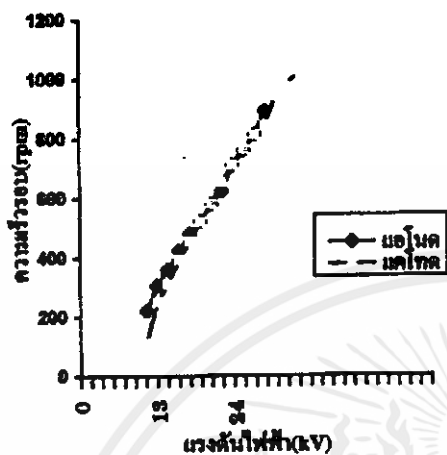
เมื่อเปลี่ยนตัวอิเล็กทรอนิกส์จากตัวหมุนแฉกโต  
เป็นตัวหมุนแฉกโต จะพบว่าจุดที่เกิดเบรคความถี่ระหว่าง  
ตัวอิเล็กทรอนิกส์จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่เบรคความถี่และความเร็ว  
รอบต่ำกว่าตัวหมุนแฉกโตดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า  
(kV) กับความเร็วรอบของตัวหมุนแฉกโต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ 135 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวหมุนแอมโนกับตัวหมุนซิงโคร

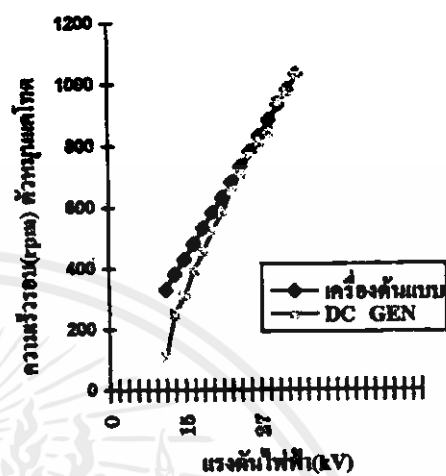
แสดงว่าตัวหมุนแอมโนมีอีเล็กตรอนอิสระ จาก  
ขบวนการไอออไนเซชันมากกว่าและพบอีกว่า ระดับ  
แรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวกับตัวหมุนแอมโนจะมีความเร็วรอบการ  
หมุนสูงกว่าตัวหมุนซิงโครดังที่แสดงในรูปที่ 10

สำหรับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบ นำ  
มาทดสอบคุณสมบัติของตัวเครื่องโดยการทดสอบ วัด  
ระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งอาศัยความเร็วรอบของตัวมอเตอร์  
สนามไฟฟ้าแรงสูงเป็นตัววัดระดับแรงดันไฟฟ้ากับการวัด  
โดยอาศัยเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงแรงสูงเมื่อเทียบกับ  
ความเร็วรอบของการหมุน ดังกราฟรูปที่ 10

จากผลการทดลองจะพบว่าเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรง  
ดันสูงแบบกับการวัดผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแส  
ตรงใกล้เคียงกันมาก สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 12 - 30  
kV ในช่วงใช้งานได้ดี คือ 24 - 33 kV

5. สรุปผลงานวิจัย

เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ทดลองวิจัยเป็นเครื่องใช้  
วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยอาศัยหลักการการทำงานของมอเตอร์  
สนามไฟฟ้าแรงสูงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ  
มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงกับส่วนประมวลผลและแสดงผล



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกับแบบอื่น การวัดผ่านเครื่องกำเนิดแรงสูงกระแสตรง

ผลการทดสอบเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบ  
แบบโดยการตรวจจับความเร็วของมอเตอร์สนามไฟฟ้า  
แรงสูงแล้วนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของตัวมอเตอร์  
สนามไฟฟ้าแรงสูงพบว่าใกล้เคียงกันสามารถนำไปใช้งานได้  
ในช่วงระดับแรงดัน 12 - 33 kV แต่ในช่วงระดับต่ำกว่า  
20 kV จะเกิดความผิดพลาด เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นและหยุด  
ของตัวหมุน เครื่องมือวัดนี้จะสามารถวัดได้เป็นช่วงๆระดับ  
แรงดันการใช้งานและสามารถปรับเปลี่ยนช่วงระดับ แรง  
ดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้โดยการปรับเปลี่ยน ระยะห่าง  
ระหว่าง อิเล็กโทรดหรือปรับเปลี่ยนความดันบรรยากาศของ  
ก๊าซ หรือเลือกชนิดของก๊าซให้เหมาะสม

ดังนั้นเราสามารถจัดสร้างเครื่องมือวัดนี้ให้มีขีด  
ความสามารถในการวัดระดับศักดาช่วงใดก็ได้และสามารถ  
นำออกไปใช้งานในภาคสนามจริงของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า  
โดยไม่ยุ่งยาก ในการปรับเปลี่ยนช่วงการวัดควรพิจารณาถึง  
คุณสมบัติระหว่างมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงกับเครื่องมือวัด  
ระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

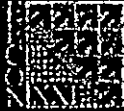
**เอกสารอ้างอิง**

- 1) ศิริวัฒน์ โพรวิเขต , "มอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูง" ,วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2528
- 2) ศิริวัฒน์ โพรวิเขต , "แรงกระทำต่อขั้วฉีกโทรคในสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง " , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง , 2536
- 3) E.Kuffel and M.Abdullah , High-Voltage Engineering , Pergamon Press , Oxford , 1977
- 4) LL A Istion , High-Voltage Technology , Oxford University Press , London, 1968
- 5) คู่มือเทรนเซอร์ไอซี TIL , บริษัทเซ็คคูเรชั่น , กรุงเทพฯ , 2529
- 6) คู่มือไอซี CMOS 4000 SERIES , บริษัทเซ็คคูเรชั่น , กรุงเทพฯ , 2528

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณ คุณมัณฑิต งานจำ คุณพจนาท สุภวันต์ คุณสิทธิวิธ รอดพิงา คุณไพรัช นาทอมและผู้ช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลงดังไปด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การประชุมวิชาการ**  
**ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21**


**21<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference**  
**(EECON-21)**

วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541  
 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 อ.สุขสวัสดิ์ 43 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBUURI

ดำเนินการจัดกรประชุมโดย  
**ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

High Voltage Measurement Technique Using Electric Field Motor

หงษ์เทพ เกิดคอนแปก      ศิริวัฒน์ ไทภิเวรกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร 10520

โทร 3269902, 3266052-101 ต่อ 2623

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นกรนำเสนอเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยอุปกรณ์ที่วัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง โดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า[2] ซึ่งมอเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ ดังนั้นเมื่อทำการวัดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้าได้จะทำให้สามารถทราบค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สนามไฟฟ้า ช่วงระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดสามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับระดับความดันและชนิดของก๊าซที่บรรจุในมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคที่นำเสนอนี้เป็นอย่างมาก จึงสร้างโปรแกรมไฟไนต์ เอเลเมนต์ เพื่อมาช่วยคำนวณหาการกระจายของระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งที่ตำแหน่งต่างๆของมอเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะช่วยในการออกแบบโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อความเร็วยรอบหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนและทนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้ เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่นำเสนอนี้จะทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้โดยไม่ต้องถอดถอน น้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด เคลื่อนย้ายได้ง่าย สะดวกในการติดตั้ง ต้นทุนการสร้างค่าและสามารถสร้างได้ภายในห้องทดลอง

Abstract

This paper is presents the high voltage measurement technique that can be used for both AC and DC systems by using the principle of Electric Field Motor [2]. The speed of Electric Field Motor will depend on it's input voltage. There fore, the input voltage of Electric Field Motor can be measured by detecting the speed of Motor. The voltage level measured range depend on the pressure and type of gases in Electric Field Motor. So that the Electric Field Motor structure is very important for the result of this technique. There for, the Finite Element Program will be used to compute the voltage level and electric field distribution at any point of Electric Field Motor. The calculated results will be used to design the appropriate structure of Electric Field Motor that has linear relation between the speed of motor and its input

voltage and can withstand the measured voltage level. The advantages of this technique are light, compact, portable , easy to install, low cost, using no dividers and can be in the laboratory.

1. บทนำ

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับในปัจจุบันจะวัดโดยใช้การวัดแรงดันผ่านอุปกรณ์ลดระดับแรงดันประเภทที่สร้างจากตัวความต้านทานหรือตัวเก็บประจุและหม้อแปลงแรงดัน(P.T)เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอุปกรณ์ลดระดับแรงดันแต่ละประเภทที่กล่าวมาสามารถนำไปใช้ในการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงหรือแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับได้ถูกต้องจนเป็นที่ยอมรับได้โดยแต่ละวิธีมีความเหมาะสมกับสัญญาณเนื่องชนิดและขนาดของอุปกรณ์วัดระดับแรงดันจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากเมื่อต้องการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ไม่สะดวกในการติดตั้งและเคลื่อนย้าย ดังนั้นจึงทำให้ผู้ใช้ที่ต้องการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สูงมากเกิดความไม่สะดวกในการใช้งานซึ่งอาจทำให้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงคลาดเคลื่อนจากค่าจริงหรืออาจวัดค่าไม่ได้เมื่อทำการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงไม่เหมาะสม ในบทความฉบับนี้เป็นโครงการทดลองวิธีการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยการใช้เทคนิควัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยอาศัยหลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้าทำให้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ทั้งสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงและสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนให้กับมอเตอร์สนามไฟฟ้า ทำให้เมื่อสามารถวัดความเร็วรอบของมอเตอร์สนามไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปความถี่จากนั้นนำความถี่ที่ได้ป้อนวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะส่งต่อไปยังส่วนแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าที่แสดงที่ส่วนแสดงผลจะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนให้มอเตอร์สนามไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อต้องการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ทำได้โดยการนำแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการทราบค่าไปป้อนให้กับมอเตอร์สนามไฟฟ้า ส่วนระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่หากต้องการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นก็สามารถทำได้โดยการปรับระดับแรงดันก๊าซที่บรรจุในหรือเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีกว่าเดิม

2. ทฤษฎี

2.1 สนามไฟฟ้า

ความหนาแน่นประจุรวมต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_e$  ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆหลายประการอาทิ เช่น รูปลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโทรดตัวนำไฟฟ้า ลักษณะคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก (DIELECTRIC) ความชื้น, ความดัน, อุณหภูมิเป็นต้น อิเล็กโทรดที่ใช้ในโครงการวิจัยมอเตอร์สนามไฟฟ้าแรงสูงชนิดนี้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน จุดต่าง ๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ซึ่งสมการทั่วไปที่ใช้หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวของอิเล็กโทรดรูปทรงเรขาคณิตจะคำนวณได้จาก

$$E_{max} = \frac{V}{d\eta} \tag{1}$$

$\eta$ : แพคเตอร์สนามไฟฟ้า (FIELD UTILIZATION FACTOR)

มีนิยามว่า  $\eta = E_{avg} / E_{max}$  ซึ่งโดยทั่วๆ ไปจะมีค่า  $\eta \leq 1$   $E_{avg}$ : ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของมอเตอร์สนามไฟฟ้าไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงเพราะรูปทรงของอิเล็กโทรดไม่เป็นเรขาคณิตจึงต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข ( Numerical ) ช่วยในการคำนวณ

2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้ Finite Element เพื่อทำการวิเคราะห์จะประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน[1] คือ

1) แบ่งขอบเขตของปัญหาเป็นอีลิเมนต์ย่อย ( Discretization ) คือทำการแบ่งบริเวณของปัญหาที่พิจารณาออกเป็นรูปสามเหลี่ยมย่อยๆ เรียกว่า อีลิเมนต์ แต่ละอีลิเมนต์ประกอบด้วยโหนด(node) 3 โหนด อีลิเมนต์แบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะใช้กับปัญหารูปทรงต่างๆ ได้สะดวก

2) พิจารณาหาสมการของแต่ละอีลิเมนต์ ( Element Governing Equation ) ซึ่งจะอาศัยจากความสัมพันธ์ของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่สัมพันธ์กับแต่ละอีลิเมนต์ [1] แสดงดังสมการ(2)

$$W_e = \frac{1}{2} \int \epsilon |E|^2 ds \tag{2}$$

เมื่อ  $W_e$ : พลังงานต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่สัมพันธ์กับแต่ละอีลิเมนต์ (J/m)

$\epsilon$ : ค่าประมิบัติของวัสดุ(F/m)

$E$ : ความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)

$\Omega$ : พื้นที่ผิวของแต่ละอีลิเมนต์ (m<sup>2</sup>)

3) รวมอีลิเมนต์เป็นขอบเขตของปัญหาคงเดิม (Assemblage) คือการรวมอีลิเมนต์ย่อยเหล่านั้นกลับเป็นปัญหาทั้งหมดที่พิจารณาในคอนเวร์ชั่นอีกครั้ง พลังงานที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการรวมอีลิเมนต์คือ

$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \epsilon [V]^T [C][V] \tag{3}$$

เมื่อ  $W$ : พลังงานที่สัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการรวมอีลิเมนต์(J)

$[V]$ : เวกเตอร์ของตัวแปรที่ต้องการทราบค่า

$[C]$ : เมทริกซ์ global coefficient

$N$ : จำนวนอีลิเมนต์

4) แก้ระบบสมการเพื่อหาคำตอบ (Solving System of Equation)

3. หลักการการทำงานและการออกแบบโครงสร้าง

จุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างจากเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้าตาม [2] สามารถแสดงหลักการการทำงานและส่วนประกอบดังไฟว์วารท์ในรูปที่ 1.



รูปที่ 1. ไฟว์วารท์จุดเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้า

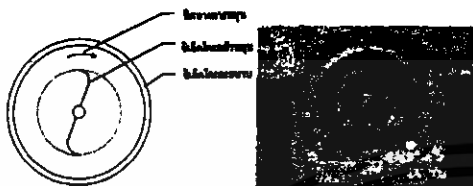
ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างจุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงตามเทคนิคที่นำเสนอ โดยในส่วนการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงชั่วขณะออกแบบให้มีอำนาจวัดตั้งแต่ 20-100 kV และในส่วนการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับจะให้วัดตั้งแต่ 30-85 kV ทำให้การออกแบบของแต่ละส่วนจะแตกต่างกันมีรายละเอียดดังนี้

### การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

#### 3.1 มอเตอร์สนามไฟฟ้า

โครงสร้างของมอเตอร์สนามไฟฟ้ามีส่วนประกอบดังนี้

- ตัวถัง (case) รูปทรงกลมเป็นพลาสติกใสหนาประเภทอะคริลิกหนา 10 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm คัดกรองความชื้นและวางสำหรับอุทิศที่ภายในตัวมอเตอร์



รูปที่ 2. มอเตอร์สนามไฟฟ้า

- อิเล็กโตรคั่วหมุน (rotor) เป็นตัวทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm มีลักษณะแบนโค้งงอ 2 ข้างมีเบร้งเป็นตัวคั่นแรงเสียดทานระหว่างตัวหมุนกับเพลลาทองเหลือง ความยาวของแกนตัวหมุนวัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายเฟลอมมี 3 ขนาด คือ 78 mm 73 mm 58 mm แกนเพลลาทำด้วยลวดทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm

- อิเล็กโตรคั่วระนาบเป็นแผ่นทองแดงกว้าง 35 mm นำมาฉนวนเป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm

#### 3.2 ส่วนประมวลผลและแตกผล

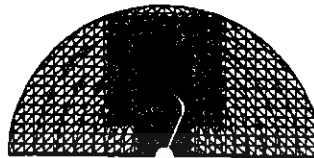
การออกแบบจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

- ภาคตั้งสัญญาณ จะเป็นเลขจอร์ไดโอดแสงสีแดงส่งแสงผ่านตัวมอเตอร์สนามไฟฟ้า ให้อิเล็กทรอนิกส์คั่วหมุนคั่วผ่าน
- ภาครับสัญญาณ จะเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์รับสัญญาณแสงที่ถูกอิเล็กทรอนิกส์คั่วหมุนคั่วผ่านเป็นสัญญาณรูปความถี่(2)เข้ามาจากนั้นจะนำสัญญาณไปผ่านส่วนขยายสัญญาณ ตัวขยายจะรับแอมป์
- ส่วนเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า จะเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณจากภาครับเป็นแรงดันไฟฟ้า
- ส่วนแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า จะรับค่าแรงดันที่มาจากส่วนเปลี่ยนความถี่มาแสดงผลเป็นตัวเลขได้ตั้งแต่ 0 - 199.9 kV

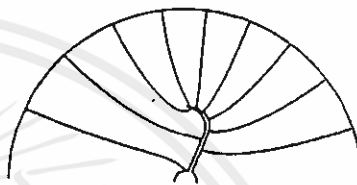
#### 3.3 ส่วนโปรแกรมไฟในทีโอเอ็มเอ็นท์

ในโครงการวิจัยได้สร้างโปรแกรมไฟในทีโอเอ็มเอ็นท์มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าของอีเล็กโตรคั่วหมุนและขนาดโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าโดยจะเป็นการหาการกระจายของระดับแรงดันที่ป้อน, ทิศทางของแอมแปร์และขนาดของแรงที่กระทำบนอีเล็กโตรคั่วหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้า สมการที่นำมาใช้จะเป็นแบบ 2 มิติและไม่คำนึงถึงผลของประจุกลึง( $\rho_s=0$ ) ในการใช้โปรแกรมไฟในทีโอเอ็มเอ็นท์มาช่วยในการวิเคราะห์ได้ทั้งการแบ่งรูปมอเตอร์สนามไฟฟ้ามาพิจารณาเชิงครึ่งซีกหรือใช้หลักการแกนสมมาตรกัน (Symmetry) จากนั้นได้แบ่งโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าออกเป็น 1296 โหนด 2454 อิเล็กเมนต์

ส่วนผลการวิเคราะห์หาการกระจายของศักย์ไฟฟ้าจากแรงดันที่ป้อนและทิศทางของแอมแปร์ที่กระทำบนอีเล็กโตรคั่วหมุนของมอเตอร์สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟในทีโอเอ็มเอ็นท์แสดงได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4.



รูปที่ 3. การกระจายของระดับแรงดันในมอเตอร์สนามไฟฟ้า



รูปที่ 4. ทิศทางของแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้า

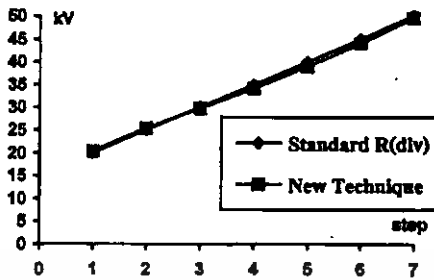
#### 4. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ส่วนผลการทดสอบจุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างจากเทคนิคที่นำเสนอในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่เชื่อมกับเครื่องวัดมาตรฐานของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

- ในการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงช่วงช่วง 20 - 50 kV ใช้มอเตอร์สนามไฟฟ้าขนาดอีเล็กโตรคั่วระนาบเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm, อิเล็กโตรคั่วหมุนยาว 78 mm วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายเฟลอมและภายในบรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> ความดัน 0.5 bar สามารถแสดงผลการทดสอบที่เชื่อมกับเครื่องวัดแบบค่าความต้านทานต่ออันดับได้ดังรูปที่ 5. ช่วง 50-100kV ใช้มอเตอร์สนามไฟฟ้าขนาดอีเล็กโตรคั่วระนาบเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm, อิเล็กโตรคั่วหมุนยาว 73 mm วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายเฟลอมและภายในบรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> ความดัน 2.5 bar สามารถแสดงผลการทดสอบที่เชื่อมกับเครื่องวัดแบบค่าความต้านทานต่ออันดับได้ดังรูปที่ 6.

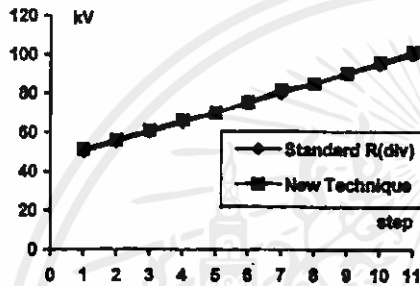
- สำหรับการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงช่วง 30 - 50 kV ใช้มอเตอร์สนามไฟฟ้าขนาดอีเล็กโตรคั่วระนาบเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm, อิเล็กโตรคั่วหมุนยาว 73 mm วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายเฟลอมและภายในบรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> ความดัน 2.5 bar สามารถแสดงผลการทดสอบที่เชื่อมกับเครื่องวัดแบบค่าความต้านทานต่ออันดับได้ดังรูปที่ 7. ช่วง 50-85 kV ใช้มอเตอร์สนามไฟฟ้าขนาดอีเล็กโตรคั่วระนาบเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 mm, อิเล็กโตรคั่วหมุนยาว 58 mm วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายเฟลอมและภายในบรรจุก๊าซ SF<sub>6</sub> ความดัน 4 bar สามารถแสดงผลการทดสอบที่เชื่อมกับเครื่องวัดแบบค่าความต้านทานต่ออันดับได้ดังรูปที่ 8.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541



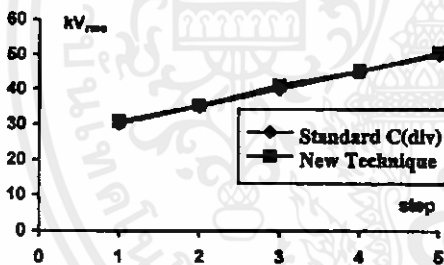
รูปที่ 5. ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

จำนวน 20 - 50kV



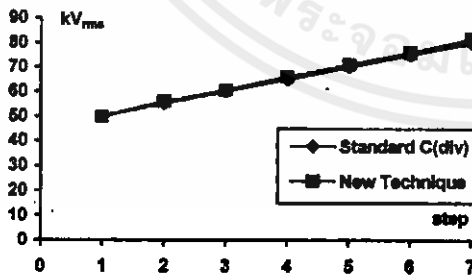
รูปที่ 6. ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

จำนวน 50 - 100kV



รูปที่ 7. ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

ช่วง 30 - 50kV<sub>rms</sub>



รูปที่ 8. ผลการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

ช่วง 50 - 85kV<sub>rms</sub>

5. สรุปผลงานวิจัย

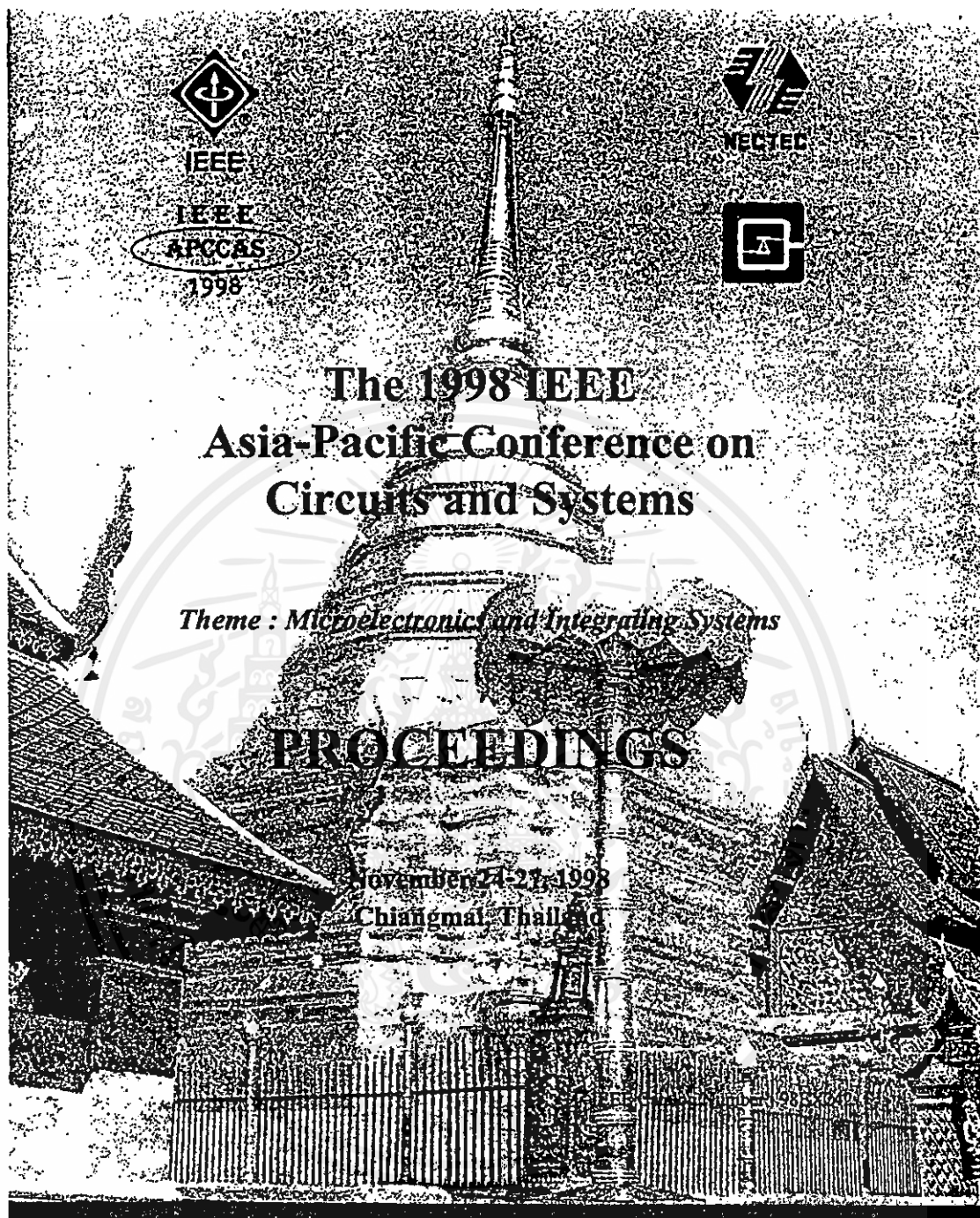
ในการทดสอบชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างจากเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่นำไปวิเคราะห์ด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและกระแสสลับที่เชื่อมกับเครื่องวัดความถี่ของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จากผลการทดสอบในรูปที่ 5 จนถึงรูปที่ 8 จะพบว่าความผิดพลาดที่อ่านได้จากชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างจากเทคนิคที่นำเสนอในส่วนการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจำนวน จะได้ค่า  $\pm 3\%$  และในส่วนการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับจะได้ค่า  $\pm 2.75\%$  เมื่อเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความถี่ของห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชุดวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างจากเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการของมอเตอร์สนามไฟฟ้าที่นำเสนอจะมีค่าความผิดพลาดที่ได้จากการวัดอยู่ในช่วงที่อมรับได้ จัดสร้างง่าย ขนาดกะทัดรัด การใช้งานสะดวกปลอดภัย สามารถขยายอำนาจได้โดยการปรับระดับความถี่ของก๊าซหรือปรับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตัวหมุนกับอิเล็กโทรดระบบของมอเตอร์สนามไฟฟ้า อีกทั้งวัสดุที่ใช้สร้างหาได้ในประเทศ ส่วนของโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ที่สร้างขึ้นในโครงการวิจัยจะได้ค่าการพัฒนาส่วนของสมการที่ใช้ให้เป็นแบบ 3 มิติและคำนึงถึงผลของประจุตกค้างที่อาจก่อให้เกิดการวิเคราะห่ออกแบบรูปว่าของอิเล็กโทรดตัวหมุนและขนาดโครงสร้างมอเตอร์สนามไฟฟ้าให้เหมาะสมมากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบณาธิระลึกถึง คุณวงศ์ นนชวิญประชา ชาวไร่ นามนิต ทอด มุขพันธ์ นามนิตกร ทิศฤทธิ์ นามจรวิวัฒน์ แห่งศิริवार มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจฬาลงครณ์ที่ท่าให้งานวิจัยชิ้นนี้ด้วยใจสุจริตใจดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Matchew N.O.Seduk "A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems" IEEE Trans. Educ., vol. 32, 1989, pp. 85-93.
- [2] พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก และ ศิริวัฒน์ โทษิวารุท, "เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจฬาลงครณ์, 2538 หน้า 131-137.
- [3] E.Kuff and M.Abdulrah, High-Voltage Engineering, Pergamon Press, Oxford, 1977
- [4] L.L. Alston, High-Voltage Technology, Oxford University Press, London, 1968



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## A New Technique for High Voltage Measurement Using High Voltage Electric Field Motor

S. Potivejkul, V. Kinnares, and P. Kerdonfag

Dept of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

Dept of Electrical Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand.

Tel (662) 3266052-6101 Ext 2619, 2623, e-mail : siriwat@mut.ac.th

### Abstract

In this paper, a new technique for high voltage measurement for DC and AC systems using High Voltage Electric Field Motor (HVEFM) is proposed. The rotor speed of HVEFM is linearly proportional to the applied voltage. Therefore, the input voltage can be measured by detecting the rotor speed. The range of the measured voltage level is dependent of the pressure and types of gases in HVEFM. The structure is a significant factor affecting the accuracy of measurement, and a range of measured voltage level. The Finite element (FEM) program is used for computing the voltage level and electric field distribution at any points of HVEFM. The calculated results offer a design of the appropriate structure, so that the relationship between the motor speed and measured voltage level is linear and measurement can be applicable to higher voltage level. The advantages of this technique are light, compact, easy to install, and low cost when comparing to a conventional divider technique.

### 1. Introduction

At present, DC and AC high voltage are measured by any types of divided voltage instruments which normally compose of resistors, capacitors or PT. Each of these instruments can be accurately used to measure only DC or AC high voltages. The size and weight of the divided voltage instruments depends on the measured voltage level so they are not convenient to move and install resulting in difficulty of the high voltage measurement. In other words, the measured results will have large errors or cannot be measured if unsuitable instrument is used.

These problems can be solved by using HVEFM. The accuracy of measured results are within acceptable level both DC and AC high voltage. Furthermore, the size and weight of the equipment is much smaller and more light than a conventional one. The proposed equipment is useful, low cost, movable and simply implemented.

### 2. Theory

#### 2.1 Electric Field

Dielectric strength depends on several factors such as electrode geometry, dielectric characteristics, humidity, pressure, temperature, etc. Electric field stress

relies on electrode shapes. The equation for maximum electric field stress at geometrical electrode surface can be defined as

$$E_{max} = \frac{V}{d \eta^*} \quad (1)$$

where

$\eta^*$  : field utilization factor ( $\eta^* = E_{av}/E_{max}$ , generally  $\eta^* \leq 1$ ,  $E_{av}$  : average electric field)

Unfortunately, electric field stress of proposed HVEFM cannot be calculated from such equation. The numerical method may be used for solving that problem.

#### 2.2 Finite Element Method Analysis

The finite element analysis of any problem involves basically four steps : 1) discretizing the solution region into finite number of subregions or elements, 2) deriving governing equations for a typical element, 3) assembling of all elements in the solution region, 4) and solving the system of equations obtained. The more details can be found in [1].

$$V(x,y) = \sum_{i=1}^N V_i(x,y) \quad (2)$$

where  $V(x,y)$  : potential distributions in various element

$V_i(x,y)$  : potential within an element

$$E_i = -\nabla V_i \quad (3)$$

where  $E_i$  : electric field (uniform) within an element

$$\nabla V_i = \sum_{j=1}^3 V_{ij} \nabla \alpha_j \quad (4)$$

where  $\alpha_j$  : element shape functions

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j ds \quad (5)$$

where  $C_{ij}^{(e)}$  : coefficient matrix coupling between nodes  $i$  and  $j$

$$We = \frac{1}{2} \epsilon [V_e]^T [C^{(e)}] [V_e] \quad (6)$$

where  $We$  : energy per unit length associated with the element

$C^{(e)}$  : element coefficient

**3. Experimental System and Measurement Technique**

As shown in Figure 1, a HVEFM consists of a S-shaped electrode acting as a rotor, a rolled copper plate acting as a stator. All of them are contained in an insulated transparent chamber.

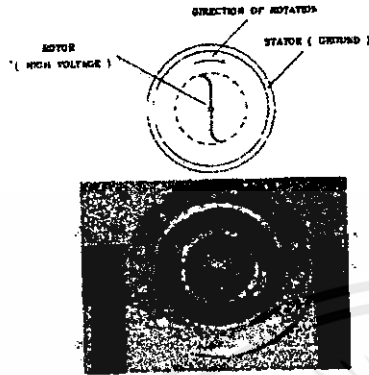


Figure 1 Structure and direction of rotation of HVEFM

The principle of using the HVEFM to measure the AC and DC high voltage is based on gases ionization causing Electric forces on rotating electrodes (rotor). The angular velocity of motor is linearly proportional to the voltage supply level. Therefore, it implies that the real application can be developed for measuring high voltage supplies by measuring velocity of the motor which is quite straightforward. This velocity can be detected from blades of the motor spinning pass a signal transmitter. The frequency signal from the transmitter will be converted into the high-voltage-level by the F/V circuit. The measurement procedure is shown in Figure 2.

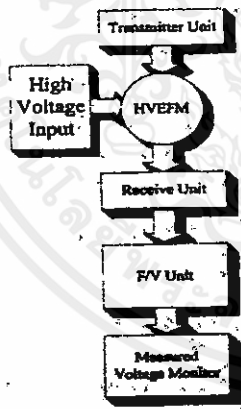


Figure 2 Flowchart of high voltage-measurement procedure.

The measured voltage level depends on the characteristics of motors. If we want to measure the higher voltage level, we have to increase more gas pressure in the chamber or adjust the gap between the stator-rotor or change gas types in order to extend the range of measurement.

**4. Results**

In this paper, the Finite Element Method (FEM) program has also been used to assist in the design and analysis of the HVEFM structure. Figure 3 shows the division of the elements of FEM to calculate the voltage distribution and direction of electric force. The results is shown in Figures 4 and 5.

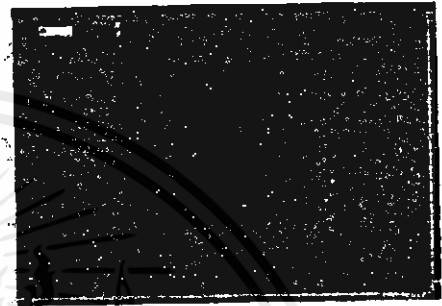


Figure 3 Element division of FEM for HVEFM.



Figure 4 The potential distribution in the HVEFM.



Figure 5 Electric force direction in the HVEFM.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Due to the inherent property of HVEFM, the linearity range of angular velocity depends on many factors such as gap length, rotor shapes, types and pressure of gases. As shown in Figure 6, the variation of gas types and pressure are essential factors in choosing the suitable range of measurement. For examples, with the same motor structure, at 1 bar Air pressure yields measured voltage level between 15 - 25 kV<sub>dc</sub>; whilst 1 bar SF<sub>6</sub> pressure yields measured voltage level between 20 - 50 kV<sub>dc</sub>.

In the construction of the prototype of this equipment, it was designed to measure the DC high voltage between 20 - 100 kV and AC high voltage between 30 - 85 kV<sub>rms</sub>. In each procedure of voltage measurement, the interval of voltage is divided and measured, which is suitable for the structure of HVEFM. Also, this leads to the better precision prototype.

From above results, the suitable structure of HVEFM can be designed as follows:

- The rolled stator is made of copper plate with 35 mm width.
- The S - shaped rotor made from brass with 73 mm arm length.
- The gap length between the rotor and the stator is 27 mm.
- The contained gas in a chamber is SF<sub>6</sub> as an insulator.

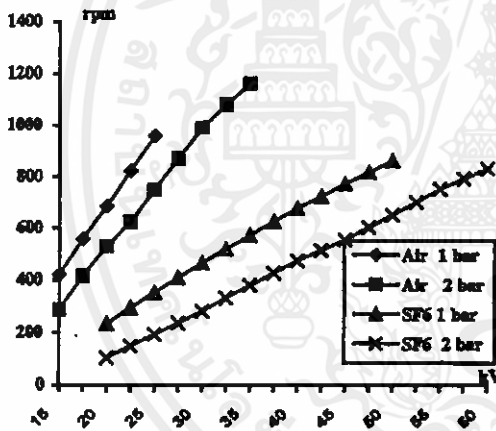


Figure 6 The relationship between voltage supply and velocity of HVEFM with the variation of gas types and pressure.

For DC high voltage (negative) measurement with a range of 20 - 100 kV, the test is divided into 2 ranges (20 - 50 kV and 50 - 100kV). As shown in Figures 7 and 8, the measured results are compared with

the actual value based on a standard resistor divider (0-300 kV<sub>dc</sub> rated).

For AC high voltage measurement with a range of 30 - 85 kV<sub>rms</sub>, the test is divided into 2 ranges (30 - 50 kV<sub>rms</sub> and 50 - 85 kV<sub>rms</sub>). As shown in Figures 9 and 10, the measured results are compared with the actual value based on a standard capacitor divider (0-150 kV<sub>rms</sub> rated).

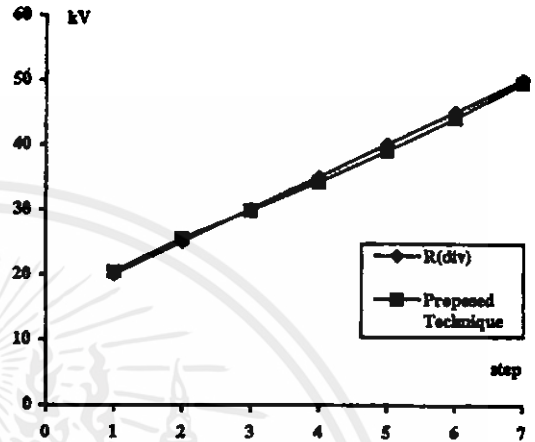


Figure 7 The experimental result of the 20 - 50kV<sub>dc</sub> DC high voltage measurement (pressure = 0.5 bar SF<sub>6</sub>)

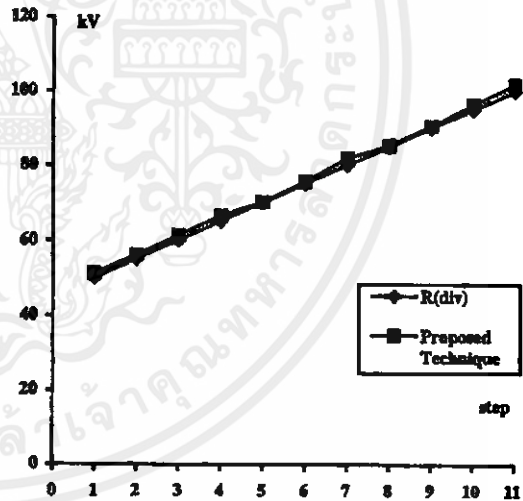


Figure 8 The experimental result of the 50 - 100kV<sub>dc</sub> DC high voltage measurement (pressure = 2.5 bar SF<sub>6</sub>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

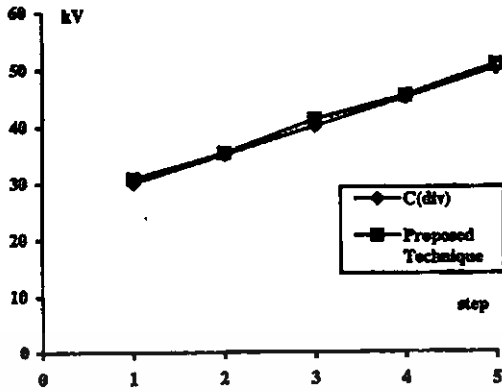


Figure 9 The experimental result of 30-50kV<sub>rms</sub>  
AC high voltage measurement (pressure = 2.5 bar SF<sub>6</sub>)

## 5. Conclusion

The proposed technique for high voltage measurement using HVEFM is capable of measuring both DC high voltage between 20 - 100kV and AC high voltage between 30 - 85 kV<sub>rms</sub> within 3% error when comparing with the standard measurement. Note that with the same motor structure, gas types, and pressure, the measured range of DC voltage is wider than that of AC voltage (See Figures 8 and 9). The good accuracy can be achieved by dividing measurement ranges, depending on gas pressure. The extended measured range can be made by adjusting gas pressure level and gap between a rotor and a stator. The further work will fully examine the various factors influencing reliability for real applications.

## References

- [1] Matchew N.O.Sadiku , " A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems" IEEE Trans. Educ.,vol.32,1989,pp.85-93.
- [2] H.Yamashita, E. Nakamae, T. Okano, M.S.A.A. Hammam, "A Color Graphics Display of The Field Intensity Around The Insulator on 13.2 kV Distribution Lines", IEEE Trans. On Power Delivery, vol.8, 1993, pp.1696-1702.
- [3] E.Kuff and M.Abdulrah, High-Voltage Engineering, Pergamon Press, Oxford, 1977.
- [4] L.L. Alston, High-Voltage Technology, Oxford University Press, London, 1968.
- [5] Matthew N.O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, Florida: CRC Press, 1992.
- [6] W.H. Hayt, Engineering Electromagnetics, New York: McGrawHill,1981.

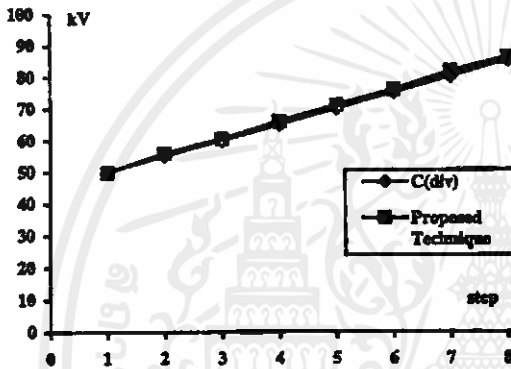


Figure 10 The experimental result of 50 - 85kV<sub>rms</sub>  
AC high voltage measurement (pressure = 4 bar SF<sub>6</sub>)

## ประวัติผู้เขียน



นายพงษ์เทพ เกิดคอนแฝก เกิดเมื่อวันที่ 6 ธันวาคม 2515 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ไฟฟ้ากำลัง)และประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ไฟฟ้ากำลัง) จากวิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้าวิศวกรรมไฟฟ้า(ไฟฟ้ากำลัง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้