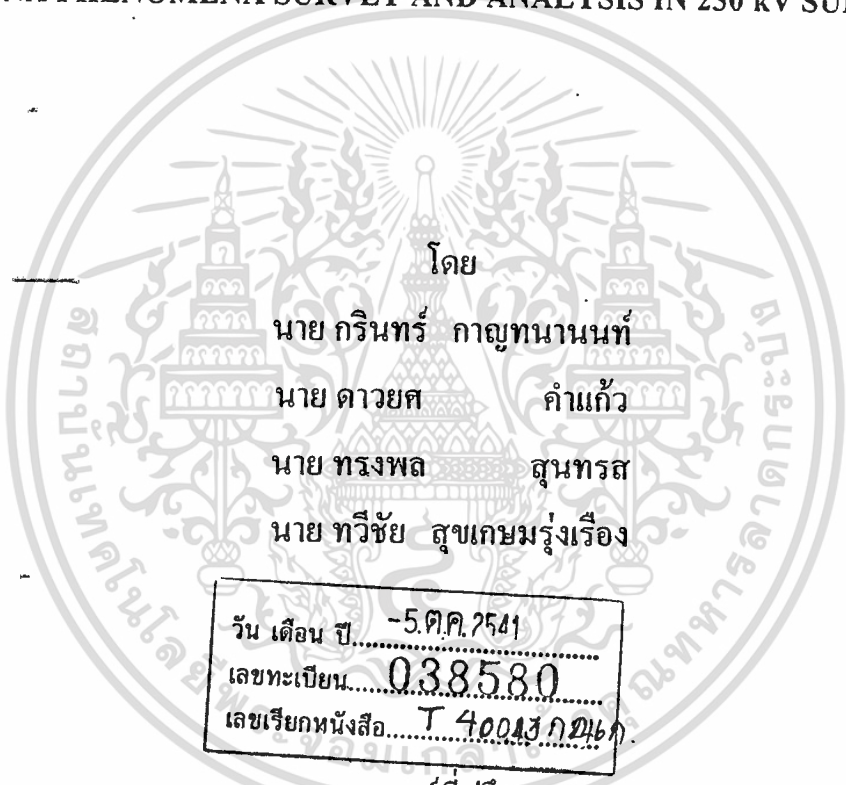




ปีการศึกษา 2540

การสำรวจและวิเคราะห์โคโรนาในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV  
CORONA PHENOMENA SURVEY AND ANALYSIS IN 230 kV SUBSTATION



โดย  
นาย กรินทร์ กาญจนานนท์  
นาย ดायศ คำแก้ว  
นาย ทรงพล สุนทรส  
นาย ทวีชัย สุขเกษมรุ่งเรือง

วัน เดือน ปี.....5.ค.ค.2541  
เลขทะเบียน.....038580  
เลขเรียกหนังสือ.....T 40043 ก 246 ก

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

ปริญญาโทปีการศึกษา 2540


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสำรวจและวิเคราะห์โคโรนาในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV

ผู้จัดทำ

1. นาย กรินทร์ กาญจนานนท์
2. นาย ดวยศ คำแก้ว
3. นาย ทรงพล สุนทรส
4. นาย ทวีชัย สุขเกษมรุ่งเรือง

 .....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสำรวจและวิเคราะห์ปรากฏการณ์โคโรนาในสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV

นาย กรินทร์ กาญจนานนท์

นาย คาวศ คำแก้ว

นาย ทรงพล สุนทรส

นาย ทวีชัย สุขเกษมรุ่งเรือง

รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาถึง ปรากฏการณ์โคโรนา และศึกษาถึงปัจจัยในการเกิดโคโรนาที่มีผลทำให้เกิดความสูญเสียทางด้านไฟฟ้าของระบบ อีกทั้งทำให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง โดยเริ่มจากการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้า เพื่อให้เห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าพร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง จากนั้นทำการสำรวจและสังเกตปรากฏการณ์จากสถานที่ตั้งจริง อันได้แก่ สถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV โดยจะสำรวจอุปกรณ์บริเวณที่ใช้ขั้วสายส่ง Tension String ขนาด 230 kV เข้ากับลูกถ้วย Tension ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงบางปะกง , หอนงออก , อ่อนนุช และ บางกะปิ เพื่อรวบรวมข้อมูลและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา ด้วยกล้องสำรวจโคโรนาซึ่งเป็นกล้องที่ใช้ในการสำรวจโคโรนาโดยตรง แทนการสำรวจด้วยตาเปล่า เพื่อนำเอาปรากฏการณ์และปัจจัยผลกระทบมาวิเคราะห์ เพื่อเสนอแนะแนวทางแก้ไขและป้องกันการเกิดโคโรนาในระบบ อันอาจจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัย และการประยุกต์ใช้ได้ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CORONA PHENOMENA SURVEY AND ANALYSIS IN 230 kV SUBSTATION

Karin Kandananond

Daoyot Khamkaew

Songpon Soontaros

Taweechai Sukkasemrungraung

Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul Advisor

1997

### ABSTRACT

This project will show the study of Corona Phenomena characteristics and the environmental factors affecting it. Corona Phenomena is the system loss which decreases the system stability. In the process of studying we will begin with the artificial phenomena built in the laboratory and survey the real in the selected 230 kV substation which are Bangpakong sub., Nong-Chok sub., Omuch sub., and Bangkapi sub.. Corona on insulator assemblies for tension string is the aim of surveying and studied by the special instrument Corona-Camera which can detect the corona effect and show by the picture recorded in video tape along with recording the environmental data manually in order to introduce the correction and protect the corona

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1      บทนำ	1
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ โควิด	1
2.2 ลักษณะของปรากฏการณ์ โควิด	2
2.3 การแสดงให้เห็นถึง โควิด	4
บทที่ 2      ทฤษฎี โควิด	5
2.1 ชนิดของปรากฏการณ์ โควิด	5
2.2 คุณสมบัติของ โควิด	6
2.3 การก่อตัวของ Brush และ Plume discharge	11
2.4 Radio influence associated with corona discharge	12
2.5 แฟกเตอร์ที่มีผลต่อการเกิด โควิด	15
2.6 แรงดันตกบนลูกถ้วยเนื่องจาก โควิด	17
2.7 ผลกระทบจากปรากฏการณ์ โควิด	25
2.8 การดิสชาร์จในก๊าซ	25
บทที่ 3      กระบวนการสำรวจและวิจัย โควิด	30
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจ	30
3.2 วิธีการในการสำรวจ	31
3.3 ขั้นตอนในการขออนุญาตเข้าสำรวจ	31
3.4 การสำรวจและขั้นตอนในการเก็บข้อมูล	31
3.5 สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เลือกไปสำรวจ	34
3.6 ผลที่ได้จากการสำรวจ	35
บทที่ 4      ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด โควิด	41
4.1 อุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลต่อการเกิด โควิด	41
4.2 ความชื้นที่มีผลต่อการเกิด โควิด	65

บทที่ 5	ฉนวนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์	68
	5.1 ฉนวน	68
	5.2 suspension clamps	69
	5.3 compression dead end clamps	70
	5.4 arcing horn	70
	5.5 hard ware ที่ใช้ยึด clamps และสายเข้ากับลูกถ้วย	71
บทที่ 6	แนวเส้นทางการเกิดวาทไฟตามผิว	77
บทที่ 7	สรุปและวิเคราะห์	83

ภาคผนวก  
กิตติกรรมประกาศ  
เอกสารอ้างอิง



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 bundle 4 ตัวนำของสายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วผิวเรียบ ระยะห่างของสาย 20 นิ้ว ขนาดทดสอบ	2
รูปที่ 1.2 การเกิด โคโรนาดีสชาร์จ บนตัวนำ bundle 400kV line to ground	3
รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิด โคโรนาในช่วงต่างๆ	5
รูปที่ 2.2 กราฟ oscilograms จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยอยู่ในสภาวะต่างๆ	6
รูปที่ 2.3 รูปโคโรนาดีสชาร์จ บนตัวนำแห้งและเรียบขณะป้อนไฟ 200 kV line to ground	8
รูปที่ 2.4 รูปโคโรนาดีสชาร์จ บนตัวนำเปียกและเรียบขณะป้อนไฟ 200 kV line to ground	9
รูปที่ 2.5 รูปโคโรนาดีสชาร์จ บนสาย Hawk ACSR stranded 150 kV line to ground	10
รูปที่ 2.6 Plume และ Brush discharge บนสายตัวนำ ACSR ที่ 300 kV line to ground จะพบว่าเกิด Plume ขึ้นบนสายตัวนำทุกๆระยะ 0.1 นิ้ว	11
รูปที่ 2.7 ลักษณะ Brush discharge ที่เกิดจากแรงดัน AC มีลักษณะเป็นปมออกมาตามแนวรัศมีรอบสายตัวนำขอบนอกเป็นหย่อมๆและเกิดเสียงซ่า	13
รูปที่ 2.8 ลักษณะ Brush discharge ที่เกิดจากแรงดัน DC ลบ มีลักษณะเป็นแปรงโค้งออกมาตามแนวรัศมีรอบสายตัวนำขอบนอกเป็นหย่อมๆและเกิดเสียงซ่า	13
รูปที่ 2.9 ลักษณะของ plume discharge ที่เกิดจากแรงดัน AC มีลักษณะเป็นปม ซึ่งบางปมมีลักษณะเป็นก้อน และตรงปลายมีลักษณะบานออกและมีเสียงซ่า	14
รูปที่ 2.10 ลักษณะของ plume discharge ที่เกิดจากแรงดัน DC ลบ มีลักษณะคล้ายๆกับ plume ที่เกิดจากแรงดัน AC	15
รูปที่ 2.11 แสดงการวางสายไฟฟ้ารูปทรงกระบอกผิวเรียบ	20
รูปที่ 2.12 แสดงพื้นที่ผิวของสายต่างชนิดกัน	22
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส	26

รูปที่ 2.14	การเพิ่มของอิเล็กตรอนจากการชนกัน	27
รูปที่ 2.15	ทฤษฎีของ Townsend	27
รูปที่ 2.16	การเปลี่ยนแปลงของ Avalance electron ไปสู่ Streamer	28
รูปที่ 3.1	กล้องตรวจจับ โครโนา	30
รูปที่ 3.2	รูปแสดงการทำงาน	32
รูปที่ 3.3	รูปแสดงการทำงาน	33
รูปที่ 3.4	รูปแสดงการทำงาน	33
รูปที่ 3.5	กราฟแสดงค่า ESDD ในปี 2540 ของ สฟ. บางปะกง	36
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัวที่ line ไทรน้อย ณ สฟ. หนองจอก	43
รูปที่ 4.2	ภาพของ โครโนาที่เกิดบนอุปกรณ์ที่ยึดสายส่งเข้ากับลูกถ้วยที่ line ไทรน้อย ณ สฟ. หนองจอก ที่อุณหภูมิ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ค่าแรงดันวิกฤต 145.6 kV / cm	44
รูปที่ 4.3	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 146.1 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 65% อุณหภูมิ 28.5 °C	44
รูปที่ 4.4	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 147 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 73% อุณหภูมิ 26 °C	45
รูปที่ 4.5	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 147.56 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 76% อุณหภูมิ 24 °C	45
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัว line หนองจอก ณ สฟ. บางปะกง	46
รูปที่ 4.7	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 145.82 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 62% อุณหภูมิ 29.5 °C	47
รูปที่ 4.8	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 146.52 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 72% อุณหภูมิ 27.5 °C	47
รูปที่ 4.9	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 147.284 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 71% อุณหภูมิ 25 °C	48
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัว line บางปะกง ณ สฟ. หนองจอก	49
รูปที่ 4.11	ภาพของ โครโนาที่แรงดันวิกฤต 145.6 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 55%	50

	อุณหภูมิ 30°C	
รูปที่ 4.12	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 146.028 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 62.5% อุณหภูมิ 29 °C	50
รูปที่ 4.13	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 146.586 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 66% อุณหภูมิ 27 °C	51
รูปที่ 4.14	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 147.42 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 80% อุณหภูมิ 24.5 °C	51
รูปที่ 4.15	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 147.77 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 82% อุณหภูมิ 23.8 °C	52
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัว line อ่อนนุช สฟ. หนองจอก	53
รูปที่ 4.17	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 145.6 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 55% อุณหภูมิ 30 °C	54
รูปที่ 4.18	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 146.028 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 66.85% อุณหภูมิ 29 °C	54
รูปที่ 4.19	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 146.586 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 66% อุณหภูมิ 27 °C	55
รูปที่ 4.20	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 147 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 74% อุณหภูมิ 26 °C	55
รูปที่ 4.21	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 147.284 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 78% อุณหภูมิ 25 °C	56
รูปที่ 4.22	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 147.77 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 82% อุณหภูมิ 23.8 °C	56
รูปที่ 4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัว line บางกะปิ สฟ. อ่อนนุช	57
รูปที่ 4.24	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 146.3 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 67% อุณหภูมิ 28 °C	58
รูปที่ 4.25	ภาพของ โคโรนาที่แรงดันวิกฤต 14.586 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 72% อุณหภูมิ 27 °C	58

รูปที่ 4.26	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 147.07 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 79% อุณหภูมิ 25.5 °C	59
รูปที่ 4.27	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 146.3 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 67% อุณหภูมิ 28 °C	60
รูปที่ 4.28	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 147 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 75% อุณหภูมิ 26 °C	60
รูปที่ 4.29	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 147.07 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 79% อุณหภูมิ 25.5 °C	61
รูปที่ 4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัว line อ่อนนุช ณ สฟ. บางกะปิ	62
รูปที่ 4.31	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 145.6 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 55% อุณหภูมิ 30 °C	63
รูปที่ 4.32	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 146.284 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 60% อุณหภูมิ 29.5 °C	63
รูปที่ 4.33	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 146.586 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 69% อุณหภูมิ 27 °C	64
รูปที่ 4.34	ภาพของ โครโมนาที่แรงดันวิกฤต 146.586 kV / cm ความชื้นสัมพัทธ์ 69% อุณหภูมิ 27 °C	64
รูปที่ 5.1	ลูกถ้วย porcelain	68
รูปที่ 5.2	suspension clamp	69
รูปที่ 5.3	compression dead end clamp	70
รูปที่ 5.4	arcing horn	71
รูปที่ 5.5	socket clevis	72
รูปที่ 5.6	yoke plate	72
รูปที่ 5.7	sag adjuster plate	73
รูปที่ 5.8	shackle	73
รูปที่ 5.9	ข้อกำหนดตามชนิดของ clamp	74
รูปที่ 5.10	ข้อกำหนดตามชนิดของ clamp	75
รูปที่ 5.11	ข้อกำหนดตามชนิดของ clamp	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 6.1 แสดงลักษณะการกระจายตัวของประจุไฟฟ้า(ภาวะปกติ) ใช้ประโยชน์ด้านกา 77

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.2	แสดงลักษณะการกระจายตัวของประจุไฟฟ้า(เมื่อเกิด โควิด)	77
รูปที่ 6.3	รูปลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ทดสอบ	80
รูปที่ 6.4	แสดงขั้นตอนการวางไฟตามผิวในลูกถ้วย porcelain	80
รูปที่ 6.5	แสดงขั้นตอนการวางไฟตามผิวในลูกถ้วย porcelain	81
รูปที่ 6.6	แสดงขั้นตอนการวางไฟตามผิวในลูกถ้วย porcelain	81
รูปที่ 6.7	แสดงขั้นตอนการวางไฟตามผิวในลูกถ้วย porcelain	82
รูปที่ 6.8	แสดงขั้นตอนการวางไฟตามผิวในลูกถ้วย porcelain	82



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความดันบรรยากาศมาตรฐานที่เป็นฟังก์ชันของความสูงเหนือระดับน้ำทะเล	17
ตารางที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันของกำลังสูญเสีย โคโรนา	24
ตารางที่ 6.1 แสดงถึงปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมกับผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้	79



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเกิดโคโรน่า

Saint Elmo' fire ในการเกิดพายุที่ทะเล น่าจะเป็นรูปแบบในการจดบันทึกครั้งแรกในการเกิด corona ซึ่งปรากฏเห็นเป็นเปลวไฟสีแดงระเรื่อหรือแสงสีฟ้าอ่อนเป็นบางครั้งบางคราวบนคอนบนของเสาเรือและบนคอนท้ายของใบขวางบนเสาเรือ ทะลาลีบนเรือมีความเชื่อว่าเป็น โชคกลางที่ดี และได้เรียกชื่อตามนักบุญผู้อุปถัมภ์ว่า Saint Elmo

หลายปีต่อมา เบนจามิน แฟรงคลิน ได้อ้างถึงปรากฏการณ์ดังกล่าวแต่ไม่ได้อธิบายว่าที่ทะเลสาบเรือกล่าวเป็นจริง และที่เสาเรือเปียกและเครื่องเสาไม้ที่ใช้ในเรือเป็นเสาหล่อฟ้า เพราะว่ารอบๆคอนบนของเสาเรือคลุมด้วยไฟที่เหมือนรัศมีหรือมงกุฎพระราชา ต่อมาจึงเรียกมันว่าเป็น โคโรน่า (เป็นภาษาลาติน แปลว่า มงกุฎพระราชา) โดยนักศึกษาลาดินตะวันออกในวันหนึ่ง

หลายปีต่อมาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงได้มีการพัฒนา ซึ่งก็เกิดปรากฏการณ์ของแสงคล้ายคลึงกันในห้องทดลอง และต่อมาจึงเรียกการเกิดแสงดังกล่าวว่าเป็นการเกิด โคโรน่า ด้วย และคำว่า โคโรน่า ได้ถูกเรียกในปรากฏการณ์การเกิด discharge ทางไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นได้ไม่ภายในก็ภายนอกในเครื่องมือทางไฟฟ้า

The ASTM standard Method สำหรับป้องกันและอุปกรณ์แสดง pulse ของ โคโรนาดิซชาร์จ ในฉนวน ( 1868 - 73 ) ได้ให้คำนิยาม โคโรนา หรือ ดิสชาร์จตามผิว ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการ ไอออไนเซชัน ของก๊าซชั่วคราวในระบบฉนวน เมื่อเกิดความเครียดของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจนถึงค่าวิกฤต กระบวนการ ไอออไนเซชัน จะถูกจำกัดอยู่ในวงตามส่วนของระยะทางระหว่าง อิเล็กโตรดของระบบเท่านั้น ( 1868 - 73 ) การเกิด โคโรนา ภายในจะผิดแผกจากการเกิด โคโรนา ภายนอก ซึ่งคุณสมบัติของการ ดิสชาร์จ จะเกิดบนพื้นผิวของตัวนำซึ่งจริงๆ แล้ว ปรากฏการณ์การเกิดโคโรนา คนทั่วไปมักจะคุ้นเคยกันอยู่แล้ว ซึ่งมันเป็นสาเหตุของการเกิดรอย ( impressive ) รอบๆตัวนำที่แขวนอยู่ระหว่างเสาของไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการ ดิสชาร์จ นี้สังเกตเห็นได้ชัดในตอนกลางคืน แต่จะเห็นได้ชัดกว่าในคืนที่มีหมอกหนามากนอกจากนี้ในที่ที่มีหมอกหนา จะมีเสียงฟ่อซึ่งมากกว่าปกติด้วย โดยปกติที่เกิดการ ดิสชาร์จ ภายนอกในอากาศจะเกิด ไอโชน ซึ่ง ไอโชน นี้สามารถช่วยในการตรวจจับ โคโรนาได้ด้วย

คำจำกัดความทั่วไปในอดีตจะเป็น ดิสชาร์จ อันเนื่องมาจาก ความเครียดของสนามไฟฟ้า ที่สูงมากๆ แต่ต่อมาจากการศึกษาพบว่า ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่สูงมากๆ คือสาเหตุ และ ดิสชาร์จ คือผล โคโรนาเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง / ของเหลว / ก๊าซ

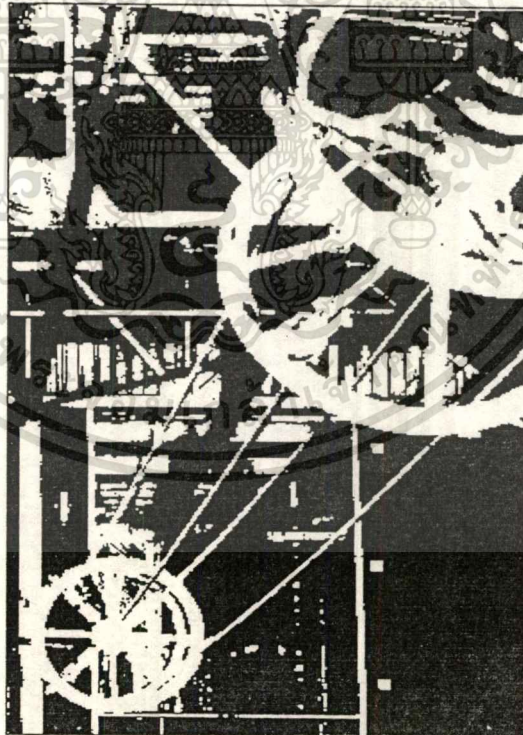
กรณีในของแข็ง โครนา จะเกิดขึ้นเมื่อมีความเสียหายในตัววัตถุ สำหรับในทาง สายส่ง การ ดิสชาร์จ ที่เกิดขึ้นในอากาศบริเวณที่อยู่ใกล้เคียงกับตัวนำ หรือผิวของฉนวน จะเป็นผลเนื่องมาจาก ความเครียดไฟฟ้า (electrical stress) มีค่าเกินค่าวิกฤต

คำนิยามของ โครนา ตาม ASTM จะได้ว่า “ โครนา คือการ ดิสชาร์จ ที่มีปรากฏการณ์ทาง แสงสว่างออกมาให้เห็นเนื่องจากการ ไอออไนเซชัน ของอากาศที่อยู่รอบๆตัวนำ ทำให้ค่า voltage gradient มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต “

### 1.2 ลักษณะของปรากฏการณ์โครนา

โครนา ดิสชาร์จ ( ซึ่งจะสังเกตได้จากผิวของตัวนำ ) จะเกิดเมื่อมีการเกิด electron avalanches อันเป็นผลมาจาก ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าเกินค่าวิกฤต

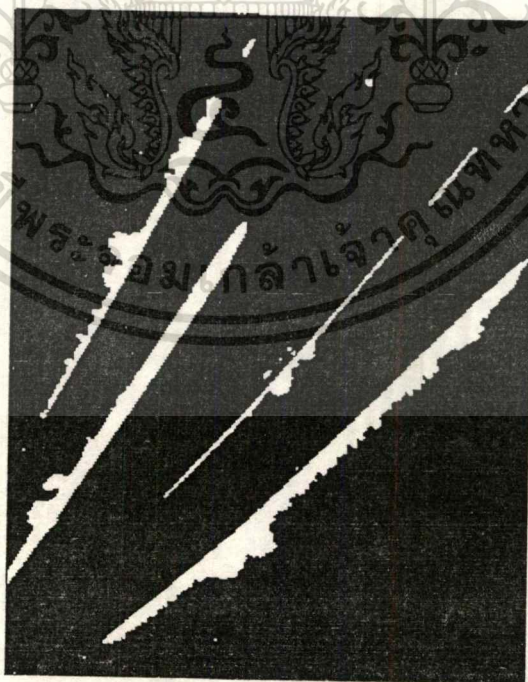
ในบรรยากาศของโลกทั่วไปจะมี อิเล็กตรอน อิสระอยู่เป็นจำนวนมากอันเป็นผลเนื่องมาจาก วัตถุกัมมันตภาพรังสีที่เปลือกลูกโลกและรังสี คอสมิก จากนอกโลก ในขณะที่ ตัวนำ จะได้รับการ กระตุ้นโดยไฟ AC ในทุกๆ ครั้ง cycle



รูป 1.1 bundle 4 ตัวนำของสายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ผิวเรียบ ระยะห่างของสาย 20 นิ้ว ขณะทดสอบ

ความเร็วของ อิเล็กตรอน อิสระจะขึ้นอยู่กับความเข้มของ สนามไฟฟ้า ถ้า ความเข้มสนามไฟฟ้า มีค่ามาก การชนของ อิเล็กตรอน กับโมเลกุลของอากาศ ( เช่น ก๊าซออกซิเจน หรือ ก๊าซ ไนโตรเจน ) จะเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น เนื่องจาก อิเล็กตรอนจะมีความเร็วมากพอ และผลจากการชน ก็จะทำให้มี อิเล็กตรอน ในวงโคจรวงนอกสุดของโมเลกุลมีการหลุดออกมา ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ไอออไนเซชัน ซึ่งโมเลกุลมีการแตกตัวออกเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอน หลังจากนั้นอิเล็กตรอน ที่เป็นตัวเริ่มต้นในการชนและอิเล็กตรอนที่ได้มาจากการชน จะมีความเร็วลดลง แต่อิเล็กตรอนทั้งคู่ จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าอีกครั้ง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณตาม ปริมาณการชนในแต่ละครั้ง เราจะเรียกว่า “ Electron avalanche ”

ความเข้มของสนามไฟฟ้ารอบๆ ตัวนำ จะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ และมันจะมีความเข้มสูงสุดที่ผิวดังนั้นเมื่อค่า Voltage ใน ตัวนำ ถูกทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวก็มีโอกาสที่จะสามารถเข้าใกล้ค่า ความเครียดของสนามไฟฟ้าวิกฤต และการ discharge ก็จะเกิดในบริเวณผิวของตัวนำในช่วงที่ Voltage ใน ตัวนำ อยู่ในช่วง ครึ่ง cycle ที่เป็นบวกการ avalanche ของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นตรงเข้าหา ตัวนำ จนกระทั่งถึงผิว ตัวนำ ในช่วงที่ voltage อยู่ในช่วง ครึ่ง cycle ที่เป็นลบ การ avalanche ของอิเล็กตรอนจะมีทิศทางออกจากผิวของ ตัวนำ ไปสู่บริเวณที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำกว่า และจะหยุดการ avalanche เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยเกินกว่าที่จะสามารถเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วที่สามารถ ไอออไนซ์ได้



รูป 1.2 การเกิด corona discharge บน ตัวนำ bundled ที่ 400 kV line-to-ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอ็อนบวคซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการ avalanche จะมุ่งหน้าอย่างช้าๆเข้าหาอิเล็กโตรดที่มีขั้วลบ แต่เพราะมวลของมันซึ่งมีค่ามากเป็น 50,000 เท่าของมวลอิเล็กตรอนจึงให้มันเคลื่อนที่ได้ช้า และเมื่ออ็อนบวคนี้ไปจับตัวกับอิเล็กตรอนที่อยู่อิสระ ( wandering electron ) ทั้งคู่ก็จะรวมตัวกันกลายเป็นโมเลกุลที่มีค่าเป็นกลางอีกครั้ง และจะพบว่า ระดับพลังงานของโมเลกุลที่มีค่าเป็นกลางนี้จะน้อยกว่า ระดับพลังงานของอ็อนบวค ดังนั้นเมื่ออ็อนบวคมีการจับตัวกับ อิเล็กตรอนอิสระ ก็จะมีการปล่อยพลังงานออกมาจากโมเลกุลที่เราเรียกว่า “quanta” หรือ “chunk”

โดยค่า quanta จะเท่ากับ ขนาดของพลังงานที่ต้องการที่จะนำมาใช้ในการชนแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลในตอนแรก quantaจะมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการแผ่กระจายออกมา ในระดับที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

### 1.3 การแสดงให้เห็นถึง corona

การ ดิสชาร์จ เนื่องจากอิเล็กตรอน avalanche นั้นจะสามารถสังเกตได้หลายวิธีดังนี้

วิธีที่ (1) เป็นวิธีที่รู้งะแพร่หลายมากที่สุด โดยการสังเกตจาก “visual corona” ซึ่งจะปรากฏเป็นแสงสีม่วงออกจากบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากๆ (overstress) ในขณะที่สังเกตดู specimen (ชิ้นอุปกรณ์) ในสภาวะที่มีดสนิท แสงที่เห็นนี้จะเป็นผลมาจากการรวมตัวกันระหว่างอ็อนบวค(ของใน โครเจน) กับ อิเล็กตรอนอิสระ

วิธีที่ (2) สามารถทราบได้จาก “audible corona” ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเสียงหึ่งๆหรือเสียงฉ่าๆ เมื่อตัวอุปกรณ์ได้รับการกระตุ้นจนมีค่า voltage เกินค่า corona thres hold voltage เสียงที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นผลมาจากการ discharge หรือจากการเคลื่อนที่ของอ็อนบวค

วิธีที่ (3) สามารถทราบได้จาก “radio influence(RI)” ที่เกิดขึ้นในการ avalanche จะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดกระแสขึ้นมา ซึ่งจะสร้างทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสถิตขึ้นมาใกล้เคียงกันในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และในทันทีทันใด ซึ่งจะก่อให้เกิด voltage pulse ที่มีความถี่สูงที่เรียกว่า RI ส่วน voltage pulse นี้จะถูกเรียกว่า “radio influence voltage(RIV)”

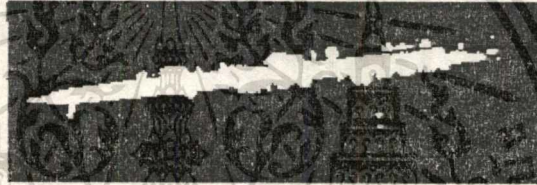
## บทที่ 2

### ทฤษฎีโคโรนา

#### 2.1 ชนิดของปรากฏการณ์โคโรนา

ระดับชั้นของ โคโรนา ทั้ง 3 ระดับใน EHV specimen จะมีดังนี้คือ “plume discharge” , “brush discharge” , “glow discharge”

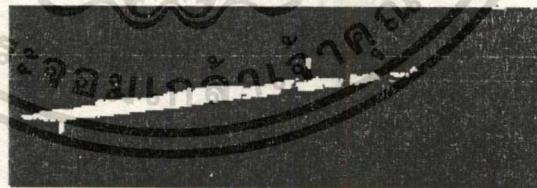
plume discharge จะเกิดบ่อยครั้งที่สุดในบรรดาทั้ง 3 ระดับเมื่อสังเกตในความมืดจะเห็นว่ามันมีปม (stem) ซึ่งจะปรากฏเป็นระยะยาวได้ตั้งแต่ 1 นิ้วไปจนถึงหลายนิ้วซึ่งขึ้นอยู่กับระดับค่า แรงดันในสาย ตัวนำ ที่ปลายสุดของ stem จะมีการแตกเป็นกิ่งก้าน ซึ่งมีสีม่วง โดยกิ่งก้านนี้ จะมีระดับความยาวได้จากตั้งแต่หลายนิ้ว ( ที่ค่าแรงดันต่ำๆ ) ไปจนถึงความยาวหลายฟุต (ที่มีค่าแรงดัน สูงๆ) เสียงที่เกิดจาก plume discharge จะเป็นเสียงหึ่งๆหรือแฉะๆ



(ก) Both half cycle



(ข) Negative half cycle



(ค) Positive half cycle

รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดโคโรนา ในช่วง cycle ต่างๆ

brush discharge จะเป็น streamer ที่แผ่ออกมาจากผิวของ ตัวนำตามรัศมีของการ การดิสชาร์จ แบบนี้สามารถเกิดได้ทั่วสายตัวนำ โดยขนาดความยาวของการดิสชาร์จ จะมีขนาดได้ตั้งแต่เศษส่วนของนิ้ว ( ที่ค่าแรงดันต่ำๆ ) ไปจนถึง 1-2 นิ้ว (ที่ค่าแรงดันสูง) เสียงที่ได้ยินจาก brush discharge จะเป็นเสียง ช่า ๆ หรือ หึ่งๆ

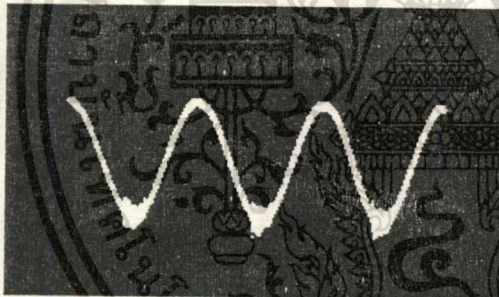
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

glow discharge จะมีลักษณะเป็นแสงเรืองๆ จะเกิดรอบๆผิวของ ตัวนำ ( ไม่เหมือนกับ brush discharge) glow discharge จะเกิดบริเวณที่เป็น critical region (บริเวณที่มีความชื้นสูง)แต่ไม่เกิดเสียง

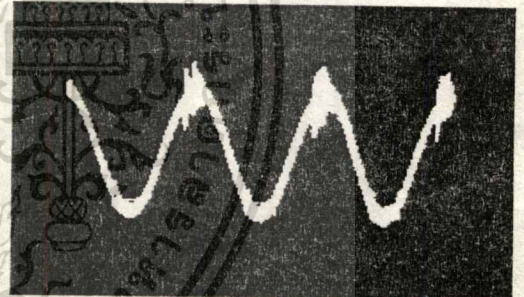
## 2.2 คุณสมบัติของโคโรนา

บนพื้นผิวที่เรียบ/แห้ง/สะอาด ของ ตัวนำ เมื่อ ตัวนำได้รับการกระตุ้นจนมีค่าอยู่เหนือค่า แรงดันวิกฤตเพียงเล็กน้อย ก็จะเกิด brush discharge เมื่อ แรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $0 \rightarrow +$  อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับผิวของ ตัวนำจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และมีการชน โมเลกุลของอากาศ ทรายใดที่ความเร็วของอิเล็กตรอนในขณะที่มีการชนมีค่าต่ำกว่าความเร็วในการทำให้ ไอออนซ์ จะไม่มีไอออนบวกเกิดขึ้น และไม่มีการ ดิสชาร์จ

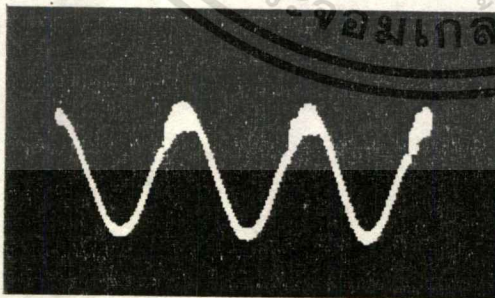
เมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $0 \rightarrow -$  อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับผิวของตัวนำ จะเคลื่อนตัวออกไปจากพื้นผิวไปสู่บริเวณที่มีค่า ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำๆ ในช่วงที่อิเล็กตรอนจะชนกับ โมเลกุลของก๊าซ ถ้าความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำจนไม่สามารถเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วเท่ากับ ionizing velocity ระหว่างการชน ก็จะ ไม่เกิดการดิสชาร์จ



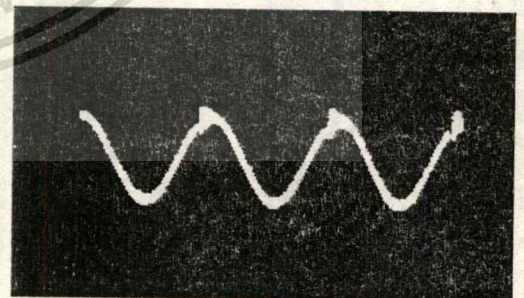
(ก) 1-inch smooth conductor energized at 200 kV  
Dry, clean surface



(ข) 1-inch smooth conductor energized at 200 kV  
Dry surface, with defect



(ค) 1-inch smooth conductor energized at 200 kV  
Wet, clean surface



(ง) 0.858-inch stranded conductor energized at 150 kV  
Dry, weathered surface

รูป 2.2 กราฟ oscillograms จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงโดยอยู่ในสถานะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่มีการป้อน sine wave เข้าไปในตัวนำ ที่มีพื้นผิวเรียบจะเกิด brush discharge เมื่ออยู่ในครึ่ง cycle - ของแรงดัน และไม่มีดิสชาร์จเกิดขึ้นบนครึ่ง cycle + แสดงว่าถ้ามีความเข้มของสนามที่สูงกว่าก็จะเพียงพอต่อการเกิดไอออไนเซชัน จากพื้นที่ผิวดำนำประจุไฟฟ้า +

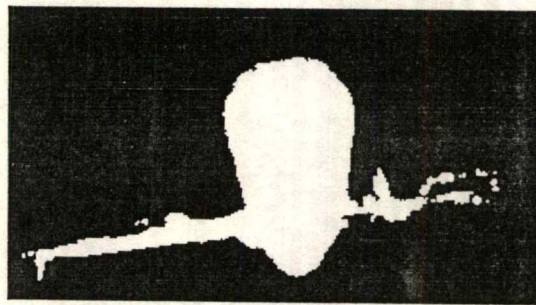
ในกรณีที่ตัวนำ มีความบดพร่องหรือมีความเสียหายจะทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ในจุดนั้นอย่างมาก เช่นในการทดสอบที่ 200 kV การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอน ที่จุดนั้น ได้รับพลังงานที่สูงขึ้นเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระด้วยความเร่ง ทำให้เกิดการไอออไนเซชัน ซึ่งเป็นการเริ่มเกิด plume discharge ดังแสดงในรูป 2.1 (ก)

วิธีที่ 2 ที่จะศึกษาการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ โดยสังเกตได้จากการอ่าน radio noise meter โดยต่อขั้วลบของออสซิลอโคป เข้าไปใน phone jack ของเครื่อง radio noise meter โดยเอาสัญญาณ output ของ reference voltage wave และ voltage test ที่ 60 cycle ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ทับกัน เพื่อศึกษาผลของ radio noise ต่อการเกิดโคโรนา ดังรูปที่ 2.2

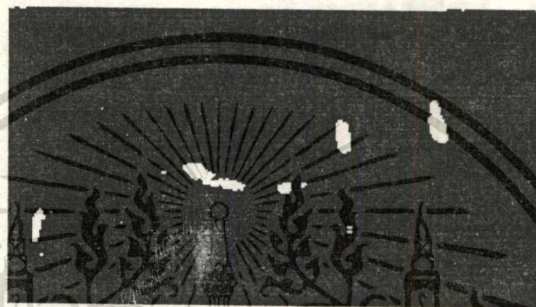
รูปที่ 2.2 เป็นการแสดงถึงตัวนำที่สะอาด แห่ง และ เรียบ วัด RIV จากการทดลองรูปที่ 2.1 โดยแสดงถึงการเริ่มรบกวนสัญญาณในครึ่ง cycle - เท่านั้น RIV เกิดขึ้นพร้อมกับเมื่อเริ่มก่อ plume discharge บนครึ่ง cycle + ซึ่งแสดงในรูป 2.1(ก) ซึ่งเกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่นำมาคิดก็ได้เมื่อเปรียบเทียบกับที่เกิดในครึ่ง cycle - ของการเกิด brush discharge

สำหรับในตัวนำ ที่มีความบดพร่องหรือมีความเสียหายบนพื้นที่ผิวของตัวนำเป็นเหตุให้เกิด full-fledged plume discharge ที่ปรากฏบนพื้นผิวดำนำบนครึ่ง cycle + ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับในรูป 2.2 (ข) แสดงถึงลักษณะสัญญาณ RIV เมื่อพื้นที่ผิวเกิดความบดพร่อง ส่วนในครึ่ง cycle - มีการรบกวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในการเกิด full-fledged plume discharge บนครึ่ง cycle + จะเกิดนานและมีการรบกวนของสัญญาณมากเมื่อเปรียบเทียบผลของการ discharge แบบ brush discharge และ plume discharge โดยจะอ่านได้จากเครื่อง radio noise meter จะให้ระดับของ RIV 3000 microvolts สำหรับ brush discharge ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 25000 microvolts ในระดับของ single plume discharge ดังแสดงในรูปที่ 2.3



(ก) A both half cycle



(ข) Negative half cycle



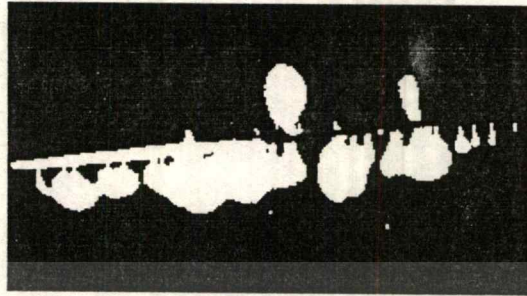
(ค) Positive half cycle

รูป 2.3 รูปโคโรนาดีสชาร์จตัวนำแห้งและเรียบ ป้อนไฟ 200 kV line-to-ground

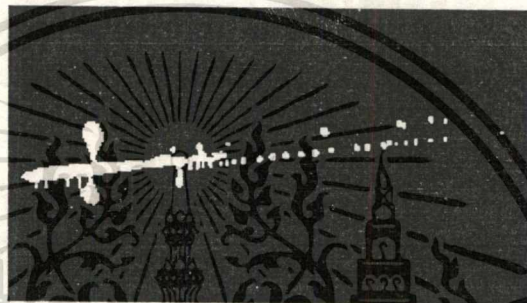
รูปที่ 2.3(ข) เป็นการเกิด brush discharge ในชั่วลบ ในพื้นที่ผิวที่มีความบกร่องจะมีขนาดใหญ่กว่าในการเกิดในที่ผิวเรียบ เพราะว่า มันเริ่มที่จะเกิดในช่วง voltage ค่อนข้างจะต่ำบน 60 cycle wave และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากพื้นที่ผิวที่บกร่องหรือเสียหายมีค่ามากกว่าในพื้นที่ผิวที่เรียบ ดังกล่าว

ในกรณีที่ตัวนำมี water drop เกิดขึ้นจะมี corona discharge อย่างทวีคูณเกิดขึ้น ดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงการเกิด plume discharge เพียงเล็กน้อยในครึ่ง cycle + และเกิด blush discharge เป็นจำนวนมากในครึ่ง cycle - ของ wet smooth conductor รูปที่ 2.2 (ค) แสดงถึง oscillogam ของ

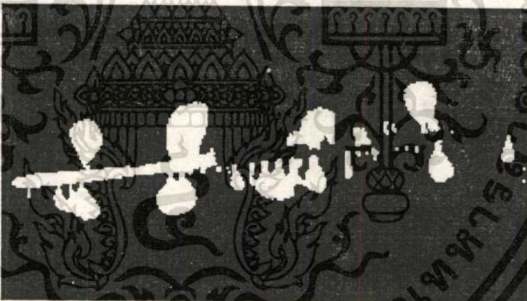
กรณีดังกล่าว ในการ discharge บนครึ่ง cycle + ซึ่งเป็นเหตุให้เกิด RIV level ในตัวนำ



(ก) Both half cycle



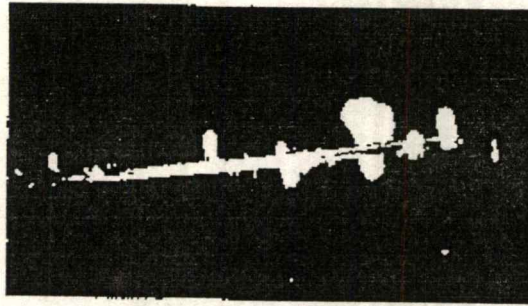
(ข) Negative half cycle



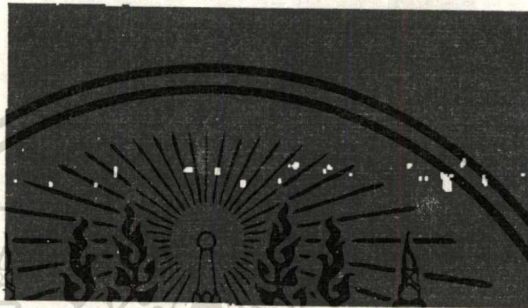
(ค) Positive half cycle

รูปที่ 2.4 รูปโคโรนาดีสชาร์จ ตัวนำเปียกและเรียบ ป้อนไฟ 200kV line-to-ground

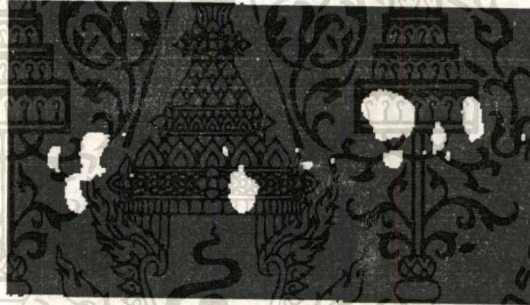
สำหรับตัวนำที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เช่นในกรณี weathered ACSR conductor มีการ discharge เกิดขึ้นดังในรูปที่ 2.5 แสดงถึง plume discharge เพียงเล็กน้อยในครึ่ง cycle + และเกิด brush discharge เพียงเล็กน้อยในครึ่ง cycle - รูปที่ 2.2 (ง) แสดงถึง oscillogram ของกรณีดังกล่าวในการ discharge บนครึ่ง cycle + ซึ่งเป็นเหตุให้เกิด RIV level ในตัวนำ



(ก) Both half cycles



(ข) Negative half cycle



(ค) Positive half cycle

รูป 2.5 โครนาดีสชาร์จ บนสาย “Hawk” ACSR stranded 150 kV line-to-ground

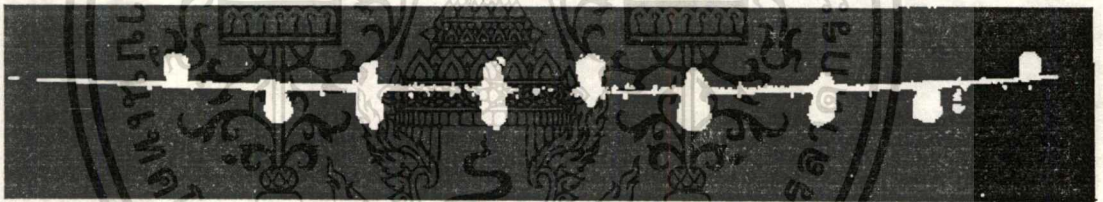
plume discharge และ brush discharge แสดงในรูปที่ 2.6 เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบแบบอนุกรมของตัวนำขนาด 1.602 นิ้ว ACSR standard conductor โดยที่ plume discharge จะเกิดบนตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวนำมีขนาดโครนาที่ยื่นออกมา 0.1 นิ้ว brush discharge จะเกิดที่ครึ่ง cycle - , plume discharge จะเกิดที่ครึ่ง cycle +

โครนาดีสชาร์จ ใน 1.6 conductor bundle test ดังที่กล่าวในตอนต้น จะเกิดโครนาดีสชาร์จแบบ brush discharge มีการเกิด plume discharge เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## 2.3 การก่อตัวของ Brush และ plume Discharge

### 2.3.1 Brush discharge

จะเกิดที่ครึ่ง cycle - ที่มีความเข้มสนามที่มากพอในการเกิดการดีสชาร์จ กล่าวคือเมื่อความเข้มของสนามมีค่าถึงค่าวิกฤต อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ใกล้ตัวนำจะได้รับพลังงานจนเกิดความเร็วในการ ionizing และเริ่มเกิดการแตกตัวแบบ avalanches เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ + ที่มีน้ำหนักมากในสนามใกล้พื้นผิวตัวนำ โดยที่ประจุ - เคลื่อนที่ออกจากผิว เกิดสนามขึ้นที่บริเวณนี้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า อิเล็กตรอนในปริมาณมากทำให้เกิด negative space charge ซึ่งมีการถูเข้าหาด้วยแรงเสริมของความเข้มสนามไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้านี้เป็นเหตุทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ พุ่งตรงเข้าสู่ปลายของการ avalanches ซึ่งเป็นการเริ่มต้นในการเกิด avalanches ใหม่ ซึ่ง negative space charge จะดำเนินต่อไป กระบวนการในการเกิดการสะสม และ the brush discharge จะยังคงเป็นต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความเครียดที่ปลายด้านนอกของ advancing discharge ไม่เพียงพอต่อการเกิดการไอออนในเซชัน อาจกล่าวอย่างไม่ต้องสงสัยว่า ความยาวของ steamer จะถูกอธิบายได้โดย ความต่างศักย์ของตัวนำ และจะเกิด maximum length ที่ความต่างศักย์สูงสุด



รูป 2.6 Plume และ Brush discharge บนสายตัวนำ ACSR ที่ 300 kV line-to-ground จะพบว่าเกิด plume discharge ขึ้นบนผิวสายตัวนำ ทุกๆระยะห่าง 0.1 นิ้ว

การคงอยู่ของ brush discharge จะปรากฏขึ้นโดยแสงที่มองเห็นได้ ซึ่งจะถูกแพร่กระจายออกไปโดยที่แต่ละ ion + เสมือนเป็นการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนอิสระ เพื่อที่จะก่อตัวให้เกิด neutral molecule ดังนั้น ตำแหน่งและการขยายตัวของ brush discharge ถูกสร้างขึ้นมาโดย electron avalanche นั้นเอง

### 2.3.2 plume discharge

เมื่อสนามไฟฟ้าใกล้ผิวตัวนำแพร่กระจายจนถึงค่าวิกฤต บนครึ่ง cycle + electron ในบริเวณใกล้ผิวตัวนำจะถูกเร่งให้เกิดความเร็วของการเกิดไอออนในเซชัน ดังนั้นจะเริ่มการเกิด electron avalanches ซึ่งมีค่ามากขึ้น พุ่งเข้าหาพื้นผิวของตัวนำไอออนจำนวนมากที่มีน้ำหนักมาก จะถูกทิ้งไว้ด้านหลัง ทำให้เกิด positive space charge ที่ปลายของ project outward จากพื้นผิวตัวนำ การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามที่ปลายทำให้เกิดการก่อรูปของ electron avalanches ซึ่งเคลื่อนที่ตรงเข้าไปหาสนาม ผลก็คือ positive space charge จะมีทิศทางที่ต่อเนื่องจากตัวนำ ใกล้ๆพื้นผิวของตัวนำ avalanches จะเกิดขึ้นในด้านหน้าของ advancing positive space charge projection เนื่องจากสนามจากตัวนำเองถูกทำให้เข้มข้นและรวมกับสนามไฟฟ้า อาจจะมีมากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ positive space charge จะอ่อนตัวลงจนกลายเป็น conductor field และ resultant field ที่จุดปลายของมันจะลู่เข้าหา hemispherical radial field ดังนั้น electron avalanche สามารถที่จะเข้าถึงจุดปลายของ advancing positive space charge จากทิศทางที่แตกต่างกัน ดังนั้น การเริ่มต้น positive ion projection ซึ่งแตกตัวออกไปในทิศทางที่แตกต่างกันจากทิศทางเริ่มต้น การแตกตัวจำนวนมากเหล่านี้จะดำเนินต่อไป และจะเกิดการแตกตัวอีกครั้งหนึ่งเหมือนกับแตกแขนงออกไป เช่นเดียวกับกิ่งก้านของต้นไม้

การเจริญเติบโตเช่นนี้จะดำเนินการต่อไปจนกระทั่ง plume ถึงขนาดความเข้มของสนามที่ปลายของกิ่งของ positive จำนวนมากมีน้อยเกินไปที่จะเกิดไอออนในเซชัน

plume discharge จะแสดงให้เห็นได้ในรูป 2.3(ค) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีของ full-fledge plume ในขณะที่ดิสชาร์จ แสดงได้ในรูป 2.1(ค) ซึ่งเป็นตัวอย่างของตอนกำลังเริ่มเกิด plume ซึ่งจะไปถึงขั้นตอนการแตกตัว

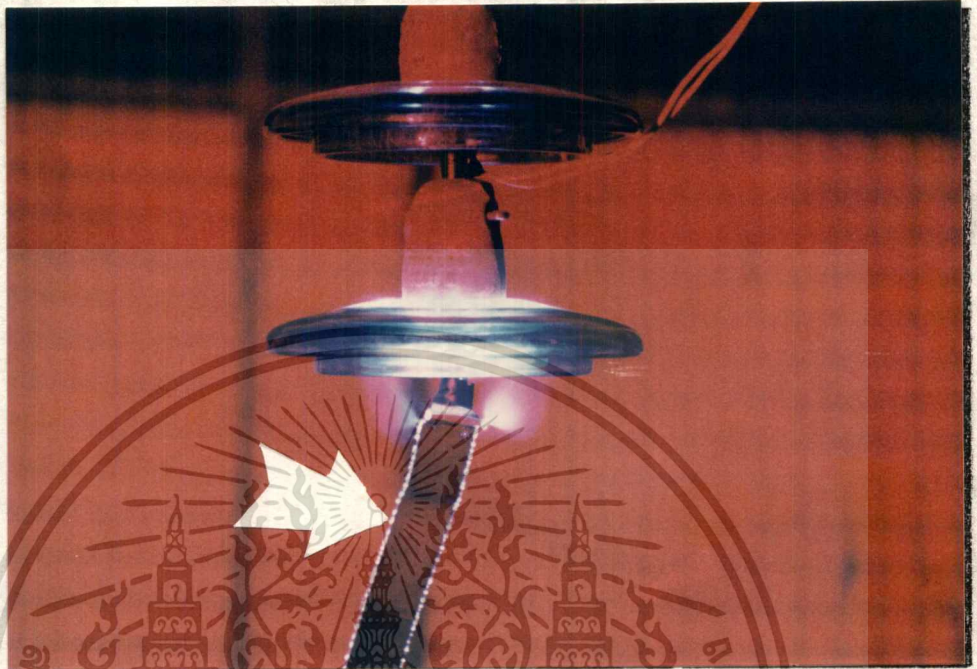
### 2.4 Radio influence เนื่องจากโคโรนาดิสชาร์จ

ที่ขั้ว + plume จะเป็นแหล่งเกิด electrical disturbance อย่างมาก ทำให้เกิด RIV ใน order of 10 times ในการเกิด brush discharge ในขั้ว -

โดยทั่วไปแล้วจะพบในการทดสอบสายส่ง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.5 นิ้ว ซึ่งเมื่อ plume เกิดขึ้น แล้วระดับของ RIV จะอยู่ในระดับ 10000 microvolts

สังเกตได้จาก range ของระดับ RIV สำหรับ discharge อยู่ในช่วง 100- 5000 microvolts บน โคโรนาที่มองไม่เห็นในกรณี brush discharge เราอาจจะใช้การฟังเสียงแทน ในขณะที่รูปร่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็สามารถมองเห็นได้

รูปต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของลักษณะของ brush discharge ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแรงดันแบบ AC และ DC



รูป 2.7 ลักษณะของ brush discharge ที่เกิดจากแรงดัน AC มีลักษณะเป็นปุ่ม ๆ ออกมาตามแนวรัศมี รอบสายตัวนำขอบนอกเป็นหย่อม ๆ และ เกิดเสียงซ่า



รูป 2.8 ลักษณะของ brush discharge ที่เกิดจากแรงดัน DC negative มีลักษณะเป็นรูปแปรงล้างขวด ออกมาตามแนวรัศมีรอบสายตัวนำขอบนอก เป็นหย่อม ๆ และเกิดเสียงซ่า

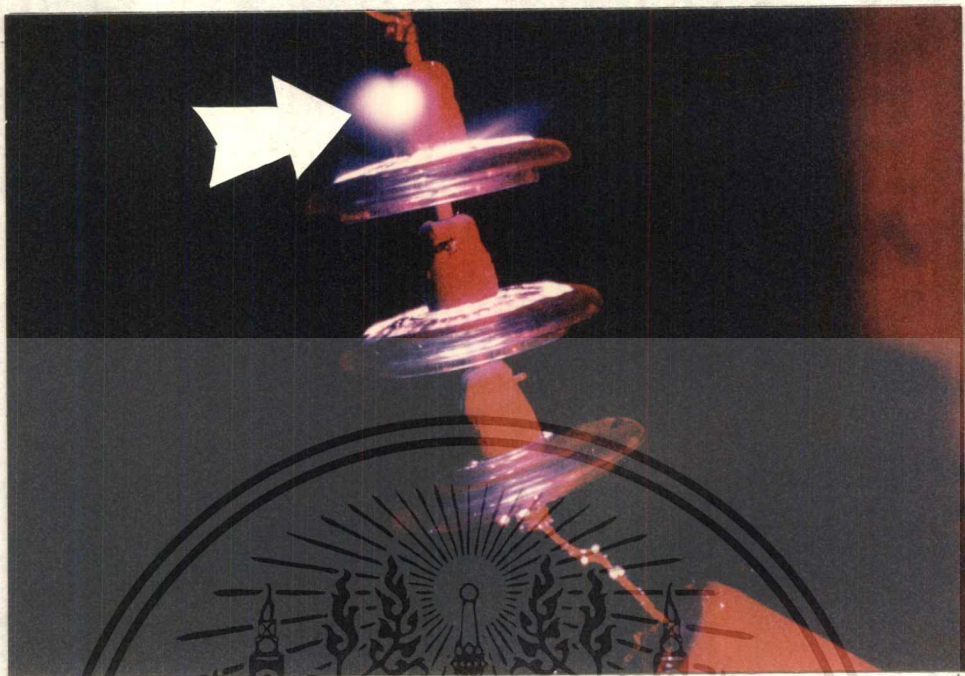
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Glow discharge จะถูกสังเกตเห็นเพียงบนพื้นผิวของตัวนำเท่านั้น และเมื่อคิซาร์จ เหล่านี้เกิดขึ้น มันจะยังคงอยู่ในตำแหน่งแรงดัน ต่ำๆ ไม่สามารถได้ยินเสียง และมองเห็น brush discharge ระดับ RIV สัมพันธ์กับ Glow discharge ซึ่งมักจะเกิดขึ้นต่ำกว่า 10 microvolts การ discharge จะปรากฏขึ้นมาเพราะความบกพร่องของพื้นผิว และสามารถกำจัดได้โดยการล้างพื้นผิวตัวนำที่บริเวณที่เกิดนั้นได้

รูปต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของลักษณะของ Plume discharge ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแรงดันแบบ AC และ DC



รูป 2.9 ลักษณะของ plume discharge ที่เกิดจากแรงดัน AC มีลักษณะเป็นปม ซึ่งบางปมมีลักษณะเป็นก้อน และตรงปลายจะมีลักษณะบานออก และมีเสียงดังซ่า



รูป 2.10 ลักษณะของ plume discharge ที่เกิดจากแรงดัน DC negative มีลักษณะคล้าย ๆ กับ plume ที่เกิดจากแหล่งกำเนิด AC

#### 2.5 แฟลคเตอร์ที่มีผลต่อการเกิด corona

โคโรนา คือ การเกิดดิซชาร์จบางส่วน (partial discharge) ที่ผิวของตัวนำสายส่งในอากาศ เมื่อมีความเข้มสนามไฟฟ้า หรือเกรเดียนต์แรงดันที่ผิวของตัวนำมีค่า เกินจุดเบรกดาวน์ของอากาศ จึงทำให้อากาศรอบ ๆ ตัวนำเกิดการแตกตัวขึ้น ในการทดสอบอากาศแห้ง (dry air) ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิปกติ (ความดัน 760 mmHg และ  $25^{\circ}\text{C}$ ) จะได้ผลของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้อากาศเกิดการเบรกดาวน์ที่ 29.8 kV/cm (เป็นค่ายอดหรือค่าสูงสุด) หรือที่ 21.1 kV/cm (เป็นค่าประสิทธิผลหรือค่า rms)

มีกฎกล่าวไว้ว่า ถ้าอัตราส่วนของระยะระหว่างตัวนำต่อรัศมีของตัวนำมีค่าน้อยกว่า 15 จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) ขึ้นระหว่างตัวนำก่อนเกิดปรากฏการณ์โคโรนา แต่ในความเป็นจริงสำหรับสายส่งในอากาศอัตราส่วนดังกล่าวจะมีค่าสูงมากกว่า 15 ดังนั้นภายใต้สภาวะปกติจึงเป็นไปได้ที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวขึ้น แฟลคเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดโคโรนาจะรวมถึงสิ่งต่อไปนี้

คือ

### 2.5.1 ชนิดและลักษณะพื้นผิวของตัวนำ

พื้นผิวดำนำที่ไม่เรียบในลักษณะของการมีรอยขูดขีด รอยถลอก ผิวของสายตัวนำที่เกลียว และการที่มีฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกเกาะที่ผิวของตัวนำ สิ่งเหล่านี้สามารถทำให้มีโอกาสดำนำเกิดการสูญเสียโคโรนาได้มากขึ้น ในขณะที่ผิวของตัวนำเป็นทรงกระบอกเรียบจะทำให้เกิดโคโรนาได้ยาก

สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำก็มีผลต่อการเกิดโคโรนาได้เช่นเดียวกัน โดยการใช้ตัวนำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดโคโรนาน้อยลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงจึงต้องใช้ ตัวนำที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ หรือใช้ตัวนำแบบ bundle เพื่อเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิภาพให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำลดลง และเป็นการลดผลของการเกิดโคโรนาด้วย

### 2.5.2 รูปแบบการจัดวางตัวนำสายส่ง

การจัดวางตัวนำสายส่งเรียงกันตามแนวราบ ( horizontal configuration ) จะทำให้สนามไฟฟ้าใกล้เคียงกับตัวนำที่อยู่กลางมีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ตัวนำที่อยู่ด้านนอก ดังนั้นตัวนำที่อยู่กลางจึงมีโอกาสที่จะเกิดกำลังสูญเสียโคโรนาได้มากกว่าตัวนำอื่น ๆ และถ้าระดับของการจัดวางตัวนำไม่เท่ากัน จะทำให้เกรเดียนต์ที่ผิวของตัวนำและกำลังสูญเสียโคโรนาก็จะไม่เท่ากันด้วย กล่าวคือ ตัวนำที่ติดตั้งอยู่ในระดับสูงกว่าย่อมมีกำลังสูญเสียโคโรนาน้อยกว่า

### 2.5.3 สภาพภูมิอากาศ

ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศจะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขของสภาพภูมิอากาศ โดยความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของอากาศ ( density of the air ) ซึ่งแฟกเตอร์ความหนาแน่นของอากาศกำหนดได้ตามสมการ

$$\delta = \frac{3.9211p}{273 + t} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\delta$	คือ	แฟกเตอร์ความหนาแน่นของอากาศ
	$p$	คือ	ความดันบรรยากาศ , มิลลิเมตรของปรอท (mm Hg)
	$t$	คือ	อุณหภูมิแวดล้อม , องศาเซลเซียส ( °C )

สำหรับความดันบรรยากาศจะเป็นฟังก์ชันของความสูงเหนือระดับน้ำทะเล ( altitude ) แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่มีสภาพอากาศที่ไม่ดี เช่น มีฝนตก หรือหมอกหนา จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าปกติ โดยเฉพาะน้ำฝนสามารถทำให้เกิดสูญเสียโคโรนาได้มากกว่าเฟลคเตอร์อย่างอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 ความดันบรรยากาศมาตรฐานที่เป็นฟังก์ชันของความสูงเหนือระดับน้ำทะเล

ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (m)	ความดัน (mm Hg)	ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (m)	ความดัน (mm Hg)
-305	78.79	1524	63.22
-152	77.40	1829	60.91
0	76.00	2134	58.67
305	73.30	2438	56.44
610	70.66	3048	52.27
914	68.10	4572	42.88
1218	65.54	6096	34.93

## 2.6 แรงดันตกบนลูกถ้วยเนื่องจากโคโรนา

โคโรนาเป็นกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่ง ที่เกิดขึ้นบนสายไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การเกิดโคโรนาจะทำให้กำลังไฟฟ้าถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน แสง เสียง เคมี และแม่เหล็กไฟฟ้า

ความปกติสายส่งไฟฟ้าจะวางขนานกันและมีระยะห่างกันมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายขณะที่ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันพอเหมาะให้ จะไม่มีสิ่งผิดปกติปรากฏบนสายไฟฟ้า แต่ถ้าเพิ่มแรงดันระหว่างสายให้สูงขึ้นทีละน้อย ๆ ในที่สุดจะพบว่ามีความเสียงดังออกมาจากสาย เป็นเสียงที่ดังพอได้ยิน ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของอากาศรอบ ๆ สาย การแตกตัวของอากาศทำให้เกิดโอโซนและกรดไนตริกถ้าการแตกตัวของอากาศมากขึ้น จะเห็นเป็นแสงเรืองสีม่วงเกิดขึ้นรอบ ๆ สายเป็นจุด ๆ พร้อม ๆ กันนั้นก็เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรบกวนคลื่นวิทยุด้วย ถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีก แสงเรืองบนสายก็จะสว่างมากขึ้น จนกระทั่งสว่างจ้าในที่สุด แสงสว่างจะเกิดขึ้นมากตรงบริเวณที่สายขรุขระหรือสกปรก และถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกเรื่อย ๆ โคโรนาก็จะเกิดมากขึ้น ๆ จนกระทั่งในที่สุดจะเกิดสปาร์ก (spark) หรือเกิดการวาบตามสายไฟ (flashover) บนพวงลูกถ้วยระหว่างคู่สาย จากการศึกษาเรื่องโคโรนาพบว่า ถ้าป้อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดปรากฏการณ์บนสายแตกต่างกัน คือ สายบวมจะมีแสงสว่างสม่ำเสมอ แต่ที่สายลบจะสว่างเป็นจุด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 การอธิบายปรากฏการณ์โคโรนาตามทฤษฎีอิลีครอน

อาจกล่าวได้ว่า โคโรนาเกิดจากสายส่งที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงเกินค่าขีดจำกัดที่กำหนดไว้ ตามปกติการเลือกระดับแรงดันเพื่อใช้ส่งพลังงานจะไม่ให้สูงถึงค่าวิกฤต แต่เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ผิดปกติจึงทำให้เกิดสิ่งต่อไปนี้ คือ

1. แรงดันระหว่างสายสูงเกินค่าแรงดันวิกฤต (critical voltage) ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่สายส่งยาวมากๆแต่มีโหลดปลายสายต่ำ เนื่องจากสายส่งที่ยาวจะเกิดกระแสอัดประจุ (charging current) ในสายสูง และทำให้ตัวประกอบกำลังของวงจรกลายเป็นชนิดนำหน้า ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันปลายสายสูงกว่าแรงดันต้นสาย

2. แรงดันวิกฤตมีค่าต่ำกว่าสภาวะปกติ ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดจากสภาพดินฟ้าอากาศเปลี่ยนแปลง เช่น ฝนตก ความชื้นในอากาศ ความกดดันของอากาศและอุณหภูมิโดยรอบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ในสภาวะปกตินั้น อากาศที่ล้อมรอบสายมีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก (dielectric) แต่เมื่อแรงดันระหว่างคู่สายสูงขึ้นจนถึงสภาวะวิกฤตหรือแรงดันวิกฤตลดต่ำลงมามากกว่าปกติดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว จะทำให้อากาศที่ล้อมรอบสายเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในเซชัน และกลายสภาพเป็นตัวนำชั่วคราว ซึ่งอาจจะเรียกแรงดันขณะนั้นว่า แรงดันวิกฤตที่ทำให้แตกตัว (disruptive critical voltage ;  $V_0$ ) อากาศที่แตกตัวเกิดจากอิทธิพลของความเข้มสนามไฟฟ้า  $E$  บนสายที่ส่งแรงดึงมีจำนวนมากออกไปกระทำต่อโมเลกุลของอากาศ ขณะที่อากาศแตกตัวจะเกิดเสียงดังพอได้ยิน แต่ถ้าแรงดันมีค่าสูงกว่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้แตกตัว  $V_0$  ขึ้นไปอีก จะทำให้อากาศวงนอกรอบ ๆ สายแตกตัวด้วย อิเล็กตรอนของอากาศเมื่อแตกตัวจะถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าบนสาย ทำให้มีพลังงานสูงขึ้น และเลื่อนขึ้นไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ตัวที่ไม่ได้รับการกระตุ้นก็จะตกลงมาอยู่ในสภาวะเดิมที่มีระดับพลังงานต่ำพร้อมกับคายโฟตอน (photon) ที่เป็นพลังงานแสงออกมา เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้แสงที่เปล่งออกมามีลักษณะต่อเนื่อง ดังที่เรามองเห็นแสงเรือง ๆ รอบสายนั่นเอง ซึ่งแรงดันที่ป้อนให้กับสายส่งในขณะที่เกิดเรืองแสงจะถูกเรียกว่า แรงดันวิกฤตที่ทำให้มองเห็น (visual critical voltage ;  $V_v$ ) ถ้าหากปรับแรงดันให้สูงกว่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้มองเห็น  $V_v$  ขึ้นไปอีกจะทำให้อากาศที่อยู่ชั้นนอก ๆ ของสายแตกตัวได้หมด อากาศบริเวณนั้นจะกลายเป็นตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายข้ามอากาศไปได้ มองเห็นลำแสงสว่างมากที่เรียกว่าการวาบไฟตามผิวนั่นเอง



## 2.6.2 การคำนวณหาแรงดันวิกฤตบนสายตัวนำ

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า แรงดันวิกฤตมีความสัมพันธ์กับสภาพดินฟ้าอากาศ จึงต้องนำเอาองค์ประกอบดังกล่าวมาศึกษาสภาพของความแปรปรวนด้วย ถ้าเรียกความสัมพันธ์ระหว่างความกดดันและอุณหภูมิของอากาศว่า ตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ ( air density factor ) อาจเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(273+25)}{(273+t)} \times \frac{b}{76} \\ &= \frac{3.92b}{(273+t)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\delta$  = ตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ  
 $b$  = ความกดดันของอากาศ มีหน่วยเป็นเซนติเมตรปรอท  
 $t$  = อุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

จากสมการ ถ้าความกดดันของอากาศเท่ากับ 76 เซนติเมตรปรอท และอุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศจะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าความกดดันและอุณหภูมิเปลี่ยนไป  $\delta$  อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 1 ก็ได้ จากการทดลองหาความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้อากาศแตกตัวพบว่า ถ้าความกดดันของอากาศเท่ากับ 76 เซนติเมตรปรอท และอุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่า 30 กิโลโวลต์ / เซนติเมตร และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้อากาศแตกตัวนี้ จะเปลี่ยนแปลงตามค่าตัวประกอบความหนาแน่น ของอากาศยกกำลัง 2/3 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.3)

$$E_{mo} = 30 \times \delta^{2/3} \quad (2.3)$$

แต่เนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นคลื่นแบบซายน์ (sinusoidal) จึงนิยมบอกค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นค่า r.m.s. ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1/\sqrt{2}$  เท่าของค่า สูงสุดหรือมีค่าตามสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned} E_o &= \frac{E_{mo}}{\sqrt{2}} = \frac{30}{\sqrt{2}} \delta^{2/3} = 21.1 \delta^{2/3} \\ &= \text{ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้แตกตัว} \end{aligned} \quad (2.4)$$

### 2.6.2.1 การหาแรงดันวิกฤตบนสายตัวนำรูปทรงกระบอกที่มีผิวเรียบ การคำนวณหาแรงดันบนสายตัวนำรูปทรงกระบอกผิวเรียบที่วางสายห่างกัน D เมตรและรัศมีของสาย R เมตร ดังแสดงในรูปที่

เอกสารนี้ 2.11 อาจหาได้ดังนี้คือ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{D}{r} \\
&= \left(\frac{q}{2\pi \epsilon r}\right) r \ln \frac{D}{r} \\
&= E_r \ln \frac{D}{r} \text{ โวลต์} \quad (2.8)
\end{aligned}$$

เมื่อ  $E$  คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวสาย หาได้โดยแทนค่า  $X = r$  ลงในสมการของ  $E_r$

$$\text{หรือ} \quad E = \frac{V}{r \ln \frac{D}{r}} \text{ โวลต์ / เมตร}$$

จากสมการจะแสดงให้เห็นว่า ถ้าสายส่งมีขนาดเล็ก ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวจะมีค่าสูงมากและเกิดโคโรนาได้ง่ายกว่าสายขนาดใหญ่ ในทำนองเดียวกัน สายทองแดงที่ออกแบบให้รับกระแสโหลดได้เท่า ๆ กับสายอะลูมิเนียม จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าสายอะลูมิเนียม 25 เปอร์เซ็นต์ จึงมีโอกาสเกิดโคโรนาก่อนสายอะลูมิเนียม 25 เปอร์เซ็นต์ด้วย

ถ้าใช้สมการที่ (2.8) หาแรงดันวิกฤตที่ทำให้แตกตัว  $V_0$  จะกลายเป็นสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned}
V_0 &= E_0 r \ln \frac{D}{r} \\
&= 21.1 \delta^{23} r \ln \frac{D}{r} \quad (2.9)
\end{aligned}$$

จากการทดลองของพีค (F.W. Peek) ได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวที่ทำให้มองเห็น  $E_v$  กับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวที่ทำให้แตกตัว  $E_0$  ว่ามีค่าดังสมการที่ (2.10)

$$E_v = E_0 \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) \quad (2.10)$$

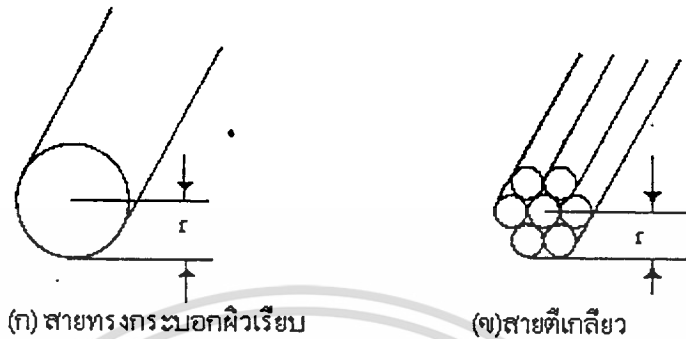
ดังนั้นแรงดันวิกฤตที่ทำให้มองเห็น  $V_v$  จึงหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$\begin{aligned}
V_v &= E_v r \ln \frac{D}{r} \\
&= 21.1 \delta^{23} \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) r \ln \frac{D}{r} \\
&= \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) V_0 \quad (2.11)
\end{aligned}$$

### 2.6.2.2 การหาแรงดันวิกฤตที่เกิดกับสายตัวนำตามสภาพจริง

เนื่องจากสายตัวนำตามสภาพจริงมิได้ทำจากสายรูปทรงกระบอกผิวเรียบเพียงเส้นเดียว แต่ประกอบขึ้นจากสายเส้นเล็ก ๆ หลายเส้นตีเกลียว สายชนิดนี้จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าสายตัวนำรูปทรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอกเพียงเส้นเดียวเมื่อเทียบที่รัศมีเท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนั้นจึงทำให้สนามไฟฟ้าที่ผิวมีค่าลดลง



รูปที่ 2.12 แสดงพื้นที่ผิวของสายต่างชนิดกัน

จากการทดลองของบัตเตอร์เวิร์ท (S.Butterworth) พบว่าสายตีเกลียวที่มีสายวงนอก 6 เส้น จะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวเพียง 75 เปอร์เซ็นต์ ของสายคั้นเส้นเดียวที่มีรัศมีเท่า ๆ กัน สำหรับสายตีเกลียวที่มีสายวงนอกมากขึ้น จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าถ้าสายขรุขระ (roughness) ที่ผิวไม่สะอาด อันเกิดจากการใช้มาเป็นเวลานาน จนเกิดออกไซด์หรือเกิดจากการสึกกร่อนตามสภาพ จะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวลดลง จากสาเหตุที่กล่าวมานี้ อาจสรุปได้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากตัวประกอบ 2 ตัว คือ

$p$  คือตัวประกอบของการตีเกลียว (stranding factor) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.87 ถึง 0.75 ถ้าจำนวนสายตีเกลียวมีน้อยเส้น พื้นที่ผิวของสายจะมีค่ามากขึ้น และ  $p$  จะมีค่าต่ำ

$m$  คือตัวประกอบของความขรุขระ (roughness factor) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.97 ถึง 0.90 สายที่มีผิวขรุขระมากจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น และ  $m$  จะมีค่าต่ำเช่นเดียวกัน

เมื่อคำนึงถึงตัวประกอบของการตีเกลียว  $p$  และตัวประกอบของความขรุขระ  $m$  ที่เกิดจากสายตัวนำตามสภาพจริงจะทำให้สมการของแรงดันวิกฤตเปลี่ยนแปลงไปเป็นสมการที่ (2.12) และ (2.13)

$$V_0 = 21.1 \text{ pm } \delta^{23} r \ln \frac{D}{r} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} V_0 &= 21.1 \text{ pm } \delta^{23} \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) r \ln \frac{D}{r} \\ &= \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) V_0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

ถ้าเปลี่ยนหน่วยของ  $D$  และ  $r$  เป็นนิ้ว และเปลี่ยนฐานลอจจากฐาน  $e$  เป็นฐาน 10 จะทำให้สมการที่ (2.12) และ (2.13) เปลี่ยนไปเป็นสมการที่ (2.14) และ (2.15)

$$V_0 = 123 \text{ pm } \delta^{23} r \log \frac{D}{r} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} V_0 &= 123 \text{ pm } \delta^{23} \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) r \log \frac{D}{r} \\ &= \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}}\right) V_0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

### 2.6.3 กำลังสูญเสียที่เกิดจากโคโรนา

จากการทดลองของพีค ( F.W.Peek ) ในเรื่องของโคโรนา สามารถสรุปเป็นสูตรเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดจากโคโรนาได้ดังนี้

$$P_c = \frac{244}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_0)^2 \times 10^{-5} \quad \text{kW / km / ph} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $P_c$  = กำลังสูญเสียที่เกิดจากโคโรนา เป็น กิโลวัตต์ต่อกิโลเมตรต่อเฟส

$V$  = แรงดันใช้งาน เป็นกิโลโวลต์ต่อเฟส

$V_0$  = แรงดันวิกฤตที่ทำให้แตกตัว เป็นกิโลโวลต์ต่อเฟส

$f$  = ความถี่ใช้งาน เป็นเฮิรตซ์

$\delta$  = ตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ

$D$  = ระยะห่างระหว่างสาย เป็นนิ้ว

$r$  = รัศมีของสาย เป็นนิ้ว

สูตรนี้ใช้คำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดจากโคโรนามานานหลายปี จนกระทั่งในระยะหลัง พีเตอร์สัน คาร์รอลล์ และ รอคเวลล์ ( Peterson, Carroll and Rockwell ) ได้ทำการทดลอง แล้วสรุปว่าสูตรของพีคให้ผลลัพธ์ไม่แน่นอนในย่านกำลังสูญเสียต่ำ ๆ หรืออัตราส่วนแรงดัน  $V / V_0$  มีค่าน้อยกว่า 1.8 จะมีค่าผิดพลาดมาก พีเตอร์สันจึงได้เสนอวิธีการคำนวณกำลังสูญเสียโคโรนาขึ้นมาใหม่อีกสูตรหนึ่ง คือ

$$P_c = 33.7 f F \left[ \frac{V}{\log \frac{D}{r}} \right]^2 \times 10^{-6} \quad \text{kW / mi / ph} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $F$  เป็นฟังก์ชันของ  $V / V_0$  เรียกว่าฟังก์ชันของกำลังสูญเสียโคโรนา (corona loss function) ซึ่งกำหนดค่าไว้ในตารางที่ 2.2

จากวิธีของพิกและพีเตอร์สันจะเห็นว่ากำลังสูญเสียโคโรนาที่คำนวณตามวิธีของพิก มีค่าสูงกว่าการคำนวณตามวิธีของพีเตอร์สันมากและมีค่าผิดพลาดไปจากค่าที่วัดได้ตั้งนั้นในระยะหลังๆจึงไม่ค่อยมีผู้นิยมใช้สูตรของพิกคำนวณหา

สำหรับการคำนวณหาลำดับสูญเสียโคโรนาในสายส่งที่ยาวมาก ๆ อาจจะต้องใช้วิธีคำนวณหาค่าเป็นช่วง ๆ ทั้งนี้ก็เพราะว่าแรงดันคร่อมสายแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกัน อีกกรณีหนึ่งที่สร้างความยุ่งยากในการคำนวณมากขึ้นก็คือ กรณีที่ไม่ได้วางสายเป็นรูปสามเหลี่ยมคางหมู จากการศึกษพบว่า ถ้าวางสายในแนวระนาบด้วยระยะห่างเท่า ๆ กัน เมื่อวงเป็นรูปสามเหลี่ยม โคโรนาจะเกิดขึ้นที่สายเส้นกลางก่อน เพราะการวางสายลักษณะนี้จะทำให้แรงดันวิกฤตที่สายเส้นกลางลดลง 4 เปอร์เซ็นต์ และสายเส้นนอกเพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันของกำลังสูญเสีย โคโรนา

$V/V_0$	F	$V/V_0$	F	$V/V_0$	F	$V/V_0$	F
1.00	0.037	1.26	0.120	1.52	1.10	1.78	4.72
1.02	0.039	1.28	0.136	1.54	1.33	1.80	4.95
1.04	0.042	1.30	0.154	1.56	1.59	1.82	5.17
1.06	0.045	1.32	0.176	1.58	1.88	1.84	5.39
1.08	0.048	1.34	0.200	1.60	2.20	1.86	5.60
1.10	0.052	1.36	0.228	1.62	2.52	1.88	5.81
1.12	0.057	1.38	0.260	1.64	2.83	1.90	6.01
1.14	0.063	1.40	0.300	1.66	3.13	1.92	6.21
1.16	0.069	1.42	0.380	1.68	3.42	1.94	6.41
1.18	0.075	1.44	0.480	1.70	3.70	1.96	6.61
1.20	0.082	1.46	0.600	1.72	3.97	1.98	6.81
1.22	0.092	1.48	0.740	1.74	4.23	2.00	7.00
1.24	0.105	1.50	0.900	1.76	4.48		

#### 2.6.4 ผลเสียจากการเกิด โคโรนา

การเกิดโคโรนาของสายส่งจะก่อให้เกิดผลเสีย 2 ประการ คือ

1. สูญเสียกำลังไฟฟ้าไปโดยเปล่าประโยชน์

2. เกิดคลื่นแทรกและรบกวนคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามปรกติการออกแบบสายส่งจะใช้ข้อมูลของสภาพอากาศปกติมาคิด โดยให้เกิดกำลังสูญเสียจากโคโรน่าน้อยที่สุด เนื่องจากโคโรนาจะมีค่าสูงเพียงบางช่วงเท่านั้น เช่น ฤดูฝน หรือช่วงที่อากาศแปรปรวน ถ้าการออกแบบคำนึงถึงโคโรนามากเกินไป จะต้องเสียค่าใช้จ่ายทางด้านโครงสร้างสูงขึ้นเกินจำเป็น การสูญเสียเนื่องจากโคโรนานั้น ถ้านำมาคิดเฉลี่ยตลอดปี จะมีค่าน้อยมาก

สำหรับการเกิดคลื่นแทรกนั้น เกิดจากการแตกตัวของอากาศรอบ ๆ สาย จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงออกมาครบทุกคลื่นวิทยุด้วย ถ้าอากาศชื้นความเข้มของสนามจะเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติ ความเข้มของสนามจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ไกลจากจุดที่เกิดโคโรนา จากการศึกษาพบว่าที่ระยะห่าง 50 หลา ความเข้มของสนามที่รบกวนจะเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด

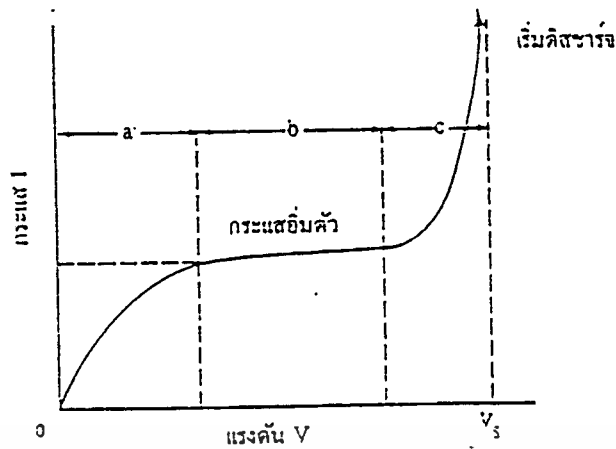
## 2.7 ผลกระทบจากปรากฏการณ์โคโรนา

โคโรนา มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับไฟฟ้าแรงสูง และสามารถทำให้เกิดแสง เสียง และโอโซน ซึ่งสามารถตรวจจับได้ โดยการมองเห็น การได้ยิน และการได้กลิ่นโคโรนา ยังทำให้เกิดปรากฏการณ์อย่างอื่นอีก เช่น กำเนิด

1. รังสี untraviolet
2. กำเนิดออกซิเจนจากผลของการออกซิไดซ์ เช่น ในกรณีการเกิด โอโซน
3. เกิดกรดออกซาลิก และสารอื่นๆ polythylene และฉนวนต่างๆ
4. ให้ความร้อนในช่วงคิสชาร์จ discharge และ power loss ในแหล่งจ่าย
5. เกิดการผุกร่อนบริเวณพื้นผิวจากการแตกตัวของไอออน สารที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการกัดกร่อนจากการคิสชาร์จ คุณสมบัติเรียกว่า corona resistance อุปกรณ์พวกสารอินทรีย์ จะถูกกัดกร่อนมากกว่าพวก mica , glass และ เซรามิก
6. กรดไนตริกในรูปของความชื้น
7. electric wind
8. การรบกวนคลื่นวิทยุ

## 2.8 การคิสชาร์จในก๊าซ

ตอนเริ่มต้น มีการป้อนแรงดันเข้าไปน้อยมาก ทำให้มีกระแสปริมาณน้อยเกิดขึ้นอธิบายรูปกราฟ



รูป 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส

ช่วง A กระแสจะแปรผันตามแรงดัน เนื่องจาก

ถ้าให้

อนุภาคไฟฟ้าบวก

อนุภาคไฟฟ้าลบ

ความเร็ว	ความหนาแน่น
V +	n +
V -	n -

จะได้ว่า  $I dt = S.e\{(n_+ \cdot V_+) + (n_- \cdot V_-)\} dt$

เมื่อ S คือ พื้นที่บริเวณที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน

$I dt$  คือ จำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ S ในเวลา dt วินาที

$$I dt = S.e\{(n_+ \cdot \mu_+ \cdot E) + (n_- \cdot \mu_- \cdot E)\} dt$$

$$I = S.e\{(n_+ \cdot \mu_+) + (n_- \cdot \mu_-)\} V/d$$

(2.18)

ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่า  $I \propto V$

ช่วง B กระแสมีการอิ่มตัว โดย  $I_s = S.d.n_0.e$

ตัวอย่าง ถ้ามีอนุภาคไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากรังสีคอสมิก หรือสารกัมมันตรังสีวินาทีละ 10 คู่ และ

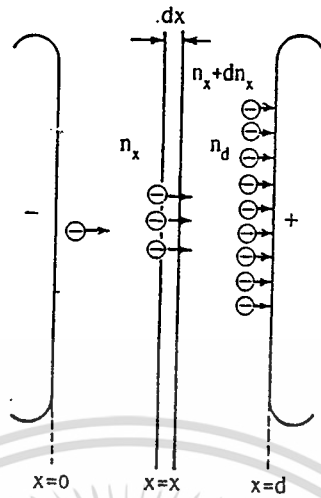
$$S = 10 \text{ cm}^2, d = 1 \text{ cm}$$

$$\text{จาก } I_s = S.d.n_0.e = 10 \times 1 \times 10 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$\therefore \text{กระแสอิ่มตัว} = 1.6 \times 10^{-17} \text{ A} \text{ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อย}$$

ช่วง C เมื่อค่าแรงดัน ที่ป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนก็จะมีความเร็วเพิ่มขึ้น (เพราะ  $V_d = \mu E = \mu V/d$ )

ทำให้อิเล็กตรอนชนเข้ากับโมเลกุลของก๊าซ ทำให้มีการแตกตัวออกเป็น ไอออนบวก และไอออนลบ ทำนองเดียวกันอิเล็กตรอน ที่เกิดขึ้นใหม่ก็จะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงเช่นเดียวกัน และไปชนกับโมเลกุลอื่นอีก ทำให้อิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูป 2.14 การเพิ่มของอิเล็กตรอนจากการชนกัน

เริ่มต้นมีอิเล็กตรอน 1 ตัว หลังจากนั้นก็จะมีการวาลานซ์จนถึงระยะ  $x$  ซึ่งจะทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนจำนวน  $n_x$  เพราะที่ต้องการหาความสัมพันธ์ ระหว่าง จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นกับระยะทาง(x) ดังนั้นจึงพิจารณาในช่วง  $dx$

คือ  $dn_x = n_x \cdot \alpha \cdot dx$  ได้ว่า  $n_x = e^{\alpha x}$

ดังนั้น ตั้งแต่  $x=0$  ถึง  $x=x+dx$  จะมีจำนวนอิเล็กตรอน  $= n_x + dn_x$

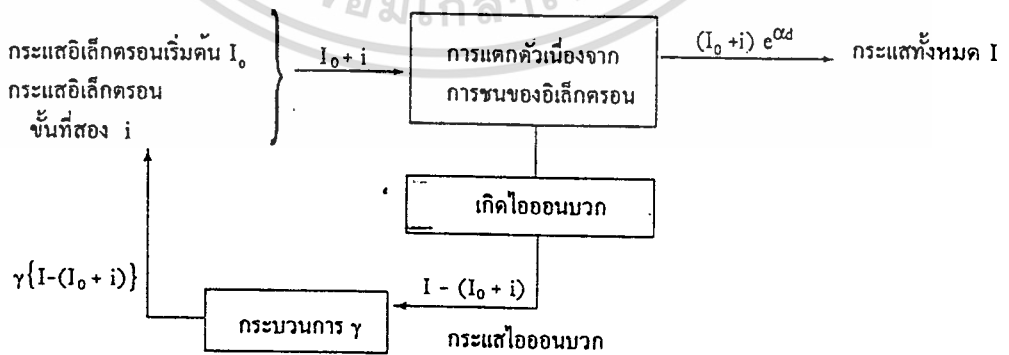
$x=0$  ถึง  $x=d$  จะมีจำนวนอิเล็กตรอน  $= e^{\alpha d}$

โดยเราจะเรียกกลไกในช่วง C นี้ว่า "Townsend's Discharge"

( แคโทด )

( แก๊ส )

( แอโนด )



รูป 12.15 ทฤษฎีของ Townsend

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

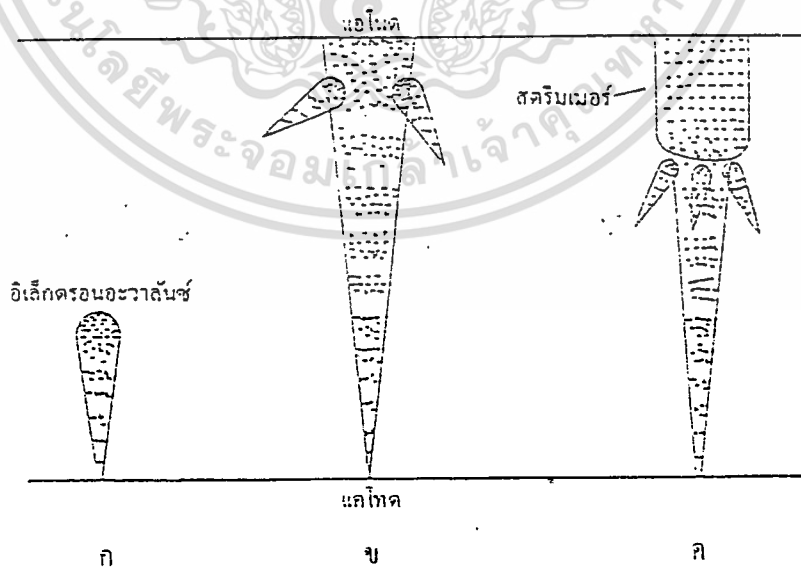
สรุป ทฤษฎีของ Townsend ได้ว่า ถ้าเริ่มต้นมีอิเล็กตรอนอิสระ 1 ตัวก็จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระ จาก  $x_0$  ถึง  $d$  จำนวน  $e^{\alpha d} - 1$  ตัว ชนเข้ากับแผ่นแคโทด ก็จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวน  $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$  ตัว ถ้า  $\gamma(e^{\alpha d} - 1) > 1$  ก็จะให้อิเล็กตรอนจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดการสปาร์ก ได้สรุปได้ว่า

1. อิเล็กตรอน 1 ตัว ก็ทำให้เกิดการสปาร์กได้
2. แม้ไม่มีแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอกก็ทำให้เกิดการคายประจุได้

ทฤษฎี Streamer

เนื่องจากการคำนวณจาก ทฤษฎีของTownsend พบว่า เวลาที่ไอออน บวกใช้ในการเคลื่อนไปชนกับ แคโทดจะใช้เวลามากกว่าเวลาจริงที่วัดได้จากการทดลอง ที่วัดตั้งแต่ป้อนแรงดันจนเกิดการเบรคดาวนด์ดังนั้นจึงมีแนวความคิดว่า อิเล็กตรอนที่เกิดจากการอวาลานซ์ในกระบวนการ  $\alpha$  เพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดการเบรคดาวนด์ โดยไม่ผ่านกระบวนการ  $\gamma$  ซึ่งจะสามารถเรียบเรียงขั้นตอนใหม่ได้ดังนี้

1. เมื่ออิเล็กตรอนออกจากแคโทดก็จะทำให้เกิดการอวาลานซ์ตามปกติ
2. อิเล็กตรอนที่เกิดจากการอวาลานซ์จะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่มาอยู่ด้านหน้า ในขณะที่ไอออนบวกจากการอวาลานซ์ซึ่งเคลื่อนที่ช้าจะ ไปอยู่ด้านหลัง ดังรูป 2.1 ก.



รูป 2.16 การเปลี่ยนแปลงจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตริมเมอร์

3. เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นส่วนหัวเคลื่อนที่มาถึงแอโนด มันก็จะถูกดูดเข้าไปเหลือแต่ไอออนบวก ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งกรวย มีความหนาแน่นสูง ดังรูป 2.16 ข.
4. แท่งกรวยไอออนบวกจะเป็นเสมือนขั้วไฟฟ้าบวกขนาดใหญ่ที่ดึงอิเล็กตรอนเข้ามาเป็นอะวาลานซ์ขนาดเล็มากมาย
5. อิเล็กตรอนที่ถูกดึงเข้ามาจะปะปนกับไอออนบวกบริเวณยอดเกิดเป็น พลาสมาความนำไฟฟ้าสูง Streamer ดังรูป 2.16 ค.

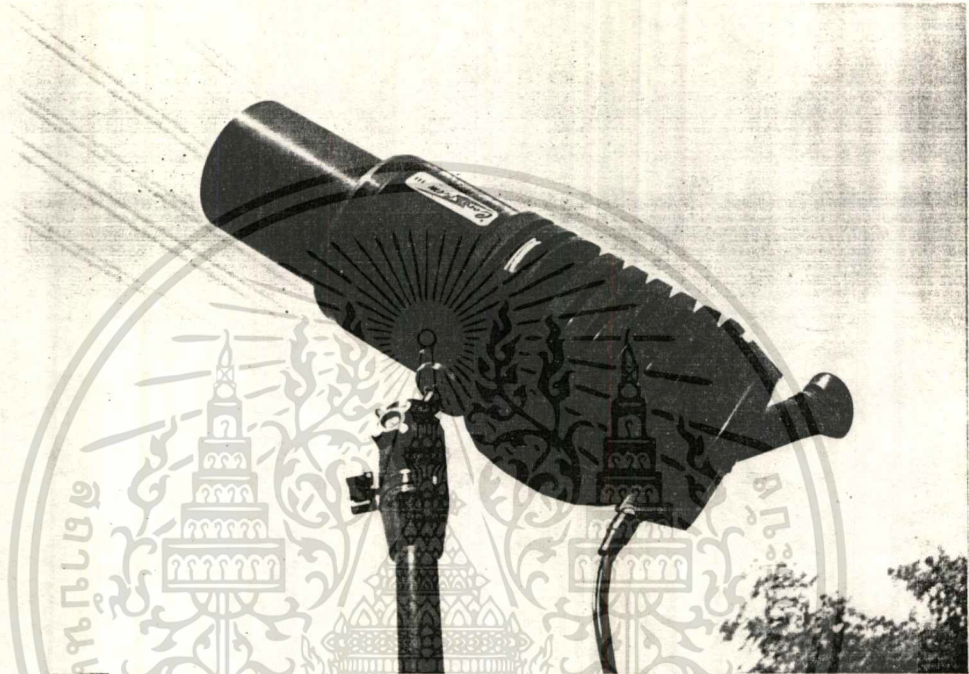


### บทที่ 3

#### กระบวนการในการสำรวจโคโรนา

##### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจ

##### -กล้องตรวจจับโคโรนา (coro-camera)



รูป 3.1 กล้องตรวจจับโคโรนา

คือ กล้องที่ออกแบบมาเป็นพิเศษในการตรวจจับคลื่นแสงในย่านความถี่ที่ ปราณการณ์โคโรนามีการแผ่ออกมา เพราะจะมีความสามารถในการกรองคลื่นแสงในย่านความถี่อื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง เช่น แสงสว่างจากดวงอาทิตย์ แสงสว่างจากหลอดไฟ ฯลฯ โดยใช้เลนส์ชนิดพิเศษ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการขยายสัญญาณ ที่สุดจะแสดงผลในรูปของแสงจากปราณการณ์โคโรนา อันเป็นคุณลักษณะพิเศษของกล้องซึ่ง จะนำมาใช้

(สำหรับ อุปกรณ์ กล้องตรวจจับโคโรนา ทางกลุ่มได้รับความอนุเคราะห์ในการให้ยืมจาก คุณ นพ พุทธิวิบูลย์ บริษัท Data Entry Group จำกัด )

##### -กล้องวีดีโอขนาด 8 มิลลิเมตร

นำมาใช้เพื่อทำการบันทึกสัญญาณภาพจาก กล้องตรวจจับโคโรนา ลงม้วนเทปวีดีโอ

##### -Thermometer

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมขณะตรวจจับโคโรนา โดยจะแสดงผลเป็นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -Hygrometer

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ ของสิ่งแวดล้อมขณะตรวจจับโคโรนา โดยจะแสดงผลเป็นค่า เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์

### 3.2 วิธีการในการสำรวจ

เนื่องจากกล้องโคโรนายังมีข้อจำกัดในเรื่องของ การนำเอาไปใช้ในเวลากลางวันซึ่งจะมีแสงจากดวงอาทิตย์ที่แรงเกินกว่าที่ เลนส์ของกล้องจะ สามารถรองเอาคลื่นแสงจากดวงอาทิตย์ออกไปได้หมด เพราะฉะนั้น การสำรวจโคโรนาจะต้องทำในเวลา เย็น กลางคืน และ เช้ามืดเท่านั้น ดังนั้น ทางกลุ่มจึงเลือก ที่จะสำรวจโคโรนาในเวลาตั้งแต่ 18.00 น. จนถึงเวลา 6.00 น. ของวันใหม่

### 3.3 ขั้นตอนในการขออนุญาตเข้าสำรวจ

1. เลือก สถานีไฟฟ้าแรงสูง และ line ที่เป็นเป้าหมายในการสำรวจ
2. ทำการสำรวจ สภาพพื้นที่ ของ สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เลือกไว้ พร้อมกับติดต่อ หัวหน้าสถานีไฟฟ้าแรงสูง และ เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุม
3. ทำหนังสือขออนุญาต จากทางภาควิชาฯ เพื่อเข้าไปใน สถานีไฟฟ้าแรงสูงโดย -สฟ. ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ยื่นหนังสือขออนุญาตที่ ฝ่ายปฏิบัติการเขตนครหลวง (สปล.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิต บางกรวย -สฟ. ในเขตภูมิภาค ยื่นหนังสือขออนุญาตที่ ฝ่ายปฏิบัติการส่วนภูมิภาค (สปก.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิต บางกรวย
4. เมื่อได้รับการอนุญาตจากทาง สปล. และ สปก. แล้วก็ทำการติดต่อ หัวหน้า สถานีไฟฟ้าแรงสูงเพื่อนัดเวลาอีกครั้ง

### 3.4 ขั้นตอนในการสำรวจ และ เก็บข้อมูล

1. ทำการตั้งกล้องสำรวจ และเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 18.00 น. จนกระทั่งถึง เวลา 06.00 น. ของวันใหม่
2. การสำรวจจะเริ่มที่ก่อนเวลา 18.00 น. หรือ เวลาที่เริ่มสำรวจ อันเป็นเวลาเริ่มเห็นโคโรนา โดยใช้กล้องสำรวจตามจุดต่างๆที่น่าจะมี โคโรนาเกิดขึ้น ( เช่น ลูกถ้วยทั้ง แบบ suspension และ

tension , clamp , tension-sleeve , bus bar , corona-ring ฯลฯ) โดยการมองผ่านรอบๆ และ เลือก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

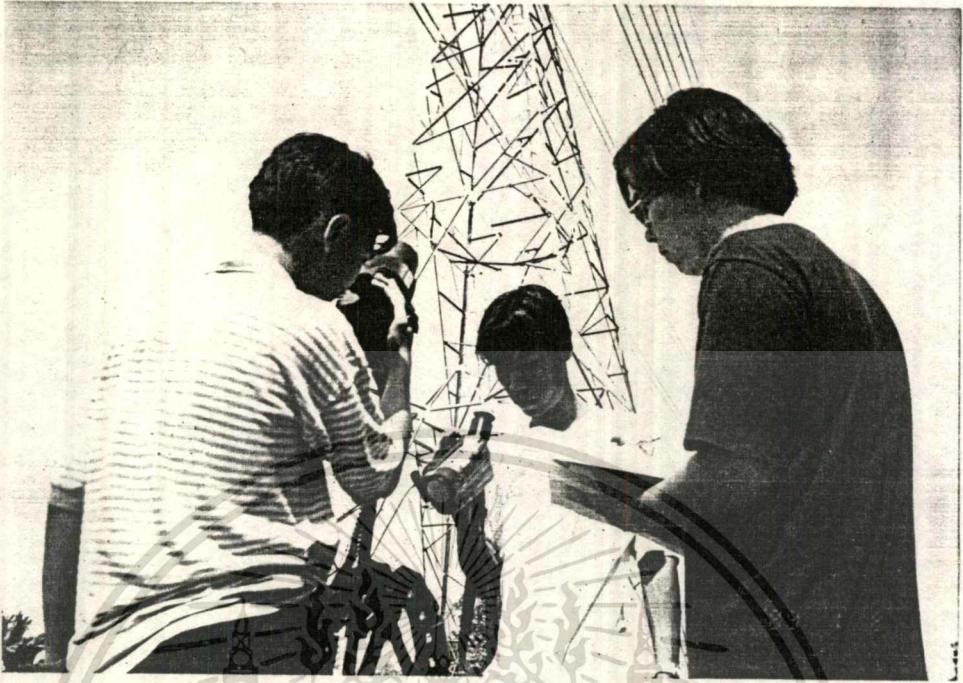
จุดที่เห็นโคโรนา ได้ชัดเจนที่สุด เพื่อกำหนดให้เป็นจุดเป้าหมายในการสำรวจทุกๆ ชั่วโมง ซึ่งจะ  
ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของ โคโรนาในทุกๆ ชั่วโมง

3. ในทุกๆ ชั่วโมง จะทำการใช้กล้องตรวจจับโคโรนา สำรวจในจุดเป้าหมาย ที่เลือกไว้ และทำ  
การบันทึกลงในม้วนเทปวีดีโอ โดยจะบันทึกเป็นเวลาประมาณ 5 นาที ในทุกๆ ชั่วโมง และ ใน  
ทุกๆ ชั่วโมง ก็จะมีการใช้กล้อง สำรวจในจุดต่างๆ อีกครั้ง เพื่อ เช็คว่ามีจุดใดอีกบ้างที่มีโคโรนา  
เพิ่มขึ้น หรือ ลดลง หรือ เกิดขึ้นใหม่
4. ทำการวัด และบันทึกค่า อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ ในทุกๆ ชั่วโมง ที่ทำการตรวจจับโคโร  
นา
5. ทำการบันทึกค่า kV , I , MW , MVAR ของ line ที่ทำการสำรวจ จากเครื่องวัดของ ทางสถานี  
ไฟฟ้าแรงสูง

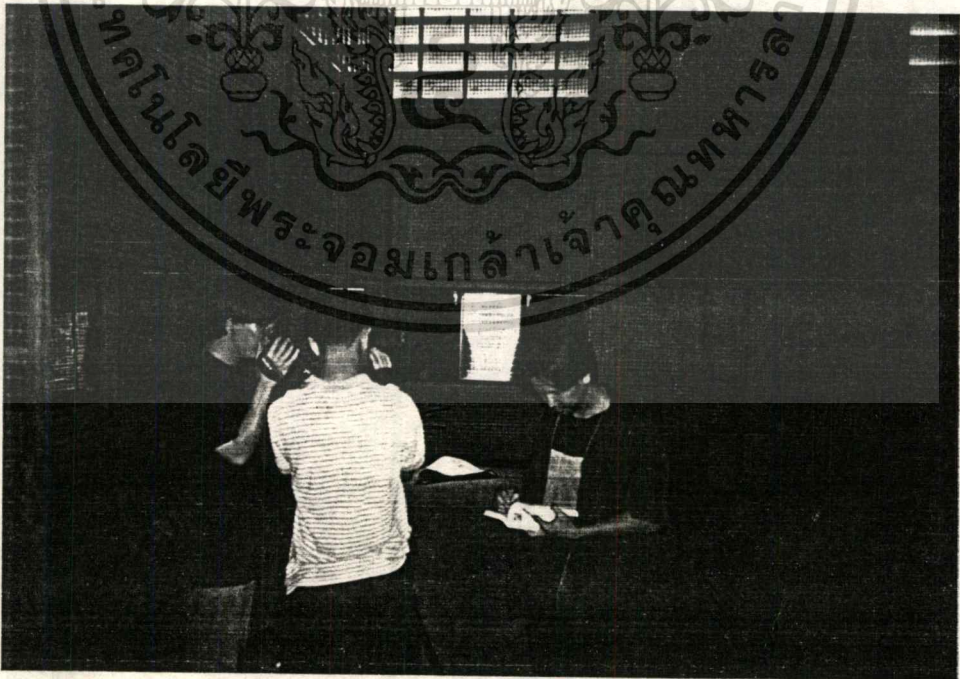


รูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เลือกไปสำรวจ

เนื่องจาก จุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์นี้คือ สำรวจ และ เสนอแนะวิธีแก้ไขที่จะทำให้ไม่มีปรากฏการณ์โคโรนาเกิดขึ้น ดังนั้นจึงเลือกสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีปัญหาในการเกิด วาบไฟตามผิวมากเป็นพิเศษ เพื่อที่จะได้เห็นปรากฏการณ์ โคโรนาได้อย่างชัดเจน รวมไปถึง สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่ไม่มี หรือมีความถี่ในการเกิดวาบไฟตามผิว ต่ำ เพื่อศึกษา พฤติกรรมของปรากฏการณ์โคโรนา และพิจารณาถึงอุปกรณ์ ที่มีการเกิด โคโรนา

จากการที่ได้ปรึกษากับทางท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ประกอบกับ คำแนะนำของ เจ้าหน้าที่จากทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ในที่สุดทางกลุ่มจึงได้ทำการเลือก สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นเป้าหมายในการสำรวจ โดยอาศัยข้อพิจารณา ในการเลือกดังต่อไปนี้

1. ลักษณะสภาวะแวดล้อมของ สถานีไฟฟ้าแรงสูง
  2. ลักษณะของอุปกรณ์ใน สถานีไฟฟ้าแรงสูง
  3. ลักษณะการเชื่อมต่อของ สายไฟฟ้าแรงสูงอยู่ในเส้นทางเดียวกัน
- สำหรับ สรุปสุดท้าย สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นเป้าหมายในการสำรวจก็มี 4 แห่ง อันได้แก่

1. สถานีไฟฟ้าแรงสูง บางปะกง จ.สมุทรปราการ
  - เป็นสถานีไฟฟ้าแรงสูงในระบบ 230 kV
  - เป็นสถานีไฟฟ้า ต้นทางในการสำรวจ
  - Line ที่สำรวจ คือ \*บางปะกง-หนองจอก , บางปะกง-บางพลี , บางปะกง-คลองใหม่
  - มีปัญหาในการเกิดวาบไฟตามผิว สูงมาก (ข้อมูลจากทาง กฟผ. ในปีที่ผ่านมา)
  - สภาพพื้นที่ โดยรอบคือ โรงจักรไฟฟ้าบางปะกง , แม่น้ำบางปะกง และด้านที่จ่ายไฟออกไปยังเสาไฟฟ้าแรงสูง เป็นทุ่งหญ้า
2. สถานีไฟฟ้าแรงสูง หนองจอก
  - เป็นสถานีไฟฟ้าแรงสูงในระบบ 230 kV
  - Line ที่สำรวจ คือ หนองจอก-บางปะกง , หนองจอก-อ่อนนุช
  - มีปัญหาในการเกิดวาบไฟตามผิว ก่อนข้างน้อย
  - สภาพพื้นที่ โดยรอบคือ ทุ่งหญ้า , โรงจักรดีเซลหนองจอก , ถนนสุวินทวงศ์

### 3. สถานีไฟฟ้าแรงสูง อ่อนนุช

- เป็นสถานีไฟฟ้าแรงสูงในระบบ 230 kV
- เป็นระบบ indoor-GIS
- Line ที่สำรวจ คือ อ่อนนุช-หนองจอก , อ่อนนุช-บางกะปิ
- มีปัญหาในการเกิดวาบไฟตามผิว ค่อนข้างน้อย
- สภาพพื้นที่ โดยรอบคือ ทุ่งหญ้า , คลอง

### 4. สถานีไฟฟ้าแรงสูง บางกะปิ

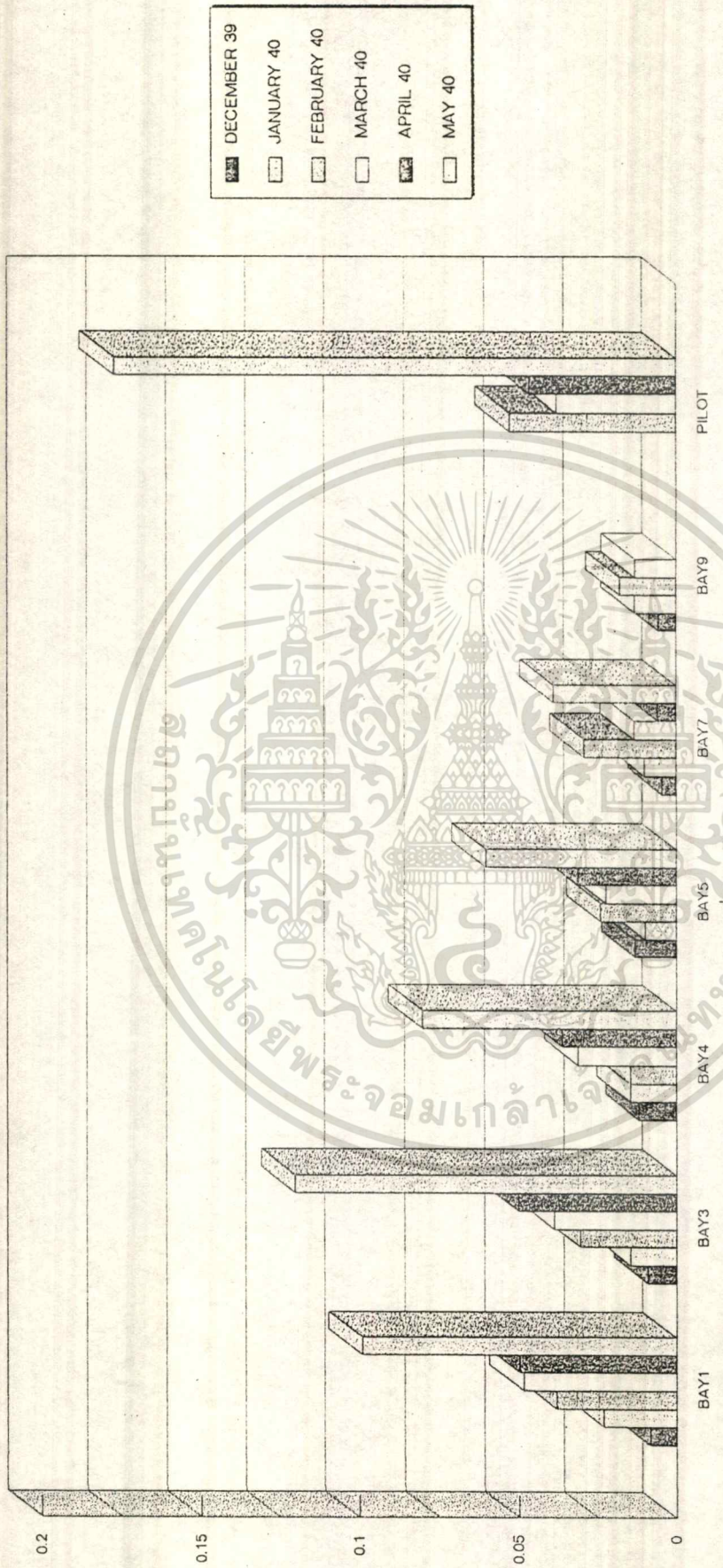
- เป็นสถานีไฟฟ้าแรงสูงในระบบ 230 kV
- เป็นสถานีปลายทางในการสำรวจ
- เป็นระบบ outdoor-GIS
- Line ที่สำรวจ คือ บางกะปิ-อ่อนนุช
- มีปัญหาในการเกิดวาบไฟตามผิว ค่อนข้างน้อย
- สภาพพื้นที่โดยรอบคือ ถนนรามคำแหง , ทางรถไฟ , ตึกสูง , แหล่งชุมชนขนาดใหญ่

#### 3.6 ผลที่ได้จากการสำรวจ

ช่วงเวลาในการสำรวจ คือ ต้นเดือนธันวาคม ถึง ต้นเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ฝนเพิ่งจะตกลงมา ทำให้สิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ถูกชะล้างออกไปเสียเป็นส่วนใหญ่ (ดูรายละเอียดจากค่า ESDD ของ สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางปะกงประกอบ) ประกอบกับ ยังไม่เข้าช่วงฤดูร้อน ( เพราะในช่วงฤดูร้อน ทางโรงจักรบางปะกงจะมีการใช้งาน หอหล่อเย็น เต็มที่ ทำให้ละอองน้ำจาก หอหล่อเย็น ซึ่งจะมีเกลือเป็นส่วนผสมอยู่มากนั้น ไปจับตาม อุปกรณ์ทำให้เกิดโคโรนา และมีการ วาบไฟตามผิว สูงมาก )

ดังนั้น โอกาสในการที่จะสามารถ เห็น ปრაกฏการณ์ โคโรนา จนวาบไฟตามผิว นั้นแทบที่จะไม่มีเลย หรือมีน้อยมาก เพราะฉะนั้น ผลจากการสำรวจจึงออกมาในรูปแบบของการศึกษา ลักษณะของปรากฏการณ์โคโรนา และ จุด หรือ อุปกรณ์ที่เกิดโคโรนา ซึ่งผลที่ได้จากการ สำรวจ แต่ละ สถานีไฟฟ้าแรงสูง จะเป็นดังนี้

ESDD สฟ BPK



Test By ทตท1-ต

Date

0.06-0.1 mg/sq.cm เปื้อนปานกลาง

มากกว่า 0.1 mg/sq.cm เปื้อนมาก

0-0.03 mg/sq.cm เปื้อนน้อยมาก

0.03-0.06 mg/sq.cm เปื้อนน้อย

ค่า ESDD ในปี 2540 ก่อนที่จะมีการ flash-over เนื่องจากมลภาวะในเดือนมิถุนายน 2540

ตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้...  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางปะกง

วัน/เวลา/จุดที่สำรวจ :

1. line 230 kV ที่ส่งไปยังหนองจอก , 19 ม.ค. 2541
2. line 230 kV ที่ส่งไปยังบางพลี , 19 ม.ค. 2541
3. line 230 kV ที่ส่งไปยังคลองใหม่ , 19 ม.ค. 2541

### บริเวณที่เห็นโคโรนา

บริเวณ จุดมุมของ yoke plate ( ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ ลูกถ้วย tension กับ clamp ) , clevis และ compression-dead-end clamp ซึ่งจะเห็น ณ. จุดเหล่านี้ ณ. line ที่ส่งไปยังหนองจอก, บางพลี , คลองใหม่

บริเวณก้าน ลูกถ้วยsuspension ด้านล่าง ณ. Line คลองใหม่

### ลักษณะของโคโรนา

เห็นเป็นจุดอยู่ตามมุม และ ความแรงในการพุ่งของลำ โคโรนา จะสูง และถี่ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูง และ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ

### ข้อสังเกต

ลูกถ้วย tension และ suspension ที่พบตาม line ที่ไปสำรวจเป็น ลูกถ้วย porcelain แบบ fog , ลูกถ้วยที่มีการพ่น silicone , ลูกถ้วยแก้ว ฯลฯ

### สรุปผล

จากที่ไปสำรวจ ณ. สฟ.บางปะกงจะเห็นว่าโอกาสที่จะ วาบไฟตามผิว บริเวณลูกถ้วยนั้นไม่มีเลย และ โคโรนา เท่าที่สำรวจเห็นนั้นก็ไม่มีโอกาสเกิด วาบไฟตามผิว ดังจะเห็นได้ว่าตรง กับข้อมูลค่า ESDDในเดือน ม.ค. 2541 ซึ่งบ่งว่ามีการปนเปื้อนน้อยมาก

## 2. สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก

### วัน/เวลา/จุดที่สำรวจ :

1. line 230 kV ที่รับจากวังน้อย ( temporary line ) , 16 ธ.ค. 2540
2. line 230 kV ที่รับจากบางปะกง , 22 ธ.ค. 2540
3. line 230 kV ที่ส่ง ไปยังอ่อนนุช , 29 ธ.ค. 2540
4. line 230 kV ที่ส่ง ไปยังอ่อนนุช และ ที่รับจากบางปะกง , 23ม.ค. 2541

### บริเวณที่เห็นโคโรนา

บริเวณ จุดมุมของ yoke plate ( ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ ลูกถ้วย tension กับ clamp ) , clevis และ compression-dead-end clamp ซึ่งจะเห็น ณ จุดเหล่านี้แทบทุก line และ ทุกครั้งที่ไปสำรวจ

ส่วนในบริเวณอื่นที่สังเกตเห็นก็ เช่น support insulator , bus-bar แต่โคโรนาที่เห็นเป็นจุดเล็กๆ และเห็นเป็นครั้งคราวเท่านั้น ส่วนบริเวณอื่นนอกจากนี้ เช่น ลูกถ้วย นั้นแทบไม่เห็น โคโรนา เลย

### ลักษณะของ โคโรนา

เห็นเป็นจุดอยู่ตามมุม และ ความแรงในการพุ่งของลำ โคโรนา จะสูง และถี่ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูง และ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ

### ข้อสังเกต

ลูกถ้วย tension ที่พบตาม line ที่ไปสำรวจเป็น ลูกถ้วย porcelain

### สรุปผล

จากที่ไปสำรวจ ณ. สฟ.หนองจอกจะเห็นว่าโอกาสที่จะเกิด วาบไฟตามผิว บริเวณลูกถ้วยนั้นแทบไม่มีเลยไม่ว่าจะเป็นแบบ tension , suspension , support insulator และ โคโรนา เท่าที่เห็นจากการสำรวจนั้นก็ไม่มีโอกาสทำให้เกิด วาบไฟตามผิวเลย และจะเห็นว่าภาพ โคโรนา ที่ปลายสายที่รับจากบางปะกงมีลักษณะไม่แตกต่างจากต้นสายที่ สฟ.บางปะกงเลยไม่ว่าจะเป็น จุดที่เกิด , ความแรง ณ.เวลาเดียวกัน

### 3. สถานีไฟฟ้าแรงสูงอ่อนนุช

วัน/เวลา/จุดที่สำรวจ :

1. line 230 kV ที่รับจากหนองจอก และ ที่ส่งไปยังบางกะปิ , 12 ม.ค. 2541
2. line 230 kV ที่รับจากหนองจอก และ ที่ส่งไปยังบางกะปิ , 26 ม.ค. 2541

บริเวณที่เห็นcorona

บริเวณ จุดมุมของ yoke plate ( ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ ลูกถ้วย tension กับ clamp ) , clevis และ compression-dead-end clamp ซึ่งจะเห็น ณ. จุดเหล่านี้ทั้ง line ที่รับจากหนองจอก และ ที่ส่งไปยังบางกะปิ และ ทั้ง 2 ครั้งที่ไปสำรวจ

ส่วนบริเวณอื่นนอกจากนี้ เช่น ลูกถ้วย นั้นแทบไม่เห็น โคโรนา เลย

ลักษณะของ โคโรนา

เห็นเป็นจุดอยู่ตามมุม และ ความแรงในการพุ่งของลำ โคโรนา จะสูง และถี่ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูง และ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ

ข้อสังเกต

1. ลูกถ้วย tension ที่พบตาม line ที่ไปสำรวจเป็น ลูกถ้วย แก้ว
2. บริเวณใน สฟ. มีการก่อสร้าง switchyard 115 kV โดย บ. ชไนเดอร์ ทำให้มีฝุ่นจำนวนมาก

สรุปผล

จากที่ไปสำรวจ ณ. สฟ.อ่อนนุชจะเห็นว่าโอกาสที่จะเกิด วาบไฟตามผิว บริเวณลูกถ้วยนั้นไม่มีเลย และ โคโรนา เท่าที่เห็นนั้นจากการสำรวจนั้นก็ไม่มีโอกาสเกิด วาบไฟตามผิว และ จะเห็นว่า ภาพ โคโรนาที่ปลายสายที่รับจากหนองจอกมีลักษณะไม่แตกต่างจากต้นสายที่ สฟ. หนองจอก เลย ไม่ว่าจะเป็น จุดที่เกิด , ความแรง ณ.เวลาเดียวกัน

#### 4. สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางกะปิ

วัน/เวลา/จุดที่สำรวจ :

1. line 230 kV ที่รับจากอ่อนนุช , 19 ม.ค. 2541
2. line 230 kV ที่รับจากอ่อนนุช , 26 ม.ค. 2541

บริเวณที่เห็นcorona

บริเวณ จุดมุมของ yoke plate (ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ ลูกถ้วย tension กับ clamp), clevis และ compression-dead-end clamp ซึ่งจะเห็น ณ จุดเหล่านี้ทั้ง line ที่รับจากอ่อนนุช และทั้ง 2 ครั้งที่ไปสำรวจ

ส่วนบริเวณอื่นนอกจากนี้ เช่น ลูกถ้วย นั้นแทบไม่เห็น โคโรนาเลย

ลักษณะของโคโรนา

เห็นเป็นจุดอยู่ตามมุม และ ความแรงในการพุ่งของลำ โคโรนา จะสูง และถี่ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูง และ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ

ข้อสังเกต

ลูกถ้วย tension ที่พบตาม line ที่ไปสำรวจเป็น ลูกถ้วย แก้ว

สรุปผล

จากที่ไปสำรวจ ณ. สฟ.บางกะปิจะเห็นว่าโอกาสที่จะเกิด วาบไฟตามผิว บริเวณลูกถ้วยนั้นไม่มีเลย และ โคโรนา เท่าที่เห็นนั้นก็ไม่มีโอกาสเกิด วาบไฟตามผิว และจะเห็นว่าภาพ โคโรนา ที่ปลายสายที่รับจากอ่อนนุช มีลักษณะไม่แตกต่างจากคั้นสายที่ สฟ. อ่อนนุช เลยไม่ว่าจะเป็น จุดที่เกิด และความแรง ณ.เวลาเดียวกัน

## บทที่ 4

### ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา

ในการศึกษารังนี้ี้ได้ทำการสำรวจตามสถานีส่งจ่ายไฟฟ้าต่าง ๆ โดยได้ทำการสังเกต โคโรนาที่ เกิดบริเวณ clamp ของสายส่ง และได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนาได้เป็น 3 กรณี

1. อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อการเห็นแสงของโคโรนา
2. ความชื้นสัมพัทธ์
3. ความบกพร่องและมลภาวะของอุปกรณ์ที่ใช้ยึดสายส่งเข้ากับลูกถ้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 4.1 อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อการเกิดโคโรนา

จากการศึกษาสำรวจและรวบรวมข้อมูล อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลต่อแสงของโคโรนา โดย อุณหภูมิมีผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศทำให้อากาศบริเวณนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ และต่อมาได้ทำการศึกษาตามความเร็วกระจายของแมกซ์เวลล์ การเกิดไอออไนเซชันที่อุณหภูมิห้อง จะเกิดขึ้นได้ยาก ซึ่งพบว่าโอกาสการเกิด ไอออไนเซชันบนพื้นโลกมีโอกาสนี้ครั้งทุก  $10^{500}$  ปี ต่อมาศึกษาพบว่า เมื่ออากาศอยู่ในสถานะที่มีแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิแวดล้อมมีผลช่วยทำให้เกิดการ ไอออไนเซชันในอากาศได้ ดังจะอธิบาย ได้จากปรากฏการณ์โคโรนาตามทฤษฎีอิเล็กตรอนที่เกิด บริเวณรอบตัวนำ โดยเฉพาะจุดที่มีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูง เช่น จุดที่มีความแหลมคม , จุดที่เกิดการหักงอ , ผิวที่ขรุขระเนื่องจากการกัดกร่อน

จากการสำรวจและเก็บผลของอุณหภูมิแล้วนำมาวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิแวดล้อม จะมีผลช่วย ทำให้อากาศเกิดไอออไนเซชัน และเกิดเป็นโคโรนาในอากาศ บริเวณ clamp และรอบสายตัวนำ โดยไม่มีผลต่อการเกิดโคโรนาบนลูกถ้วย จากผลที่สำรวจตามสถานีไฟฟ้า 230 kV ต่างๆ เช่น บริเวณหนองจอก, อ่อนนุช, บางกะปิ , บางปะกง จากบริเวณดังกล่าวพบว่าเมื่ออุณหภูมิแวดล้อม ลดลงทำให้เห็นแสงช่วงปลายของโคโรนาลดลง ซึ่งเป็นผลมาจาก เมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้แรงดันวิกฤตที่ทำให้อากาศแตกตัวมีค่าสูงขึ้น ( ดังสมการในหัวข้อ 2.6.2 ) ดังนั้นอากาศจึงทนการเกิดไอ อออไนเซชันได้สูงขึ้นทำให้การเห็นแสงของโคโรนาลดลง จากการวิเคราะห์ พบว่าในการหาระยะ ปลอดภัย ควรจะนำอุณหภูมิ แวดล้อม สูงสุดบริเวณนั้นมาร่วมในการพิจารณาด้วย

ตัวอย่าง การคำนวณแรงดันวิกฤตบนตัวนำอลูมิเนียม ACSR , 3φ , 230 kV , 50 Hz

$$\text{สายมีขนาดพื้นที่หน้าตัด} = 1272 \text{ mm}^2$$

$$\text{ดิ่งนั้นสายมีรัศมี} = 20.1 \text{ mm}$$

$$\text{ระยะห่างระหว่างเฟส} = 2.5 \text{ m}$$

$$\text{อุณหภูมิห้อง} = 30^\circ \text{ C}$$

$$\text{ความดันบรรยากาศ} 760 \text{ mmHg}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } \delta &= \frac{273+25}{273+t} \times \frac{b}{76} \\ &= \frac{298}{273+30} \\ &= 0983 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } E_0 &= (21.1) \times \delta^{2/3} \\ &= (21.1) \cdot (0983)^{2/3} \\ &= 20.86 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

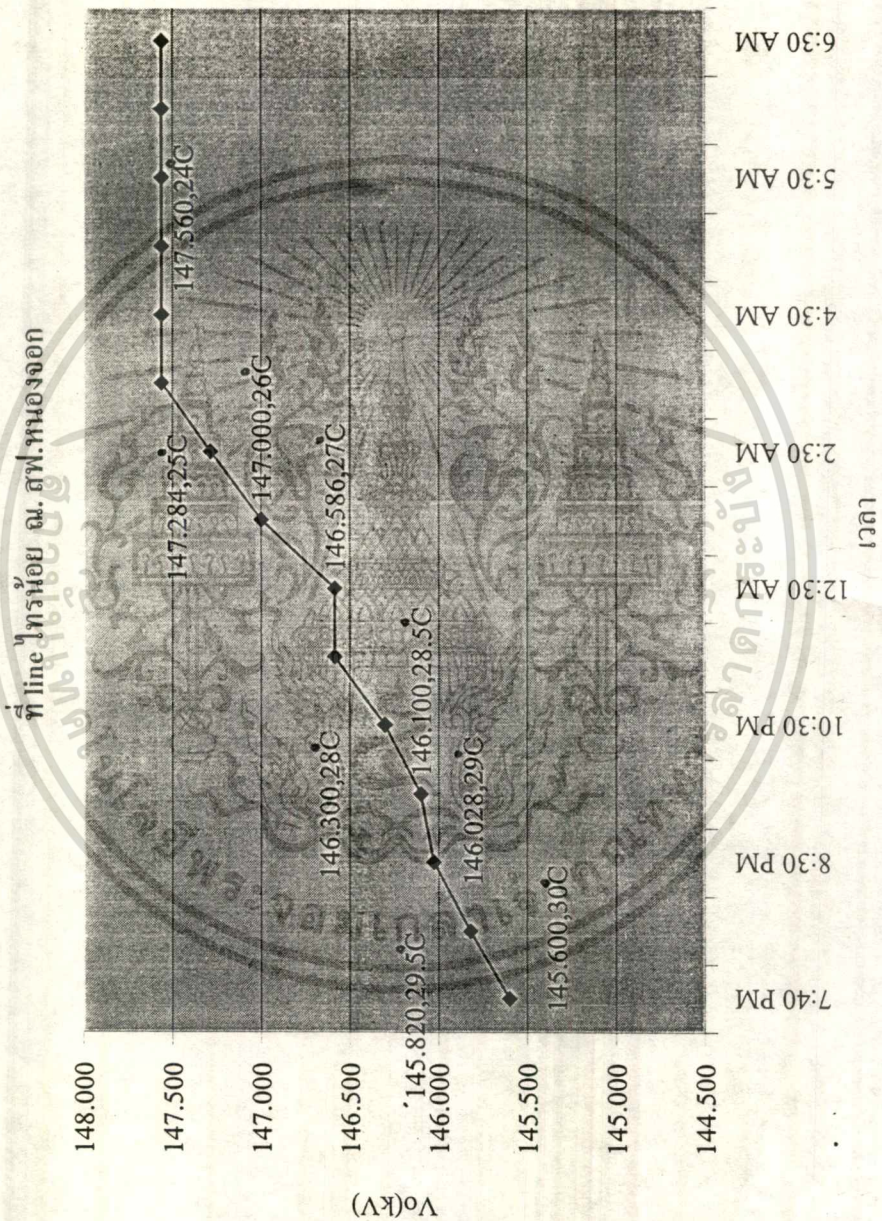
$$\begin{aligned} \text{จาก } V_0 &= p. m. E_0 \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} \\ &= 0.8 \times 0.9 \times 20.8 \times 2.01 \times \ln \frac{2.5}{2.01 \times 10^{-2}} \\ &= 145.6 \text{ kV จาก ความสูญเสียของโคโรนา} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{224}{0.983} (50+25) \sqrt{\frac{r}{D} (V-V_0)^2} \times 10^{-5} \\ &= \frac{244}{0.983} (50+25) \sqrt{\frac{2.01}{250} \left( \frac{230}{\sqrt{3}} - 145.6 \right)^2} \times 10^{-5} \\ &= 2.514 \text{ kW/km/Ph} \end{aligned}$$

\* ค่าแรงดันวิกฤตที่คำนวณได้จากการรวบรวมข้อมูลจากสถานีส่งจ่ายไฟฟ้าต่าง ๆ อยู่ที่ภาคผนวก และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ณ เวลาบันทึกต่างๆ กับแรงดันวิกฤตที่ทำให้อากาศแตกตัว เป็นตามกราฟต่อไปนี้

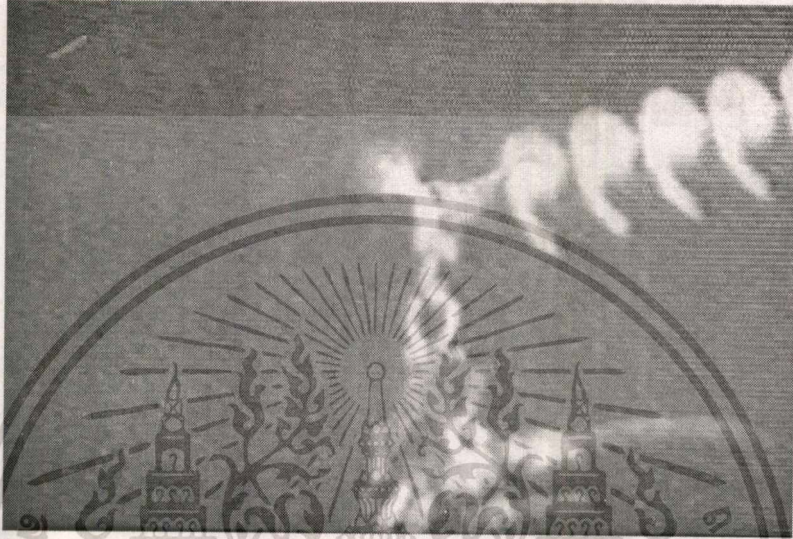
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับแรงดันวิกฤตแตกตัว

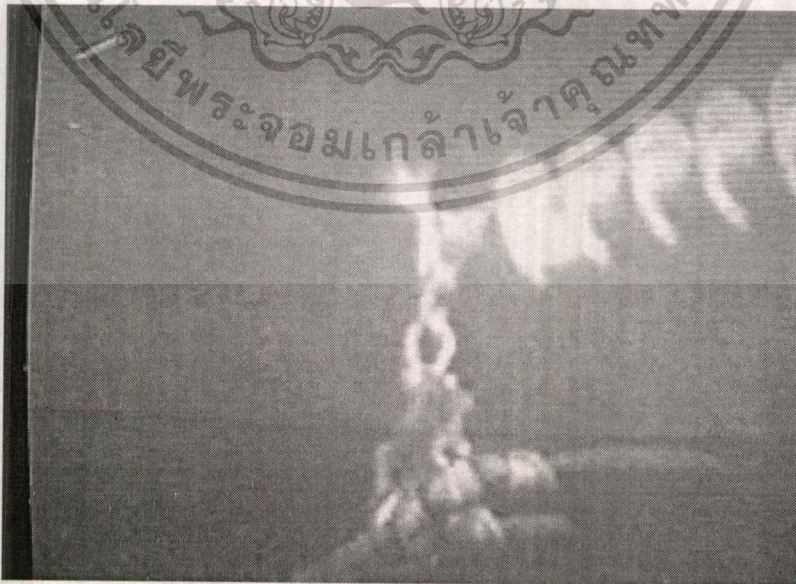


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

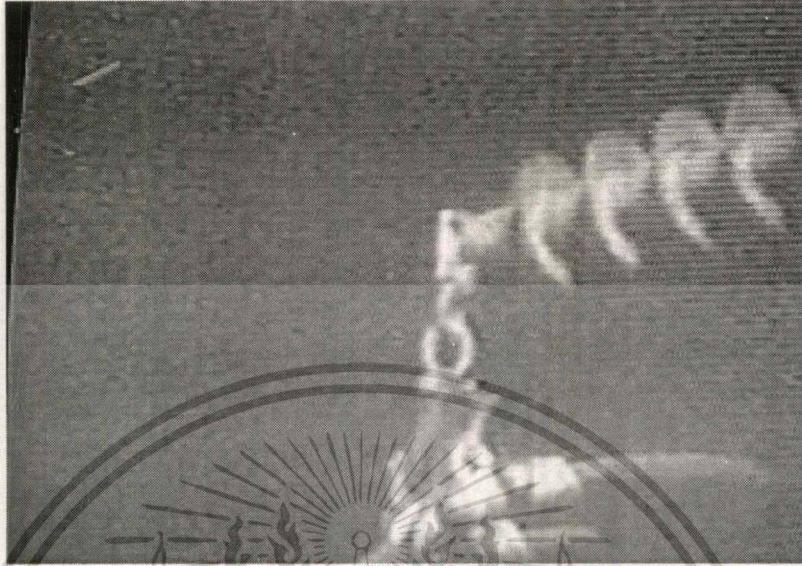
ต่อไปนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ และนำมาวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโคโรนา line ชั่วคราวไทรน้อยที่ สฟ. หนองจอก



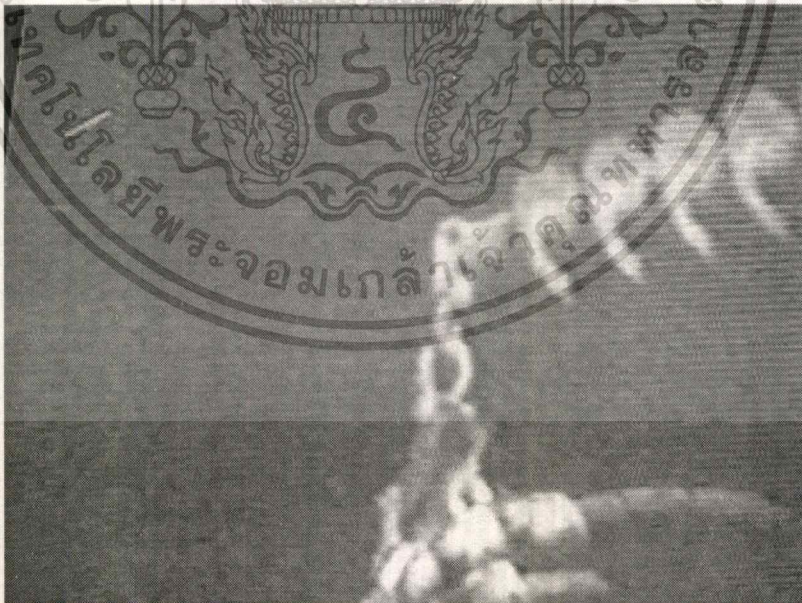
รูปที่ 4.2 จากภาพเป็น โคโรนาที่เกิดบนอุปกรณ์ที่ยึดสายส่ง line ชั่วคราวไทรน้อย ณ สฟ.หนองจอก เข้ากับลูกถ้วย จะเห็นว่าแสงของโคโรนาที่พุ่งออกมาค่อนข้างแรง และอุณหภูมิแวดล้อม  $30^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศมีค่าเป็น 145.6 kV



รูป 4.3 เมื่ออุณหภูมิตกลงมาอยู่ที่  $28.5^{\circ}\text{C}$  ทำให้ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวเพิ่มขึ้นเป็น 146.1 kV และความชื้นสูงขึ้นเป็น 65% จะพบว่าแสงของโคโรนาจะลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



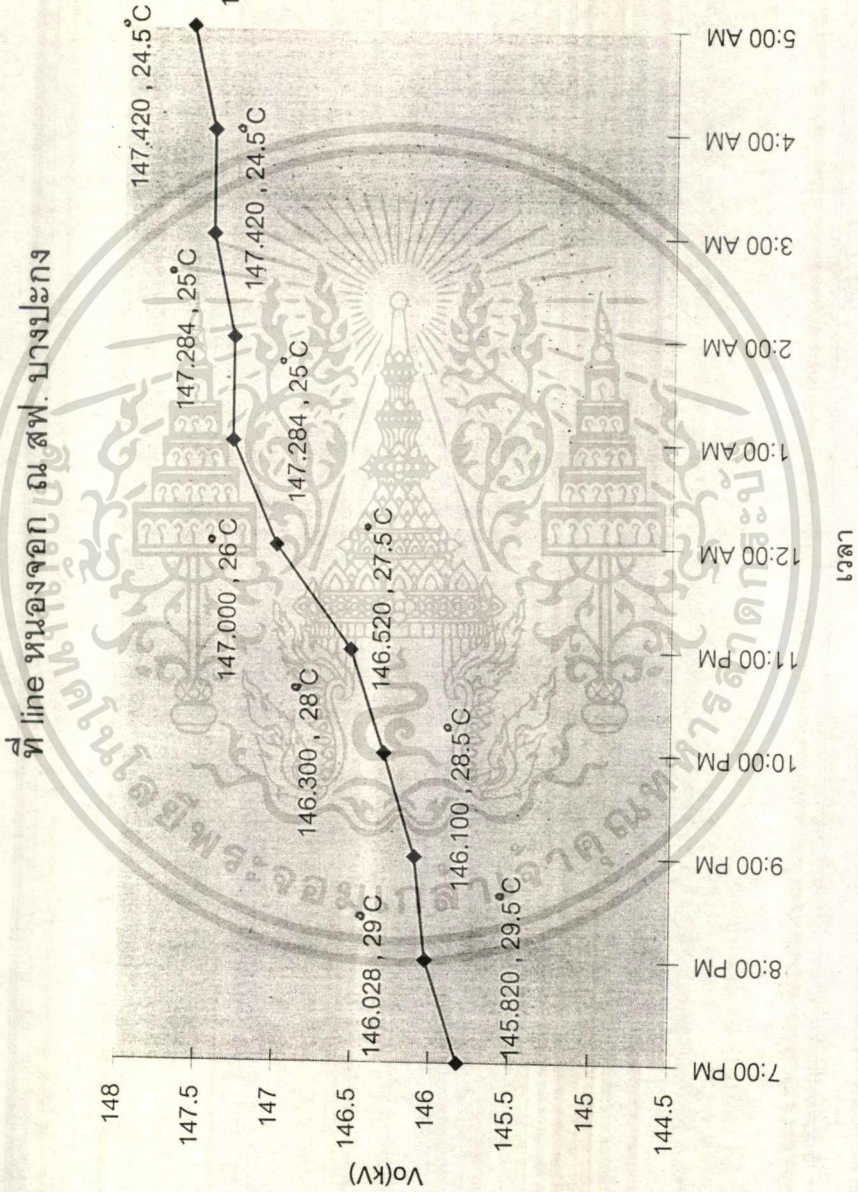
รูป 4.4 จากภาพจะพบว่าโคโรนาจะลดลงมากเนื่องจากอุณหภูมิมาอยู่ที่  $26^{\circ}\text{C}$  ความชื้น  $73\%$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศสูงขึ้นเป็น  $147\text{ kV}$  และสาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ โคโรนา ลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเพราะยังเป็นอุปกรณ์ที่ใหม่ ซึ่งเป็น line ชั่วคราวและเพิ่งติดตั้ง



รูปที่ 4.5 ขณะที่อุณหภูมิ  $24^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $147.56\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $76\%$  จะมองไม่เห็น โคโรนา เลย

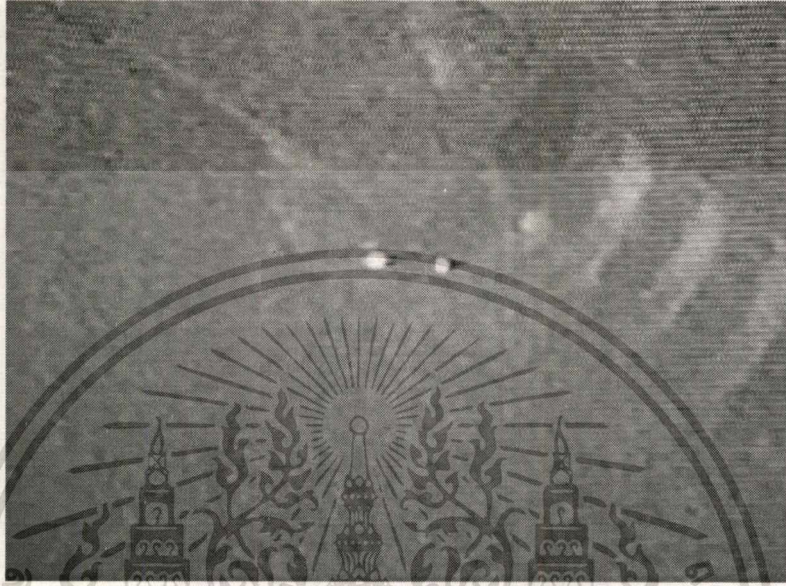
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับแรงดันวิกฤต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

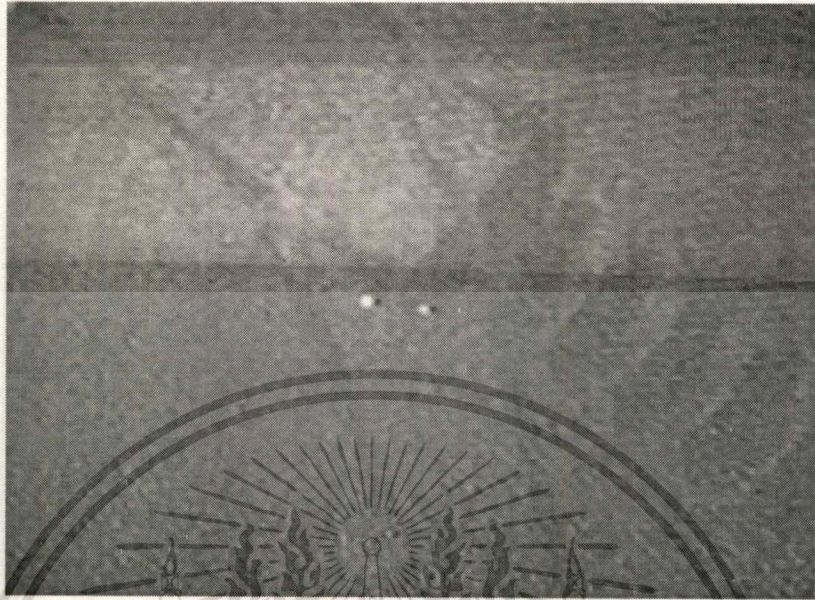
line หล่องจอก ณ สฟ. บางปะกง



รูป 4.7 มีข้อมูลดังต่อไปนี้คืออุณหภูมิ  $29.5^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $145.82\text{kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $62\%$  พบว่า จะเห็นแสงโคโรนา กระจายอยู่หลายจุดแต่โคโรนาไม่แรงมากเนื่องจากถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะมีค่าสูง แต่ในขณะที่เดียวกัน ความชื้นขณะนั้นก็จะสูงด้วย จึงทำให้อากาศแตกตัวและนำไฟฟ้าได้น้อยลง

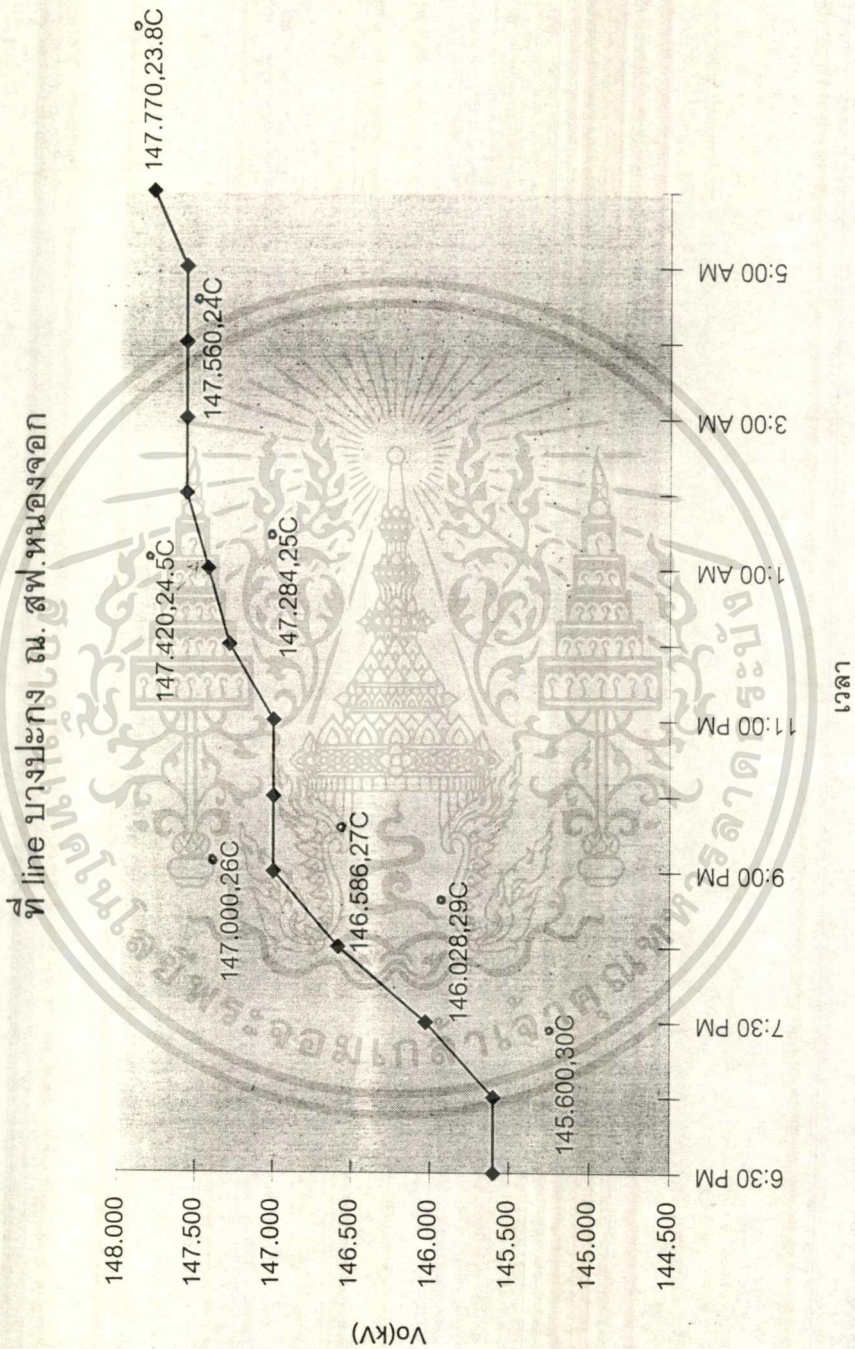


รูป 4.8 อุณหภูมิ  $27.5^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $146.82\text{kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $67\%$  เห็นแสงของโคโรนาลดลง ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.9 อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $147.284\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $71\%$  ส่งผลให้ปลายของของแสงโคโรนามีขนาดลดลง

รูป 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิกับแรงดันวิกฤตแตกตัว

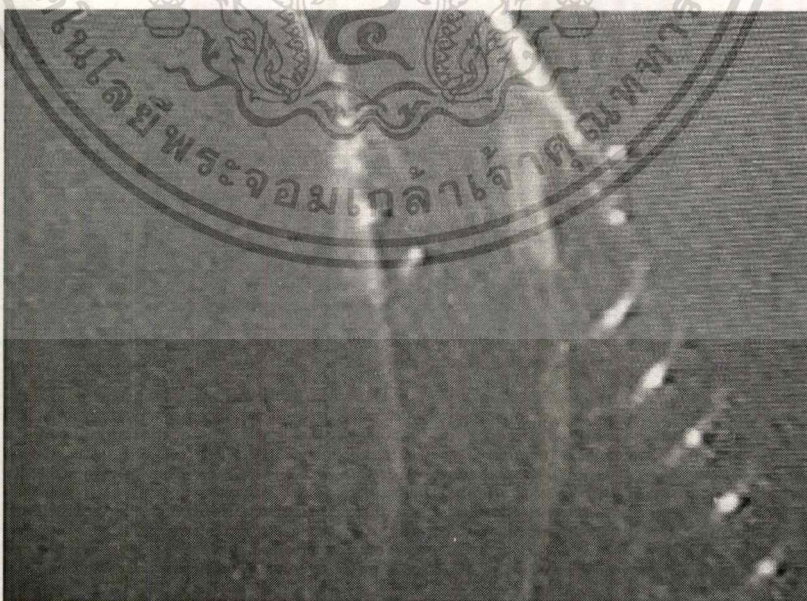


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

line บางปะกง ณ สฟ. หนองจอก

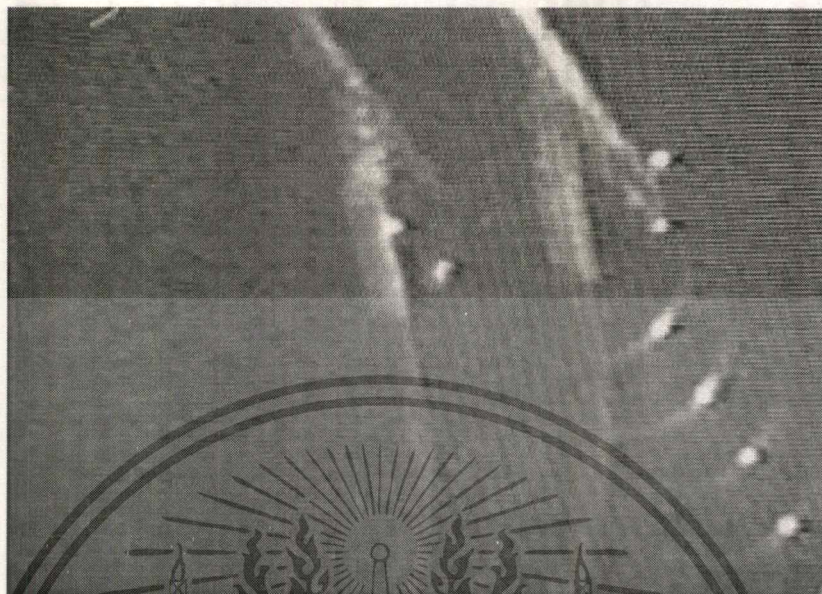


รูป 4.11 จากรูปเป็นแสงของโคโรนาขณะอุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $145.6\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $55\%$  จะเห็นโคโรนาค่อนข้างแรง

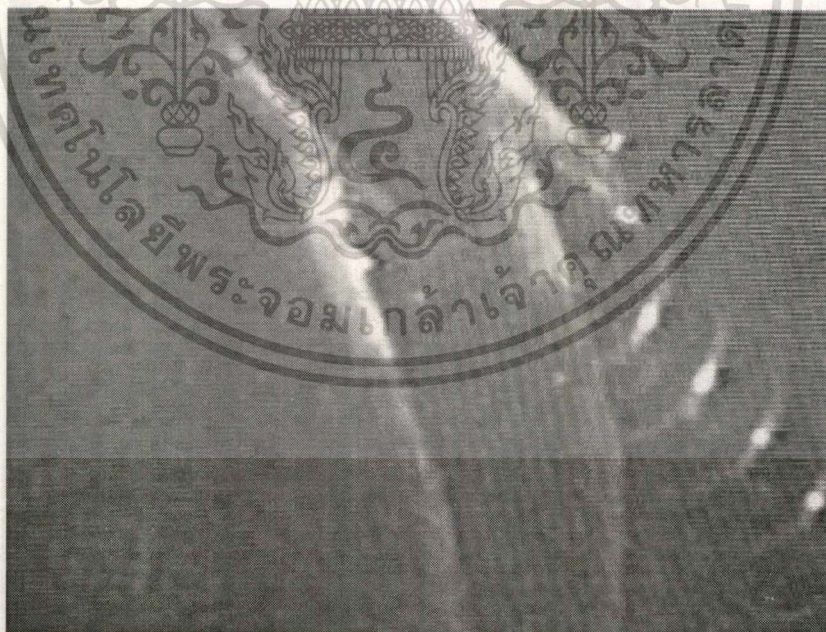


รูป 4.12 ที่อุณหภูมิ  $29^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $146.028\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $62.5\%$  แสงของโคโรนามีขนาดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.13 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $27^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $14.586\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $66\%$



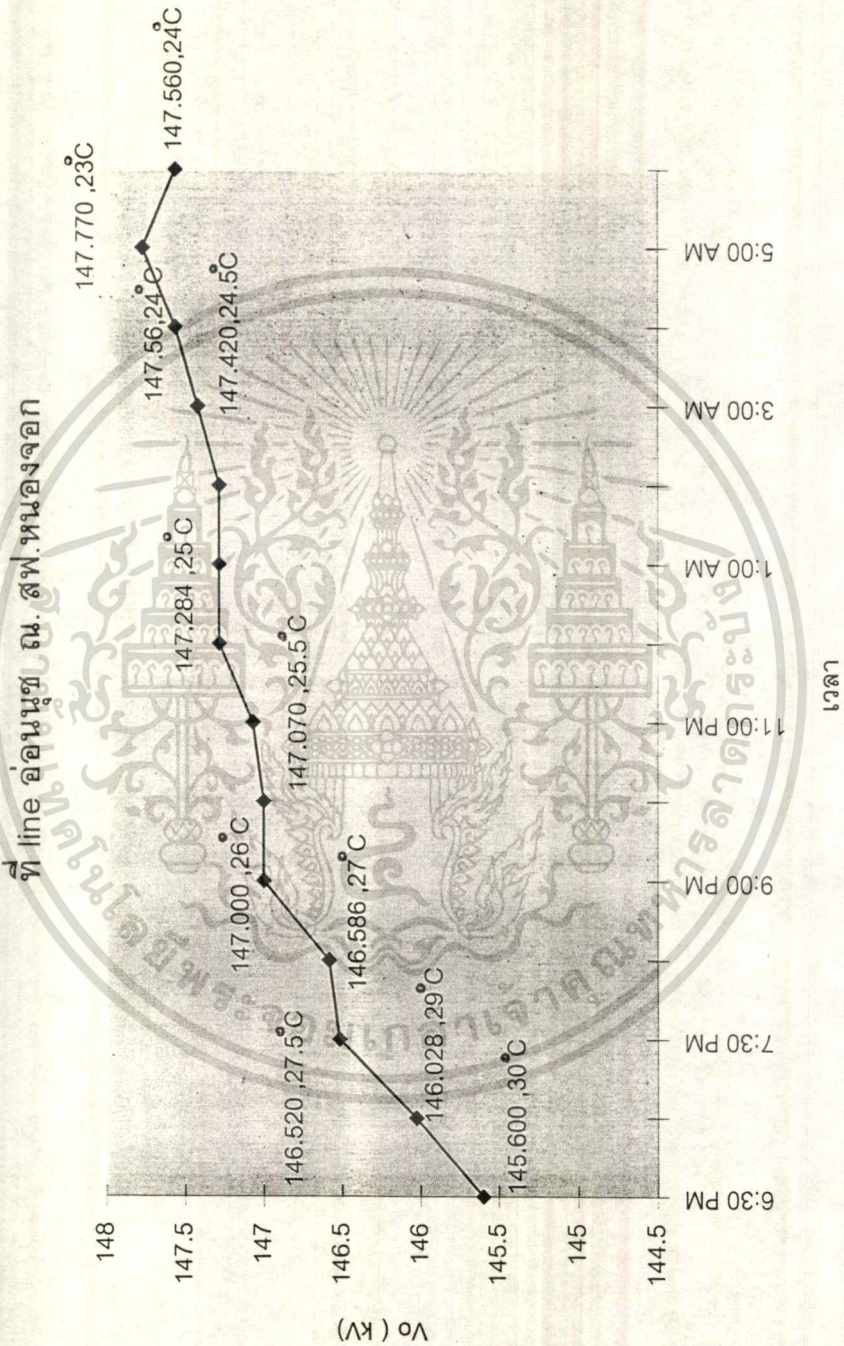
รูป 4.14 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $24.5^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $14.742\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $80\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.15 ที่อุณหภูมิห้อง 23.8°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 147.77 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 82% พบว่าไม่เห็นแสงของโคโรนาเลย

รูป 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับแรงดันวิกฤตแตกตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

line อ่อนนุช ฅ สฟ. หนองจอก

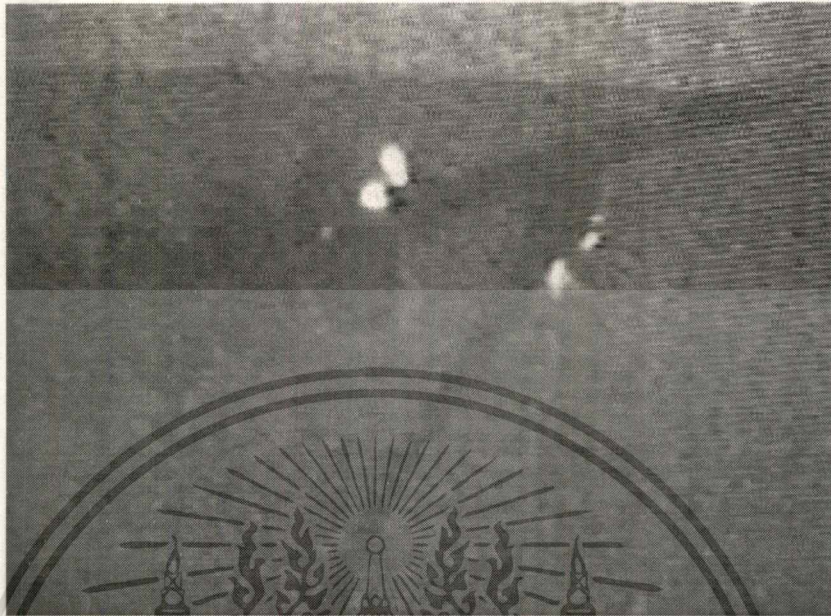


รูป 4.17 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $30^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ อยู่ที่  $145.6\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $55\%$  จะเห็นว่า แสงของโคโรนาใน line อ่อนนุชที่ สฟ. หนองจอก ซึ่งเป็น single line จะมีลักษณะแรง

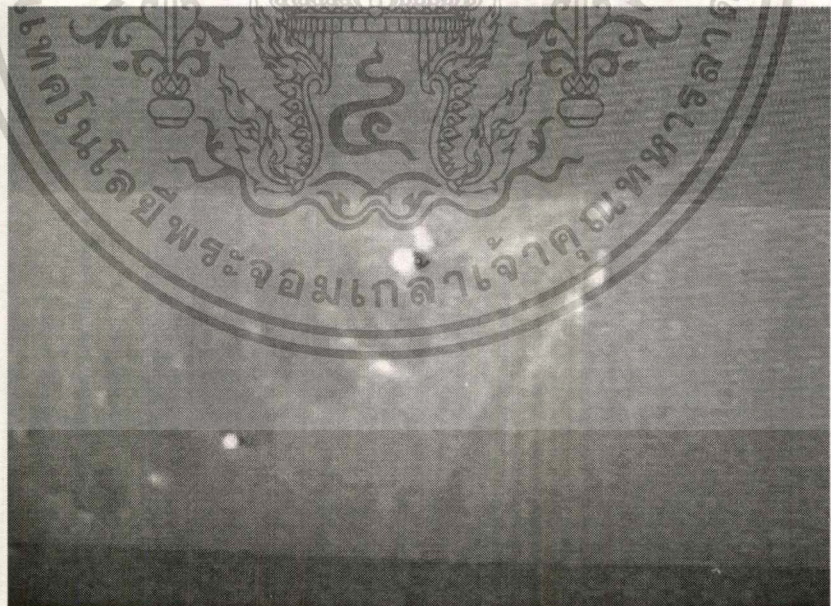


รูป 4.18 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $29^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ อยู่ที่  $146.028\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $66.85\%$  จะเห็นว่า แสงของ โคโรนา มีปริมาณลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

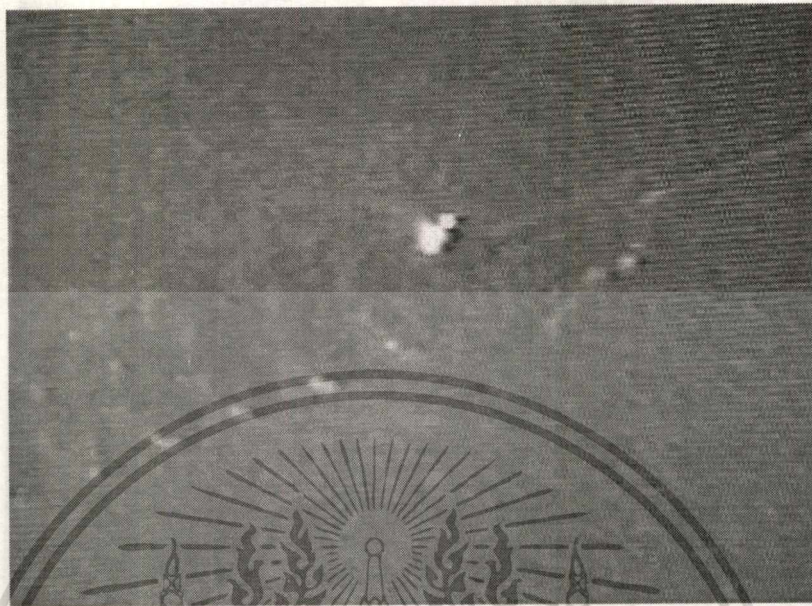


รูป 4.19 ที่อุณหภูมิห้อง 27°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 146.586kV  
ความชื้นสัมพัทธ์ 66 % โครนามีปริมาณลดลง

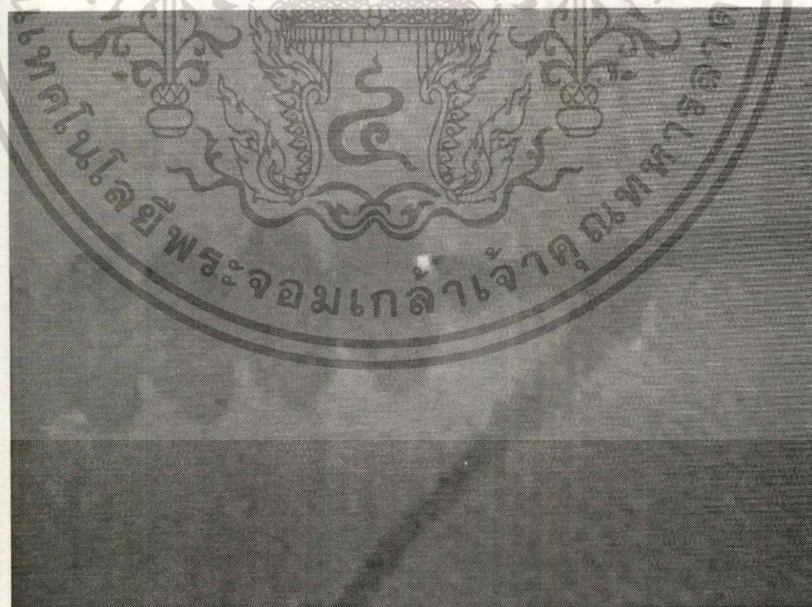


รูป 4.20 ที่อุณหภูมิห้อง 26°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ อยู่ที่ 147kV ความชื้น  
สัมพัทธ์ 74 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



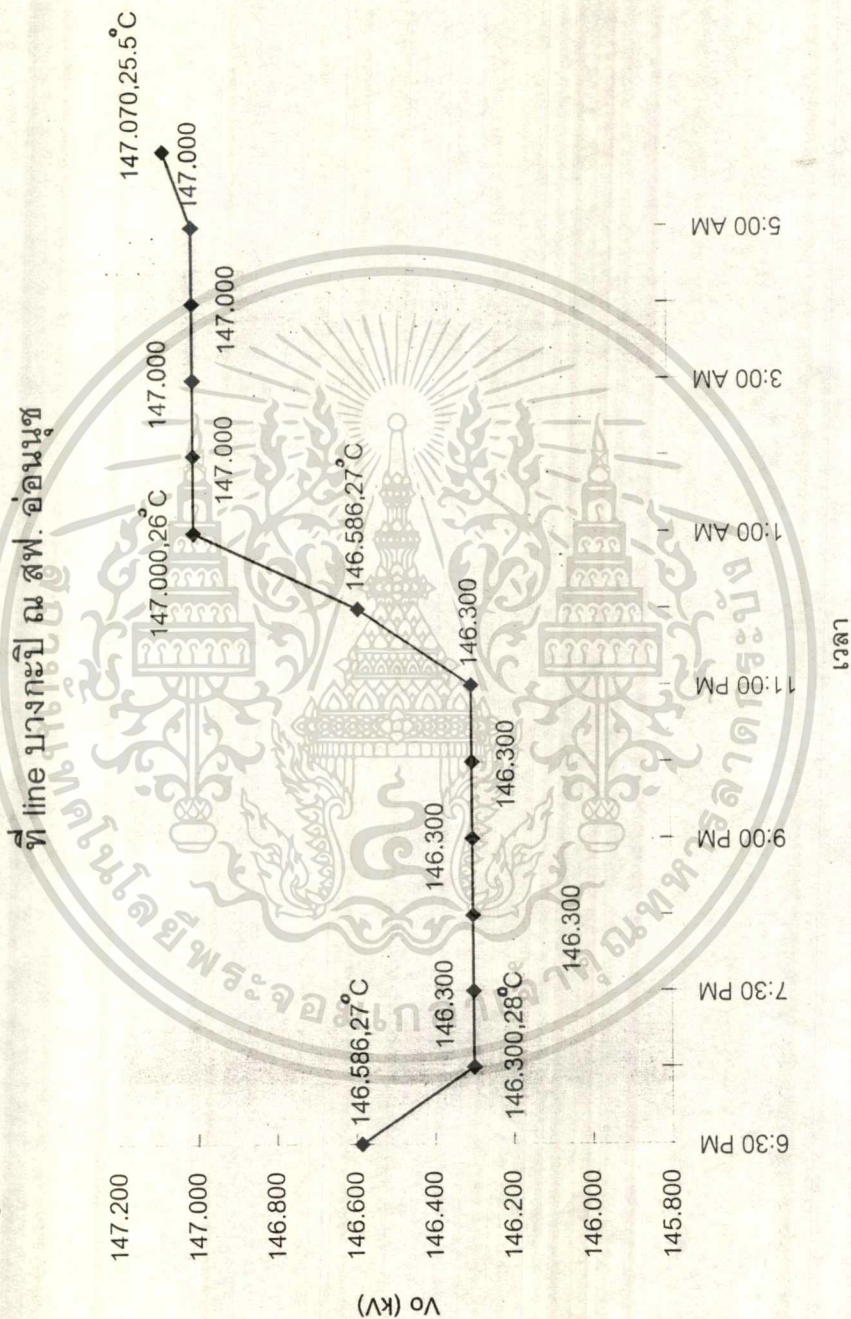
รูป 4.21 ที่อุณหภูมิห้อง 25°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 147.284 kV  
ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %



รูป 4.22 ที่อุณหภูมิห้อง 23.8°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 147.77 kV  
ความชื้นสัมพัทธ์ 82 % แสงของโคโรนามีปริมาณลดลงมากเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับค่าแรงดันวิกฤตแตกตัว

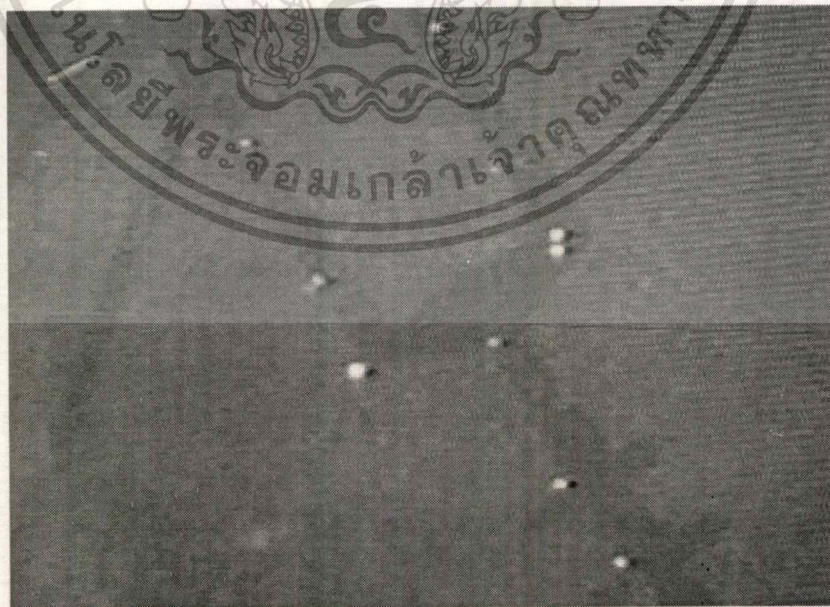


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

line หนองจอก ณ สฟ. อ่อนนุช

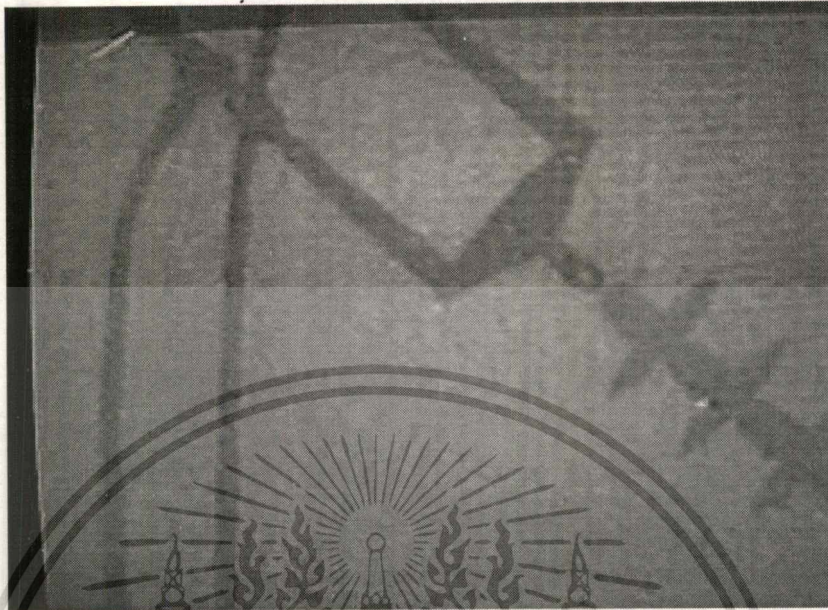


รูป 4.24 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $28^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $146.3\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $67\%$



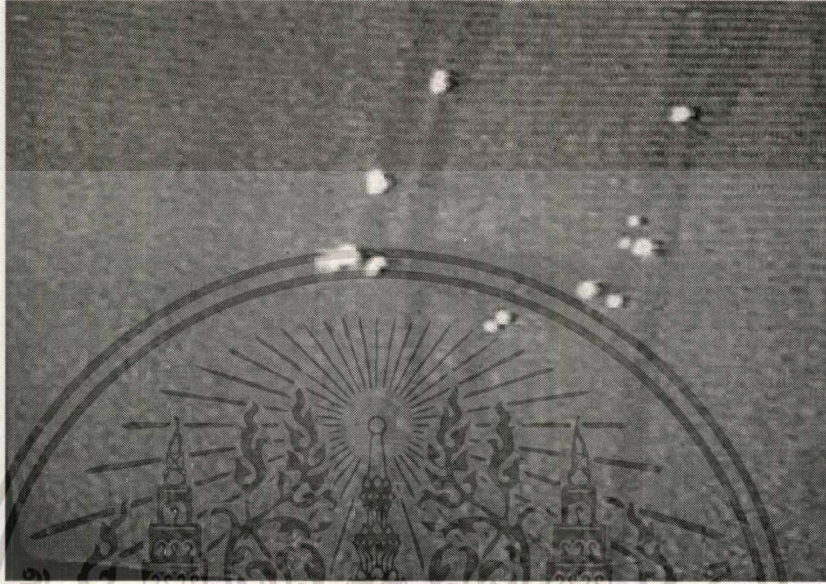
รูป 4.25 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $27^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $146.586\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $72\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

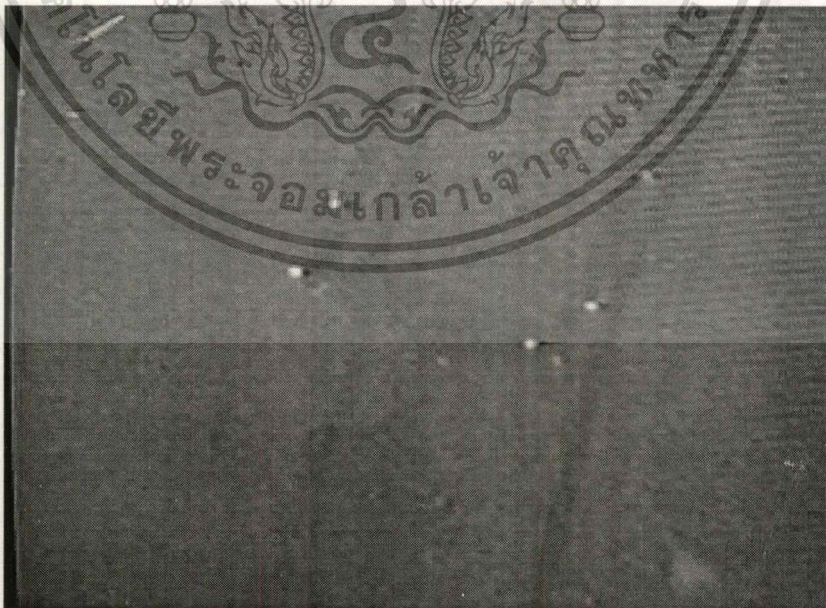


รูป 4.26 ที่อุณหภูมิห้อง 25.5°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 147.07 kV  
 ความชื้นสัมพัทธ์ 79 %

line บางกะปิ สฟ. อ่อนนุช

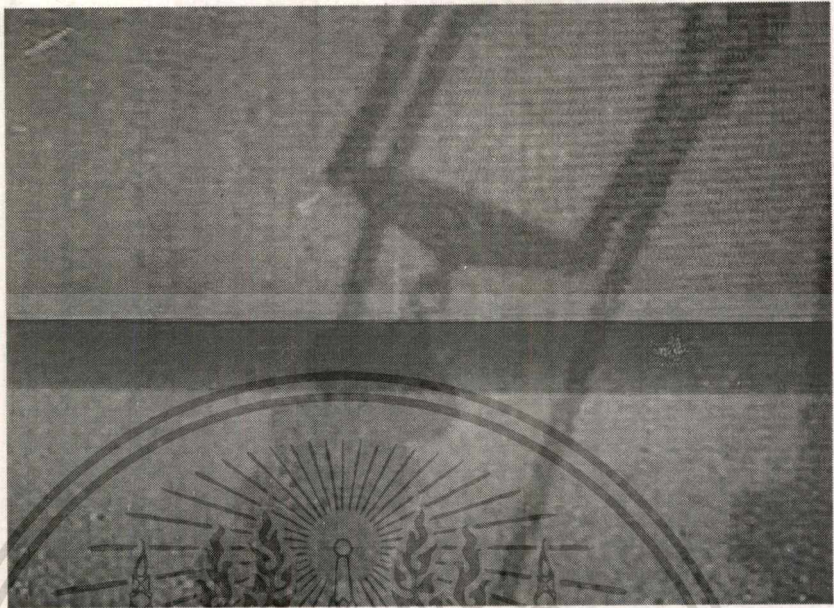


รูป 4.27 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 28°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 146.3 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 67%



รูป 4.28 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 26°C ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ อยู่ที่ 147 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

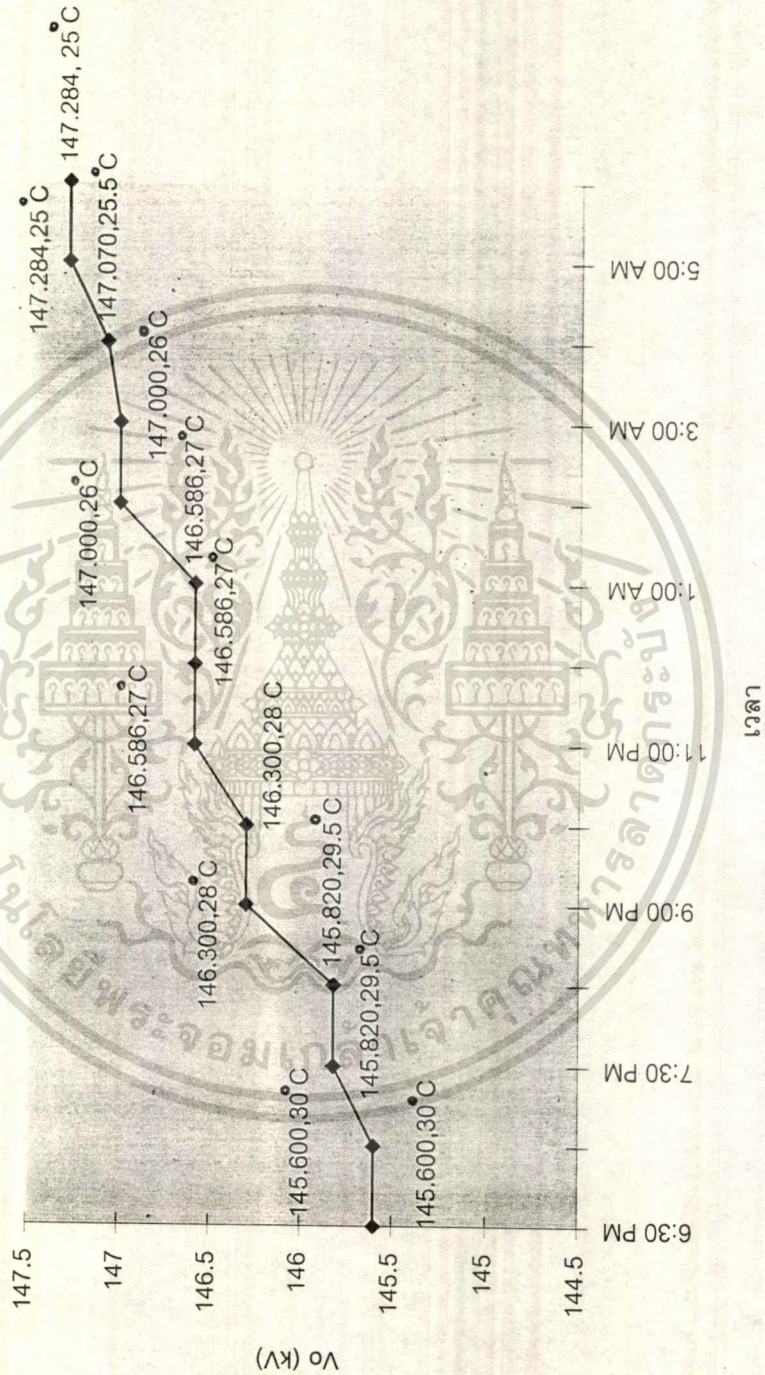


รูป 4.29 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $25.5^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $147.07\text{ kV}$   
ความชื้นสัมพัทธ์  $79\%$  โคโรนาหายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับค่าแรงดันวิกฤตแตกตัว

ที่ line อ่อนนุช ณ สฟ. บางกะปิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## line อ่อนนุช ณ สฟ. บางกะปิ

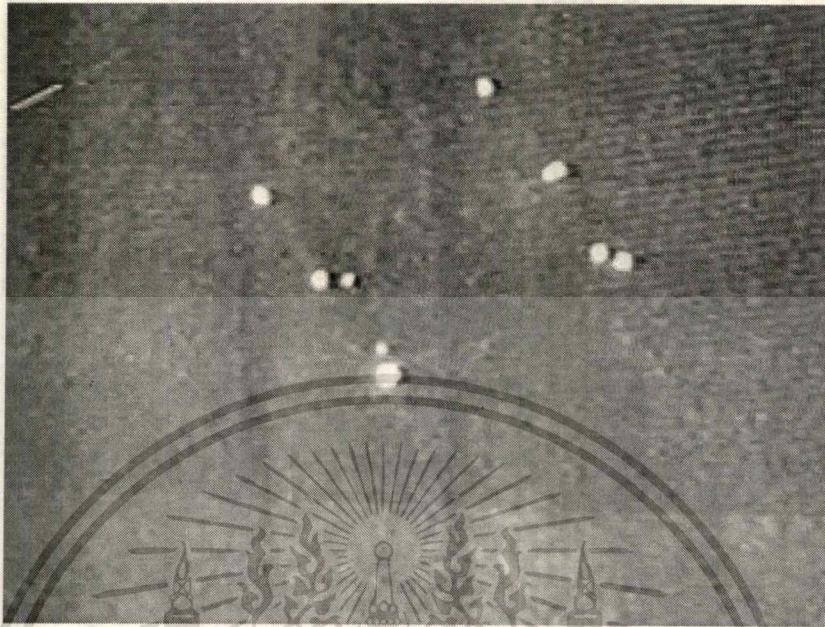


รูป 4.31 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $30^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 145.6 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 55% พบว่าโคโรนาค่อนข้างมาก



รูป 4.32 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $29.5^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่ 146.284 kV ความชื้นสัมพัทธ์ 60 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.33 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $28^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $146.3\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $65\%$  โครนามีปริมาณลดลง



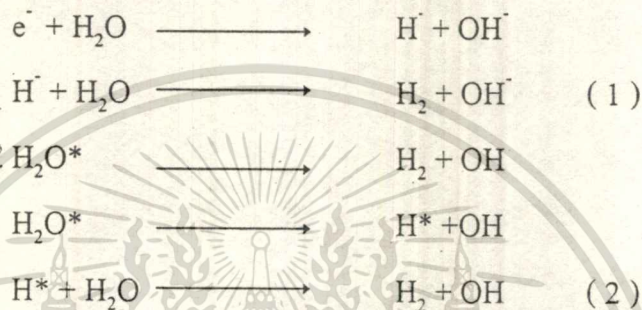
รูป 4.34 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม  $27^{\circ}\text{C}$  ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวของอากาศ มาอยู่ที่  $146.586\text{ kV}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $69\%$  เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมกับความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละช่วงเวลามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความชื้นที่มีผลต่อการเกิด corona ( ในสภาวะที่มีมลภาวะน้อย เมื่อพิจารณาบริเวณ clamp )

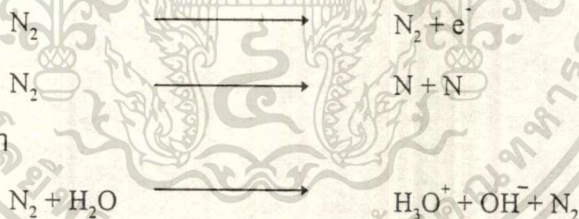
ผลของการไอออไนเซชัน อันทำให้เกิด Corona Effect ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น กระบวนการดังกล่าวจะเกิดในอากาศที่มีความชื้นของสนามไฟฟ้าสูงมาก ๆ

ถ้าในขณะนั้นมีปริมาณความชื้นสูง นั่นหมายถึง มีปริมาณ  $H_2O$  ต่อลูกบาศก์เมตรมาก ความชื้นดังกล่าวจะมีผลต่อกระบวนการไอออไนเซชันในอากาศ ซึ่งเมื่อนำได้รับพลังงานกระตุ้นจากความชื้นของสนามไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



จะเห็นได้ว่าจะเกิดสารประกอบประเภท ไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีคุณสมบัติรวมตัวกับสารอื่นได้ดี

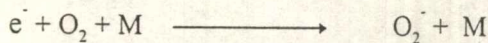
ในอากาศจะประกอบไปด้วยก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) เป็นส่วนใหญ่ ผลจากการไอออไนเซชัน และ excitation ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นเช่น ก๊าซไนโตรเจน



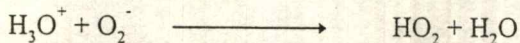
เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ

เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรด

ในออกซิเจน ( $O_2$ ) เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอออนอิสระ จะเกิด ออกซิเจนไอออน ( $O_2^-$ )



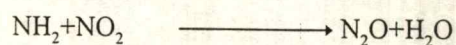
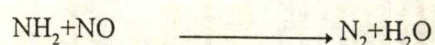
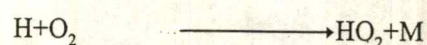
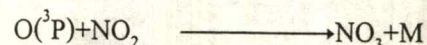
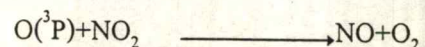
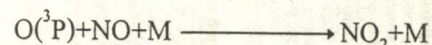
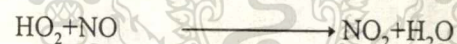
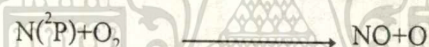
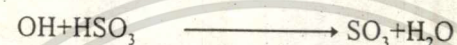
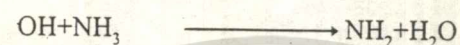
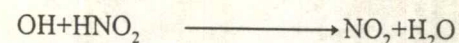
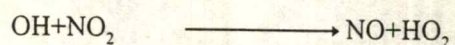
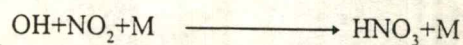
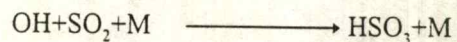
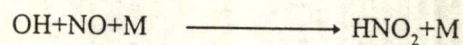
ประจุที่ได้สามารถรวมตัวเป็นกลางได้อีก โดย



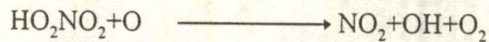
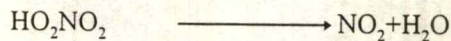
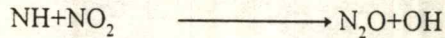
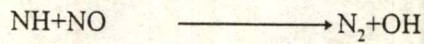
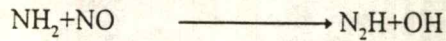
จะเห็นได้ว่าผลจากการไอออไนเซชันจะทำให้เกิด  $OH^\cdot$ ,  $N^\cdot$ ,  $H_2O$ ,  $O$  และ  $H$

โดยทั่วไปเขตโรงงานอุตสาหกรรมจะมีปัญหาจากก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $SO_x$ ) และ ก๊าซไนตริกออกไซด์ ( $NO_x$ ) ซึ่งเป็นปัญหาทางมลภาวะที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในสถานีส่งถ่ายไฟฟ้าแรงสูง เพราะผลจากส่วนประกอบจากไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

## ตัวอย่าง

Main radical reaction related to the removal of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$ 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จะเห็นได้ว่า จากกระบวนการไอออไนเซชัน การเกิดโคโรนาจะทำให้เกิด กรดไนตริก กรดออกซาลิก ฯลฯ โดยสรุปอาจกล่าวได้ว่า ความชื้นทำให้เกิดสารประกอบ ไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีคุณสมบัติรวมกับสารอื่นได้ดี ในกระบวนการไอออไนเซชันจะทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นบวก และเป็นลบ ไฮดรอกไซด์ไอออนจะไปรวมกับสารประกอบดังกล่าว เกิดเป็นก๊าซชนิดใหม่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการลดผลของการเกิดไอออไนเซชัน ดังนั้นในช่วงเวลาที่มีความชื้นมากๆจะทำให้เกิดการไอออไนเซชันลดลง

ซึ่งจะสังเกตได้จากการผลการสำรวจโคโรนาในสถานีไฟฟ้าแรงสูงต่างๆอันได้แก่ บางปะกง , หนองจอก , อ่อนนุช , บางกะปิ ในสภาวะปกติในเดือนธันวาคม ถึง กุมภาพันธ์ ได้ว่าเมื่อความชื้น

เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิลดลง ลักษณะของโคโรนาที่ถ่ายจากกล้องโคโรนาจะลดลง

\* สำหรับเรื่องความบกพร่อง และมลภาวะของอุปกรณ์ที่ใช้ขดสายส่งเข้ากับลูกถ้วยจะกล่าวถึงในบทที่ 5

## บทที่ 5

### ฉนวน และ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบฉนวนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทุกชนิดจะต้องคำนึงถึง การลดและป้องกันการเกิด โควิดา โดยเราจะแยกการพิจารณาดังนี้

#### 5.1 ฉนวน (Insulator)

##### 5.1.1 ลูกถ้วย

ลูกถ้วยส่วนใหญ่ที่ทาง กฝผ. ใช้อยู่ จะทำมาจาก porcelain ประเภทที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ตลอด (homogeneous) , ผ่านกระบวนการ wet process และ จะต้องสามารถรับแรงดันทั้งทาง ไฟฟ้าและทางกลได้สม่ำเสมอทั่วทั้งลูกถ้วย

ผิวของ porcelain จะต้องปราศจาก รอยขรุขระ , สิ่งแปลกปลอมมาเกาะ , รอยแตก ฯลฯ ตาม ที่ระบุ ไว้ใน มาตรฐาน ANSI C9.2

วัสดุ porcelain ที่ใช้ทำลูกถ้วย จะต้องคงทนต่อ บรรยากาศ , โอโซน , กรดไนตริก , ฝุ่น รวม ไปถึง การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิอย่างฉับพลัน ในบรรยากาศ



รูปที่ 5.1 ลูกถ้วย Porcelain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 Cap and Pin

Cap และ pin จะต้องถูกออกแบบมาให้ทนต่อแรงกระทำทางกลโดยไม่เกิดการบิดเบี้ยว

Cap จะต้องทำมาจาก เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) หรือ Non-Ferrous Metal ส่วนในลักษณะของโครงสร้าง cap จะต้องมีลักษณะเป็นรูปกลม รัศมีภายใน และนอกจะต้องมี จุดศูนย์กลางร่วมกัน ปราศจาก รอยแตก , รุ้อากาศ , ผิวที่คม Pin จะต้องทำมาจาก Malleable Iron ที่ปราศจาก รอยแตก และ รุ้อากาศ

### 5.1.3 Cementing

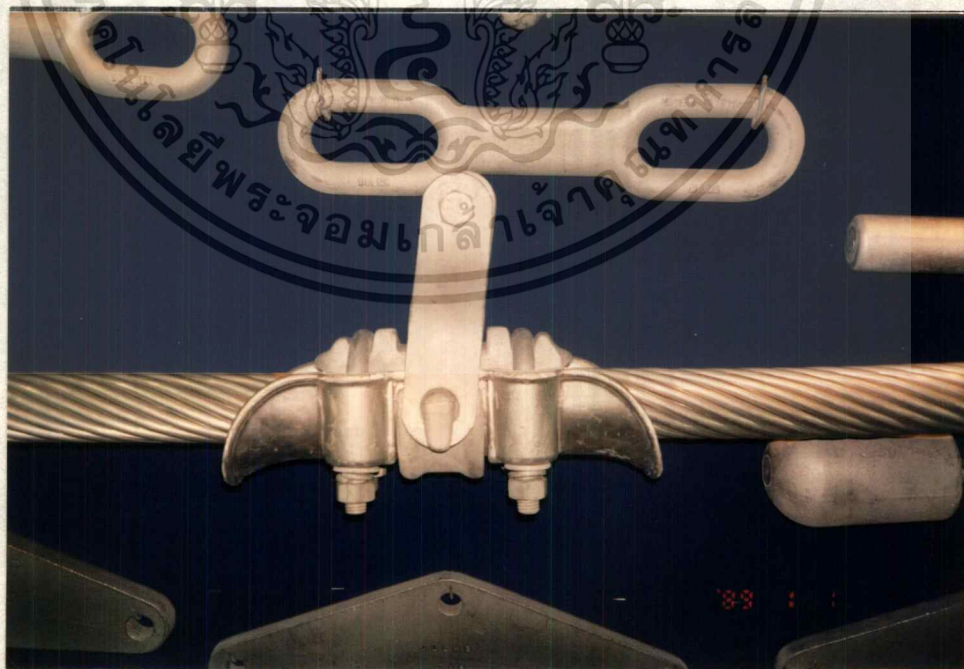
เป็นส่วนที่เชื่อม Cap และ Pin เข้ากับ ลูกถ้วย ส่วน cementing มักจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

### 5.2 Suspension clamps

จะทำมาจาก Aluminium alloy ผิวของ Suspension Clamp จะต้องเรียบปราศจาก ขอบคม รอยขีดข่วน เพื่อลดโคโรนา และ Radio interference

นอกจากนี้ Clamp จะต้องถูกออกแบบมาเพื่อลด ความสูญเสียทางแม่เหล็ก (Magnetic Loss) ขณะมีกระแสสูงสุดไหลผ่าน สายตัวนำ

วัสดุที่ใช้ทำ Clamp จะต้องทนต่อการกัดกร่อน เนื่องจาก ปฏิกิริยา Electrolytic



รูปที่ 5.2 Suspension Clamp

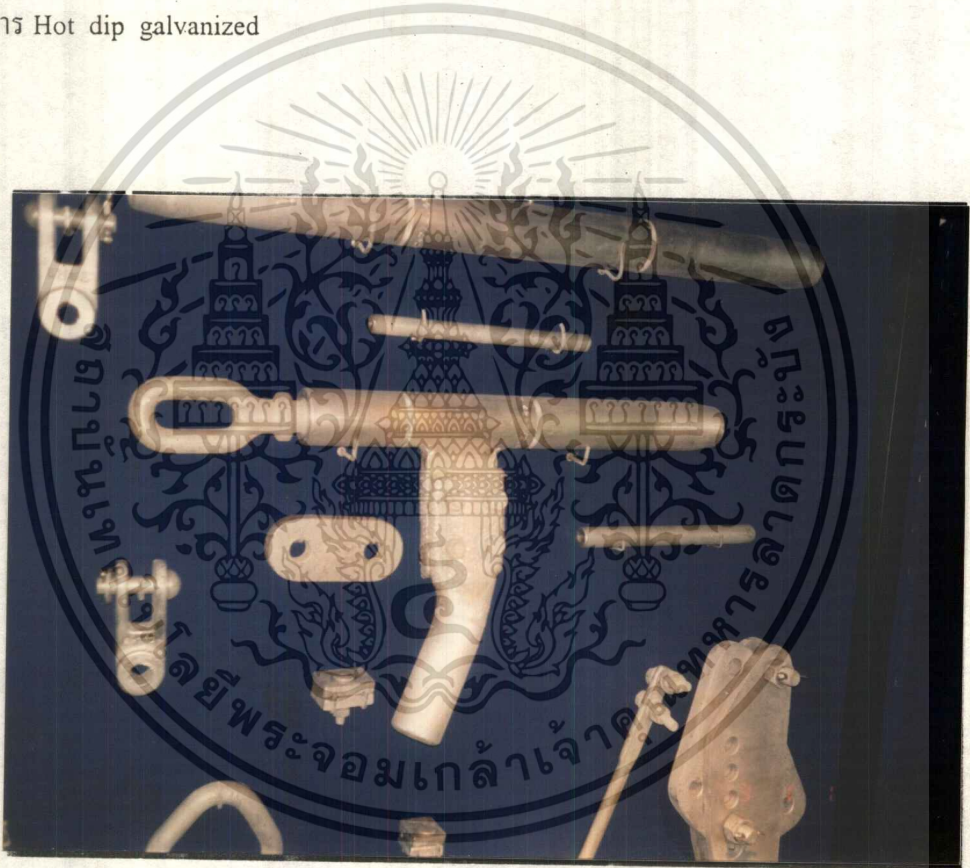
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 Compression Dead End Clamp

ขนาดของ Compression dead End clamp จะขึ้นอยู่กับ ขนาดของ สายตัวนำ โดยจะต้องประกอบเข้ากับ อุปกรณ์ Hardware พวก Clevis , Oval eye

Compression Dead End clamp จะต้องทนต่อแรงดึง ไม่น่า 90 % ของ แรงดึงพิกัดสูงสุดของ สายตัวนำ และจะต้องมีค่าความนำไฟฟ้าไม่น้อยกว่า สายตัวนำ

นอกจากนี้ Clamp จะต้องปราศจาก รอยขูดขีดต่างๆ โดยส่วนที่เป็น steel จะต้องผ่านกระบวนการ Hot dip galvanized



รูปที่ 5.3 Compression Dead End Clamp

### 5.4 Arcing Horns

Arcing Horns แบบคู่จะถูกติดตั้งเข้ากับ ด้านปลายแต่ละข้างของลูกถ้วย Suspension ในขณะที่ Arcing Horns แบบเดี่ยวจะถูกติดตั้งเข้ากับ ด้านปลายของสายส่ง และด้าน Earth

การติดตั้ง Arcing Horns จะถูกติดตั้งในลักษณะ ตั้งขึ้น ( Directed Upward ) โดยที่จะต้องไม่

สัมผัสกับ Pin ของลูกถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้ง Arcing Horns จะต้องระมัดระวังในเรื่องของการไปสร้างความเสียหายให้แก่ Clamp และ ตัวนำ ส่วนในด้านของการตั้งระยะ gap ของ Arcing Horns จะต้องคำนึงถึง ค่า Impulse flashover voltage

สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ทำ Arcing Horns ก็ได้แก่ Round Steel Bars และ Steel Tube ที่ผ่านกระบวนการ hot dip galvanized

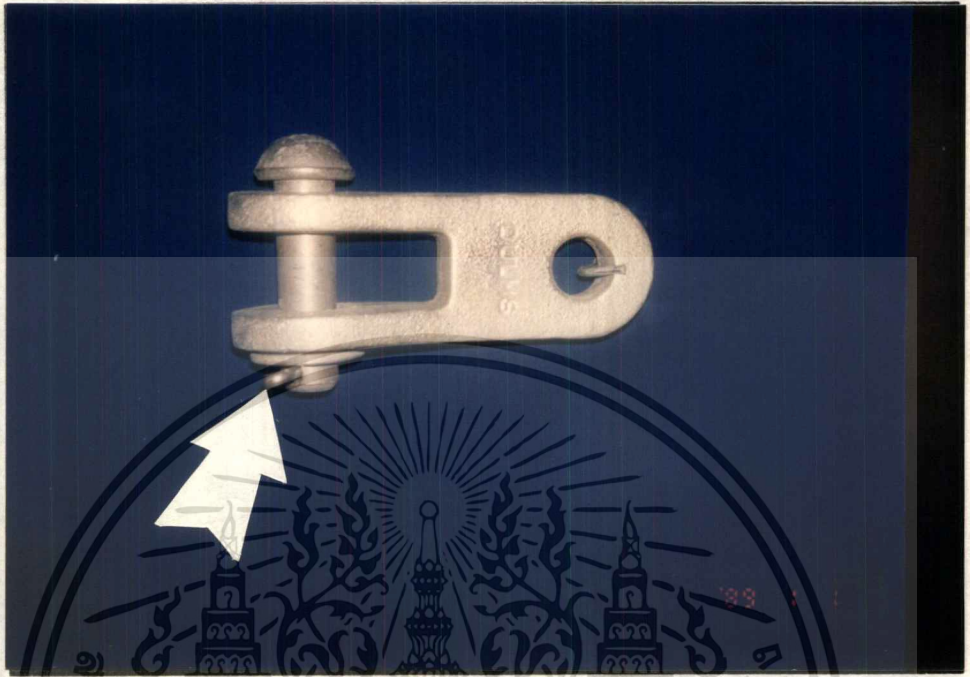


รูปที่ 5.4 Arcing Horns

## 5. Hardware

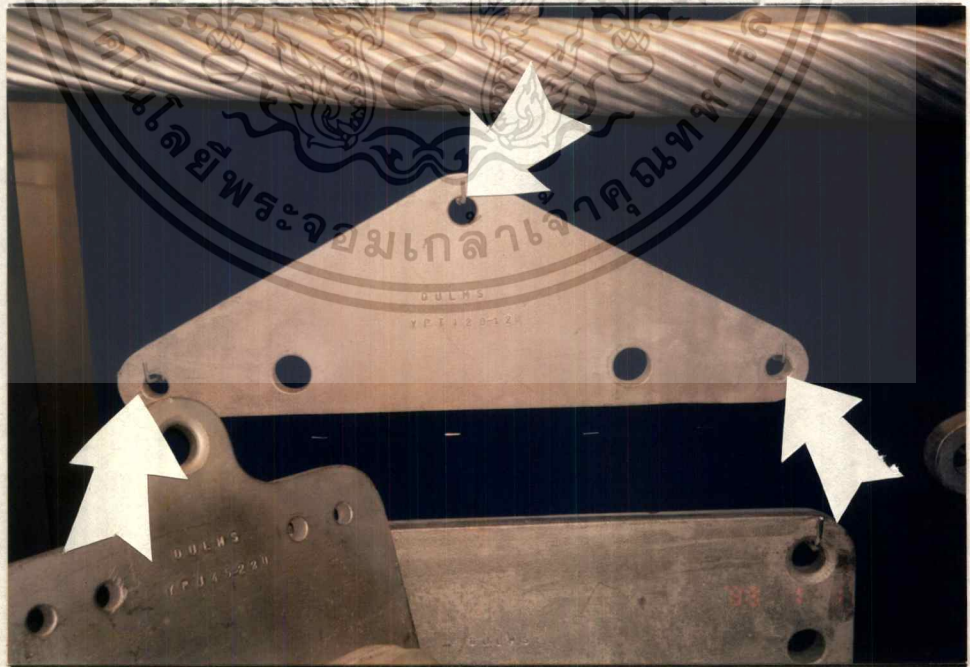
จะกล่าวถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดสาย และ Clamp เข้ากับตัวลูกถ้วย ซึ่งเป็นจุดที่จะพบโคโรนาบ่อยที่สุด และแทบทุกครั้งจากการสำรวจใน สถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV ดังนั้น จึงจะมีการแยก อุปกรณ์ Hardware แต่ละชิ้นออกมาให้เห็นอย่างชัดเจน โดยเริ่มจาก แบบ Shop Drawing ซึ่งแสดงภาพโดยรวมของอุปกรณ์ Hardware ทุกชิ้น และ แยกอุปกรณ์แต่ละชิ้น

## 5.5.1 Socket Clevis



รูปที่ 5.5 Socket Clevis

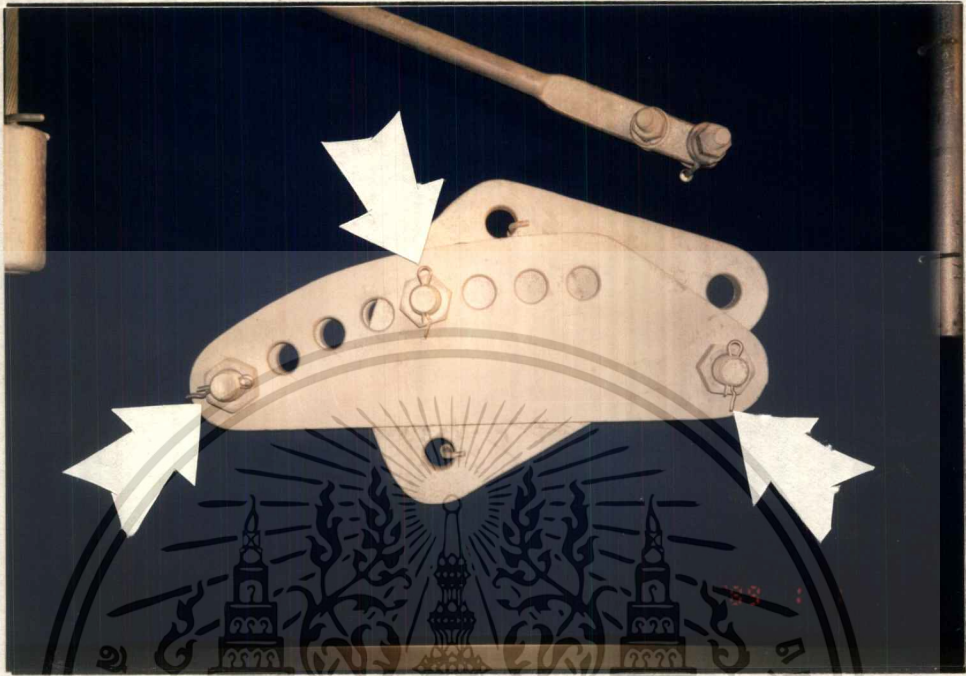
## 5.5.2 Yoke Plate



รูปที่ 5.6 Yoke Plate

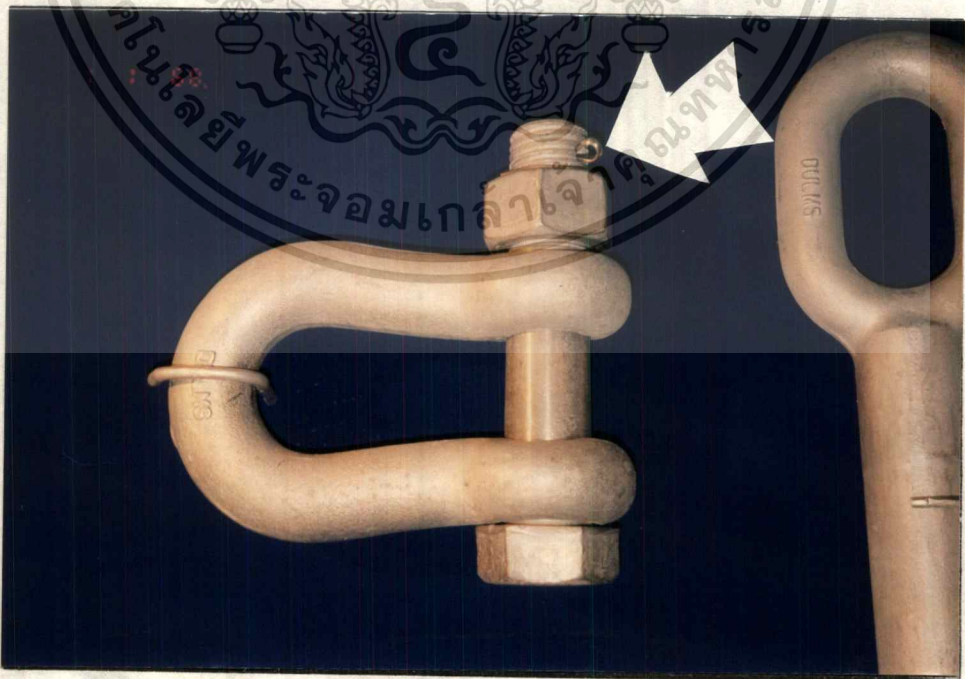
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.3 Sag Adjuster Plate



รูปที่ 5.7 Sag Adjuster Plate

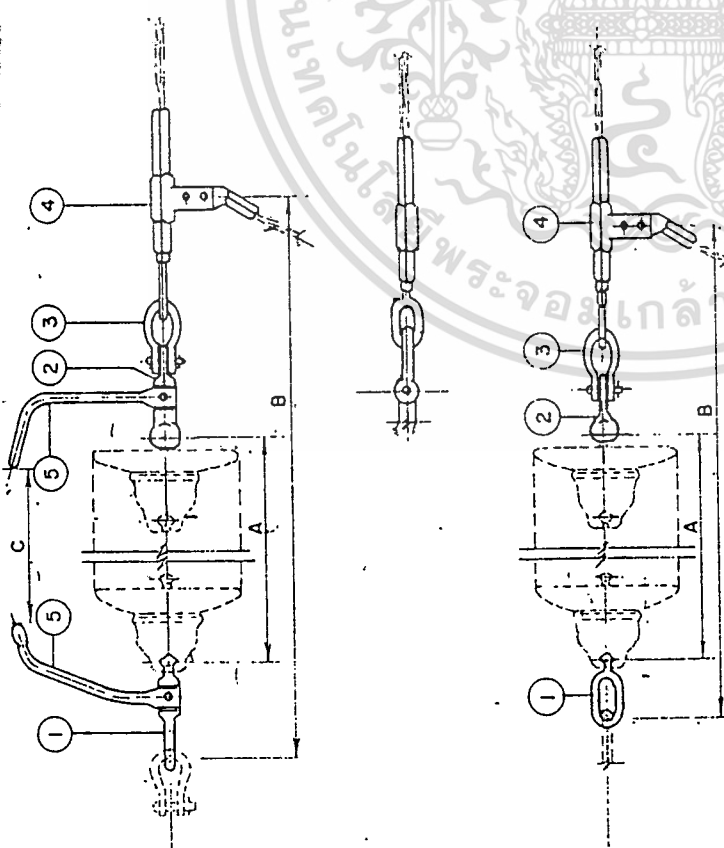
### 5.5.4 Shackle



รูปที่ 5.8 Shackle

เอกสารนี้\* จากลูกศรจะชี้ให้เห็นถึงจุดที่เกิดโคโรนาซึ่งมักเป็นจุดที่มี pin เป็นตัวล๊อคไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SINGLE CONDUCTOR**



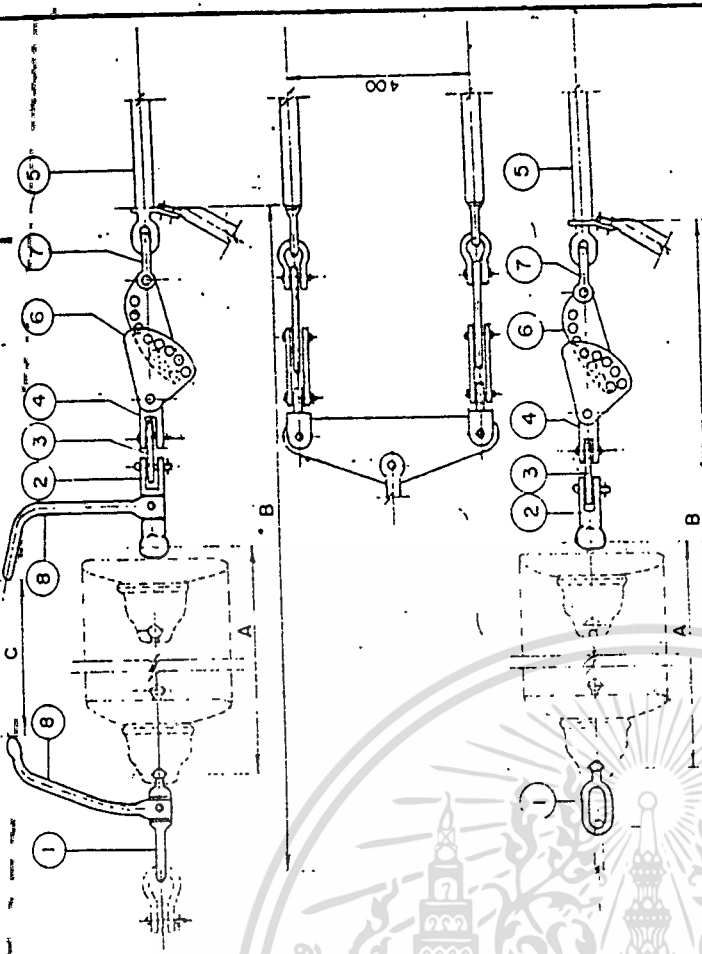
WITH ARCING HORN

Legend	Qty. per set	Description
1	1	Horn holder oval ball-eye.
2	1	Horn holder socket-eye.
3	1	Shackle.
4	1	Compression deadend clamp.
5	1 set	Arcing horn.

WITHOUT ARCING HORN

Legend	Qty. per set	Description
1	1	Oval ball-eye.
2	1	Socket-eye.
3	1	Shackle.
4	1	Compression dead-end clamp.

**TWO BUNDLE CONDUCTOR**



WITH ARCING HORN

Legend	Qty. per set	Description
1	1	Horn holder oval ball-eye.
2	1	Horn holder socket clevis.
3	1	Yoke plate.
4	2	90° Clevis eye.
5	2	Compression deadend clamp.
6	2	Sag adjuster plate.
7	2	Shackle.
B	1 set	Arcing horn.

WITHOUT ARCING HORN

Legend	Qty. per set	Description
1	1	Oval ball-eye.
2	1	Socket clevis.
3	1	Yoke plate.
4	2	90° Clevis eye.
5	2	Compression dead end clamp.
6	2	Sag adjuster plate.
7	2	Shackle.

Line Voltage kV	Insulator per set	Approx dimension (mm)		
		With arcing horn	Without arcing horn	Without arcing horn
69	6	A	B	C
	6	876	1,350	
115	8	A	B	C
	9	1,314	2,000	985
	10	1,460	2,150	1,095
	11	1,606	2,296	1,205
230	15	2,190	2,950	1,655
	17	2,482	3,242	1,862
				2,482
				2,102

Line Voltage kV	Insulator per set	Approx dimension (mm)		
		With arcing horn	Without arcing horn	Without arcing horn
69	6	A	B	C
115	8			

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**

**INSULATOR ASSEMBLIES - SINGLE - TENSION FOR SINGLE CONDUCTOR B TWO BUNDLE CONDUCTOR**

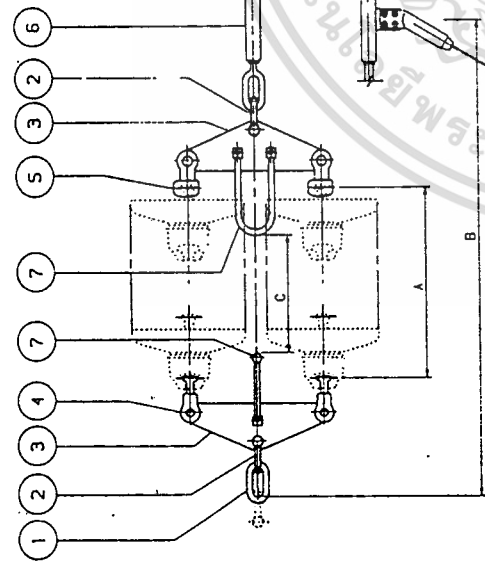
DRAWING NO. TP-114 Rev 2  
 DATE: 18/11/71  
 DESIGNED BY: P.S. H.  
 CHECKED BY: [Signature]  
 DIVISION: TRANSMISSION LINE ENGINEERING DIVISION  
 PROJECT NO.: [Blank]  
 SHEET NO.: [Blank] OF [Blank]

Line Voltage kV	Insulator per set	Approx dimension (mm)	Without arcing horn	Without arcing horn	Without arcing horn
69	6	876	1,350		
115	8	1,314	2,000	985	
	9	1,460	2,150	1,095	
	10	1,606	2,296	1,205	
230	15	2,190	2,950	1,655	
	17	2,482	3,242	1,862	
				2,482	
				2,102	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงที่มาของเอกสารอย่างถูกต้อง

SINGLE CONDUCTOR

TWO BUNDLE CONDUCTOR

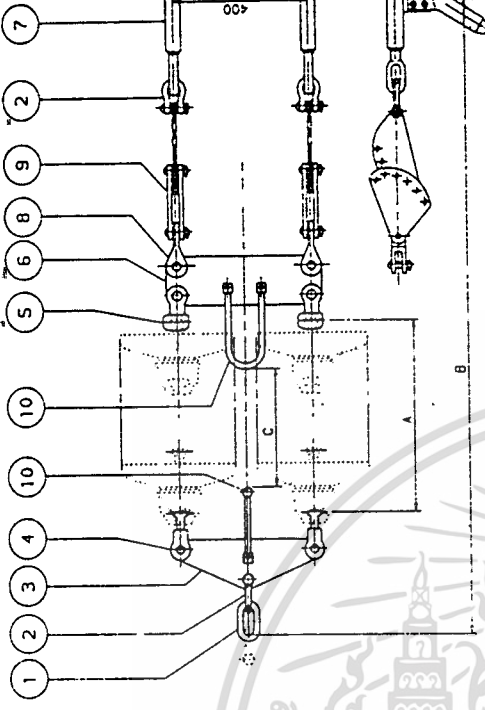


WITH ARCING HORN

LEGEND	QTY. per SET	DESCRIPTION
1	1	Oval link
2	2	Shackle
3	2	Yoke plate
4	2	Ball clevis
5	2	Socket clevis
6	1	Compression deadend clamp
7	1 set	Arcing horn

WITHOUT ARCING HORN

LEGEND	QTY. per SET	DESCRIPTION
1	1	Oval link
2	1	Shackle
3	1	Yoke plate
4	1	Ball clevis
5	1	Socket clevis
6	1	Yoke plate for two bundle conductor
7	1	Compression deadend clamp
8	1	90° clevis eye
9	1	Sag adjuster plate
10	1 set	Arcing horn



WITH ARCING HORN

LEGEND	QTY. per SET	DESCRIPTION
1	1	Oval Link
2	1	Shackle
3	1	Yoke plate
4	1	Ball clevis
5	1	Socket clevis
6	1	Yoke plate for two bundle conductor
7	1	Compression deadend clamp
8	1	90° clevis eye
9	1	Sag adjuster plate
10	1 set	Arcing horn

WITHOUT ARCING HORN

LEGEND	QTY. per SET	DESCRIPTION
1	1	Oval Link
2	3	Shackle
3	1	Yoke plate
4	2	Ball clevis
5	2	Socket clevis
6	1	Yoke plate for two bundle conductor
7	2	Compression deadend clamp
8	2	90° clevis eye
9	2	Sag adjuster plate

LINE VOLTAGE (kV)	INSULATOR per SET	APPROX. DIMENSION (mm)		
		WITH ARCING HORN	WITHOUT ARCING HORN	
69	2x6	876	876	1,900
	2x8	1,168	1,168	2,204
	2x9	1,314	1,314	2,350
115	2x10	1,460	1,095	2,500
	2x11	1,606	1,205	2,650
	2x15	2,190	1,655	3,400
230	2x17	2,482	1,862	3,629

LINE VOLTAGE (kV)	INSULATOR per SET	APPROX. DIMENSION (mm)		
		WITH ARCING HORN	WITHOUT ARCING HORN	
69	2x6	876	876	1,900
	2x8	1,168	1,168	2,204
	2x9	1,314	1,314	2,350
115	2x10	1,460	1,095	2,500
	2x11	1,606	1,205	2,650
	2x15	2,190	1,655	3,400
230	2x17	2,482	1,862	3,629

NOTE  
\* Upper and below figures show the range of sag adjuster plate

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND

INSULATOR ASSEMBLIES-DOUBLE TENSION FOR SINGLE CONDUCTOR AND TWO BUNDLE CONDUCTOR

TP-115A

REVISIONS

NO.	DATE	DESCRIPTION	BY	CHKD.
1	14/11/82	ISSUED		
2	14/11/82	REVISION		
3	14/11/82	REVISION		
4	14/11/82	REVISION		
5	14/11/82	REVISION		

FOR NO. TP-115

REVISION NO. TP-115A

**TWO BUNDLE CONDUCTOR**



**WITHOUT ARCING HORN**

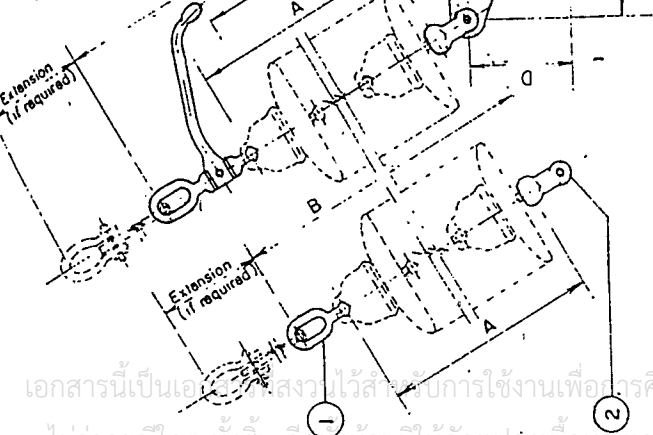
Legend	Qty per set	Description
1	2	Oval ball-eye
2	2	Socket clevis
3	1	Yoke plate for two bundle conductor
4	2	90° clevis eye
5	2	Suspension clamp
6	2 Sets	Preformed armor rod

**WITH ARCING HORN**

Legend	Qty per set	Description
1	2	Horn holder ball-eye
2	2	Socket clevis
3	1	Yoke plate for two bundle conductor
4	2	90° clevis eye
5	2	Suspension clamp
6	2 Sets	Preformed armor rod
7	1 Set	Arcing horn

Line Voltage kV	Approx dimension (mm)			
	With arcing horn	Without arcing horn	A	B
69	2 x 5			
115	2 x 7			
	2 x 8			
230	2 x 9	2,044	1,655	400
	2 x 14	2,336	1,752	400
	2 x 16	2,336	1,752	400

**SINGLE CONDUCTOR**



**WITHOUT ARCING HORN**

Legend	Qty per set	Description
1	2	Oval ball-eye
2	2	Socket clevis
3	1	Yoke plate
4	1	90° clevis eye
5	1	Suspension clamp
6	1 Set	Preformed armor rod

**WITH ARCING HORN**

Legend	Qty per set	Description
1	2	Horn holder ball-eye
2	2	Socket clevis
3	1	Yoke plate
4	1	90° clevis eye
5	1	Suspension clamp
6	1 Set	Preformed armor rod
7	1 Set	Arcing horn

Line Voltage kV	Approx dimension (mm)			
	With arcing horn	Without arcing horn	A	B
69	2 x 5			
115	2 x 7			
	2 x 8			
230	2 x 9	2,044	1,655	400
	2 x 14	2,336	1,752	400
	2 x 16	2,336	1,752	400

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**

INSULATOR ASSEMBLIES V-STRING SUSPENSION FOR SINGLE CONDUCTOR & TWO BUNDLE CONDUCTOR

REVISIONS: 3rd NO TP-129, Rev. 1-1

DATE: 17/12/74

DESIGNED BY: [Signature]

CHECKED BY: [Signature]

APPROVED BY: [Signature]

DESIGNER: [Signature]

ENGINEER: [Signature]

DATE: 17/12/74

TP-129, Rev. 1-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### แนวเส้นทางการเกิด flashover เป็นเส้นทางการเกิด corona มากที่สุดหรือไม่

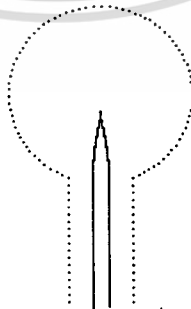
เนื่องจากการเกิด corona เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิด flashover ซึ่งจะเกิดเมื่ออยู่ภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าค่าสูงๆ โดยจะมีผลทำให้อากาศบริเวณรอบๆเกิดการ ionization ทำให้อากาศ บริเวณรอบๆเกิดการแตกตัวเป็น  $\text{ion}^+$  และ  $\text{ion}^-$  ซึ่งจะสามารถนำไฟฟ้าได้หากมีปริมาณที่มากพอ

แต่เนื่องจากการเกิด corona effect จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านการกระจายตัวของประจุไฟฟ้า ซึ่งในสภาวะปกติการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าจะหนาแน่นมากในบริเวณที่เป็นขอบหรือปลายแหลม จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้บริเวณดังกล่าวเกิด corona ได้ง่ายกว่าบริเวณที่มีผิวเรียบ



รูป 6.1 แสดงลักษณะการกระจายตัวของประจุไฟฟ้า (ภาวะปกติ)

แต่เมื่อเกิด corona แล้ว ลักษณะของ corona จะมีลักษณะเป็นพู่แผ่ออกรอบจุดปลายแหลม ทำให้มีลักษณะคล้ายกับ electrode ทรงกลม จึงทำให้เหมือนกับเป็นการนำ electrode ทรงกลมมาต่อเข้ากับที่ปลายแหลม มีผลทำให้การกระจายตัวของประจุไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจมีผลทำให้แนวเส้นทางการเกิด flashover เปลี่ยนเส้นทางไปจากแนวเดิมถ้าหากเกิด corona ขึ้นก่อน



รูป 6.2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของประจุไฟฟ้า(เมื่อเกิด corona)

สาเหตุส่วนหนึ่งของแนวการ flashover มีสาเหตุสำคัญคือ ความเสื่อมของฉนวน ต่อไปจะกล่าวถึงสาเหตุของความเสื่อมของฉนวน

#### 6.1 สาเหตุของความเสื่อมของฉนวน

มีหลายสาเหตุที่ทำให้ เกิดความเสื่อมของฉนวน ความเกี่ยวข้องระหว่างปรากฏการณ์การเสื่อมของฉนวน และสภาพแวดล้อม สามารถจำแนกสภาวะการเสื่อมได้ดังนี้

##### 6.1.1 อายุการใช้งานของฉนวน ( Aging of insulator material )

จากเทคนิคในการผลิตที่มีคุณภาพต่ำเป็นเหตุให้มีข้อบกพร่องภายในเนื้อฉนวนทำให้ฉนวนร้าว หรือแตกเป็นเสี่ยงๆเนื่องจากผลของ mechanical stress หรือ electrical stress การเกิดรูพรุนใน porcelain เมื่อเทคนิคในการผลิตไม่เหมาะสม นำไปสู่การลดลงของ electrical strength หรือ mechanical strength

##### 6.1.2 การกัดกร่อนของฉนวน ( Erosion of insulating material )

ในสภาวะแวดล้อมที่มีสิ่งเจือปนมาก ที่ผิวของฉนวนมีการเสื่อมเกิดขึ้นบ่อยเนื่องจากการกัดกร่อนในกรณีเลวร้ายที่สุดคือการที่เสื่อมสภาพทั้งหมดการกัดกร่อนเกิดจาก Leakage current บนฉนวน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาร้ายแรงที่เกิดขึ้นบนฉนวนแก้ว ( มีปัญหามากในกรณีเป็นฉนวนแก้ว )

##### 6.1.3 อายุของวัสดุประสาน ( Cement aging ) shrinkage turdening

โดยปกติ cement มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา โดย cement จะถูกทำให้แห้งและแข็งตัว ซึ่งผลที่ได้คือการหดตัวของ cement แต่บางทีก็อาจขยายตัวได้ถ้ามีน้ำมากเกินไป ผลที่ตามมาคือถ้าวัสดุประสาน ( cement ) เปลี่ยนและขยายตัวตามกาลเวลาจะเกิด high mechanical stress ( internal tress ) ขึ้นที่วัสดุที่ใช้ทำฉนวนแบบแขวน suspension insulator ผลที่เกิดขึ้นก็คือ บางครั้งเกิดการแตกหลังจากที่ใช้ไปนานๆ

##### 6.1.4 Hardware corrosion (การกัดกร่อนของอุปกรณ์)

ในอุปกรณ์ของฉนวนแบบแขวน(suspension insulator) ได้รับความเสียหายบ่อยจากการกัดเซาะเมื่อใช้ไปนานๆ ภายใต้อากาศที่มีมลพิษ ซึ่งการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นทั้งใน DC lines และ AC lines การกัดกร่อนทางกลสามารถอธิบายโดย ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (electrolytic corrosion) เพราะจากการสังเกต ปรากฏว่า ใน Leakage current มี Direct current เป็นองค์ประกอบ เมื่อเราจ่ายไฟ AC ท้ามกลาง Hardware ของ suspension insulator การกัดกร่อนของเข็ม (pin) ที่ใช้ยึดลูกถ้วยฉนวน เป็นปัญหาสำคัญมากเพราะจะเป็นการลดความแข็งแรงทางกล(mechanical strength)ซึ่งอาจทำให้แตกได้เนื่องจากสาเหตุการขยายตัวของ pin เมื่อถูกกัดกร่อน อีกนัยหนึ่ง Cap corrosion ของฉนวนจะบางเมื่อเทียบกับ pin

corrosion เพราะว่า ความหนาแน่นของกระแสต่ำๆ บน cap และองค์ประกอบของ positive DC ทางด้าน pin

#### 6.1.5 Fatigue fracture of hardware (การแตกเนื่องจากความล้าของ hardware)

บน Overhead transmission line ตัวนำหลายชนิดแกว่ง เนื่องจาก ลม และการเกาะของ หิมะหรือน้ำแข็งบนตัวนำ บางครั้งการแกว่งของตัวนำเป็นสาเหตุให้ฉนวน เกิดความล้าจนแตกได้ดีพอๆ กับ Hardware ความล้าของฉนวนปกติเกิดขึ้นที่ส่วนของสายรัศระหว่าง ball และ shank ของ pin ที่ความเค้นสูงที่ถูกถ่วง และความล้าโดยปกติจะไม่เกิดที่ฉนวนหรือส่วนที่เป็นเป้าหรือรูกลวง

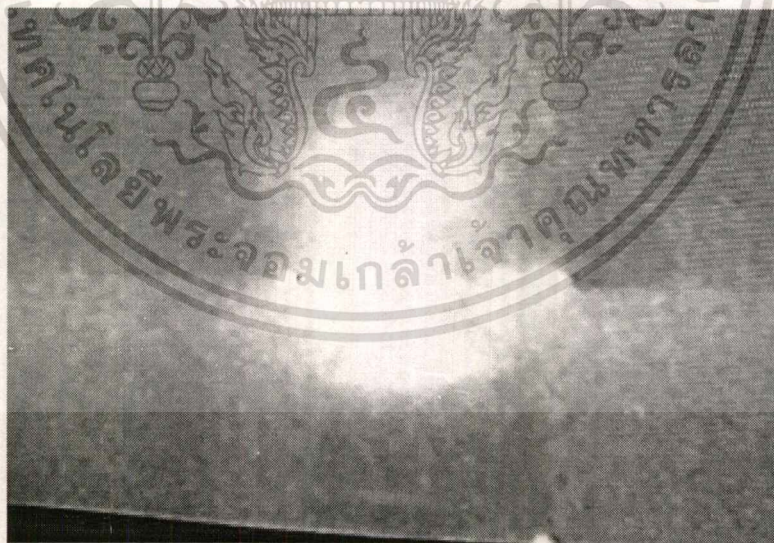
ตาราง 6.1 แสดงถึงปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมกับผลที่เกิดขึ้น ได้ดังนี้

ปัจจัยสิ่งแวดล้อม	ผลที่เกิดขึ้น
surge เนื่องจากฟ้าผ่า	จะเกิด Electrical puncture
อุณหภูมิ ทำให้เกิด thermal stress	เป็นเสมือนการเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุฉนวน เป็นเสมือนการเพิ่มอายุการใช้งานของ cement ทำให้ hardware เกิดการกัดกร่อน
ความชื้น , การปนเปื้อน	ทำให้เกิดการกัดกร่อนของวัสดุฉนวน ทำให้ hardware เกิดการกัดกร่อน
ความเครียดทางกลเนื่องจากน้ำหนักของสายตัวนำ	เป็นเสมือนการเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุฉนวน การแตก, หัก เนื่องจากความล้า
Voltage ที่ป้อนเข้าทำให้เกิด( electrical stress )	เป็นเสมือนการเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุฉนวน ทำให้เกิดการกัดกร่อนของวัสดุฉนวน ทำให้ hardware เกิดการกัดกร่อน
Power flow current	ฉนวนถูกทำลายและ hardware หลอมละลาย

6.2 แนวการ flashover สามารถแสดงได้ตามภาพ 6.3-6.6

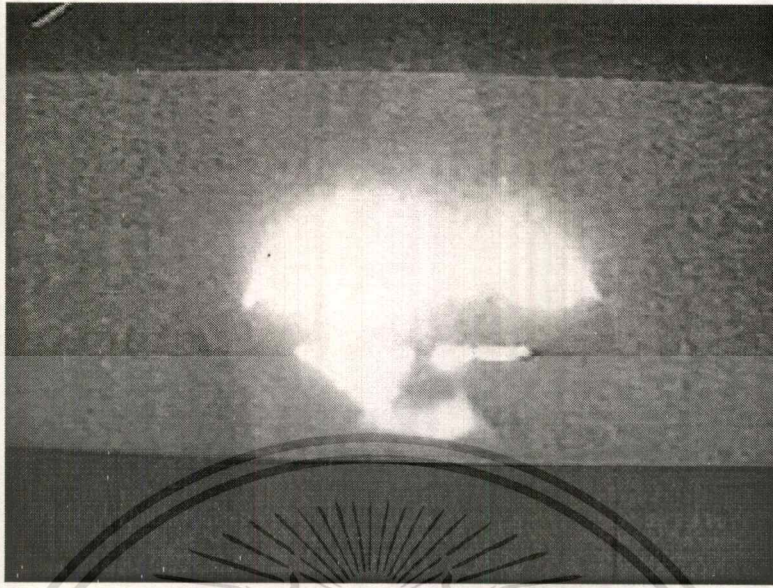


รูป 6.3 รูปถูกด้วยฉนวนที่ใช้ทดสอบ



รูป 6.4 แสดงให้เห็นแสงของมีลักษณะเป็นกลุ่มเชื่อมกันแต่ยังไม่เบรคดาวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.5 แสดงให้เห็นแสงของโคโรนาเมื่อแรงดันสูงขึ้นจะเห็นกลุ่มโคโรนาเกิดขึ้นมากบริเวณทางด้านซ้าย



รูป 6.6 แสดงให้เห็นแสงของโคโรนาเมื่อแรงดันสูงขึ้นจะเห็นกลุ่มโคโรนากระจายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.7 แสดงให้เห็นถึงแสงที่เกิดจากการเบรคดาวนั จะพบว่าการเบรคดาวนัเกิดขึ้นเบี่ยงมาทางด้านขวา ซึ่งเบี่ยงออกจากกลุ่มโคโรนาที่เกิดขึ้นมากที่สุดในตอนต้น



รูป 6.8 จะเห็นการเจริญเติบโตของโคโรนาจนถึงแนวการ flashover ซึ่งพบว่าแนวการ flash เบี่ยงจากกลุ่มทางด้านที่เกิดโคโรนามากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### สรุปและวิเคราะห์

จากการศึกษาปรากฏการณ์โคโรนา ทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเกิดโคโรนามากขึ้น ซึ่งโคโรนา คือ partial discharge สามารถแบ่งออกได้เป็น plume discharge, blush discharge , glow discharge โดย

- plume discharge เป็นโคโรนาที่เกิดขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าใกล้ผิวตัวนำเกิดการไอออไนเซชันจนถึงค่าวิกฤตบนครึ่ง cycle บวกของแรงดันไฟฟ้า ซึ่ง plume discharge มีลักษณะเป็นปม และมีลักษณะปลายบานออกเป็นกิ่งก้าน
- blush discharge เป็นโคโรนาที่เกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าใกล้ผิวตัวนำ เกิดการไอออไนเซชันจนถึงค่าวิกฤตบนครึ่ง cycle ลบ ของแรงดันไฟฟ้า ซึ่ง blush discharge มีลักษณะเป็นปม ๆ ออกมาตามแนวรัศมีของตัวนำ ลักษณะไม่เหมือนกับของ plume discharge คือจะไม่มีการปลายบานออกเหมือน plume discharge
- glow discharge จะเกิดบนพื้นผิวของตัวนำที่ระดับแรงดันต่ำกว่า plume และ brush discharge ไม่สามารถได้ยินเสียงแต่จะเห็นแสงเรือง ๆ รอบตัวนำ

ในการสำรวจครั้งนี้เราใช้การสำรวจ จากการเห็นแสงของโคโรนาโดยใช้อุปกรณ์พิเศษ คือกล้อง coro-cam ช่วยในการสำรวจข้อดีของการใช้กล้องนี้คือ

- ช่วยทำให้เห็นแสงของโคโรนาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น
- ทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่เกิดโคโรนา

แต่ยังมีข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้งานในบริเวณที่มีแสงจ้าเกินไป  
จากการสำรวจสามารถสรุปปัจจัยที่ช่วยทำให้เกิดโคโรนาได้ดังนี้

1. อุณหภูมิแวดล้อมทำให้ค่าแรงดันวิกฤตการแตกตัวของอากาศเปลี่ยนไปคือ อุณหภูมิสูงขึ้นค่าแรงดันวิกฤตการแตกตัวของอากาศจะมีค่าต่ำลง ทำให้อากาศเกิดการไอออไนเซชันได้ง่าย ทำให้เกิดโคโรนาได้ง่ายขึ้น

2. ความชื้นในอากาศจะมีผลทำให้เมื่อเกิดการไอออไนซ์ ของอากาศและเกิดไอออนขึ้นความชื้นจะรวมตัวกับไอออน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบชนิดต่าง ๆ และน้ำชื้นทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าในอากาศลดลงส่งผลทำให้เกิดโคโรนาลดลง (ในกรณีที่ถูกถ้วย ) แต่จะมีผลทำให้เกิดโคโรนามากขึ้น ในกรณีที่ถูกถ้วยมีการปนเปื้อนมาก หรือสกปรกเนื่องจากหยดน้ำ ส่งผลให้มีค่านำไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงดันตกบนลูกถ้วยในส่วนของบริเวณที่แห้งมากขึ้น ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้เกิดโคโรนาง่ายขึ้น

จากการวิเคราะห์ต่อไปนี้เป็นข้อสันนิษฐานที่ได้จากการสังเกต จากข้อมูลที่ทำกรสำรวจ และทำการทดลอง

3. ความดันบรรยากาศ จะมีผลต่อการเกิดของโคโรนาโดย มีผลต่อค่าตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ ถ้าความดันบรรยากาศสูงขึ้น การเกิดปรากฏการณ์โคโรนาจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากทำให้ค่าแรงดันวิกฤตแตกตัวสูงขึ้น

4. ความถี่จากทฤษฎีและการทดลอง สันนิษฐานได้ว่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อโคโรนามาขึ้น คือเมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้มีการกระตุ้นให้โมเลกุลของก๊าซในอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานทำให้เกิดการไอออไนเซชันมากขึ้น ทำให้เกิดโคโรนาง่ายขึ้น และ flashover ง่ายขึ้น จากการทำกรทดลองด้วยหม้อแปลงเตสลา เมื่อป้อนแรงคนที่มีความถี่ที่สูงระดับ kHz โคโรนาจะเกิดขึ้นเร็วมากจนกล้องตรวจจับโคโรนาไม่สามารถบันทึกภาพได้ทัน โดยจะเกิดการ flashover เลยในเวลาอันรวดเร็ว

5. ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ จะมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาโดยเมื่อกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่ใช้ยึดสายส่งเข้ากับลูกถ้วยมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิบริเวณอุปกรณ์จะมีค่าสูงขึ้นทำให้ความชื้นบริเวณนั้นลดลง เป็นผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศได้ง่าย ทำให้โคโรนามากขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่มีความบกพร่อง

เช่นเดียวกับค่าของ power ก็น่าจะมีผลต่อปรากฏการณ์โคโรนาเช่นกัน เพราะค่า power เป็นฟังก์ชันของกระแส ในขณะที่ค่า reactive power จะมีผลน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่า power

6. ลักษณะรูปร่างของปรากฏการณ์โคโรนาที่เกิดขึ้นบริเวณที่สำรวจซึ่งเป็นตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ยึดสายส่ง tension string เข้ากับลูกถ้วย tension จะมีรูปร่างเป็นในลักษณะของ plume discharge คือมีการแตกออกเป็นกิ่งก้านสาขา เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนตัวเข้าหาพื้นผิวของอุปกรณ์ แล้วอิเล็กตรอนอิสระจะรวมตัวเข้ากับไอออนบวกที่เป็นกลุ่มหมอก

ลักษณะของปรากฏการณ์โคโรนาที่สำรวจเห็นในแต่ละสถานีไฟฟ้าแรงสูง จะมีลักษณะคล้ายกัน เพราะว่าอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงเหล่านั้นจะมีลักษณะเหมือนกัน

7. จากการสำรวจมักพบโคโรนาตามจุดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดสายตัวนำกับลูกถ้วย ซึ่งจะพบได้แน่นอน เนื่องจากตามจุดดังกล่าวจะมีลักษณะ เป็นจุดแหลมคมทำให้เป็นจุดที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่มีผิวเรียบจึงทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดโคโรนาได้ง่ายขึ้น จากเหตุการณ์ดังกล่าว ในการติดตั้งอุปกรณ์จึงควรทำด้วยความระมัดระวัง ไม่ควรให้เกิดการกระแทกหรือเกิดรอยบาก ทำให้เกิดจุดแหลมจุดคมขึ้น , ในการ เข้าสายควรทำให้พอดี ไม่ควรให้มีส่วนที่เหลืยื่นออกมา หลังการติดตั้งหากพบว่ามีจุดแหลมหรือรอยบาก ควรทำการลบรอยแหลมคมของอุปกรณ์ , ควรมี

การออกแบบอุปกรณ์โดยไม่ต้องใช้ pin ในการยึดอุปกรณ์ เพราะจุดนี้เป็นจุดที่มีลักษณะยื่นออกมาจากอุปกรณ์ ทำให้มีความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย และในการติด corona ring ที่อุปกรณ์ยึดจนอาจช่วยลดปริมาณของการเกิด โคโรนาได้

จากการสังเกตในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังพบว่าแนวการ flashover จะไม่อยู่ในแนวเดียวกับบริเวณที่มีโคโรนามากที่สุด( ในสภาวะลูกถ้วยปกติ ) แต่ถ้าลูกถ้วยเกิดเสื่อมสภาพ หรือมีมลภาวะมาก ๆ แนวการ flashover จะเป็นในแนวเดียวกับบริเวณที่ลูกถ้วยเสื่อมสภาพ หรือตำแหน่งมีมลภาวะมาก ๆ

#### ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำการสำรวจและจัดทำ VDO และการทดลอง

1. ความสามารถของกล้องตรวจจับโคโรนามีข้อจำกัด คือไม่สามารถใช้งานในที่ ที่มีแสงจ้ามากเกินไปได้ จึงต้องทำการสำรวจในเวลากลางคืน หรือในห้องทดสอบที่มีปริมาณแสงน้อย ๆ
2. ความไม่พร้อมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจ และทดสอบจึงไม่สามารถศึกษาปัจจัยบางอย่างได้

ข้อเสนอแนะ ควรมีการขอความร่วมมือกับทางไฟฟ้าเป็นโครงการร่วมวิจัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนขึ้น และมีความสะดวกในการเข้าปฏิบัติการทดลอง และควรมีการทดสอบในห้องทดสอบที่สามารถควบคุมภาวะแวดล้อมได้ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 26 ม.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 27 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งจาก sub. หนองจอก หมายเลข 1 เฟส A

กับ ลูกถ้วย porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง อ่อนนุช

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	30	46	230	769.6	306.58	40.4	145.6
19.00	29	47	230	780.0	310.72	40.4	146.028
19.30	29	48	230	780.0	310.72	40.4	146.028
20.00	29	50	230	743.6	296.22	40.4	146.028
21.00	28	55	230	741.0	295.20	42.3	146.5
22.00	27	56	230	806.0	321.08	33.0	146.586
23.00	26	65	230	997.1	397.22	33.0	147.0
24.00	25.5	68	230	906.1	360.96	33.0	147.07
1.00	25	73	230	930.0	372.87	31.1	147.284
2.00	24.5	72	230	847.6	337.65	31.1	147.42
3.00	24	74	230	806.6	321.32	28.0	147.56
4.00	24	75	230	755.6	281.48	33.0	147.56
5.00	24	75	230	542.1	215.95	29.9	147.56
6.00	24	75	230	490.1	195.24	45.4	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 28 ม.ค. ถึง 7.00 น. ของ วันที่ 29 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งไปยัง sub. หนองจอก เฟสA กับ

ถูกด้วยtension

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง บางปะกง

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
19.00	29.5	62	230	617	245.79	12	145.82
20.00	29	65	230	670	398.37	10	146.028
21.00	28.5	66	230	670	398.37	-	146.1
22.00	28	67	230	700	278.86	-	146.3
23.00	27.5	67	230	667	265.71	-	146.52
24.00	26	67	230	617	245.79	12	147.0
1.00	25	76	230	583	232.25	-	147.284
2.00	25	79	230	583	232.25	-	147.284
3.00	24.5	71	230	567	225.87	20	147.42
4.00	24.5	58	230	567	225.87	20	147.42
5.00	24	49	230	567	225.87	20	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น.อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 22 ธ.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 23 ธ.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งจาก sub.บางปะกง หมายเลข2 เฟสA กับ

ลูกถ้วย Porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง หนองจอก

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	30	55	230	464.98	-183.74	7.51	145.6
19.00	30	55	230	473.41	-184.55	7.51	145.6
19.30	29	62.5	230	487.24	-187.59	4.63	146.028
20.00	27	66	230	466.19	-183.74	10.15	146.586
21.00	26	70	230	447.54	-179.89	7.51	147.0
22.00	26	74	230	392.20	-161.11	7.51	147.0
23.00	26	77	230	358.51	-146.19	-0.43	147.0
24.00	25	78	230	460.17	-184.70	-2.35	147.284
1.00	24.5	80	230	495.06	-199.62	-5.11	147.42
2.00	24	82	230	453.55	-180.85	2.70	147.56
3.00	24	82	230	460.2	-183.25	4.10	147.56
4.00	24	82	230	485.42	-193.37	7.42	147.56
5.00	24	82	230	516.53	-205.77	10.26	147.56
6.00	23.8	82	230	620.19	-260.76	16.66	147.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน/เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 23 ม.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 24 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งจาก sub.บางปะกง หมายเลข 2 เฟส A

กับ ลูกถ้วย Porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง หนองจอก

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
19.00	28	52.7	230	645.45	-257.13	45.06	146.3
19.30	28	57	230	643.05	-256.17	47.83	146.3
20.00	28	58	230	646.66	-257.16	43.62	146.3
21.00	27	68	230	635.23	-253.05	53.22	146.586
22.00	27	70	230	576.27	-225.98	32.55	146.586
23.00	27	73	230	605.15	-241.07	34.71	146.586
24.00	26	75	230	593.72	-236.52	29.18	147.0
1.00	26	76	230	566.23	-225.56	11.13	147.0
2.00	25.5	78	230	482.43	-192.18	5.35	147.07
3.00	25	78	230	408.44	-162.71	19.07	147.284
4.00	25	79	230	408.02	-162.54	20.1	147.284
5.00	24	80	230	581.67	-231.72	27.73	147.56
6.00	24	80	230	531.16	-211.6	41.69	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน/เวลาที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 29 ธ.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 30 ธ.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งไปยัง sub. อ่อนนุช หมายเลข 1 เฟส A กับ

ลูกถ้วย Porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง หนองจอก

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	30	55	230	771.78	307.45	32.06	145.6
19.00	29	53	230	772.98	307.93	33.75	146.028
19.30	27.5	62.5	230	738.09	294.03	33.75	146.52
20.00	27	66	230	749.52	298.59	42.17	146.586
21.00	26	70	230	760.35	302.90	45.06	147
22.00	26	74	230	792.04	315.53	35.67	147
23.00	25.5	79	230	753.13	300.02	42.17	147.07
24.00	25	78	230	780.22	310.81	28.21	147.284
1.00	25	80	230	732.68	291.87	21.23	147.284
2.00	25	80	230	729.87	290.75	27.25	147.284
3.00	24.5	82	230	789.37	288.04	26.53	147.42
4.00	24	82	230	689.37	274.62	21.72	147.56
5.00	23.5	82	230	656.87	261.67	25.08	147.77
6.00	24	82	230	514.91	205.12	31.10	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 23 ม.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 24 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อกันระหว่าง สายส่งไปยัง sub. อ่อนนุช หมายเลข1 เฟสA

กับ ลูกถ้วย porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง หนองจอก

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	28.5	52	230	865.82	344.12	-1.5	146.1
19.00	28	52	230	877.66	349.63	0.43	146.3
19.30	28	57	230	878.86	350.11	0.91	146.3
20.00	28	58	230	884.86	352.51	1.5	146.3
21.00	27	68	230	868.84	346.12	2.83	146.586
22.00	27	70	230	867.45	345.56	14.01	146.586
23.00	27	73	230	1056.7	421.04	19.55	146.586
24.00	26	75	230	1053.27	412.42	20.03	147.0
1.00	26	76	230	1030.45	410.50	33.75	147.0
2.00	25.5	78	230	804.87	320.63	20.51	147.07
3.00	25	78	230	766.97	305.54	19.07	147.284
4.00	25	79	230	750.40	298.94	21.00	147.284
5.00	24	80	230	700.2	278.94	14.49	147.56
6.00	24	80	230	582.69	232.12	20.51	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 12 ม.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 13 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งไปยัง sub. บางกะปิ หมายเลข 4 เฟส A  
กับ ตู้ถ้วย porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง อ่อนนุช

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	27	70	230	903.5	359.9	37.3	146.586
19.00	28	67	230	945.1	376.5	13.7	146.3
19.30	28	67	230	847.6	337.7	13.7	146.3
20.00	28	70	230	854.1	340.2	13.7	146.3
21.00	28	70	230	971.0	386.8	19.9	146.3
22.00	28	70	230	997.1	397.2	1.2	146.3
23.00	28	70	230	871.0	346.9	9.3	146.3
24.00	27	72	230	1049.0	417.9	11.2	146.586
1.00	26	75	230	995.4	396.5	14.5	147.0
2.00	26	75	230	905.6	360.7	11.2	147.0
3.00	26	75	230	1003.0	399.6	20.5	147.0
4.00	26	75	230	966.3	384.9	17.4	147.0
5.00	26	76	230	865.0	344.6	12.4	147.0
6.00	25.5	79	230	896.2	357.02	3.1	147.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน/ เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 12 ม.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 13 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งจาก sub. หนองจอก หมายเลข 1 เฟส A  
กับ ลูกถ้วย porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง อ่อนนุช

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	27	70	230	916.5	365.1	-30.0	146.586
19.00	28	67	230	906.1	360.9	-11.2	146.3
19.30	28	67	230	906.1	360.9	-11.2	146.3
20.00	28	70	230	893.1	355.8	-14.3	146.3
21.00	28	70	230	867.1	345.4	3.1	146.3
22.00	28	70	230	828.1	329.9	3.1	146.3
23.00	28	70	230	786.5	313.3	-3.1	146.3
24.00	27	72	230	763.1	304.0	8.1	146.586
1.00	26	75	230	760.0	302.8	5.0	147.0
2.00	26	75	230	773.6	308.2	4.5	147.0
3.00	26	75	230	752.2	299.7	7.6	147.0
4.00	26	75	230	731.2	291.3	-1.1	147.0
5.00	26	76	230	742.0	295.6	1.0	147.0
6.00	25.5	79	230	755.3	300.9	2.1	147.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 26 ม.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 27 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อกะหว่าง สายส่งไปยัง sub. บางกะปิ หมายเลข 4 เฟส A

กับ ลูกถ้วย porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง อ่อนนุช

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	30	46	230	880.6	398.37	37.3	145.6
19.00	29	47	230	893.1	355.78	13.7	146.028
19.30	29	48	230	893.1	355.78	13.7	146.028
20.00	29	50	230	880.1	350.60	13.7	146.028
21.00	28	55	230	867.1	345.42	19.9	146.3
22.00	27	56	230	877.5	349.57	1.2	146.586
23.00	26	65	230	782.6	311.76	9.3	147.0
24.00	25.5	68	230	678.6	270.33	11.2	147.07
1.00	25	73	230	691.6	275.51	14.5	147.284
2.00	24.5	72	230	626.6	249.61	11.2	147.42
3.00	24	74	230	598.0	238.22	20.5	147.56
4.00	24	75	230	587.6	234.08	17.4	147.56
5.00	24	75	230	624.0	248.58	12.4	147.56
6.00	24	75	230	656.5	261.53	3.1	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน/ เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 19 ม.ค. ถึง 7.00 น. ของ วันที่ 20 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อกันระหว่าง สายส่งจาก sub. อ่อนนุช เฟสA กับ

ลูกถ้วยtension

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง บางกะปิ

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (KV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	30	55	230	969	386.02	61	145.6
19.00	30	55	230	927	369.29	35	145.6
19.30	29.5	60	230	918	365.70	42	145.82
20.00	29.5	60	230	927	369.29	38	145.82
21.00	28	64	230	885	352.56	15	146.3
22.00	28	65	230	868	345.79	11	146.3
23.00	27	67	230	839	334.23	2	146.586
24.00	27	69	230	837	333.47	1	146.586
1.00	27	69	230	762	303.56	2	146.586
2.00	26	70	230	722	287.62	-1	147.0
3.00	26	70	230	682	271.69	6	147.0
4.00	25.5	75	230	674	268.50	14	147.07
5.00	25	75	230	665	264.90	14	147.284
6.00	25	77	230	682	271.69	6	147.284

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 27 ม.ค. ถึง 7.00 น. ของ วันที่ 28 ม.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งจาก sub. อ่อนนุช เฟส A กับ

ลูกถ้วยtension

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง บางกะปิ

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
18.30	32	30	230	873	347.77	3	144.98
19.00	32	35	230	863	345.79	3	144.98
19.30	31.5	38	230	872	347.38	3	145.12
20.00	31	38	230	863	343.79	6	145.33
21.00	30	48	230	863	345.73	8	145.6
22.00	29	50	230	832	331.44	15	146.028
23.00	28.5	52.5	230	691	275.27	11	146.1
24.00	27	57	230	672	267.7	8	146.586
1.00	26	62	230	661	263.32	17	147.0
2.00	25	70	230	604	240.62	9	147.284
3.00	25	67	230	563	224.28	9	147.284
4.00	25	61	230	543	216.31	2	147.284
5.00	25	54	230	554	220.69	2	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน / เวลา ที่ทำการเก็บผล : 18.00 น. ของ วันที่ 16 ธ.ค. ถึง 6.00 น. ของ วันที่ 17 ธ.ค.

ตำแหน่ง : บริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่าง สายส่งจาก ไทรน้อย เฟสB

กับ ลูกถ้วย porcelain

สถานที่ : สถานีไฟฟ้าแรงสูง หนองจอก

เวลา	อุณหภูมิ °C	ความชื้น (%)	Voltage (kV)	กระแส (A)	Power (MW)	Reactive P. (MVAR)	V <sub>0</sub> (kV)
19.40	30	50	230	87.5	-34.8	-40	145.6
20.00	29.5	56	230	100.0	-39.8	-60	145.82
20.30	29 ,	65	230	150.0	-59.8	-50	146.028
21.30	28.5	65	230	225.0	-89.6	-30	146.1
22.30	28	65	230	300.0	-119.5	-10	146.3
23.30	27	67	230	425.0	-169.3	-20	146.586
0.30	27	70	230	450.0	-179.3	-20	146.586
1.30	26	73	230	450.0	-179.3	-25	147.0
2.30	25	73	230	245.0	-97.6	-20	147.284
3.30	24	74	230	262.5	-104.6	-20	147.56
4.30	24	76	230	212.0	-84.5	-20	147.56
5.00	24	80	230	100.0	-39.8	-20	147.56
5.30	24	82.5	230	200.0	-79.7	-40	147.56
6.00	24	82	230	375.0	-149.4	-50	147.56
6.30	24	83	230	450.0	-179.3	-50	147.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการเก็บภาพของปรากฏการณ์โคโรนาดังรูป 2.7-2.10

อุปกรณ์ที่ใช้ 1. กล้องถ่ายภาพแบบ manual

2. ฟิล์มความไวแสง 800 หรือ 1600

3. แฟลชสีแดง

วิธีเก็บภาพ 1. ทำการจำลองปรากฏการณ์โคโรนาในห้องมืดสนิท

2. เมื่อได้โคโรนาถึงระดับที่ต้องการแล้ว ทำการเปิดหน้ากล้องค้างไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อทำการเก็บแสง

3. ระหว่างนั้น ให้ทำการยิงแฟลชสีแดง 1 ครั้ง

หมายเหตุ สำหรับในวันวิถีโคจรโคโรนา

ตามารอดิสด์ขอชมได้ที่ รศ. สิริวิวัฒน์ โทษะเวชกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และคุณนราคล โชติวรรณพร ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำโครงการครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณนพ พุทธวิบูลย์ (บริษัท DATA N-TRY GROUP) ที่เอื้อเพื่อข้อมูล อุปกรณ์ (กล้องส่องโคโรนา) และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. มานินี ชัยศุกกิจสินธ์ ที่เอื้อเพื่อข้อมูลเพิ่มเติม

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง และบริษัท DULMISON (ประเทศไทย) จำกัด

ขอขอบคุณบุคลากรที่ทำให้มีวันนี้ขึ้นมาได้ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายท่านที่ไม่สามารถจะกล่าวถึงได้หมดในที่นี้ คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่มีอุปการะคุณ ทำให้โครงการสำเร็จ  
ลุล่วงลงด้วยดี



- รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, “เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา High Voltage Engineering ” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- โดศักดิ์ ทัศนานุกิตยะ, “ การผลิตและการส่งจ่ายไฟฟ้า ”, สำนักพิมพ์ ซีเอ็ด ยูเคชั่น
- ชวลิต คำรงค์รัตน์, “ การส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเล่ม 1 ”, สำนักพิมพ์ ซีเอ็ด ยูเคชั่น
- ดร. ตำราย สังกษ์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ผศ. วิเชียร เบญจวัฒนาผล, “ วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย “เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่องความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างและวัดแรงดันสูง”
- วิบูรณ์ เอมรังสฤษฎ์, “อุปกรณ์ส่งจ่ายไฟฟ้า, การออกแบบและป้องกัน 1” , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ( ไทย - ญี่ปุ่น ) พิมพ์ครั้งที่ 1, 2532
- Vernon L. Chartier ( Fellow ) , David E. Blair ( Senior Member )  
“ corona performance of a complete 230 kV line ” IEEE
- A Clearly Explained and Illustrated Story About Three Type of corona Discharge and Their Relationship to Radio Interference “ What is corona ? ” Hubbel / The Ohio brass Company
- R. Bartnikas , E.J. McMahon “ Engineering Dielectrics Volume I , Corona Measurement and Interpretation ” ASTM
- J.S.T. Looms, “Insulators for High Voltage , IEE Power Engineering Series7” , สำนักพิมพ์: Peter Peregrinus LTD. ,London ,United Kingdom 1990
- Burndy International , “ Connectors For Overhead And Underground Distribution , Substations And Transmission Lines.”
- Edward A. Cherney , “ RTV Silicone Rubber Coating For Substation Insulator Maintainance .” , IEEE
- M S Naidu , V Kamaraju , “ High Votage Engineering .” , Mcgraw - Hill
- T. Imakoma , S. Matsui , Y. Suzuki , O. Fujii , “ Insulator Performance And Its Evaluation Method For Transmission Line Reliability.” ,NGK Insulators LTD. ,Nagoya Mizuho Japan.
- Laurence E. Kline , “ IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems ,Corona Cloud Model Predictions Of Switching Surge Flashover Voltages VS Electrode

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้