

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายเคเบิลอากาศ (Space Aerial Cable, SAC)



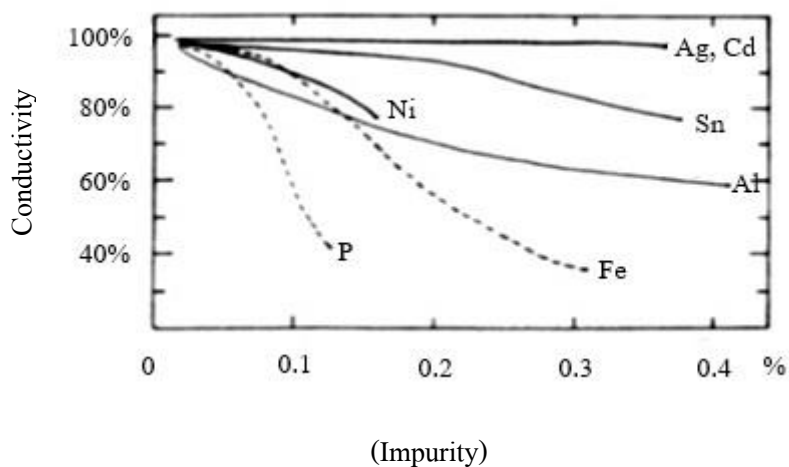
ส่วนประกอบ:

1. Conductor : Compact round Stranded hard-drawn aluminum wires
2. Conductor shield : Semi-conductive Cross-linked polyethylene (XLPE) compound
3. Insulation : Cross-linked polyethylene (XLPE)
4. Jacket : Black Cross-linked polyethylene (XLPE)

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลอากาศ

2.1.1 ตัวนำ

สำหรับสายเคเบิลอากาศทุกชนิด วัสดุทองแดงและอลูมิเนียมจะถูกนำมาใช้เป็นตัวนำความบริสุทธิ์ของโลหะมีความสำคัญอย่างมาก (มากกว่า 99.95 เปอร์เซ็นต์) ความไม่บริสุทธิ์จะทำให้ความนำไฟฟ้ามีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.2 ตัวนำโดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบพันเกลียวเพื่อที่จะได้ไม่เสียหายเมื่อทำการดัดให้โค้งงอ อลูมิเนียมมีราคาที่ถูกกว่าทองแดงแต่ในขณะนี้ความแตกต่างของราคาก็ลดลงไปอย่างมาก ความนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมมีค่าเพียง 60 เปอร์เซ็นต์ของทองแดงเท่านั้นดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของอลูมิเนียมจะมีขนาดใหญ่กว่าทองแดงสำหรับการนำกระแสค่าเดียวกันตัวนำอลูมิเนียมทั้งแบบแกนเดี่ยวหรือแบบพันเกลียวมีใช้อยู่ในโครงสร้างของสายเคเบิลอากาศในปัจจุบัน



ภาพที่ 2.2 ผลของความไม่บริสุทธิ์ที่มีต่อความนำไฟฟ้าของทองแดง [4]

2.1.2 ฉนวน XLPE

ฉนวน Cross-Link Polyethylene ผลิตขึ้นจากก๊าซเอทิลีนซึ่งได้เปลี่ยนแปลงเป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene) ทำให้เป็นส่วนเล็กๆภายใต้แรงกดดันประมาณ 50,000 psi XLPE เป็น Homo Polymer ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นส่วนเล็กๆเชื่อมโยงทางเคมีโดยโมเลกุลคาร์บอนของโพลีเอทิลีนซึ่งค่า 1 โมเลกุลจะมีอะตอมของคาร์บอนประมาณ 1,000-4,000 อะตอมทำการเชื่อมโยงถึงกันเป็นลูกโซ่ XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนโพลีเอทิลีนแต่เมื่อมีการพันธะระหว่างโมเลกุลของโพลีเอทิลีนจึงทำให้ XLPE มีคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพและความร้อนและมีค่าต้านแรงดึงดีกว่าโพลีเอทิลีนเดิมที่อุณหภูมิสูง



ภาพที่ 2.3 ฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

โดยปกติฉนวน XLPE ได้จากการนำ Polyethylene (PE) ซึ่งเป็น Thermoplastic มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก Thermoplastic ไปเป็น Thermosetting ซึ่งเป็นผลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหลายอย่าง (วิธีการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง นี้เรียกว่า Crosslinking)

ข้อดีของฉนวนประเภท XLPE

- ทนอุณหภูมิได้สูงคือ 90 องศาเซลเซียส
- มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือ มีการสูญเสียความเป็นฉนวนต่ำ และมีค่าความต้านแรงดึงสูง
- มีคุณสมบัติทางกลที่ดีทนต่อแรงกระทำภายนอก
- ทนต่อสารเคมีดีกว่า PE/PVC
- ไม่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

ข้อเสียของฉนวนประเภท XLPE

- มีราคาสูง
- มีขั้นตอนการติดตั้งที่ยุ่งยาก
- ไม่สามารถซ่อมแซมฉนวนได้ถ้าเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพของวัสดุพอลิเมอร์ [1]

วัสดุพอลิเมอร์	อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ คล้ายแก้วที่ยืดหยุ่น (°C)	อุณหภูมิการหลอม (°C)
Cross-linked Polyethylene	-125	110
Polyethylene (Low Density)	-110	115
Polytetrafluoroethylene	-97	327
Polyethylene (High Density)	-90	137
Polypropylene	-18	175
Nylon 6.6	57	265
Polyester (PET)	69	265
Polyvinyl Chloride	87	212
Polystyrene	100	240
Polycarbonate	150	265

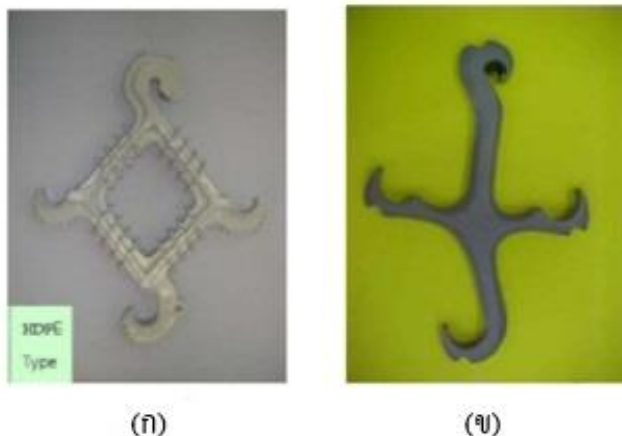
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลอากาศ [1]

วัสดุ	XLPE	PE	PVC
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.92	0.92	1.2-1.5
ความคงทนฉนวนไฟฟ้า (Dielectric strength : kV/mm)	30-50	30-50	20-35
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	2.3	2.3	5-9
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor: %)	0.03	0.03	4-12
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength : kg/mm ²)	1.4-1.8	1.2-1.5	1.0-2.5
อุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน(°C)	90	75	60-75

2.2 เคเบิลสเปเซอร์ [1]

เคเบิลสเปเซอร์ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ยึดและรองรับสายเคเบิลอากาศ รองรับน้ำหนักของสายเคเบิลอากาศไม่ให้มีระยะหย่อนยานมากเกินไป และจัดตำแหน่งของสายเคเบิลอากาศในแต่ละเฟสให้ห่างจากกัน เพื่อเพิ่มระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้า ป้องกันเหตุการณ์จากกระแสไฟฟ้าขัดข้องอันเนื่องมาจากสายเคเบิลอากาศไปสัมผัสกัน หรือวัสดุอื่นๆ กิ่งไม้ ลมพายุ หรือปัจจัยอื่นๆที่สามารถกระทำให้สายเคเบิลอากาศสัมผัสกัน เคเบิลสเปเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันสูงที่นิยมนำมาขยายสายส่งหรือเพิ่มจำนวนสายส่งให้มีปริมาณพอเพียงกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละชุมชนท้องถิ่นนั้นๆ

เคเบิลสเปเซอร์อาจจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามวัสดุที่ใช้ทำได้แก่ แบบ high density polyethylene (HDPE) และ porcelain



ภาพที่ 2.4 ประเภทของเคเบิลสเปเซอร์

(ก) ชนิด HDPE

(ข) ชนิด Porcelain

ปัจจุบันเคเบิลสเปเซอร์ที่ใช้ในการติดตั้งในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

1. เคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจาก alumina ceramic เคลือบ Teflon (ดังแสดงในภาพที่ 2.5)
2. เคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจาก track-resistance high density polyethylene (ดังแสดงในภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.5 เคเบิลสเปเซอร์ชนิด alumina ceramic เคลือบ Teflon



ภาพที่ 2.6 เคเบิลสเปเซอร์ชนิด track-resistance high density polyethylene

2.3 คุณสมบัติและผลกระทบของเคเบิลสเปเซอร์ [2]

เคเบิลสเปเซอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้า แข็งแรง ทนทาน ไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรง ไม่ดูดซึมน้ำ และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงดังแสดงตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเคเบิลสเปเซอร์ชนิดต่างๆ [2]

คุณสมบัติ	เคเบิลสเปเซอร์พอร์ซเลน ชนิดเคลือบเซรามิก	เคเบิลสเปเซอร์ ชนิดที่ทำด้วยโพลีเมอร์	เคเบิลสเปเซอร์ ชนิดที่เป็นเนื้อเซรามิก เคลือบด้วยสารฟลูออโร โพลีเมอร์
1. การทนต่อแรงดึง (นิวตัน)	มากกว่า 9,000	6,000 - 8,000	มากกว่า 9,000
2. อายุการใช้งาน	มากกว่า 20 ปี	ประมาณ 1 ปี	5-10 ปี
3. การดูดซึมน้ำ	ไม่ดูดซึมน้ำ	ดูดซึมน้ำบ้าง	ไม่ดูดซึมน้ำ
4. น้ำเกาะตามผิว ซึ่งจะ ทำให้คุณสมบัติทาง ไฟฟ้าลดลง	ผิวลื่น/น้ำไม่ยึดเกาะ	ผิวไม่ลื่น/มีน้ำยึดเกาะ	ผิวลื่น/น้ำไม่ยึดเกาะ
5. ความทนทานต่อ แสงแดด	ทนทาน	ไม่ทนทาน	ทนทานไม่เกิน 10 ปี

เคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจากพอร์ซเลน (Porcelain Cable Spacer) และทำจากโพลีเอทธิลีน (Polyethylene Cable Spacer) โดยสำหรับเคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจากพอร์ซเลนนั้น ถึงแม้ว่าจะมีสมบัติทางกลที่ดี มีความแข็งแรง อีกทั้งมีโอกาสเกิดการรอยแตกกลายงาน้อยกว่าเคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจากโพลีเอทธิลีนแต่ข้อเสียของเคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจากพอร์ซเลนนั้น คือ ราคาต่อตัวจะแพงกว่าเคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจากโพลีเอทธิลีน และเนื่องจากค่าคงที่ของความเป็นฉนวนของพอร์ซเลนมีความแตกต่าง (สูงกว่า) กับค่าคงที่ของความเป็นฉนวนของฉนวนสายเคเบิลอากาศ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอบฉนวนของสายเคเบิลอากาศ จึงมีค่ามากส่งผลให้สายเคเบิลอากาศมีค่าความเค้นทางไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สายเคเบิลอากาศเสียหายได้ง่าย

ตารางที่ 2.4 ข้อด้อยทางด้านคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานและผลกระทบที่เกิดขึ้น [1]

ปัญหาด้านคุณสมบัติการใช้งาน	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
ไม่มีความแข็งแรงทางกล	ทำให้เคเบิลสเปเซอร์ HDPE ชำรุดแตกหักได้ง่าย
ไม่มีคุณสมบัติทนต่อ รังสี UV	ทำให้เคเบิลสเปเซอร์ HDPE มีสีซีดลง แตกกรอบ และชำรุดแตกหักได้ง่าย รวมทั้งทำให้โอกาสเกิดรอยแตกกลายงาตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์มีสูงขึ้น
ไม่มีคุณสมบัติความต้านทานการแตกกลายงาที่ผิว	ทำให้เคเบิลสเปเซอร์ HDPE เกิดรอยแตกกลายงาตามผิวของเคเบิลสเปเซอร์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหลตามผิวเคเบิลสเปเซอร์ HDPE (ในช่วงเวลากลางคืนจะมองเห็นเป็นลูกไฟวิ่งวนรอบเคเบิลสเปเซอร์ HDPE) เมื่อเกิดกระแสรั่วไหลตามผิวมากขึ้นจะทำให้เคเบิลสเปเซอร์ HDPE เกิดความร้อนสูงขึ้นและทำให้เคเบิลสเปเซอร์ HDPE ลุกติดไฟในที่สุด
ไม่มีคุณสมบัติทนทานต่อการติดไฟ (ไม่มีสารดับไฟผสมในเนื้อวัสดุ HDPE)	หากเคเบิลสเปเซอร์ HDPE ลุกติดไฟจะไม่สามารถดับไฟได้เองเป็นเหตุให้ไฟลุกลามไปยังฉนวน XLPE ของสายเคเบิลอากาศทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้สายเคเบิลอากาศขาดในที่สุด

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างปัญหาที่เกิดขึ้นกับเคเบิลสเปเซอร์และสายเคเบิลอากาศ [1]

ชนิดของเคเบิลสเปเซอร์	วัสดุเคลือบผิว	ลักษณะปัญหา
HDPE	-	1. ชำรุดแตกหัก บิ่น 2. ไม่มีคุณสมบัติที่ทนต่อรังสี UV ทำให้แตกกรอบและเกิดรอยแตกกลางงตามผิว 3. เกิดกระแสรั่วไหลที่ผิวอย่างต่อเนื่องจนเกิดความร้อนทำให้ลुकติดไฟเนื่องจากไม่มีการเติมสารป้องกันการลุกติดไฟและทำให้สายเคเบิลอากาศขาด
Porcelain	เทปลอน	1. ที่ผิวเทปลอนหลุดลอกจนเห็นเป็นสีส้มหรือสีขาว 2. มีรอยการเกิดวาวไฟตามผิวและสายเคเบิลอากาศบริเวณตำแหน่งที่วางบนเคเบิลสเปเซอร์
Porcelain	เซรามิค	1. มีรอยการเกิดวาวไฟตามผิวและสายเคเบิลอากาศบริเวณตำแหน่งที่วางบนเคเบิลสเปเซอร์ 2. ฉนวน XLPE ของสายเคเบิลอากาศที่วางบนเคเบิลสเปเซอร์ได้รับความเครียดจากสนามไฟฟ้า

โดยปัญหาที่เกิดขึ้นกับเคเบิลสเปเซอร์ที่ทำจาก alumina ceramic เคลือบ Teflon ก็คือการเคลือบผิวหลังจากการติดตั้งใช้งานแล้วเกิดปัญหาการหลุดร่อนของ Teflon จนทำให้ไม่สามารถป้องกันตัวเคเบิลสเปเซอร์จากความชื้นและสิ่งสกปรกต่างๆ ได้ สภาพดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟฟ้าขัดข้องได้และสำหรับเคเบิลสเปเซอร์ชนิด track-resistance high density polyethylene มีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมีค่าต้านแรงดึงที่สูง และนอกจากนี้ยังมีความได้เปรียบในเรื่องคุณสมบัติทางกลกับฉนวนของสายเคเบิลอากาศที่ทำจาก high density polyethylene โดยสมบัติพื้นฐานของ High Density Polyethylene (HDPE) ในเชิงเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของพลาสติกชนิดต่างๆ [1]

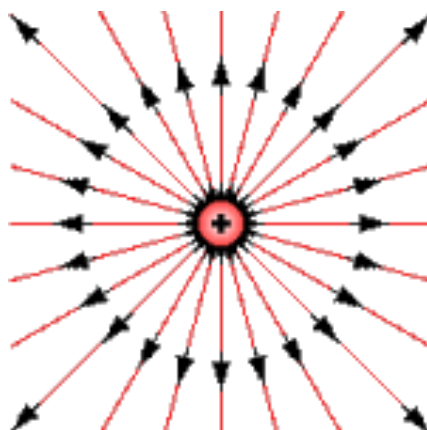
ชนิดของพลาสติก	ความหนาแน่น (g/cm ³)	Tensile Strength (10 ³ psi)	Dielectric strength (volts/mil)	Max.Temp. (°C)	Weather Resistance
ABS	1.07	4.8-5.9	385	60-94	R-E
Acrylics	1.11-1.19	5.6-11.0	450-500	54-110	R
Nylon 6	1.14	12.5	385	82-120	R
Nylon 6/6	1.13-1.15	9-12	385	82-150	R
PTFE	2.1-2.3	1-4	400-500	287	R
HDPE	0.95-0.96	2.9-5.4	480	80-120	E
PS	1.04-1.07	6.0-7.3	400-600	65-76	S
PU	1.11-1.25	4.5-8.4	460	87	R-S
PVC rigid	1.3-1.5	5-8	425-1300	65-80	R

R is resistant, S is slight effects, E is embitter

ด้วยเหตุที่ HDPE เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมาก และคุณสมบัติที่เหมาะสมของ HDPE จึงเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นเคเบิลสเปเซอร์ทั้งความเป็นฉนวนไฟฟ้า ค่าต้านแรงดึงได้สูง ความได้เปรียบในเรื่องคุณสมบัติทางกลกับฉนวนของสายเคเบิลอากาศทั้งยังสามารถผลิต HDPE ได้ในประเทศ แต่อย่างไรก็ดี HDPE ก็มีจุดอ่อนในการใช้งานเช่นกัน เช่น การเสื่อมสภาพจากการใช้งานกลางแจ้ง ที่ต้องเจอความร้อน แสงแดด ฝุ่นผง ความชื้น สภาพอากาศและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา รวมถึงกระบวนการขึ้นรูปเข้าสู่แม่พิมพ์ในรูปแบบต่างๆ และชนิดหรือคุณภาพของโพลีเอทิลีนที่นำมาขึ้นรูปเป็นเคเบิลสเปเซอร์

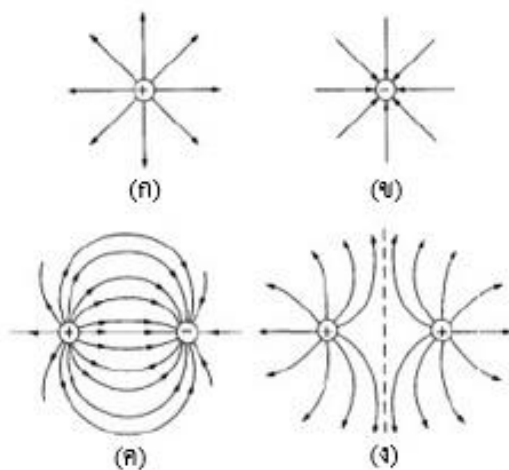
2.4 ทฤษฎีสนามไฟฟ้า [3]

สนามไฟฟ้า หมายถึง บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้าเป็นที่ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถเดินทางไปถึงหรือ บริเวณที่เรานำประจุไฟฟ้าทดสอบเข้าไปวางแล้วเกิดแรงกระทำกับประจุทดสอบนั้นๆ จุดต่างๆในบริเวณของสนามไฟฟ้า จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกันไปตามระยะใกล้ไกล โดยจุดที่อยู่ใกล้กับจุดประจุจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าจุดที่อยู่ห่างออกไป หน่วยของสนามไฟฟ้า คือ นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) หรือ โวลต์ต่อเมตร (V/m)



ภาพที่ 2.7 สนามไฟฟ้าจากประจุต้นกำเนิด

เส้นแรงไฟฟ้า หมายถึง เส้นที่เราใช้สมมุติที่ใช้เขียนเพื่อแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า หรือแสดงทิศทางของแรงที่กระทำที่ประจุไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณของสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าจะแสดงถึงขนาดของความเข้มของสนามไฟฟ้า โดยสังเกตจากเส้นแรงที่มีความหนาแน่นมากหมายถึงค่าของความเข้มสนามไฟฟ้ามากด้วย



ภาพที่ 2.8 คุณสมบัติของเส้นแรงไฟฟ้า

- (ก) ประจุบวก
- (ข) ประจุลบ
- (ค) ประจุบวกและประจุลบ
- (ง) ประจุบวกและประจุบวก

คุณสมบัติของเส้นแรงไฟฟ้า

1. มีทิศทางพุ่งออกจากประจุบวกไปหาประจุลบเสมอ
2. เส้นแรงไฟฟ้าจะตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า
3. เส้นแรงไฟฟ้าจะไม่ตัดกัน
4. เส้นแรงไฟฟ้าจะเริ่มที่ผิวตัวนำ แต่เส้นแรงไฟฟ้าสามารถผ่านฉนวนไฟฟ้าได้ และที่ตัวนำจะไม่มีเส้นแรงไฟฟ้าเกิดขึ้น
5. เส้นแรงไฟฟ้าจากประจุดังกล่าวจะไม่เสริมแรงเป็นแนวเดียวกัน แต่จะเบนแยกออกจากกัน ส่วนเส้นแรงไฟฟ้าจากประจุด่างชนิดกันเส้นแรงจะมีทิศทางเสริมเป็นแนวเดียวกัน
6. เส้นแรงไฟฟ้าจะไม่พุ่งผ่านตัวนำแต่จะหยุดอยู่ที่ผิวของตัวนำสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากน้อยซึ่งสามารถวัดในรูปแบบแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) โดยให้แรงกระทำของประจุทั้งสองมีค่าเท่ากัน คือ ประจุ q_1 และ q_2 โดยวางห่างกันเป็นระยะ r โดยให้มีการเกิดแนวของแรงกระทำให้เป็นแนวเชื่อมโยงกันทั้งสองประจุ คำนวณได้จากสมการ

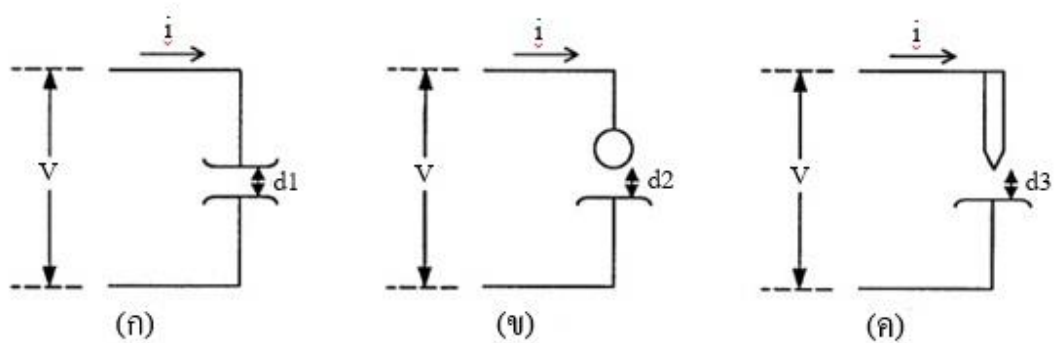
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad \text{N/C} \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- ϵ = เปรอ์มิติตวิติของตัวกลาง ที่ ϵ, ϵ_0
 - ϵ_0 = เปรอ์มิติตวิติค่าคงที่ของอากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m
 - ϵ_r = เปรอ์มิติตวิติสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)
 - \hat{r} = เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ที่มีทิศทางจากประจุดังกล่าวไปยังประจุดังกล่าวหนึ่ง
 - \vec{r} = เวกเตอร์ตำแหน่งทิศทางความสัมพันธ์ของประจุ q_1 เทียบกับ q_2

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} \quad (2.2)$$

2.5 รูปแบบของสนามไฟฟ้า (Electric Field Configuration) [3]

ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปอาจแบ่งได้ 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ กับ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 แบบ คือ แบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และแบบไม่สม่ำเสมอสูง รูปแบบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดตามรูปแบบของอิเล็กโทรดที่ถูกป้อนด้วยแรงดัน



ภาพที่ 2.9 อิเล็กโทรดที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
- (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย
- (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

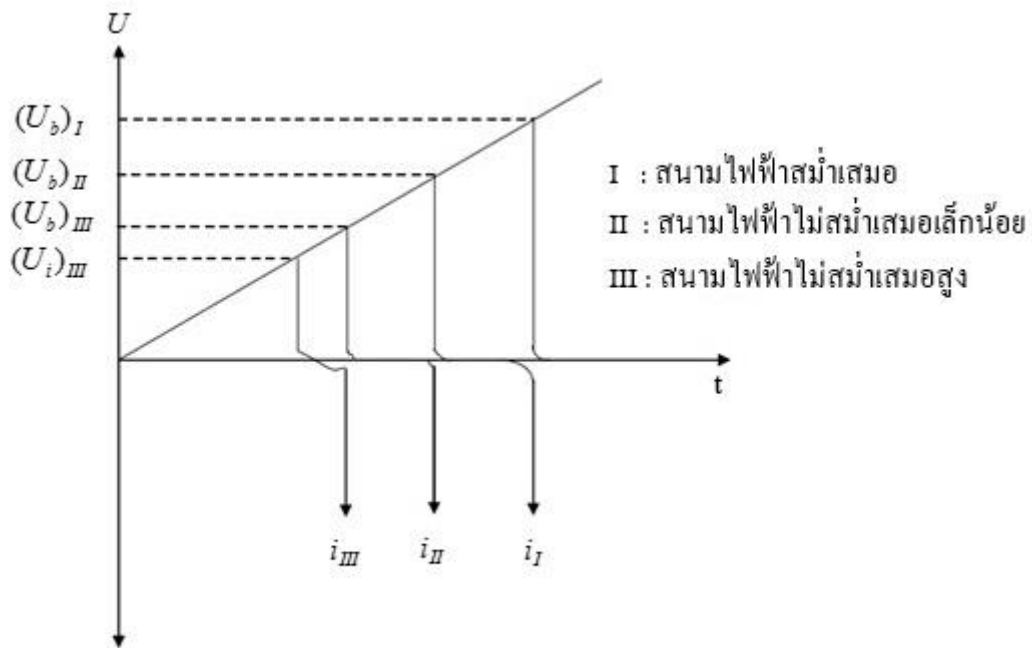
2.5.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าที่มีค่าเท่าๆกันทุกจุด เช่นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กโทรดในรูปแบบระนาบ 2 แผ่นวางขนานกัน ในภาพที่ 2.10 (แบบ I) สามารถคำนวณได้จาก

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad \text{V/mm.} \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- U = แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด หน่วยเป็น V
 - d = ระยะความห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วยเป็น mm.
 - E = ความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณจุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด หน่วยเป็น kV/mm.
 - E_{\max} = ความเครียดของสนามไฟฟ้าค่าสูงสุด หน่วยเป็น kV/mm.

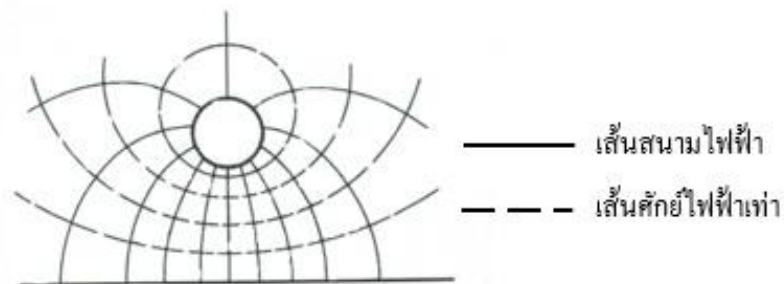
อธิบายได้ว่า เมื่อเราทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยทำให้เกิดการเบรคดาวน์ทันที ที่ความเครียดของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ถึงค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งและกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากแบบทันทีทันใด



ภาพที่ 2.10 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในไดโอดตรีกตามลักษณะทางไฟฟ้า

2.5.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ หมายถึง ความเครียดของสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งนั้นๆ ความแตกต่างของค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 2.11 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ภาพที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าเส้นของความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของอิเล็กโทรดรูปแบบทรงกลม

คำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad \text{V/mm.} \quad (2.4)$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor)

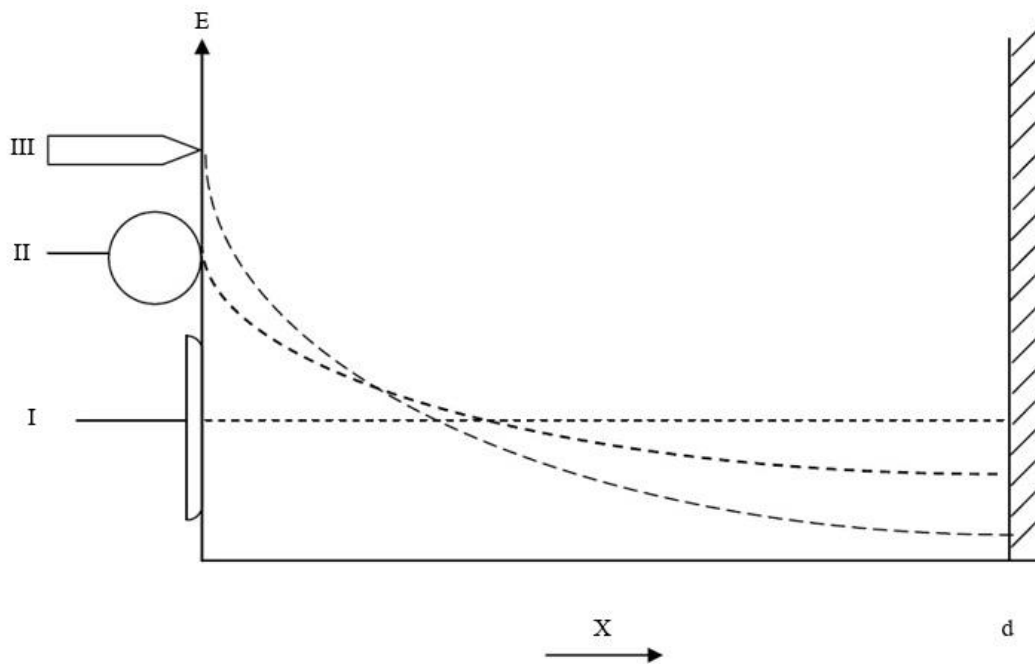
$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \quad (2.5)$$

โดยอาจจะกล่าวได้ว่า η^* คือ ค่าธรรมเนียมเพื่อให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีรูปแบบของลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเพียงใด สามารถแสดงได้โดย

$$E_b = \frac{U}{d\eta^*} \quad \text{V/mm.} \quad (2.6)$$

โดยสมการนี้ใช้ได้กับกรณีที่ไม่มีการเกิดโคโรนาขึ้นคือ จะใช้ได้กับสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือกล่าวได้ว่า ก่อนการเกิดเบรคดาวน์จะไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรดเลยนั่นเอง

แต่ถ้าในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field) จะเกิดการเครียดของสนามไฟฟ้าสูงในบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวอิเล็กโทรดที่มีเนื้อที่พื้นผิวน้อยที่สุด และถึงแม้ว่าในบริเวณนั้นจะมีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดจนถึงมีค่าวิกฤต แต่ก็ยังไม่เกิดการเบรคดาวน์ แต่จะมีการเกิดโคโรนาขึ้นแทน แต่การเกิดโคโรนาขึ้นนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลักษณะของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป เนื่องจากจะมีประจุไฟฟ้าค้างอยู่ สามารถอธิบายได้ในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 สนามไฟฟ้ากระจายโดยการเปรียบเทียบรูปแบบลักษณะอิเล็กโทรดในแบบต่างๆ

2.6 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า [3]

ฉนวนที่มีใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีใช้อยู่ 3 ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ความคงทนของฉนวนไฟฟ้าจะเริ่มจากฉนวนที่มีความเป็นฉนวนและเริ่มเปลี่ยนไปจนถึงฉนวนเป็นตัวนำไฟฟ้า หรือจนเกิดการวาบไฟที่ฉนวน หรือเกิดการเบรคดาวน์นั่นเอง ฉนวนไฟฟ้าที่ดีจะต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงได้ แต่ถ้าเมื่อใดที่ไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงจนเกิดการอาร์คได้ นั่นคือฉนวนเสียสภาพความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึง ค่าของความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทนอยู่ได้ ค่าความคงทนของฉนวน มีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm ในที่นี้คือ ค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโทรด

ชนิดของวัสดุฉนวนในไฟฟ้าแรงสูงแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ฉนวนก๊าซ

ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และเป็นตัวระบายความร้อน มีคุณสมบัติที่ดีหลักจากเกิดการเบรคดาวน์แล้วจะสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีพลังงานสูญเสียใดเล็กตริก ที่ความดันบรรยากาศเป็นฉนวนที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำ เมื่ออัดแรงดันก๊าซให้สูงขึ้นและปรับระยะช่องว่างให้เหมาะสมจะทำให้ความสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงยิ่งขึ้น

2. ฉนวนของเหลว

ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และตัวระบายความร้อน มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่าฉนวนก๊าซที่แรงดันบรรยากาศ เมื่อเกิดการเบรคดาวน์จะสูญเสียสภาพการเป็นฉนวนชั่วคราว และเวลาผ่านไปสามารถกลับคืนสู่สภาพความเป็นฉนวนได้เหมือนเดิม แต่คุณสมบัติของฉนวนลดลง มีผลจากการสูญเสียไดอิเล็กตริก มีความไวของคุณสมบัติของฉนวนเมื่อเจอสิ่งเจือปนเข้ามา

3. ฉนวนของแข็ง

ส่วนใหญ่ฉนวนของแข็งจะมีการใช้ร่วมกับฉนวนกับประเภทอื่น ๆ มากกว่าจะใช้แบบของแข็งเพียงอย่างเดียว แต่ฉนวนของแข็งจะใช้ทำหน้าที่ยึดและรองรับแรงทางกลมากกว่า ดังนั้นเมื่อเกิดการเบรคดาวน์ฉนวนของแข็งจะเสียสภาพความเป็นฉนวนแบบถาวรและมีการเสียพลังงานไดอิเล็กตริกมากที่สุด ฉนวนของแข็งสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าฉนวนของเหลว แต่ถ้าเมื่อใดเกิดมีช่องว่างภายใน หรือ โพรงอากาศในเนื้อของฉนวนของแข็ง ก็จะทำให้เกิดการคิสซาร์ภายใน และสามารถทำให้เกิดการเบรคดาวน์ขึ้นได้ คุณลักษณะที่สำคัญของฉนวนของแข็งคือ

- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า
- ค่าเปอร์มิวดิวิตี (ϵ)
- แฟกเตอร์ของพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)
- ความทนต่อพลังงานแรงกล
- ความคงทนต่อเคมี และความร้อน

ความคงทนของฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า E_b จะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ เขียนเป็นแบบทั่วไป คือ

$E_b =$ ฟังก์ชัน (ลักษณะสนามไฟฟ้า, คุณสมบัติของฉนวน และเวลา)

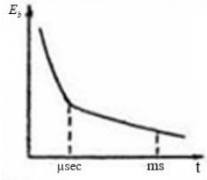
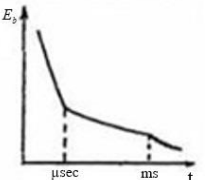
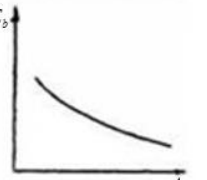
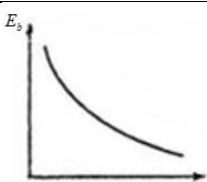
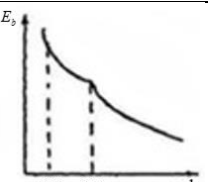

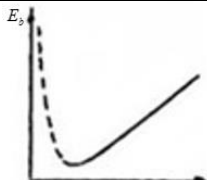
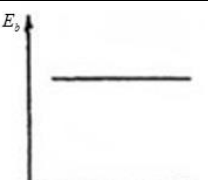
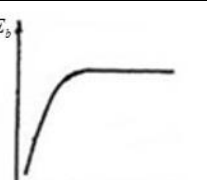
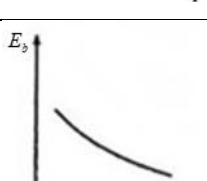
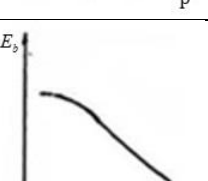
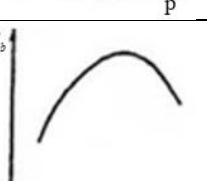
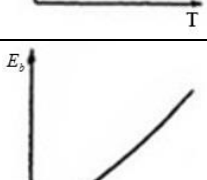
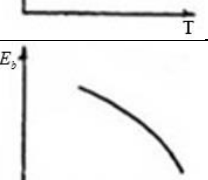
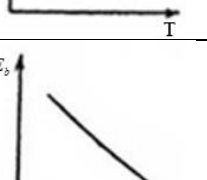
ลักษณะสนามไฟฟ้า คือ รูปร่างรูปแบบของอิเล็กโทรด (Electrode Configurations)

คุณสมบัติของฉนวน คือ คุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ความร้อน และเคมี

เวลา คือ ช่วงเวลาของแรงดันที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าต่อฉนวน

แฟกเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อความคงทนของฉนวนไฟฟ้า

ตารางที่ 2.7 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ

ผลกระทบของ/ฉนวน	ก๊าซ	ของแข็ง	ของเหลว
รูปคลื่นแรงดัน	คายยอด	ค่า rms.	คายยอดหรือ rms.
เวลา t ที่ป้อนแรงดัน			
ระยะช่องห่าง d			
ความดันอัด p			
อุณหภูมิ T			
ความชื้น h			

คุณลักษณะสมบัติความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี

1. คุณสมบัติทางไฟฟ้า ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง มีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้ฉนวนมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป และเพื่อให้มีความคงทนต่อการเกิดรอยร้าวที่ผิวของฉนวน เพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวฉนวน

2. คุณสมบัติทางกล ต้องมีความคงทนต่อแรงกระทำทางกลสูง เพราะต้องรองรับน้ำหนักแรงดึง ของการใช้งาน
3. คุณสมบัติทางความร้อน ต้องสามารถทนความร้อนในระดับความปลอดภัย ระบายความร้อนได้ดี ไม่ก่อให้เกิดการติดไฟ และต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวของความร้อนได้ต่ำ
4. มีความคงทนต่อสภาวะทางเคมี ไม่เกิดสารพิษในการใช้งาน
5. มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมในการใช้งาน ไม่ดูดซับความชื้น สามารถทนต่อการแผ่รังสีได้ เช่น รังสีของแสงอาทิตย์ การใช้งานในบริเวณภาคอุตสาหกรรม

2.7 ความเครียดของสนามไฟฟ้า E (Electric Field Stress) [3]

จากพื้นฐานของสนามไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้วิธีผลจากแรงกระทำต่อประจุ โดยวัดผลหรือแสดงออกมาทางแรงที่เกิดขึ้น โดยกฎของคูลอมบ์

$$\vec{F} = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad \text{N/C} \quad (2.7)$$

จะเห็นได้ว่าถ้านำนิยามของความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า จะสามารถเขียนเป็นแรงกระทำได้ว่า

$$\vec{F} = \frac{\vec{D}}{\epsilon} Q_2 \quad \text{N/C} \quad (2.8)$$

จะเห็นได้ว่าจากสมการที่ จะพบว่าแรงที่กระทำบนตัวประจุ Q_2 จะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแฟกเตอร์ของ $\frac{\vec{D}}{\epsilon}$ และมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) โดยกล่าวได้ว่า แรงต่อหนึ่งหน่วยของประจุเป็นแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้า หรือสามารถเรียกได้ว่า ความเครียดของสนามไฟฟ้า (E) นั้นเองมีความสัมพันธ์เป็นไปตามนิยามว่า

$$E = \frac{\vec{D}}{\epsilon} \quad (2.9)$$

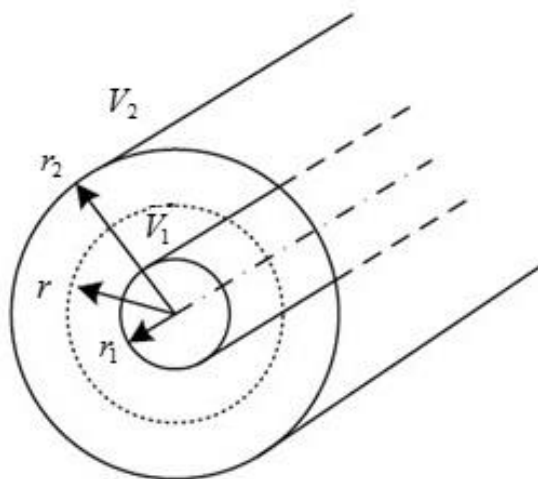
โดยใช้กฎของคูลอมบ์ แล้วเปลี่ยนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$\vec{F} = \vec{Q}E \quad \text{N/C} \quad (2.10)$$

2.7.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

ความเครียดของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV หาได้ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนกันแฉกแสดงในภาพที่ 2.13 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่แนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้า ดังนั้น โดยอาศัยการอินทิเกรตสมการแมกซ์เวลล์ตั้งสมการที่ (2.11)

$$\vec{Q} = \int_s \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad \text{C} \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.13 ทรงกระบอกซ้อนกันแฉก

สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันแฉกมีความยาว l รัศมี r ($r_1 \leq r \leq r_2$) และ $E = D/\epsilon$ จะสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{V/m.} \quad (2.12)$$

และแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกซ้อนทั้งสอง คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad \text{V} \quad (2.13)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{V} \quad (2.14)$$

จึงได้ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ $r_1 \leq r \leq r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{V/mm.} \quad (2.15)$$

ฉะนั้นความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดของ E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{V/mm.} \quad (2.16)$$

โดย U = แรงดันไฟฟ้า (แรงดันเฟส) หน่วยเป็น V
 r_1 = รัศมีของตัวนำไฟฟ้า หน่วยเป็น mm.
 r_2 = รัศมีของฉนวน XLPE รวมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า หน่วยเป็น mm.

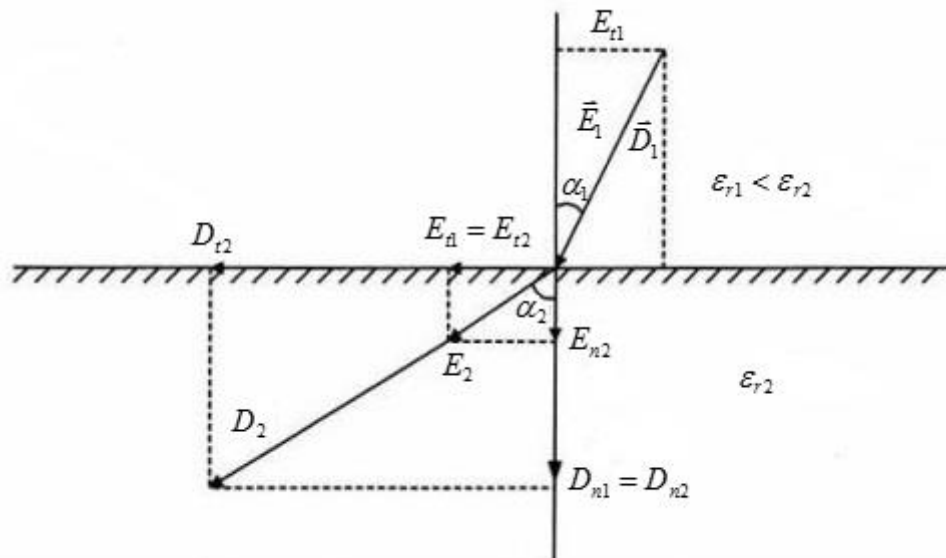
2.7.2 ทฤษฎีความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

1. การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน

อาศัยหลักการความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวที่สัมผัส E_t ของรอยต่อของฉนวนที่ต่างชนิดกันที่มีค่าคงที่ และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D_n ในเส้นแนวตั้งฉากกับรอยต่อที่มีค่าคงที่ นั่นคือ

$$E_{t1} = E_{t2}$$

$$D_{n1} = D_{n2}$$



ภาพที่ 2.14 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์ของ $D = \epsilon E$ และในความเป็นจริงดังกล่าว ในภาพที่ 2.14 จึงวิเคราะห์ และเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.17)$$

สรุปได้ว่า เส้นพลังไฟฟ้า \vec{D} และ สนามไฟฟ้า \vec{E} ในเนื้อสารฉนวนที่มีค่า ϵ_r ที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างจากแนวตั้งฉาก หรือหักเหเข้าหารอยต่อนั้นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าใน ส่วนที่มี ϵ_r สูงจะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก หรือเรียกว่าการหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของ ฉนวนต่างชนิดกัน ฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าจะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่น ๆ นั้นหมายความว่าบริเวณนั้นจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะจุดตัดระหว่างผิวระนาบของ อิเล็กโทรด กับรอยต่อของฉนวนจะมีค่าสูงมาก จะเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า และจะ ทำให้เกิดการดีสชาร์จขึ้นได้ในบริเวณนั้นแสดงในภาพที่ 2.15

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.18)$$

เมื่อ

E_1 = ความเคียดสนามไฟฟ้าของวัสดุที่ 1

E_2 = ความเคียดสนามไฟฟ้าของวัสดุที่ 2

ε_1 = ค่าคงที่ความเป็นฉนวนของวัสดุที่ 1

ε_2 = ค่าคงที่ความเป็นฉนวนของวัสดุที่ 2

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองสามารถคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ $E = U/d$ เพราะเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และใช้ความสัมพันธ์ $D = \varepsilon E$ เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้น D จะมีค่าคงตัว และลักษณะการวางของฉนวนจะอยู่ในสนามไฟฟ้า เสมือนว่ามี ตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันนั่นคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad C \quad (2.19)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี ε_1 และ ε_2 ตามลำดับ แต่เนื่องจาก

$$C_1 \approx \frac{\varepsilon_1}{d_1} \text{ และ } C_2 \approx \frac{\varepsilon_2}{d_2} \quad (2.20)$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของแรงดัน

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &= \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \\ U_2 &= \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1 \end{aligned} \quad (2.21)$$

แต่

$$U = U_1 + U_2$$

$$= U_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot U_1$$

$$= U_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)$$

โดยที่

$$U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad \text{V} \quad (2.22)$$

แทนค่า U_1 จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} U}{\left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad \text{V} \quad (2.23)$$

ฉะนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสอง คือ

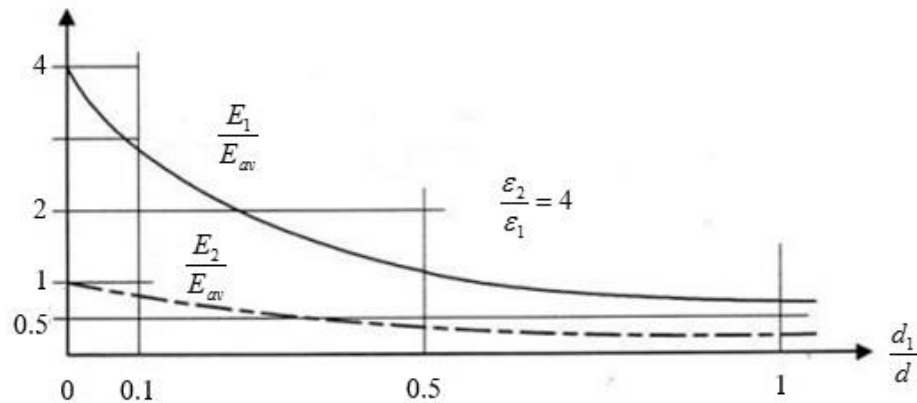
$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad \text{V/mm.} \quad (2.24)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad \text{V/mm.}$$

$$E_2 = \frac{U \varepsilon_1 / \varepsilon_2}{d_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} \right)} \quad \text{V/mm.} \quad (2.25)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad \text{V/mm.} \quad (2.26)$$

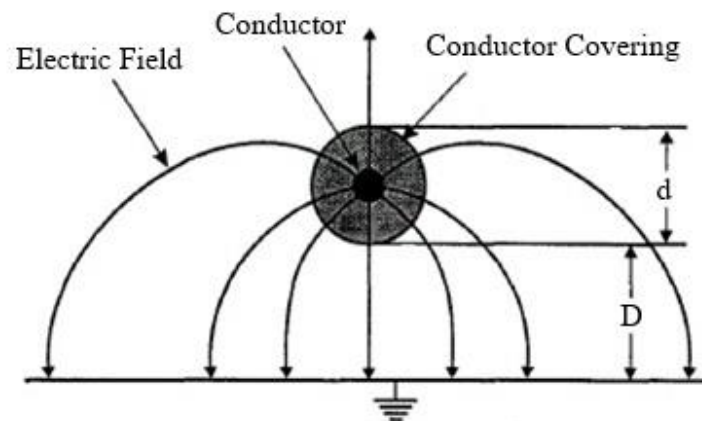
จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน ϵ_2/ϵ_1 เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนของฉนวนแต่ละชั้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่าถ้าในส่วนของฉนวนที่มีค่า ϵ ต่ำยิ่งมาก สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมากขึ้น ดังในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

2.8 หลักการของการแก้ปัญหา [4] [5]

สายเคเบิลอากาศเป็นสายหุ้มฉนวนสองชั้นที่ชั้นแรกเป็นวัสดุ High Molecular Weight Polyethylene แล้วหุ้มด้วย High Density Polyethylene ที่มีคุณสมบัติทนต่อการเกิดรอยถลอก โดยการหุ้มฉนวนสองชั้นจะช่วยลดโอกาสที่จะเกิดรูทะลุเนื้อฉนวน (Pin hole) ของชั้นฉนวนลดลง สายไฟประเภทนี้จะเรียกว่าเป็นสายประเภทหุ้มฉนวน เมื่อมีการจ่ายไฟให้กับสายเคเบิลอากาศดังกล่าว จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 สนามไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับสายประเภทหุ้มฉนวน

และเนื่องจากมีฉนวนสองชนิดซึ่งได้แก่ XLPE ที่มีค่าคงที่ความเป็นฉนวนประมาณ 2.3 - 2.5 และอากาศมีค่าคงที่ความเป็นฉนวนเท่ากับ 1 วางอยู่ในสนามไฟฟ้างกล่าวจะมีผลทำให้เกิดบิดเบือนของสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดคลื่นแรงดันแทรกแซง Radio Interference Voltage (RIV) ที่จะกีดกัรอนฉนวน XLPE ให้เสื่อมสภาพ ซึ่งการกีดกัรอนดังกล่าวเรียกกันโดยทั่วไปว่ารอยร้าว (Tracking) โดยความรุนแรงของปัญหารอยร้าวนี้จะขึ้นอยู่กับระยะ D หากระยะ D มาก ความรุนแรงจะน้อย และหากระยะ D น้อย ความรุนแรงจะมาก ซึ่งการกีดกัรอนดังกล่าวมักเกิดบ่อยครั้งเมื่อมีการใช้สายประเภทหุ้มฉนวน

สมการของการคำนวณของกระแสที่รั่วไหลผ่านวัสดุหุ้มฉนวนในกรณีของสายไฟชนิดหุ้มฉนวนด้วยโลหะ (Fully Shield) (โดยได้ทำการวัดค่ากระแสจากส่วนที่เป็นฉนวนของสายไฟ) หรือในส่วนกรณีของสายหุ้มฉนวนที่จะเกิดกับฉนวนภายนอก จากการสัมผัสกับส่วนที่เป็นกราวด์หรือผิวของสายไฟมีค่าสมการดังนี้

$$i = 2\pi fCU \quad (2.27)$$

$$C = \frac{7.354\epsilon}{\log_{10} \frac{D_{oi} \times 10^{-12}}{D_{oc}}} \quad F \quad (2.28)$$

เมื่อ

i = ค่ากระแสรั่วไหล

f = ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า

C = ค่าความจุกระแส (Capacitance)

U = ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสเทียบกราวด์

ε = ค่าคงที่ความเป็นฉนวนของชั้นฉนวน

D_{oc} = ขนาดของสายตัวนำ

D_{oi} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลอากาศ

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสรั่วไหลผ่านวัสดุหุ้มฉนวนจะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ความเป็นฉนวนของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน โดยรวมถึงค่าคงที่ความเป็นฉนวนของเคเบิลสเปเซอร์ที่เป็นตัวรองรับสายเคเบิลอากาศดังกล่าวด้วย

เนื่องจากการไฟฟ้าได้มีการใช้เคเบิลสเปเซอร์อยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิด HDPE และ ชนิด Porcelain ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้ มีการใช้งานในส่วนองแรงดันในระบบจำหน่ายขนาด 22 kV และ 33 kV โดยสายเคเบิลอากาศ ที่ใช้งานมีด้วยกัน 2 ขนาด คือขนาด 50 ตารางมิลลิเมตร และ ขนาด 185 ตารางมิลลิเมตร เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของเคเบิลสเปเซอร์ เพื่อให้มีอายุใช้งานที่ดีและไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานด้านไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และเพื่อศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าบริเวณจุดสัมผัสระหว่างสายเคเบิลอากาศกับเคเบิลสเปเซอร์โดยทางผู้จัดทำโครงการได้ใช้โปรแกรมทางด้านวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (Finite element Analysis) คือ โปรแกรมที่ใช้เรียกว่า COMSOL Multiphasic 3.5a Version 3.5 เพื่อมาวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างสายเคเบิลอากาศและเคเบิลสเปเซอร์

2.9 อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหา

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Window
3. ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (COMSOL Metaphysics 3.5a)
4. กล้องถ่ายรูป