สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเปรียบเทียบเพื่อยกระดับมาตรฐานองค์ความรู้ด้านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าของประเทศไทย ในด้านทฤษฎีการเกิดระบบป้องกันและการจัดการด้านความเสี่ยง จากมาตรฐาน IEC และ IEEE

The Tentative Comparison Study of IEC and IEEE Lightning Phenomena Standard in Theory, System Protection and Risk Management for Refining Thailand Standard

T119429

โดย

นาย ธนิสร แสงชลินทร์
นาย ธเนศ สุขสถาน
นาย ธิษณะ อุดมฤกษ์ชัย
นาย นัธที วงศ์พยัคฆ์

หมู่.....
เลขทะเบียน 119429
วัน,เดือน,ปี - 7 S.A. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

การศึกษาเปรียบเทียบเพื่อยกระดับมาตรฐานองค์ความรู้ด้านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าของประเทศไทยในด้านทฤษฎีการเกิดระบบป้องกันและการจัดการด้านความเสี่ยง จากมาตรฐาน IEC และ IEEE

The Tentative Comparison Study of IEC and IEEE Lightning Phenomena Standard in Theory, System Protection and Risk Management for Refining Thailand Standard

โดย

นาย ธนิสร แสงชลินทร์
นาย ธเนศ สุขสถาน
นาย ธิษณะ อุดมฤกษ์ชัย
นาย นัธที วงศ์พยัคฆ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบเพื่อยกระดับมาตรฐานองค์ความรู้ด้านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าของประเทศไทยในด้านทฤษฎีการเกิดระบบป้องกันและการจัดการด้านความเสี่ยง จากมาตรฐาน IEC และ IEEE

ผู้จัดทำ

นาย ธนิสร แสงชลินทร์

นาย ธเนศ สุขสถาน

นาย ธิษณะ อุดมฤกษ์ชัย

นาย นัธที วงศ์พยัคฆ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเปรียบเทียบเพื่อยกระดับมาตรฐานองค์ความรู้ด้านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าของประเทศไทยในด้านทฤษฎีการเกิดระบบป้องกันและการจัดการด้านความเสี่ยง จากมาตรฐาน IEC และ IEEE

นาย ธนิสร แสงชลินทร์
นาย ธเนศ สุขสถาน
นาย ธิษณะ อุดมฤกษ์ชัย
นาย นัธที วงศ์พยัคฆ์
ผศ.ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและรวบรวมทฤษฎีพื้นฐานในแง่ของสาเหตุ ผลกระทบและวิธีการป้องกันฟ้าผ่าจากมาตรฐานที่มีอยู่ทั้งใน และต่างประเทศเพื่อสร้างเป็นองค์ความรู้ในเรื่องของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในประเทศไทย รวมถึงการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าเมื่อมีวัสดุและรูปร่างที่แตกต่างกันเพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพในการล่อฟ้าที่ดีที่สุด และออกแบบโปรแกรมประเมินการจัดการความเสี่ยงของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานของ IEC 62305-2 ซึ่งโดยโปรแกรมได้ออกแบบมาให้ใช้งานง่ายและเหมาะแก่ผู้ที่ต้องการประเมินความเสี่ยงแบบรวดเร็วเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการป้องกันฟ้าผ่าเพื่อลดความเสียหายแก่อุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สื่อสารบนพื้นที่ปฏิบัติงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Tentative Comparison Study of IEC and IEEE Lightning Phenomena Standard in Theory, System Protection and Risk Management for Refining Thailand Standard

Tanidsorn Sangcharin
Thanate Suksatan
Titsna Udomreakchai
Nuttee Wongpayak
Asst. Prof. Dr. Chow Chompoo-inwai Advisor
2010

ABSTRACT

The main objective of this study is to gather the knowledge base of the lightning phenomena in many significant aspects which are the principles, the causes, the impact on human and buildings and the lightning protection based on related Thailand and international standard. This project includes the extensive experimental results in testing both physical and electrical characteristics of the lightning air terminals in order that the best practice for this device in Thailand can be determined. The computer aid program called "Basic Risk Management Analysis" is also developed via MATLAB GUI according to IEC 62305-2 standard. The complete report will be hugely beneficial to many Thailand researchers, scientists and engineers in establishing the background and advance knowledge in this area.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่านที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ผศ.ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว ที่คอยดูแลและเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดและคอยช่วยชี้แนะให้คำปรึกษารวมถึงความรู้ต่างๆที่ได้สอนแก่ผู้จัดทำโครงงานอันเป็นประโยชน์แก่การศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเพื่อจัดทำโครงงาน

คณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ KML TECHNOLOGY CO., LTD ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ นายปุณยวีย์ ทองเขียว นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง (HVES) และพี่ๆศูนย์วิจัยทางพลังงานและวิศวกรรมการส่องสว่าง (ESIRC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นที่ปรึกษาในเรื่องการทำการทดสอบเป็นอย่างดีและช่วยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ อีกทั้งขอบคุณเพื่อนร่วมงานและสมาชิกในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในทุกๆด้านจนกระทั่งโครงงานสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มิได้กล่าวถึงที่ให้การสนับสนุนทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งทุกๆ กำลังใจที่ดีในทุกๆ เรื่อง ในการทำโครงงานครั้งนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I
ABSTRACT II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญภาพ XI
สารบัญตาราง XVIII

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ 2
1.4 แผนการดำเนินโครงงาน 2
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน 3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน 3

บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับฟ้าผ่า 4
2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า 4
2.2 ประเภทและคุณลักษณะของการเกิดฟ้าผ่า 6
2.2.1 ฟ้าผ่าลง-ฟ้าผ่าขึ้น 6
2.2.2 ขั้วและกระแสรูปคลื่นฟ้าผ่า 7
2.2.3 ขนาดกระแสฟ้าผ่า 8
2.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่า 8
2.3.1 ความเสียหายเนื่องจากผลของความร้อน 8
2.3.2 ผลทางกล 10
2.3.3 ผลทางไฟฟ้า 13
2.4 ทฤษฎีและหลักการของสนามไฟฟ้า 14
2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ 18
2.5.1 ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ 18
2.5.2 ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ 20
2.5.3 การเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ 22
2.5.4 การเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 แฟกเตอร์ต่าง ๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ 23
2.6.1 ผลของขั้วแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น 23
2.6.2 ผลของประจุค้าง 24
2.6.3 ผลของอุณหภูมิ 24
2.6.4 ผลของลักษณะอิเล็กโตรด 24
2.6.5 ผลของความชื้นในอากาศ 24
2.6.6 ผลของรูปคลื่นแรงดัน 25

บทที่ 3 การจัดการความเสี่ยง 26
3.1 คำอธิบาย 26
3.1.1 สัญลักษณ์และตัวย่อ 26
3.1.2 ความเสียหายและความสูญเสีย 31
3.1.2.1 ที่มาของความเสียหาย 31
3.1.2.2 ประเภทของความเสียหาย 31
3.1.2.3 ประเภทของความสูญเสีย 31
3.1.3 ความเสี่ยงและองค์ประกอบความเสี่ยง 33
3.1.3.1 ความเสี่ยง 33
3.1.3.2 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากฟ้าผ่าสิ่งปลูกสร้าง 34
3.1.3.3 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากฟ้าผ่าใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง 34
3.1.3.4 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากฟ้าผ่าสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง 34
3.1.3.5 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากฟ้าผ่าใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง 35
3.1.4 ส่วนประกอบขององค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับสิ่งปลูกสร้าง 35
3.1.4.1 ส่วนประกอบขององค์ประกอบความเสี่ยงซึ่งอ้างอิงกับที่มาของความเสียหาย 36
3.1.4.2 ส่วนประกอบขององค์ประกอบซึ่งอ้างอิงกับประเภทของความเสียหาย 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของความเสี่ยง 37
3.2 การจัดการความเสี่ยง 38
3.2.1 ขั้นตอนพื้นฐาน 38
3.2.2 การจัดการความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้าง 38
3.2.3 ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ R_T 39
3.2.4 ขั้นตอนเฉพาะในการประเมินการป้องกันที่ต้องการ 39
3.2.5 ขั้นตอนในการประเมินความคุ้มทุนในการป้องกัน 40
3.2.6 มาตรการการป้องกัน 41
3.2.7 การเลือกมาตรการการป้องกัน 42
3.3 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้าง 43
3.3.1 สมการพื้นฐาน 43
3.3.2 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงจากฟ้าผ่าสิ่งปลูกสร้าง (S1) 43
3.3.3 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงจากฟ้าผ่าใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง (S2) 43
3.3.4 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงจากฟ้าผ่าสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง (S3) 44
3.3.5 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงจากฟ้าผ่าใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง (S4) 44
3.3.6 สรุปองค์ประกอบความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้าง 45
3.3.7 การแบ่งพื้นที่สิ่งปลูกสร้างเป็นส่วนๆ Z_S 46
3.3.8 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างตามพื้นที่ Z_S 47
3.3.8.1 ความเสี่ยง R_1, R_2 และ R_3 47
3.3.8.2 ความเสี่ยง R_4 48

บทที่ 4 ระบบป้องกันฟ้าผ่า 49
4.1 ทฤษฎีทั่วไปของระบบป้องกันฟ้าผ่า 49
4.1.1 กลศาสตร์ของการเกิดฟ้าผ่า 49
4.1.2 พารามิเตอร์ฟ้าผ่า 49
4.1.3 ระยะฟ้าผ่า 51
4.2 ระดับการป้องกันของระบบป้องกันฟ้าผ่า 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การอ้างอิงหรือสำเนาต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก 53
4.3.1 ระบบตัวนำล่อฟ้า 53
4.3.1.1 ทั่วไป 53
4.3.1.2 การจัดวางตำแหน่งตัวนำ 53
4.3.1.3 องค์ประกอบทางธรรมชาติ 66
4.3.2 ระบบตัวนำลงดิน 69
4.3.2.1 ทั่วไป 69
4.3.2.2 การวางตำแหน่งระบบป้องกันฟ้าผ่า แบบแยกอิสระ 69
4.3.2.3 การวางตำแหน่งระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ ไม่แยกอิสระ 70
4.3.2.4 การติดตั้งตัวนำลงดิน 71
4.3.2.5 องค์ประกอบทางธรรมชาติ 73
4.3.3 ระบบรากสายดิน 75
4.3.3.1 ทั่วไป 75
4.3.3.2 การจัดการระบบรากสายดินตามเงื่อนไขทั่วไป 75
4.3.3.3 การติดตั้งรากสายดิน 78
4.3.4 รากสายดินธรรมชาติ 78
4.3.5 การเลือกวัสดุและขนาด 78
4.3.5.1 วัสดุ 78
4.3.5.2 ขนาด 78
4.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายใน 81
4.4.1 ทั่วไป 81
4.4.2 การประสานศักย์ให้เท่ากัน 81
4.4.2.1 ทั่วไป 81
4.4.2.2 การประสานให้ศักย์เท่ากันสำหรับการติดตั้งงานโลหะ 82
4.4.2.3 การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันสำหรับส่วนของตัวนำ ภายนอก 83
4.4.2.4 การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันสำหรับระบบภายใน 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2.5 การต่อประสานศักย์ให้เท่ากันสำหรับสายไฟที่ต่อกับโครงสร้างที่ถูกป้องกัน....83
4.4.2.6 ฉนวนไฟฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก....84
4.5 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า....85
4.5.1 ขั้นตอนการวางแผน....85
4.5.2 การประชุม....86
4.5.3 ข้อกำหนดทางไฟฟ้าและทางกล....87
4.5.3.1 การออกแบบระบบไฟฟ้า....87
4.5.3.2 การออกแบบทางกล....88
4.5.4 การคำนวณการออกแบบ....89
4.6 มาตรการการป้องกันแก่สิ่งมีชีวิต....92
4.6.1 มาตรการการป้องกันจากแรงดันสัมผัส....92
4.6.2 มาตรการการป้องกันจากแรงดันช่วงก้าว....93
4.7 การบำรุงรักษาและการตรวจสอบระบบป้องกันฟ้าผ่า....94
4.7.1 ขอบเขตการตรวจสอบ....94
4.7.2 ลำดับการตรวจสอบ....94
4.7.3 การซ่อมบำรุง....94

บทที่ 5 ระบบการต่อลงดิน....95
5.1 ทฤษฎีทั่วไปของระบบการต่อลงดิน....95
5.2 การจัดระบบต่อลงดิน....100
5.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป....100
5.2.2 รากสายดิน....100
5.2.3 สายต่อหลักดิน....102
5.2.4 จุดต่อรากสายดินหลัก....103
5.3 การออกแบบและติดตั้งระบบการต่อลงดิน....103
5.3.1 รูปแบบของระบบต่อลงดิน....103
5.3.2 ตำแหน่งการติดตั้งระบบต่อลงดิน....106
5.4 การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า....106
5.5 โปรแกรมจำลองระบบการต่อลงดิน ETAP Power Station....109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 โปรแกรมวิเคราะห์ความเสี่ยง 110
6.1 แนวคิดในการเขียนโปรแกรม 110
6.2 การออกแบบและเขียนโปรแกรม 116
6.3 แนะนำตัวโปรแกรม 119
6.4 ผลที่ได้จากการใช้งานโปรแกรม 124

บทที่ 7 การศึกษา จำลองชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL 126
7.1 บทนำ 126
7.2 การศึกษา จำลองชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า 128
7.2.1 การจำลองชุดทดสอบ 128
7.2.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า 133
7.3 การวิเคราะห์แบบจำลองของแท่งตัวนำล่อฟ้า 134
7.3.1 การจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า 134
7.3.2 การจำลองสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ 135
7.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง 138

บทที่ 8 การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า 142
8.1 บทนำ 142
8.2 อุปกรณ์ทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า 143
8.3 ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกัน .. 144
8.3.1 การเตรียมการทดสอบ 144
8.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ 145
8.3.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน ที่มีวัสดุต่างชนิดกัน 146
8.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่มีวัสดุต่างชนิดกัน .. 148
8.3.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่มีรูปแบบต่างกัน 151
8.3.6 สรุปผลการทดสอบ 151
8.4 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่าง ๆ 152
8.4.1 การเตรียมการทดสอบ 152
8.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ 152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.4.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่าง ๆ 153
8.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบจำนวนครั้งเบรกดาวน์ที่มีวัสดุต่างชนิดกัน 154
8.3.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบจำนวนครั้งเบรกดาวน์ที่มีรูปแบบต่างกัน 156
8.4.6 สรุปผลการทดสอบ 157

บทที่ 9 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 158
9.1 สรุป 158
9.2 อุปสรรคและการแก้ไข 159
9.3 ข้อเสนอแนะ 159

เอกสารอ้างอิง
ภาคผนวก
ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า 2
รูปที่ 2.2 ช่วงเวลาการเกิดวาบฟ้าผ่าซึ่งถูกบันทึกโดย streak camera 6
รูปที่ 2.3 ฟ้าผ่าลง 6
รูปที่ 2.4 ฟ้าผ่าขึ้น 7
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า 8
รูปที่ 2.6 การจัดวางทั่วไปของตัวนำ 2 ตัวเพื่อที่จะคำนวณแรงไฟฟ้าพลวัต 10
รูปที่ 2.7 ประเภทการวางตัวนำในระบบป้องกันฟ้าผ่า 11
รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมของความเค้นสำหรับโครงร่างรูปที่ 2.7 12
รูปที่ 2.9 แรงต่อหน่วยความยาวในแนวระนาบของตัวนำของรูปที่ 2.8 12
รูปที่ 2.10 อิเล็โตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ 15
รูปที่ 2.11 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า 16
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ 18
รูปที่ 2.13 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระตามกระบวนการเกิดสตรีมเมอร์ 21
รูปที่ 2.14 ระยะวิกฤตของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน 22
รูปที่ 2.15 ระยะอะวาลานซ์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ 23
รูปที่ 2.16 แรงดันเบรกดาวน์ U_b ของอิเล็กโตรดแท่งกับระนาบในอากาศในเทอมของ
ระยะแกป d เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่างๆที่สภาวะมาตรฐาน IEC
(760 Torr, 20 °C , 11 gmH_2O/m^3) 25

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนสำหรับการตัดสินใจติดตั้งการป้องกัน 40
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนสำหรับการประประเมินความคุ้มทุนของมาตรการการป้องกัน 41
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนสำหรับการเลือกมาตรการป้องกันในสิ่งปลูกสร้าง 42

รูปที่ 4.1 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า 51
รูปที่ 4.2 ระยะฟ้าผ่า 52
รูปที่ 4.3 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน 54
รูปที่ 4.4 บริเวณป้องกันด้วยแท่งตัวนำในแนวตั้ง 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6 บริเวณที่ถูกป้องกันที่ได้มาจากแท่งตัวนำร่วมกับวิธีตาข่ายด้วยวิธีมุมป้องกัน และวิธีทรงกลมกลิ้ง 56
รูปที่ 4.7 บริเวณที่ถูกป้องกันด้วยขดลวดแยกกับวิธีตาข่ายด้วยวิธีมุมป้องกันและ วิธีทรงกลมกลิ้ง 56
รูปที่ 4.8 การออกแบบตัวนำล่อฟ้าด้วยวิธีมุมป้องกันสำหรับความสูงที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 4.4 57
รูปที่ 4.9 (ก) การป้องกันในระนาบแนวตั้ง (ข) ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแยกอิสระ โดยใช้เสาตัวนำล่อฟ้าสองอันแยกอิสระโดยออกแบบด้วยวิธีมุมป้องกัน 58
รูปที่ 4.10 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแยกอิสระโดยใช้เสาตัวนำล่อฟ้าสองอัน แยกอิสระโดยเชื่อมต่อจากสายตัวนำขึง 58
รูปที่ 4.11 (ก) ตัวอย่างการใช้แท่งตัวนำหนึ่งอัน (ข) ตัวอย่างการใช้แท่งตัวนำสองอัน 59
รูปที่ 4.12 (ก) ภาพฉายในระนาบแนวตั้งที่ตั้งฉากกับระนาบที่ประกอบด้วยเสาตัวนำ (ข) ภาพฉายในระนาบแนวตั้งที่ประกอบด้วยเสาตัวนำ 60
รูปที่ 4.13 พื้นที่ที่ถูกป้องกันโดยแท่งตัวนำล่อฟ้าบนพื้นผิวเอียงโดยใช้วิธีมุมป้องกัน ในการออกแบบ 61
รูปที่ 4.14 การออกแบบระบบตัวนำล่อฟ้าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง 61
รูปที่ 4.15 การจัดวางตัวนำล่อฟ้าทั่วไป 62
รูปที่ 4.16 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของโครงข่ายตัวนำล่อฟ้าบนโครงสร้าง ที่รูปร่างที่ซับซ้อน 62
รูปที่ 4.17 บริเวณป้องกันด้วยตัวนำล่อฟ้าในแนวระนาบ 2 ชุดขนานกันหรือแท่งตัวนำล่อฟ้า . 63
รูปที่ 4.18 ระบบป้องกันฟ้าผ่าของตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาเรียบ 64
รูปที่ 4.19 ระบบป้องกันฟ้าผ่าของตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาที่มีความชัน 64
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนโครงสร้างที่มีหลังคาเอียง 65
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างตัวนำล่อฟ้าและตัวนำที่ติดตั้งซ่อนในอาคารที่สูงไม่เกิน 20 เมตร หลังคาเอียง 65
รูปที่ 4.22 การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกบนสิ่งปลูกสร้างที่มีหลังคาต่างระดับ 66
รูปที่ 4.23 การก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้องค์ประกอบทางธรรมชาติ บนหลังคาของโครงสร้าง 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.24 การก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกบนโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรง โดยใช้เหล็กเสริมเป็นองค์ประกอบทางธรรมชาติ 68
รูปที่ 4.25 ตัวอย่างการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาซึ่งคลุมด้วยตัวนำและไม่ต้องให้เกิดฟ้าผ่าทะลุ 68
รูปที่ 4.26 การประสานจุดต่อของครอบโลหะบนกำแพงบังหน้าของหลังคา 69
รูปที่ 4.27 การต่อแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยธรรมชาติกับตัวนำล่อฟ้า 69
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างรายละเอียดระบบป้องกันฟ้าผ่าของสิ่งปลูกสร้างที่มีหลังคาเอียง 71
รูปที่ 4.29 ลูปในตัวนำลงดิน 71
รูปที่ 4.30 ตัวอย่างการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกของสิ่งปลูกสร้าง 73
รูปที่ 4.31 การก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้ตัวนำลงดิน 2 ชุดและรากสายดินฐานราก 73
รูปที่ 4.32 การเชื่อมกันระหว่างแผ่นโลหะแต่ละอันที่ตกแต่งส่วนหน้าของสิ่งปลูกสร้าง 74
รูปที่ 4. 33 การต่อแถบโลหะต่อเนื่องของหน้าต่างเข้ากับแผ่นโลหะที่ตกแต่งส่วนหน้าของสิ่งปลูกสร้าง 74
รูปที่ 4.34 ตัวนำลงดินภายในโครงสร้างทางอุตสาหกรรม 75
รูปที่ 4.35 ความยาวน้อยสุด $l1$ ของรากสายดินแต่ละอันตามเงื่อนไขของระบบป้องกันฟ้าผ่า 76
รูปที่ 4.36 ตัวอย่างการจัดการระบบตัวนำลงดินแบบ A ด้วยรากสายดินแนวดิ่ง 77
รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการจัดการระบบตัวนำลงดินแบบ A ด้วยแท่งตัวนำแนวดิ่ง 77
รูปที่ 4.38 แผนผังขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐาน 85
รูปที่ 4.39 ค่าสัมประสิทธิ์ k_C ในกรณีของหลังคาชันด้วยตัวนำล่อฟ้าบนสันของหลังคาและเป็นระบบต่อลงดินแบบ B 91
รูปที่ 4.40 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับส่วนของคานในโครงสร้าง 92
รูปที่ 4.41 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าว (step voltage) 93

รูปที่ 5.1 ระบบการต่อลงดิน 95
รูปที่ 5.2 วิธีการวัดความต้านทานดิน 96
รูปที่ 5.3 รูปแบบการต่อลงดิน 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.4 การฝังแท่งตัวนำลงดินและการต่อสายตัวนำในดิน 98
รูปที่ 5.5 การต่อลงดินของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า 99
รูปที่ 5.6 ระบบและการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า 99
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างรากสายดิน 100
รูปที่ 5.8 (ก) ระบบ 1 เฟส 2 สาย (ข) ระบบ 1 เฟส 3 สาย (ค) ระบบ 3 เฟส 4 สาย 104
รูปที่ 5.9 การติดตั้งแท่งตัวนำล่อฟ้า 106
รูปที่ 5.10 (ก) การติดตั้งสายตัวนำลงดิน (ข) การติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน 106
รูปที่ 5.11 Rolling Sphere Model ของฟ้าผ่าที่จะมุ่งไปหาจุดลงดินที่อยู่ใกล้ที่สุด 107
รูปที่ 5.12 การใช้ Air Terminal เพื่อป้องกัน Direct Strike บนตัวอาคาร 108
รูปที่ 5.13 ขอบเขตการป้องกันของเสาเหล็กสูง จะอยู่ภายในพื้นที่รอบ ๆ เสาใต้ Rolling Sphere 108
รูปที่ 5.14 การติดตั้ง Overhead Ground Wire เพื่อป้องกัน Direct Strike ใต้แนวพาดสาย.. 109
รูปที่ 5.15 การจำลองระบบต่อลงดินด้วยโปรแกรม ETAP Power Station 109

รูปที่ 6.1 โปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงต่างมาตรฐาน IEC 62305-2 110
รูปที่ 6.2 แผนผังแนวคิดการเขียนโปรแกรม 111
รูปที่ 6.3 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB 112
รูปที่ 6.4 หน้าต่างเรียกใช้งาน GUI GUIDE 113
รูปที่ 6.5 หน้าต่างการออกแบบ GUI Interface 114
รูปที่ 6.6 แผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง 116
รูปที่ 6.7 ส่วนประกอบของหน้าต่าง GUIDE GUI 117
รูปที่ 6.8 การวางรูปแบบหน้าต่างของโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง 118
รูปที่ 6.9 หน้าต่างการเขียน m-file หรือการทำให้โปรแกรมทำงาน 119
รูปที่ 6.10 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Structure Information 120
รูปที่ 6.11 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Conductive Electric Services Line 120
รูปที่ 6.12 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Indirect Warning 121
รูปที่ 6.13 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Protection Systems 121
รูปที่ 6.14 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Loss 122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.15 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Cost 122
รูปที่ 6.16 ส่วนของหน้าต่างที่แสดงผลลัพธ์ทางการคำนวณ 123
รูปที่ 6.17 ผลลัพธ์จากการคำนวณโดยใช้การป้องกันระดับ4 124
รูปที่ 6.18 ระดับการติดตั้ง และมูลค่าในการติดตั้งมีผลโดยตรงต่อค่าที่ยอมรับได้ 124
รูปที่ 6.19 เปลี่ยนระดับการป้องกัน และมูลค่าการติดตั้งระบบป้องกัน 125

รูปที่ 7.1 แผนภาพแนวคิดและวิธีการในการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ 126
รูปที่ 7.2 หน้าต่างและรูปร่างหน้าตาโปรแกรม SolidWork 127
รูปที่ 7.3 หน้าต่างและรูปร่างหน้าตาโปรแกรม AutoCAD 127
รูปที่ 7.4 หน้าต่างและรูปร่างหน้าตาโปรแกรม COMSOL 128
รูปที่ 7.5 แผ่นอิเล็กโตรดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ความหนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรม Solid Work 129
รูปที่ 7.6 รูปแบบหน้าต่างการเลือกใช้งานของโปรแกรม COMSOL Version 3.5 129
รูปที่ 7.7 การนำแบบจำลองที่วาดเข้ามาในโปรแกรม COMSOL 130
รูปที่ 7.8 การกำหนดค่าต่างๆ ใน Boundary settings และ Subdomain settings ในโปรแกรม COMSOL 131
รูปที่ 7.9 การสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการประมวลผลโดยโปรแกรม COMSOL 132
รูปที่ 7.10 กำหนดรูปแบบการประมวลที่ต้องการในโปรแกรม COMSOL 132
รูปที่ 7.11 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดขนาด 2.4 เมตร หนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรม COMSOL Version 3.5 ในการวิเคราะห์ 133
รูปที่ 7.12 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดขนาด 1.2 เมตร หนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรม COMSOL Version 3.5 ในการวิเคราะห์ 133
รูปที่ 7.13 การออกแบบและวาดแบบจำลองด้วยโปรแกรม SolidWork 134
รูปที่ 7. 14 การออกแบบและวาดแบบจำลองด้วยโปรแกรม SolidWork 135
รูปที่ 7.15 เลือกรูปแบบการจำลองสภาพทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL 135
รูปที่ 7.16 Import File เข้าสู่โปรแกรม COMSOL 136
รูปที่ 7.17 การตั้งค่าไฟล์ที่ทำการ Import เข้ามา 136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.18 การตั้งสเกลขนาดของแบบจำลอง 136
รูปที่ 7.19 การกำหนด Boundary Conditions 137
รูปที่ 7. 20 การกำหนด Subdomain Setting 137
รูปที่ 7.21 ความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร... 139
รูปที่ 7.22 ความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร... 139
รูปที่ 7. 23 ความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร 139
รูปที่ 7.24 ศักย์ของสนามไฟฟ้าโดยแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร 140
รูปที่ 7.25 ศักย์ของสนามไฟฟ้าโดยแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร 140
รูปที่ 7.26 ศักย์ของสนามไฟฟ้าโดยแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร 140
รูปที่ 7.27 เส้นทางเดินสนามไฟฟ้าแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร... 141
รูปที่ 7. 28 เส้นทางเดินสนามไฟฟ้าแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร. 141
รูปที่ 7.29 เส้นทางเดินสนามไฟฟ้าแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร.... 141

รูปที่ 8.1 การจำลองสภาพทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL 143
รูปที่ 8.2 โครงสร้างชุดสอบตัวนำล่อฟ้า 144
รูปที่ 8.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ 144
รูปที่ 8. 4 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกันที่ใช้ในการทดสอบ 145
รูปที่ 8.5 การทดสอบหาจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ 146
รูปที่ 8.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m 149
รูปที่ 8.7 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเมื่อแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m 150
รูปที่ 8.8 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเมื่อแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m 151
รูปที่ 8.9 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m. 151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 8. 10 แท่งตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่างๆ 152
รูปที่ 8. 11 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยระหว่างแผ่นอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m. 155
รูปที่ 8.12 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเมื่อแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m 156
รูปที่ 8.13 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m. 157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ที่มาของความเสียหาย ประเภทของความเสียหายและความสูญเสีย แต่ละจุดที่ถูกจากฟ้าผ่า 32
ตารางที่ 3.2 ความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างของแต่ละประเภทของของความเสียหายและ ความสูญเสีย 32
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบความเสี่ยงที่พิจารณาสำหรับแต่ละประเภทของความสูญเสีย ในสิ่งปลูกสร้าง 36
ตารางที่ 3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้าง 37
ตารางที่ 3.5 ค่าความสูญเสียที่ยอมรับได้ R_T 39
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้าง 45
ตารางที่ 3.7 องค์ประกอบความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างสำหรับแต่ละประเภทของความเสียหาย ที่มาจากแต่ละที่มาของความเสียหาย 46

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสสูงสุด (เพื่อประสิทธิภาพการปรับขนาด) สำหรับระดับการป้องกัน ตั้งแต่ I ถึง IV และความน่าจะเป็น 50
ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสต่ำสุด (เพื่อประสิทธิภาพการปรับขนาด) สำหรับระดับการป้องกัน ตั้งแต่ I ถึง IV และความน่าจะเป็น 50
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการป้องกันฟ้าผ่า (LPL) และประเภทของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า (LPS) 52
ตารางที่ 4.4 ค่าสูงสุดของรัศมีทรงกลมกลิ้ง ขนาดของตาข่ายและมุมป้องกันที่สอดคล้องกับ ระดับป้องกันฟ้าผ่า 53
ตารางที่ 4.5 ความหนาน้อยสุดของแผ่นโลหะหรือท่อโลหะของระบบตัวนำล่อฟ้า 66
ตารางที่ 4.6 ค่าทั่วไปของระยะห่างระหว่างตัวนำลงดินและระหว่างตัวนำแบบวงแหวน แต่ละระดับการป้องกันฟ้าผ่า 70
ตารางที่ 4.7 วัสดุ รูปทรงและขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำล่อฟ้า, แท่งตัวนำล่อฟ้าและ ตัวนำลงดิน 79
ตารางที่ 4.8 วัสดุ, รูปทรงและขนาดน้อยสุดของรากสายดิน 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.9 ขนาดของตัวนำน้อยสุดที่ต่อกับแท่งตัวนำต่อประสานแบบต่างๆหรือที่ต่อเข้ากับแท่งตัวนำต่อ ประสานกับระบบรากสายดิน 82
ตารางที่ 4.10 ขนาดของตัวนำน้อยสุดที่ต่อเข้ากับการติดตั้งโลหะภายในเข้ากับแท่งตัวนำต่อประสาน 82
ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์ k_i ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ 84
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ k_c ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ 84
ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์ k_m ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ 85

ตารางที่ 5.1Common minimum sizes of each electrodes of commonly use material from the point of view of corrosion and mechanical strength where embedded in the soil. 101
ตารางที่ 5.2 ขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยสุดของสายต่อหลักดินที่ฝังลงในดิน 102

ตารางที่ 8.1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm 147
ตารางที่ 8.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm 148
ตารางที่ 8.3 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm 149
ตารางที่ 8.4 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm 150
ตารางที่ 8.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm 153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 8.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mหนา 2 mm 154

ตารางที่ 8.7 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีรูปแบบต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm 155

ตารางที่ 8.8 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีรูปแบบต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm 156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันมนุษย์มีอัตราการใช้พลังงานและทรัพยากรธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการดำรงชีวิตของมนุษย์ทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide : CO_2) ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิด “สภาวะโลกร้อน” และความแปรปรวนของสภาพอากาศ เกิดภัยธรรมชาติที่สร้างความเสียหายอย่างรุนแรงที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงและยากที่จะคาดเดาได้ ซึ่งโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สร้างความเสียหายให้กับชีวิตและทรัพย์สิน นั่นก็คือ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (Lightning)

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับฟ้าผ่านี้ เนื่องจากฟ้าผ่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสสูงจึงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Wave) กระจายออกไปทำลายอุปกรณ์สื่อสาร ทำให้ระบบสื่อสารและระบบสารสนเทศเสียหายอย่างหนัก ซึ่งระบบดังกล่าวส่วนใหญ่จะมีมูลค่าสูงและมีความสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ อีกทั้งกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดินยังอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอันเนื่องมาจากแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) และแรงดันสัมผัส (Touch Voltage) และถ้าเกิดฟ้าผ่าลงสู่ระบบไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จ (Surge Voltage) แรงดันจะวิ่งไปตามสายไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความละเอียดอ่อน ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจเป็นมูลค่ามหาศาลรวม ทั้งถ้าหากความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบผลิตและระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพ (Stability) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของระบบ ร้ายแรงกว่านั้นจะส่งผลกระทบถึงความมั่นคงทางพลังงานระดับประเทศก็เป็นได้

เมื่อไม่สามารถหยุดยั้งปรากฏการณ์ธรรมชาตินี้ได้ ทำได้แต่เพียงการป้องกันอันตรายและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าได้เท่านั้น ดังนั้นเราจึงต้องมาทำการศึกษาระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง แท่งตัวนำล่อฟ้า (Arrestor Rod) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากชนิดหนึ่งเพราะจะต้องทำหน้าที่เป็นตัวรับลำฟ้าผ่าโดยตรง จึงต้องทำวิจัยเกี่ยวกับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ โดยการจำลองแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการทดลองจริงเพื่อเลือกใช้ตัวนำล่อฟ้าให้เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาสาเหตุผลกระทบและการป้องกันของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
2. เพื่อศึกษาการจำลองสภาพทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์และการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุและรูปแบบที่ต่างกัน
4. เพื่อศึกษาการออกแบบโปรแกรมประเมินความเสี่ยงตามมาตรฐาน IEC 62305-2
5. เพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าเพื่อลดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ศึกษาและรวบรวมทฤษฎีพื้นฐานในแง่ของ (1) สาเหตุ (2) ผลกระทบ และ (3) วิธีการป้องกัน จากมาตรฐานที่มีอยู่ทั้งใน (วสท.) และต่างประเทศ (IEC, IEEE, NFPA, BS) “เพื่อสร้างเป็นองค์ความรู้ในเรื่องของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าของประเทศไทย” รวมถึงการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ขายตามท้องตลาด เพื่อดูค่าความสามารถในการล่อฟ้าว่าวัสดุใดหรือตัวนำล่อฟ้ารูปแบบใดสามารถล่อฟ้าได้ดีที่สุดและออกแบบโปรแกรมประเมินความเสี่ยงในการเกิดฟ้าผ่า

1.4 แผนการดำเนินโครงงาน

1.ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทฤษฎีปรากฏการณ์ฟ้าผ่า คุณสมบัติแท่งตัวนำล่อฟ้า และการออกแบบพื้นที่การป้องกัน

2. ศึกษาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เช่น COMSOL SolidWork และ ATP Draw
3. จำลองสภาพทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ทำการออกแบบและสร้างแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์ 2.4 เมตร
5. ทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันและมีรูปแบบที่ต่างกันกับแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 เมตร
6. ออกแบบและเขียนโปรแกรมประเมินความเสี่ยงตามมาตรฐาน IEC 62305-2
7. บันทึกข้อมูลจากผลการทดสอบ
8. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ
9. สรุปผลการวิจัย
10. นำเสนอรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปี 2553							ปี 2554	
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการวิจัย									
2.ศึกษาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์									
3.จำลองสภาพทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์									
4.ออกแบบและสร้างแผ่นอิเล็กโตรด									
5.ทดสอบตัวนำล่อฟ้าและเขียนโปรแกรมประเมินความเสี่ยง									
6.เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ									
7.สรุปผลงานวิจัย และนำเสนอโครงการ									



1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้สำหรับพัฒนาขีดความสามารถในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในประเทศไทย

2. สามารถออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงอย่างง่ายเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

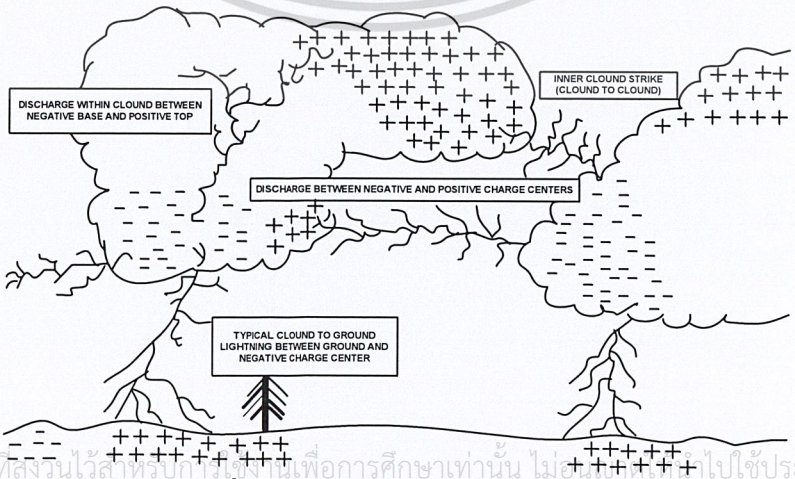
บทที่ 2
ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับฟ้าผ่า

2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า [10]

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่มีการศึกษามาแล้วตั้งแต่อดีต โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1746-1753 โดย เบนจามิน แฟรงคลิน(Benjamin Franklin) และทีมงาน ที่เมืองฟิลาเดเฟีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ค้าคว้าเกี่ยวกับประจุไฟฟ้าและได้ค้นพบฟ้าผ่าก็มีประจุไฟฟ้าเหมือนกับที่เขาได้ทดลอง และนับตั้งแต่นั้นมาก็มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับฟ้าผ่าและการค้นคว้าก็ได้พัฒนาหลักการป้องกันฟ้าผ่าด้วยเสาล่อฟ้า (Franklin Rod) ในปีค.ศ. 1753

การสะสมประจุไฟฟ้าปริมาณมากในก้อนเมฆทำให้ก่อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 10-100 MV เทียบกับพื้นดินจนเกิดการดิสชาร์จของประจุระหว่างเมฆกับพื้นดิน เป็นวาบฟ้าผ่า (Ground Flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็นฟ้าแลบ (Air Discharge) ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นได้พร้อมกัน โดยธรรมชาติปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบ การศึกษาและวิจัยของมนุษย์ส่วนมากจะให้ความสนใจเกี่ยวกับฟ้าผ่ามากกว่า

โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสมในระดับความสูง 1.5-10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก การกระจายประจุในก้อนเมฆที่ฐานจะเป็นประจุลบ ส่วนบนจะเป็นประจุบวก จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่าจะเริ่มจากกลุ่มประจุลบเพราะอยู่ใกล้กับพื้นโลกมากที่สุด เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤติประมาณ 10 kV/cm (ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลกค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ10-30 kV/cm) ก็จะเกิดไอออไนเซชันตามหลักการเกิดดิสชาร์จในก๊าซ



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า [10]

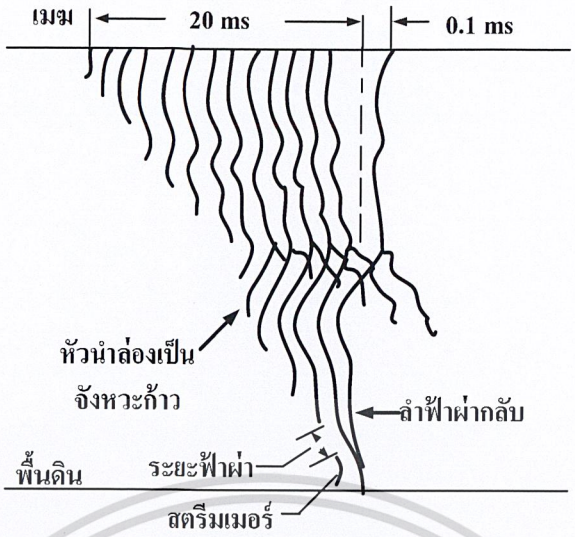
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดไอออไนเซชันของอากาศจะเป็นลีดเดอร์ (Leader) หรือหัวนำร่องที่มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในจังหวะก้าว (Step Leader) แบบสุ่ม โดยการวิจัยมีความเห็นตรงกันว่าหัวนำร่องที่เป็นจังหวะก้าวมีความร้อนสูงประมาณ 30000 K รัศมีแท่งตัวนำร่องแต่ละจังหวะประมาณ 10 – 100 เมตร โดยช่วงก้าวของส่วนบนประมาณ 50 เมตร จนใกล้กับพื้นโลกช่วงก้าวจะลดลงเหลือประมาณ 10 เมตร และเวลาระหว่างช่วงก้าวประมาณ 10 – 50 us ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าความยาวแต่ละช่วงก้าวที่เพิ่มขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของแต่ละช่วงก้าว

เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลกที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออไนซ์เป็นสตรีมเมอร์ มีความยาว 1-100 m (เฉลี่ย 50 m) วิ่งเข้าหาหัวนำร่องจนมาพบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (Main Stroke) มีแสงจ้าจากพื้นโลกวิ่งไปหาก้อนเมฆด้วยความเร็วสูงกว่าประมาณ $5x10^3$ km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรุยทางลงมา การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้า ก็คือ กระแสฟ้าผ่านั่นเอง ซึ่งการถ่ายเทประจุระหว่างพื้นโลกกับก้อนเมฆนี้เองเรียกว่า return stroke

ระยะสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์ เรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (Striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 m กระบวนการทั้งหมดนี้เป็นการอธิบายถึงการเกิดวาบฟ้าผ่าแต่ขณะที่เกิดฟ้าผ่ามักจะพบว่ามีลำฟ้าผ่าซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าครั้งแรกๆ ซึ่งบางทีก็มีการผ่าซ้ำหลายครั้ง โดยลำฟ้าผ่านี้เรียกว่า dart leader ปรากฏการณ์เช่นนี้ อาจอธิบายได้ว่าในก้อนเมฆอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง เมื่อกลุ่มประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อนก็จะดีจชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าแรก ดังที่กล่าวมาแล้ว หลังจากที่กลุ่มประจุแรกดีจชาร์จไปหมดแล้วก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิดดีจชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวลำฟ้าผ่าแรก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอากาศในแนวลำฟ้าผ่าวิ่งลงมาก่อนนั้นยังคืนสภาพฉนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากมีไอออนอยู่จึงทำให้ประจุในก้อนเมฆจากกลุ่มอื่นดีจชาร์จได้ง่ายตามแนวนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ช่วงเวลาการเกิดวาบฟ้าผ่าซึ่งถูกบันทึกโดย streak camera [10]

2.2 ประเภทและคุณลักษณะของการเกิดฟ้าผ่า [10]

2.2.1 ฟ้าผ่าลง – ฟ้าผ่าขึ้น

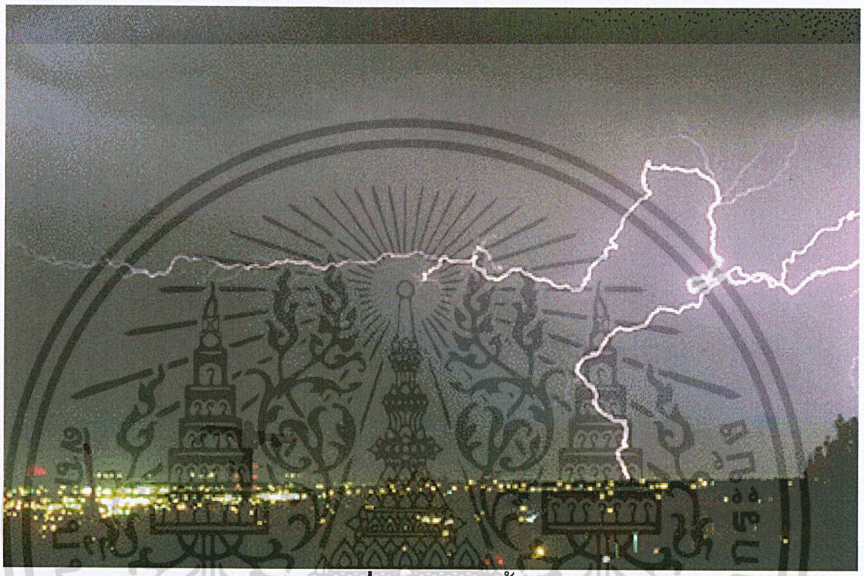
ปรากฏการณ์ที่ประจุในก้อนเมฆดีจชาร์จลงสู่พื้นโลกลงตามกระบวนการที่กล่าวข้างต้น เรียกฟ้าผ่าลง การเกิดฟ้าผ่ามีกระบวนการเป็นไปในช่วงระยะเวลาอันสั้นและรวดเร็ว ไม่อาจสังเกตุเห็นขั้นตอนได้ ตาอาจสังเกตดูจากลำฟ้าผ่า ถ้าเป็นฟ้าผ่าลงจะมีลักษณะเป็นลักษณะแขนงแตกจากลำฟ้าผ่ากระจายลงสู่พื้นโลก มีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ ทั้งนี้เนื่องจากหัวนำร่องกรุยทางลงมานั้นคืบหน้าลงมาหลายๆทาง แล้วแต่ว่าทางใดจะขยายตัวได้เร็วกว่า



รูปที่ 2.3 ฟ้าผ่าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าผ่าอาจจะเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆก็ได้ เรียกว่า ฟ้าผ่าขึ้น คือหัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจากวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างสูงๆ ในพื้นที่ราบจะเริ่มจากยอดโครงสร้างที่สูงจากพื้นดินที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป เช่น ยอดเสาส่งสัญญาณทีวี หรือหอคอยสูงๆ หรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูง และมีกระบวนการคืบหน้าเป็นจังหวะก้าวของหัวนำร่อง ในทิศทางขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ ทำนองเดียวกับหัวนำร่องที่เริ่มก่อตัวจากก้อยเมฆแล้ววิ่งลงสู่พื้นโลกของฟ้าผ่าลง จากการสังเกตจะพบว่ามักเป็นผลสืบเนื่องจากฟ้าผ่าลง



รูปที่ 2.4 ฟ้าผ่าขึ้น

2.2.2 ขั้วและรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

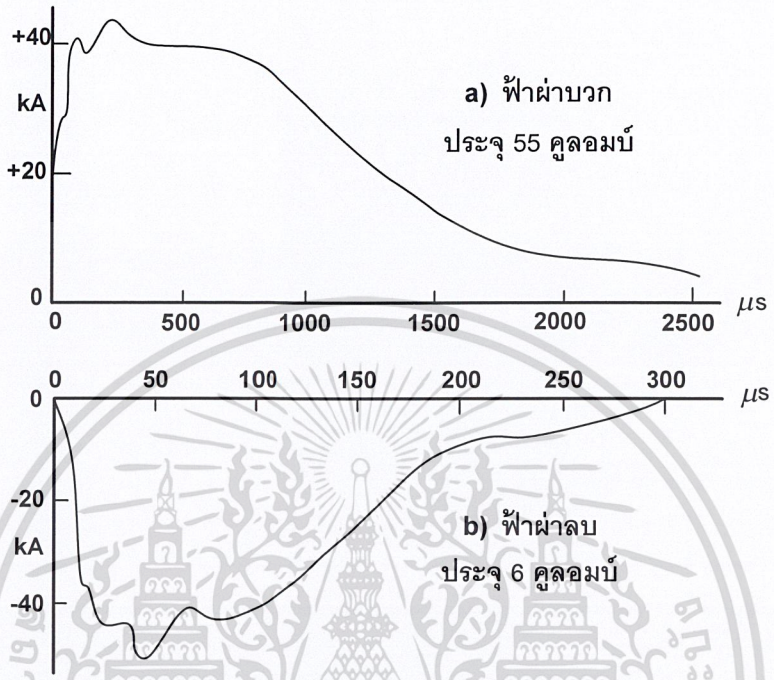
ลำฟ้าผ่าที่นำประจุลบจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลกเรียกว่า ฟ้าผ่าลบ ถ้าลำฟ้าผ่านำประจุบวกลงมาเรียกว่า ฟ้าผ่าบวก จากข้อมูลที่บันทึกได้ในต่างประเทศพบว่า ประมาณ 80 – 85% เป็นฟ้าผ่าลบ และฟ้าผ่าลบมักเป็นฟ้าผ่าซ้ำหลายครั้ง ส่วนฟ้าผ่าบวกมักเป็นลำฟ้าผ่าเดี่ยว

ลักษณะรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าอาจกำหนดได้เวลาช่วงหน้าคลื่น และช่วงเวลาหางคลื่น เวลาช่วงหน้าคลื่นหมายถึง เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น หมายถึง เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ลักษณะสำคัญของช่วงหน้าคลื่น คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส เรียกว่า ความชัน (di/dt) เป็นกิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที (kA/μ s) ซึ่งมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำคือ $\Delta U = Ldi/dt$ เป็นสิ่งที่จำเป็นที่ต้องคำนึงในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวกและลบดังแสดงดังรูปที่ 2.5

ข้อสังเกตในรูปที่ 2.5 จำนวนประจุไฟฟ้าบวกจะมีมากกว่าประจุฟ้าผ่าลบถึง 9 เท่าและเวลาของรูปคลื่นก็ยาวกว่ามากถึง 9 เท่าเช่นกัน เหตุผลอาจอธิบายได้ด้วยการกระจายของประจุจะเห็นว่ากลุ่มของประจุบวกจะอยู่ที่ส่วนบนของก้อนเมฆ ซึ่งอยู่สูงจากพื้นโลกเป็นระยะทางที่ไกลกว่าประจุลบ ที่กระจายอยู่ที่ฐานของก้อนเมฆใกล้กับพื้นโลก ประจุบวกที่อยู่ห่างจากพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก จึงต้องสะสมประจุให้มีจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดเบรคดาวน์ลงมายังพื้นโลกได้ ซึ่งเป็นไปตามหลักการดีจชาร์จของก๊าซ ค่าของฟ้าผ่าบวกจะเป็นข้อมูลที่นำไปใช้ในการกำหนดมิติต่างๆของการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า [10]

2.2.3 ขนาดกระแสฟ้าผ่า

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าหมายถึง ค่ายอดของกระแสรูปคลื่นฟ้าผ่า ขนาดของกระแสฟ้าผ่าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณประจุที่ดีจชาร์จ ขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง จากการบันทึกของ Berger พบว่ากระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงขึ้นถึง 90 กิโลแอมป์ และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมป์

2.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่า [1]

ผลจากฟ้าผ่าก่อให้เกิดความเสียหายหรืออันตรายเป็นผลเนื่องมาจากกระแสฟ้าผ่าโดยแยกออกเป็น 3 ประเภทคือ

2.3.1 ความเสียหายเนื่องจากผลของความร้อน

2.3.1.1 ความร้อนเชิงต้านทาน

ผลทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระแสฟ้าผ่า เกิดจากความร้อนเชิงความต้านทาน ที่เกิดจากการไหลวนของกระเสไฟฟ้าผ่านความต้านทานของอาร์ก บริเวณที่อาร์กเกาะอยู่เชื่อมต่อและส่วนกั้นแยกอื่นๆ ความร้อนเชิงต้านทานที่เกิดขึ้นในองค์ประกอบใดๆของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งเป็นทางเดินหลักของกระแสฟ้าผ่า พื้นที่หน้าตัดขั้นต่ำของตัวนำมีขนาดเพียงพอที่ไม่ทำให้เกิดความร้อนเกินกับตัวนำจนเป็นเหตุให้เกิดการลุกไหม้สิ่งแวดล้อม นอกจากผลทางความร้อนแล้วยังต้องคำนึงถึงเกณฑ์ความทนทางกลและทนทาน

โดยเฉพาะส่วนที่เปิดโล่งต่อสภาพบรรยากาศ หรือการกัดกร่อน การประเมินค่าความร้อนเนื่องจากการไหลของกระแสเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของบุคคลและความเสียหายจากเพลิงไหม้หรือการระเบิดโดยกำลังงานขณะหนึ่งที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความร้อนในตัวนำ เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าดังสมการ

$$p(t) = i^2 R \tag{2.1}$$

พลังงานความร้อนที่เกิดจากอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งหมดสามารถหาได้จากผลคูณของความต้านทานของทางเดินฟ้าผ่า ในองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่พิจารณากับพลังงานจำเพาะของอิมพัลส์ฟ้าผ่า พลังงานจะมีหน่วยเป็นจูลส์ (J) หรือวัตต์ – วินาที (W.s)

2.3.1.2 ความร้อนที่จุดที่อาร์คเกาะอยู่เชื่อมต่อ

ความเสียหายทางความร้อนที่จุดที่อาร์คเกาะอยู่เชื่อมต่อสามารถพบได้ทุกองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าซึ่งเป็นจุดที่อาร์คเช่น ตัวนำล่อฟ้า ช่องประกาย เป็นต้น

การหลอมเหลวและการสึกกร่อนของวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้ที่จุดอาร์คเกาะอยู่เชื่อมต่อในบริเวณจุดกำเนิดอาร์คและจะมีความร้อนของวัสดุสามารถเกิดจากจุดกำเนิดอาร์คเช่นเดียวกับความร้อนเชิงความต้านทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสที่มีความหนาแน่นสูง พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนที่ผิวของโลหะหรือบริเวณใกล้เคียง ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณที่จุดกำเนิดอาร์ค จะมีปริมาณมากเกินกว่าที่จะดูดซับไว้ภายในโลหะด้วยการนำความร้อนและพลังงานส่วนเกินจะถูกแผ่รังสีออกไปหรือสูญเสียไปในการหลอมเหลวหรือระเหยเป็นไอของโลหะ ความรุนแรงของกระบวนการขึ้นอยู่กับขนาดกระแสและระยะเวลา การพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีหลายแบบเพื่อใช้ในการคำนวณผลทางความร้อนต่อผิวโลหะ ณ จุดที่ลำฟ้าผ่าเกาะอยู่เพื่อความง่ายต่อการคำนวณ มาตรฐานนี้จะใช้แบบจะลองแรงดันตกคร่อมอาโนดหรือคาโทดดังสมการที่ (2.2) แบบจำลองดังกล่าวใช้ได้ผลดีโดยเฉพาะกับผิวโลหะบาง ในทุกกรณีผลที่ได้จะค่อนข้างมากกว่าความเป็นจริง เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสมมติว่าพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จุดที่ช่องลำฟ้าผ่าเกาะอยู่ใช้ไปในการหลอมเหลว หรือทำให้วัสดุตัวนำระเหยกลายเป็นไอ โดยไม่คำนึงถึงความร้อนที่แพร่เข้าไปในโลหะ แบบจำลองอื่นๆมีการคำนึงถึงผลสียหายที่จุดที่ช่องลำฟ้าผ่าเกาะอยู่ที่ขึ้นอยู่กับเวลาของอิมพัลส์กระแสด้วย พลังงานที่จุดกำเนิดอาร์กให้มีค่าเท่ากับ ผลคูณระหว่างแรงดันตกคร่อมอาโนดและคาโทด $u_{a,c}$ กับประจุ Q ของกระแสฟ้าผ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \int u_{a,c} i dt = u_{a,c} \int i dt = u_{a,c} Q \tag{2.2}$$

2.3.2 ผลทางกล

เมื่อมีกระแสไหลในวงจรขนาดของแรงดันไฟฟ้าพลวัต ณ จุดต่างๆในวงจร ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าและรูปแบบเรขาคณิตของวงจร ผลทางกลที่เกิดจากแรงดังกล่าวนอกจากขึ้นอยู่กับขนาด แล้วยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของกระแสช่วงเวลาของกระแสและรูปแบบทางเรขาคณิตของการติดตั้ง แรงทางไฟฟ้าพลวัตที่เกิดจากกระแสไหลในตัวนำซึ่งมีส่วนที่ขนานกันยาว l และมีระยะห่างกัน d ดังรูปที่ 2.6 สามารถคำนวณค่าโดยประมาณโดยใช้สมการที่ 2.3

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} = 2 \times 10^{-7} i^2(t) \frac{l}{d} \tag{2.3}$$

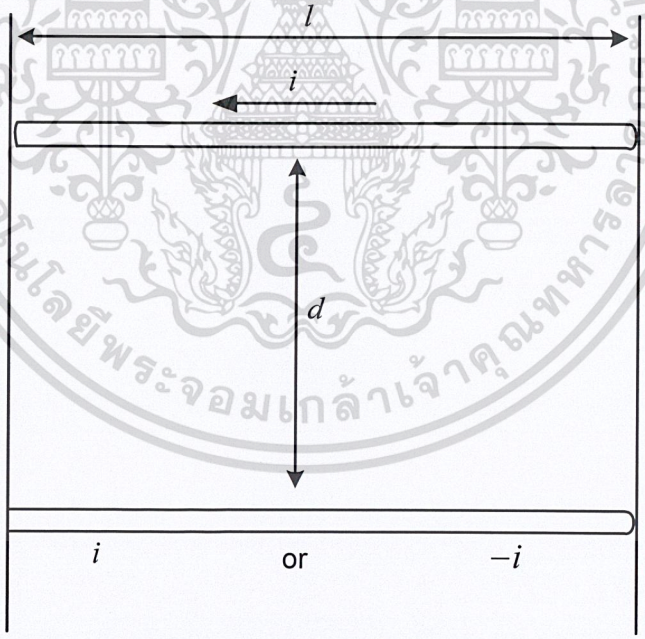
เมื่อ $F(t)$ คือ แรงทางไฟฟ้าพลวัตมีหน่วยเป็นนิวตัน

i คือ กระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

l คือ ความยาวของตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร

d คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำช่วงที่ขนานกันมีหน่วยเป็นเมตร



รูปที่ 2.6 การจัดวางทั่วไปของตัวนำ 2 ตัวเพื่อที่จะคำนวณแรงไฟฟ้าพลวัต [1]

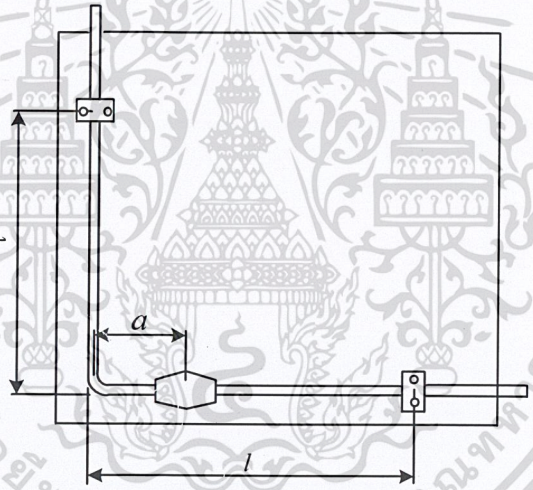
ผลที่เกิดขึ้นทางกลจะมีสาเหตุมาจากกระแสฟ้าผ่าจะขึ้นอยู่กับขนาดและระยะเวลาของกระแส พอๆกลับคุณลักษณะความยืดหยุ่นที่มีผลทางกลต่อสิ่งก่อสร้าง เช่นเดียวกันผลที่เกิดขึ้นทางกลจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานที่กระทำอยู่กับระหว่างส่วนต่างๆของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เชื่อมต่ออยู่กับสิ่งอื่น เมื่อเกี่ยวข้องกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

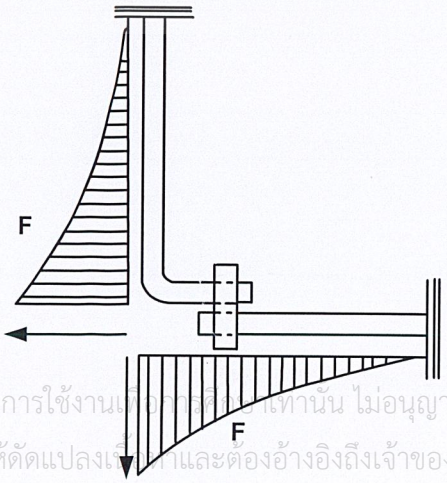
2.3.2.1 ผลกระทบทางแม่เหล็ก

แรงแม่เหล็กที่ปรากฏระหว่างตัวนำสองตัวที่มีกระแสหรือตัวนำตัวเดียวที่มีกระแสไหลอยู่ ขอบของมุมหรือวงรอบ เมื่อกระแสไหลอยู่ในวงจร ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของวงจรจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าและรูปทรงของวงจร ผลที่เกิดขึ้นทางกลของแรงเหล่านี้ไม่ว่าอย่างไรก็ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดเพียงอย่างเดียวแต่จะขึ้นอยู่กับรูปร่างทั่วไประยะเวลาของกระแสด้วย เช่นเดียวกับลักษณะรูปทรงของสิ่งที่ต้องติดตั้งด้วย

ใน LPS ตัวอย่างเบื้องต้นจะแสดงโดยตัวนำเข้ามุมที่มีขนาดเท่ากัน ลักษณะของมุมเป็น 90 องศา ยึดด้วยตัวยึด (clamp) ที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับมุมแสดงในรูป 2.7 ไดอะแกรมของความเค้นของรูปร่างนี้จะแสดงในรูปที่ 2.8 แรงในแนวแกนระนาบของตัวนำมีแนวโน้มที่จะดึงตัวนำออกจากตัวยึด ค่าเชิงตัวเลขของแรงตามแนวระนาบของตัวนำจะพิจารณาที่ค่ายอดของกระแสเท่ากับ 100 kA และความยาวของตัวนำในแนวตั้งจะเท่ากับ 0.5 เมตร ดังแสดงในรูป 2.9

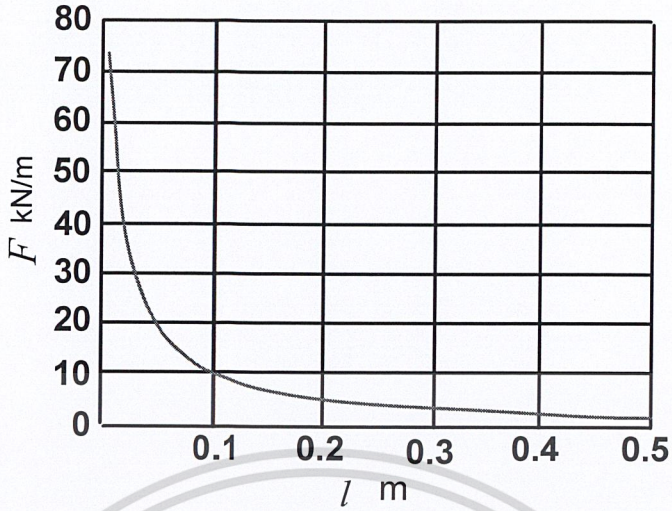


รูปที่ 2.7 ประเภทการวางตัวนำในระบบป้องกันฟ้าผ่า [1]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมของความเค้นสำหรับโครงร่างรูปที่ 2.7 [1]



รูปที่ 2.9 แรงต่อหน่วยความยาวในแนวระนาบของตัวนำของรูปที่ 2.8 [1]

ในพจน์ของขนาดของกระแสที่ใช้ค่าชั่วครู่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า F(t) เป็นสัดส่วนของค่ากระแสชั่วครู่ยกกำลังสอง $i^2(t)$ ในพจน์ของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ LPS ทางกล ซึ่งแสดงอยู่ในรูปผลคูณของ elastic deformation $\delta(t)$ และค่าคงที่ของความยืดหยุ่น k ของโครงสร้างของระบบป้องกัน ผลของตัวแปรทั้งสองควรที่จะนำมาพิจารณาความถี่ธรรมชาติเชิงกล (เชื่อมโยงกันโดยคุณสมบัติความยืดหยุ่นของโครงสร้างของ LPS) และการผิดรูปถาวรของโครงสร้างของ LPS (เชื่อมโยงกันด้วยคุณลักษณะของพลาสติก) เป็นตัวแปรที่สำคัญ นอกจากนั้นในหลาย ๆกรณีผลของความเสียดทานในโครงสร้างก็ยังเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นกัน

ขนาดการสั่นสะเทือนแบบยืดหยุ่นซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระแสฟ้าผ่า สามารถประมาณโดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับสอง ตัวแปรที่สำคัญคืออัตราส่วนระหว่างช่วงระยะเวลาของกระแสกระตุ้นและช่วงเวลาของการแกว่งโดยธรรมชาติทางกลของโครงสร้าง LPS โดยปกติเงื่อนไขของการเผชิญหน้าในการใช้งาน LPS จะประกอบด้วยช่วงเวลาของการแกว่งโดยธรรมชาติของสิ่งก่อสร้างต้องมีความยาวมากกว่าแรงที่นำไปใช้งาน (ระยะเวลาของการกระตุ้นด้วยกระแสฟ้าผ่า) ในกรณีความเค้นทางกลที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นหลังจากสิ้นสุดลงของกระแสกระตุ้น และมีค่ายอดที่คงเหลืออยู่น้อยกว่าแรงที่นำไปใช้ ในกรณีส่วนใหญ่ความเค้นสูงสุดทางกลจะสามารถละเลยได้

การทำให้พลาสติกผิดรูปจะเกิดขึ้นได้เมื่อความเค้นยืดได้ของวัตถุเกินกว่าค่าจำกัดของการยืดหยุ่นของวัสดุ ถ้าวัสดุประกอบด้วยโครงสร้างของ LPS ที่มีลักษณะเบา ตัวอย่างเช่น อลูมิเนียมและทองแดงหล่อเย็น แรงเคลื่อนไฟฟ้า จะสามารถเปลี่ยนรูปของตัวนำในมุมและวงรอบได้ องค์ประกอบของ LPS ควรที่จะออกแบบมาใช้ให้ทนทานกับแรงเหล่านี้ได้และจะต้องแสดงคุณลักษณะที่สำคัญคือความยืดหยุ่นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดทางกลทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ LPS จะขึ้นอยู่กับการอินติเกรทเทียบกับเวลาของแรงที่ใช้งาน ดังนั้นค่าพลังงานเฉพาะจะเชื่อมโยงกับกระแสกระตุ้นและขึ้นกับรูปคลื่นของกระแสกระตุ้น และช่วงระยะเวลาของมัน (เปรียบเทียบกับคาบเวลาการแกว่งโดยธรรมชาติของสิ่งก่อสร้าง) ตัวแปรที่มีผลทั้งหมดเหล่านี้จะต้องถูกคำนึงถึงในขณะที่ทำการทดลอง

2.3.2.2 ความเสียหายจากคลื่นกระแทกเสียง

เมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลในการเกิดอาร์กคลื่นกระแทกเสียงจะถูกสร้างขึ้น ความรุนแรงของคลื่นกระแทกจะขึ้นอยู่กับค่ายอดของกระแสและอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส โดยทั่วไปความเสียหายจากคลื่นกระแทกเสียงจะไม่สำคัญในส่วนของโลหะของ LPS แต่สามารถสร้างความเสียหายต่อสิ่งของที่อยู่รอบๆได้

2.3.2.3 ผลที่เกิดร่วม

ในทางปฏิบัติผลทั้งสองคือผลทางความร้อนและผลทางกลที่เกิดขึ้นโดยพร้อมกัน ถ้าความร้อนของวัสดุขององค์ประกอบ (แท่งโลหะ,เครื่องมือยึดและอื่นๆ) มีค่าเพียงพอที่จะทำให้วัสดุอ่อนตัวลง ความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าอย่างอื่น ในกรณีที่ร้ายแรงมากๆ ตัวนำที่ต่อเข้าด้วยกันอาจจะระเบิดและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างรอบๆ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของโลหะมีค่าที่เพียงพอที่จะดูแลความปลอดภัยของเหตุการณ์ทั้งหมด เฉพาะความสำคัญทางกลเท่านั้นจะต้องถูกตรวจสอบ

2.3.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่าสามารถสร้างความเสียหายและอันตรายให้แก่มนุษย์ไม่ว่าโดยตรงหรือทางอ้อมดังนี้

2.3.3.1 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า EMI

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่าก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ถ้าแรงดันสูงพอก็อาจเกิดสปาร์คได้

2.3.3.2 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าผ่าจะสิ่งที่อยู่เด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่นหรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่าหรือคนที่ยืนอยู่ในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสเป็นไปได้มากถ้าหากไปยืนเด่นในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเลหรือสันทางผ่านของกระแสไฟฟ้าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่ที่โคนต้นไม้สูงเด่น หรือต้นเดียวกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงมาต้นไม้ลงสู่พื้นดินทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอจึงเกิดการสปาร์คผ่านอากาศเข้าหาคนได้

2.3.3.3 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรงย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินเกิดขึ้นบนสายส่ง คือ ลำฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นตัวต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า I วิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพิแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจรวิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ผ่าลง เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออยู่เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

สายดินที่ขึงเหนือสายส่งกำลังทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังโดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าหากตัวนำลงดินหรือเสาไฟฟ้าที่มีค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง ย่อมให้เกิดแรงดันเกินและอาจมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดแรงดันเกิน และอาจมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวบนพวกลูกถ้วยฉนวน

2.3.3.4 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ นอกเหนือจากถูกฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังอาจได้รับอันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้องจะต้องคำนึงการป้องกันอันตรายจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์

เมื่อกระแสไหลลงสู่ดินแผ่กระจายออกไปในดินซึ่งมีความต้านทาน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดนั้นมีระยะห่างเท่ากับช่วงก้าวของคนเกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร เหนือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์เรียกว่า แรงดันช่วงก้าว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือโครงสร้างที่กระแสไหลลงสู่รากสายดินที่คนมีโอกาสสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่

2.4 ทฤษฎีและหลักการของสนามไฟฟ้า [10]

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าเกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆกัน ในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน สนามไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าเป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องและปลอดภัย

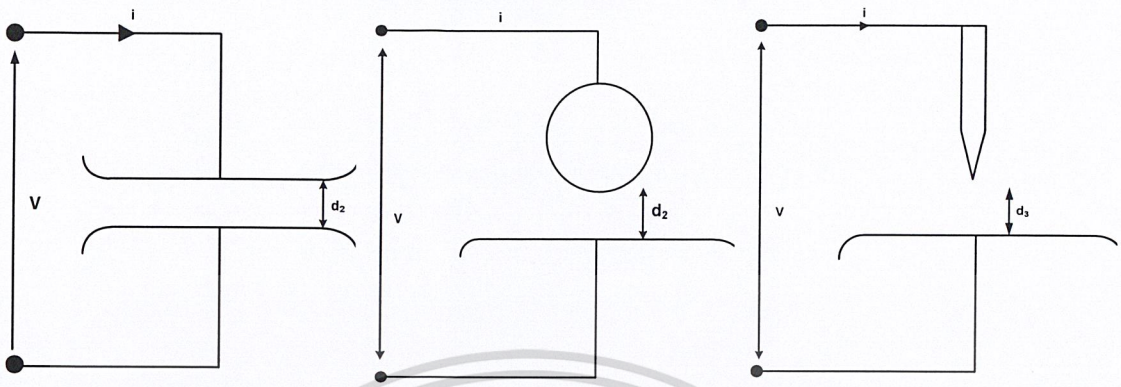
การศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
2) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

สนามไฟฟ้าจะเป็นแบบไหนนั้นขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรดดังรูปที่



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.10 อิเล็โตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่าง ๆ [10]

(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

(ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)

(ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

ซึ่งการศึกษาสนามไฟฟ้านั้น สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกดาวน์หรือสปาร์กทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้านะหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform Field) อิเล็กโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างของ ณ จุดต่าง ๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการที่

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \tag{2.4}$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \ , \ 0 \le \eta^* \le 1 \tag{2.5}$$

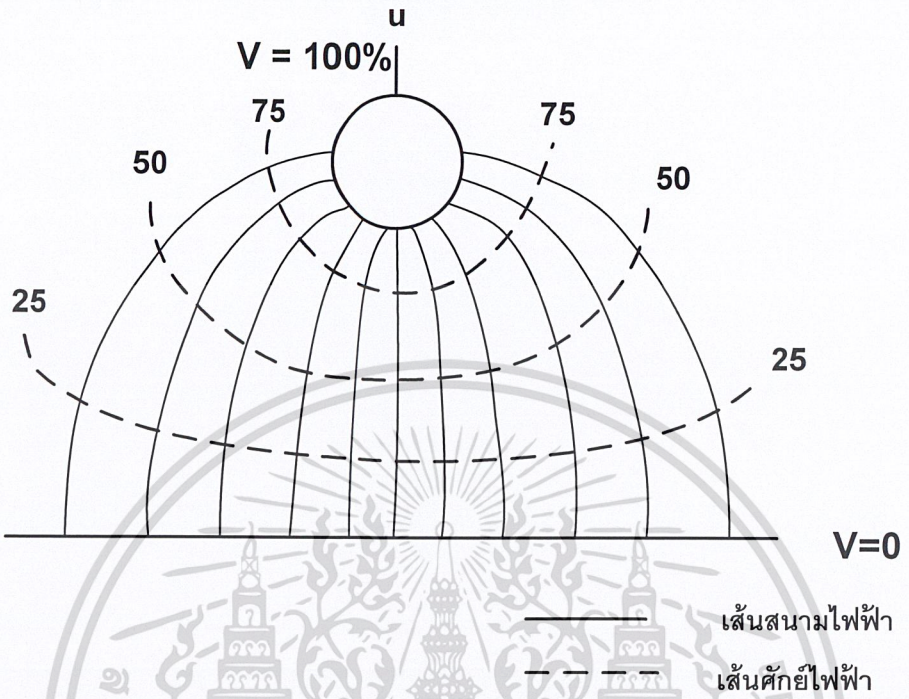
โดยที่ E_{av} คือ ค่าลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*} \qquad (2.5)$$



รูปที่ 2.11 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า [10]

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ดรรชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยสนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ดังสมการที่ (2.5)

สมการที่ (2.5) นี้ใช้เฉพาะในกรณีที่อิเล็กโตรดมีความไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนาหรือพรีดีสชาร์จ (Predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ (สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย) กล่าวคือ ก่อนการเกิดเบรกดาวน์จะมีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรด และลักษณะสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดการเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่งคือค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต E_b

ในกรณีที่อิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงจะอยู่บริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้ผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.12 อิเล็กโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตามก็จะไม่เกิดการเบรกดาวน์ แต่จะเกิดโคโรนาบริเวณใกล้ๆผิวอิเล็กโตรดคือ บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่า ดีสชาร์จบางส่วน (Partial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์เรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) หรือ กระแสดีสชาร์จ การเกิดโคโรนาจึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไปเพราะมีประจุค้าง (Space Charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของการฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ (2.5) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (2.5) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \tag{2.6}$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage)

โดยที่ E_i และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการที่ (2.6) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโตรด (Free of Space Charge) หรือกล่าวง่ายๆก็คือ สมการที่ (2.6) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage *,Threshold voltage,Inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโตรดอาจจะเป็นเบรกดาวน์ (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

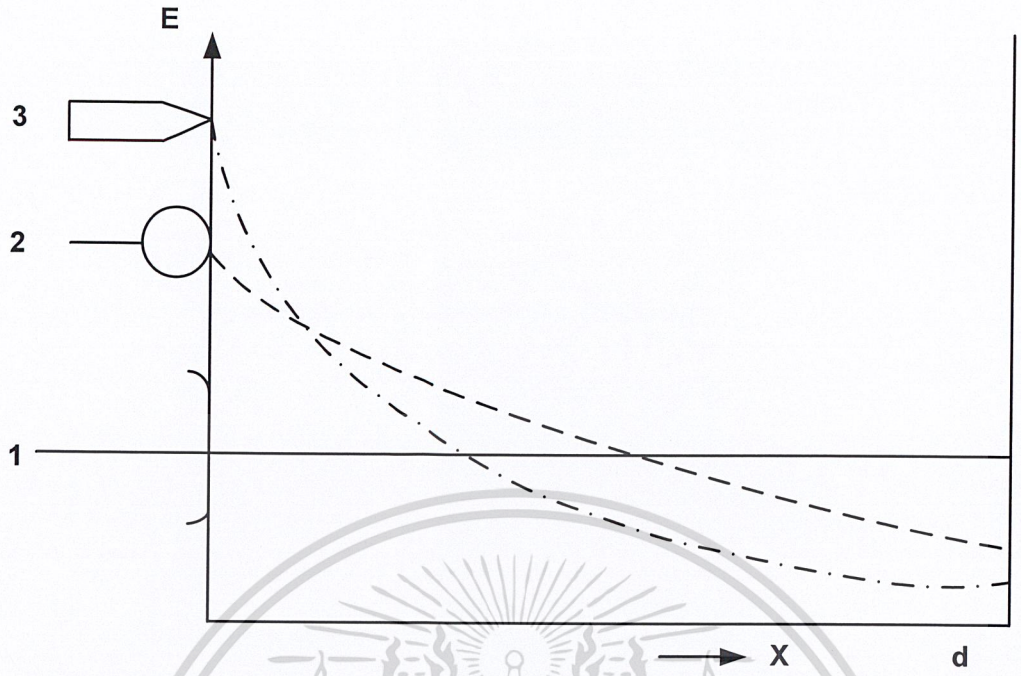
$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \tag{2.7}$$

เมื่อ U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่าU_i คือ U_bและ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโตรดของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้นหรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด, รัศมีความโค้งของ อิเล็กโตรด, ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
119429



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ [10]

เมื่อ 1 คือ แบบ Plane – Plane Electrodes สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ, $\eta^* = 1$

2 คือ แบบ Sphere – Plane Electrodes สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ,

$0.4 < \eta^* \leq 0.8$

3 คือ แบบ Rod – Plane Electrodes สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง , $0.1 < \eta^* \leq 0.3$

2.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ [10]

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซคือ การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าเป็นช่วงต่อระหว่างสถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ไปสู่สถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ช่วงต่อดังกล่าว เกิดขึ้นได้เมื่อแกปมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในอะวาลานซ์มากพอจนทำให้แกปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทังตัวเองอยู่ได้กระแสที่เพิ่มขึ้น หมายถึง จำนวนอนุภาคประจุ คืออิเล็กตรอนและไอออนมีจำนวนมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งในปัจจุบันมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาคประจุถึงค่าวิฤต หรือกลไกการเกิดเบรกดาวน์มีอยู่ 2 ทฤษฎีคือ

- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์
- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

2.5.1 ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์

ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ เบรกดาวน์ในก๊าซเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแกประหว่างอิเล็กโตรด กระบวนการเพิ่มทวีคูณของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนเกิดจากไอออนไนเซชั่นกระบวนการขั้นต้น (Primary or α process) และไอออนไนเซชั่นกระบวนการขั้นสอง (Secondary process) ประกอบด้วยไอออไนเซชั่นโดยไอออนบวกชนโมเลกุลของก๊าซ (β - process) แต่กระบวนการนี้ไม่มีความหมายในการทำให้เกิดเบรกดาวน์ กระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อกลไกการเกิดเบรกดาวน์คือ กระบวนการ γ (γ - process) เป็นกระบวนการที่เพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากคาโทด ซึ่งกระบวนการทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กระบวนการขั้นต้น (α process)

จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์ในแกปที่ระยะ X จากคาโทดตามสมการที่ (2.8)

$$N_X = N_0 \cdot e^{\alpha x} \tag{2.8}$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคาโทดต่อวินาที

N_X คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ X จากคาโทด

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนด (x=d) ต่อวินาทีเป็น

$$N_d = N_0 \cdot e^{\alpha d} \tag{2.9}$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคาโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha x} - 1$ มีจำนวนเท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นและวิ่งมาถึงคาโทด จะเห็นได้ว่าอิเล็ดตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล จะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกจากคาโทดจำนวน N_0 ต่อวินาที ที่ได้จากการส่องรังสีเข้าไปที่คาโทด เรียกว่า การดีจชาร์จประทังตัวเองไม่ได้ เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกเสีย กระบวนการไอออไนเซชั่นก็จะหยุด จึงต้องมีกระบวนการขั้นที่สองเสริม ซึ่งสืบเนื่องมาจากกระบวนการขั้นต้น โดยไอออนบวกที่เกิดจากอิเล็กตรอนแยกตัวออกมาจากโมเลกุลที่เป็นกลาง ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงมากพอก็จะทำให้เกิดไอออนไวเซชั่นในก๊าซเรียกว่า กระบวนการ β ถ้าไอออนบวกชนะคาโทดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากคาโทดได้เรียกว่ากระบวนการ γ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นสองจึงอธิบายด้วยสัมประสิทธิ์ที่สองของทาวน์เซนด์คือ β และ γ

2) กระบวนการขั้นสองแบบ β

กระบวนการ β เป็นกระบวนการชั้นที่สองที่อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นจากไอออนบวก มีพลังงานสูงวิ่งมาชนโมเลกุล ทำให้เกิดไอออไนเซชั่นในก๊าซ แต่โดยเหตุที่กระบวนการ β มีโอกาสเกิดอิเล็กตรอนอิสระยาก กระบวนการนี้จึงไม่มีความสำคัญที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในก๊าซที่มีความดัน ฉะนั้นกระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อการสร้างอิเล็กตรอนเพื่อทำให้เกิดเบรกดาวน์จึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนคาโทด (γ)

3) กระบวนการขั้นสองแบบ γ (γ - process)

กระบวนการนี้เป็นการทำให้เกิดการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากไอออนบวกวิ่งชนะคาโทด

ถ้าให้ N_0 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคาโทดต่อวินาที

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N_0' คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองต่อวินาทีที่คาโทด

N_0'' คือ จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากคาโทดต่อวินาที

ฉะนั้น

$$N_0'' = N_0' + N_0 \tag{2.10}$$

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคาโทดจะชนไอออไนเซชั่นเท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนครั้งของการชนไอออไนเซชั่นในแกปทั้งหมดจะเป็น

$$N_0' = N_0''(e^{\alpha d} - 1) \tag{2.11}$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นสองออกจากกระบวนการขั้นสองออกจากคาโทดเป็น

$$N_0'' = \gamma N_0''(e^{\alpha d} - 1) \tag{2.12}$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชั่นที่สองของทาวน์เซนด์

ดังนั้น

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

$$N_0'' = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.13}$$

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอาโนดจึงเป็น

$$N_d = N_0'' e^{\alpha d}$$

$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.14}$$

ได้สมการของกระแสไฟฟ้าเป็น

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.15}$$

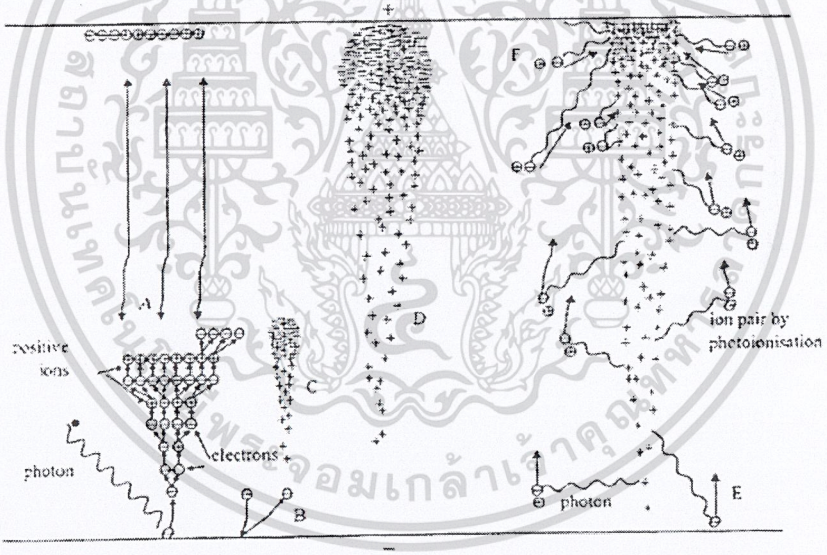
2.5.2 ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

กลไกการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานช์ (Formative time) ที่ทำให้เกิดการดีจชาร์จประทังตัวเองอยู่ได้ในก๊าซที่มีความดัน เช่น ในบรรยากาศหรือมากกว่า การเกิดเบรกดาวน์ในช่องแกปกว้างๆในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวน์ในช่วงคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped Time, T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงคาโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตาม กระบวนการของทาวน์เซนด์ที่ใช้สร้างอะวาลานช์ของอิเล็กตรอนโดยการชนแตกตัว (กระบวนการ α) แล้วปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทด (กระบวนการ γ) จะพบว่าเวลามากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลามที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากคาโทดข้ามช่องแกปไปยังอาโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุล

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้นำไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลย ก็ใช้เวลานานกว่าช่วงเวลาคลื่นตัดที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนด์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้างที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้น และอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่เกิดไอออนไนเซชั่นขึ้นได้

จากรูปที่ 2.13 เป็นกลไกการเกิดสตรีมเมอร์ เป็นผลเนื่องมาจากการวิ่งชนไอออไนเซชั่น (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์ เกิดอะวาลานซ์ขึ้น อะวาลานซ์เริ่มต้นจะมีไอออไนเซชั่นเป็นจำนวนมากจากพลังงานโฟตอน ที่เรียกว่า โฟโตไอออไนเซชั่นของก๊าซ โมเลกุลส่วนหน้าของอะวา-ลานซ์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอ-ออไนเซชั่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอกประจุค้าง การเพิ่มขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชั่นขยายตัวพิ่มขึ้น หมอกประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอาโนดกับคาโทด และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้เรียกว่า เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์



รูปที่ 2.13 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระตามกระบวนการเกิดสตรีมเมอร์ [11]

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนแปลงสถานภาพจากอิเล็กตรอนของอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ โดย Meek และ Loeb ได้เสนอเงื่อนไขการเกิด สตรีมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้น เมื่อสนามแม่ไฟฟ้าเนื่องจากประจุค้างไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าป้อนจากภายนอก ส่วน Rather เสนอเงื่อนไข การเกิดเบรกดาวน์ กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน และกำหนดว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

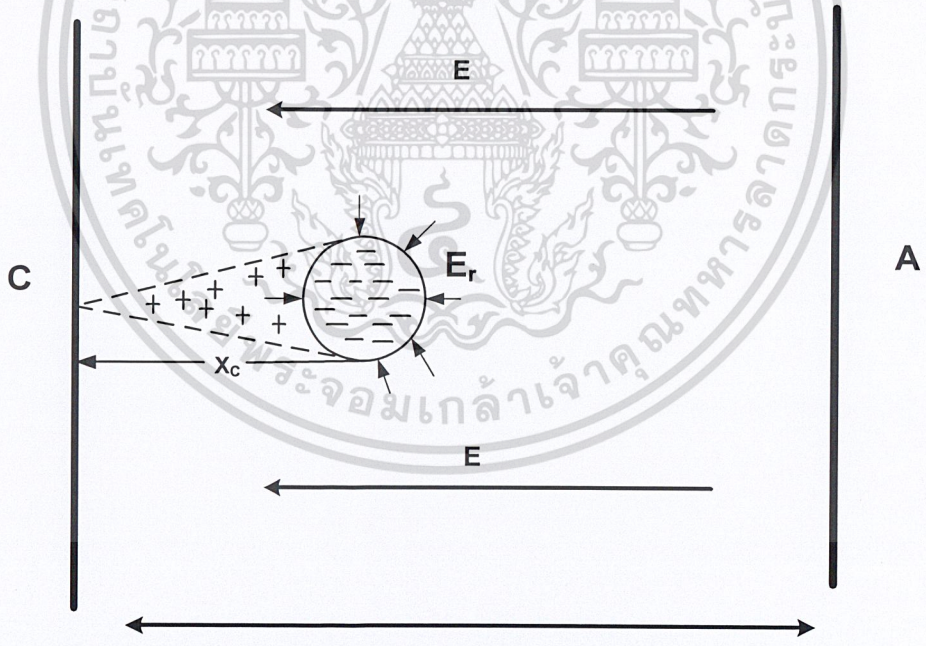
ออไนเซชั่น $e^{\alpha x}$ ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นกับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

2.5.3 การเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การพิจารณาในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดที่ระยะแกป d สตรีมเมอร์เริ่มเกิด เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่หัวอะวาลานซ์มีค่าใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากเงื่อนไขจึงสามารถหาจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤตเท่ากับ x_c ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ การเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ เมื่อ $x_c = d$ ตามเงื่อนไขเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์คือ $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ และเงื่อนไขของ Rather และ Meek สำหรับ สตรีมเมอร์เบรกดาวน์ คือ จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์วิกฤตเท่ากับ N_c ดังสมการที่ (2.16)

$$\int_0^d \alpha dx = \alpha d = \ln(\frac{1}{\gamma} + 1) = \ln N_c = K \qquad (2.16)$$

โดยค่าของ N_c จะต้องเท่ากับ 10^8 ฉะนั้น K มีค่าเท่ากับ 18 และความเครียดสนามไฟฟ้า ต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดสตรีมเมอร์



รูปที่ 2.14 ระยะวิกฤตของอะวาลานซ์อิเล็กตรอน [11]

ส่วนการเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ซึ่งจากสมการ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ โดยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเท่ากับหนึ่ง ($\eta^* = 1$) ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวน์หาได้จาก $U_b = E_b \cdot d$

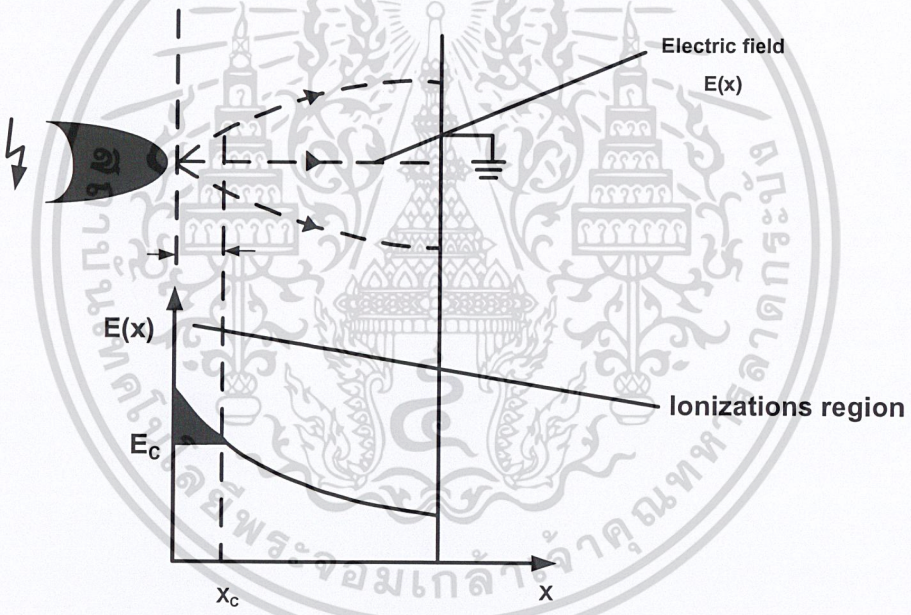
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 การเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

การเบรกดาวนีในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.17) คำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซได้ ถ้าทราบสนามไฟฟ้ากระจาย E(x) ของแกป การอินทิเกรตจะทำไปตามแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง เนื่องจาก α มีค่าขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า E คือ $\alpha = f[E(x)]$ ดังนั้นขอบเขตการอินทีเกรทจะเท่ากับความยาวของเส้นสนามไฟฟ้าที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโตรด หรือเท่ากับระยะของอะวาลานช์วิกฤต X_c และแทนค่า α อยู่ในฟังก์ชั่น E(x) และความดันก๊าซ p ดังสมการที่ (2.17)

$$\int_0^{X_c} \alpha[E(x), p]dx = K \qquad (2.17)$$

โดยจุดเริ่มต้นการอินทีเกรทจะเริ่มจากจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ซึ่งบริเวณที่ผิวของอิเล็กโตรด จุดปลายการอินทีเกรทคือ α = 0 ซึ่งเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต E_cดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระยะอะวาลานช์วิกฤตในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [11]

ส่วนการเบรกดาวน์ในอากาศในสนามไฟฟ้าม่สม่ำเสมอ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17) เมื่อทราบการกระจายของสนามไฟฟ้าคือ E(x) หรือหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการคือ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ เมื่อทราบรูปทรงลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด ก็จะทราบค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (η^*) ได้

2.6 แฟกเตอร์ต่าง ๆที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ [11]

2.6.1 ผลของขั้วแรงดันต่อค่าแรงดันเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูงที่ความดันก๊าซมากกว่าความดันวิกฤต แรงดันเริ่มต้นขั้วลบบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) จะมีค่าต่ำ

กว่าขั้วบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเกิดเบรกดาวน์ได้นั้นจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานซ์ตามกระบวนการเกิดของเบรกดาวน์ เช่น แกปของอิเล็กโตรดแท่งกับแผ่นระนาบ ถ้ากรณีแท่งเป็นขั้วลบอิเล็กตรอนเนิ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายแท่ง ซึ่งเป็นบริเวรที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงดังรูปที่ 2.15 มีโอกาสเกิดไอออไนเซชั่นจากการชนได้มาก จึงสามารถ สร้างอะวาลานซ์วิกฤตของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้าแท่งเป็นขั้วบวกอิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแกปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดแท่งไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต X_c เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต $N_c = 10^8$ ได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานซ์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ X_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎีสตรีมเมอร์ แต่ที่ระยะ X_c จากปลายแท่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชั่นเพื่อสร้างอะวาลานซ์จึงเป็นไปได้ยากหรือไม่เป็นไปได้ ถ้าจะให้เกิดไอออไนเซชั่นที่ระยะ X_c ได้ บริเวณนั้นจะมความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จึงทำให้แรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของขั้วลบจึงต่ำกว่าของขั้วบวก แต่ถ้าเบรกดาวน์เกิดในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรกดาวน์แบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต ผลของโคโรนาทำให้เกิดประจุค้าง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก

2.6.2 ผลของประจุค้าง

ประจุค้างที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูงเป็นผลให้แรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวน์ขั้วบวกละขั้วลบต่างกัน แต่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยจะเกิดเบรกดาวน์โดยตรง แรงดันเบรกดาวน์ของขั้วลบจะต่ำกว่าของขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก ปรากฏการณ์นี้เกอดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (DC AC และอิมพัลส์)

2.6.3 ผลของอุณหภูมิ

เมื่อค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงๆจะทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวเร็วขึ้น ทำให้เกิดไอออไนเซชั่นได้เร็วตาม ทำให้ใช้แรงดันในการเกิดเบรกดาวน์ต่ำ เมื่ออุณหภูมิต่ำๆ จะทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวช้าลงจึงทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงขึ้น

2.6.4 ผลของลักษณะอิเล็กโตรด

ลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปลักษณะอิเล็กโตรดนั้นมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ ซึ่งกำหนดด้วยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่าแรงดันเริ่มต้นคือ ค่าแรงดันเบรกดาวนีนั่นเอง เมื่ออะวาลานซ์วิกฤตได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที โดยไม่มีโคโรนาเกิดจิ้นก่อนเบรกดาวน์ ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์อย่างเห็นได้ชัด

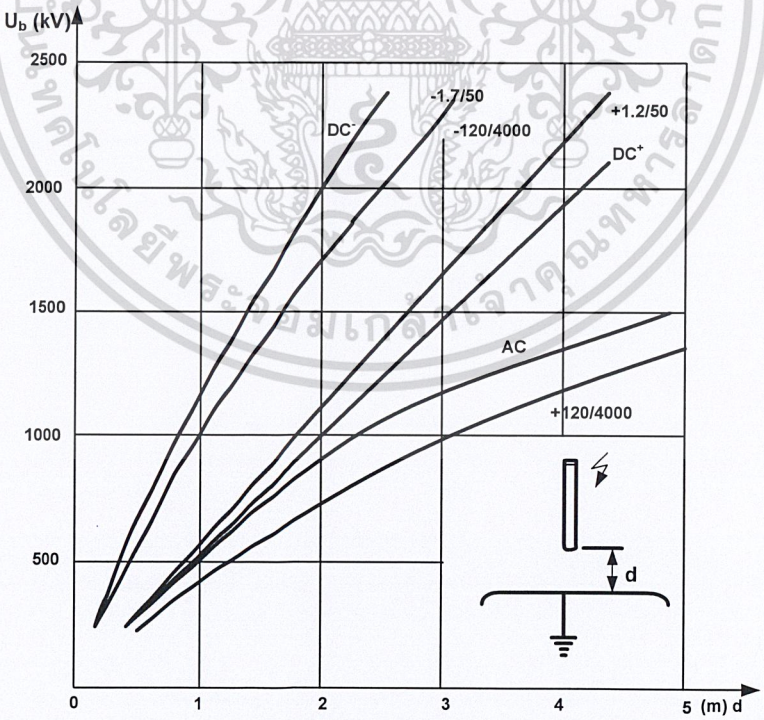
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 ผลของความชื้นในอากาศ

ในอากาศมีโมเลกุล H_2O มีลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าอ่อนๆ เนื่องจากมีอิเล็กตรอนของออกซิเจนประกอบอยู่ทำให้อากาศมีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้น ตราบเท่าที่ความชื้นยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดดีจชาร์จก่อน ความชื้นมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์และมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสตรง ถ้าแรงดันมีช่วงเวลาน้อยอย่างเช่นแรงดันอิมพัลส์ ความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์น้อย

2.6.6 ผลของรูปคลื่นแรงดัน

รูปแบบหรือรูปคลื่นแรงดันเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ในก๊าซหรืออากาศดังรูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศกับระยะแกปในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ด้วยรูปแบบแรงดันที่ต่างกันผลที่ได้คือ แรงดันแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งขั้วบวกมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำสุด แรงดันกระแสตรงขั้วลบมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุดและสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ทั้งแบบฟ้าผ่าและสวิตชิ่งขั้วลบเล็กน้อย ดังนั้นความคงทนของอากาศต่อแรงดันขั้วลบทุกรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แรงดันขั้วบวกอิมพัลส์ฟ้าผ่าและกระแสตรงจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นโดยตรงกับระยะแกปแบบอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกสูงกว่าแบบแรงดันกระแสตรงขั้วลบเล็กน้อย แต่ขั้วบวกทั้งแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 และแรงดันกระแสตรงขั้วบวกมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าขั้วลบและสูงกว่าแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งขั้วบวก



รูปที่ 2.16 แรงดันเบรกดาวน์ U_b ของอิเล็กโตรดแท่งกับระนาบในอากาศในเทอมของระยะแกป d เมื่อแรงดันป้อนมีรูปแบบต่างๆที่สภาวะมาตรฐาน IEC (760 Torr, 20 ˚C , 11 gmH_2O/m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การจัดการความเสี่ยง

การเกิดฟ้าผ่าอาจทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภค โดยอันตรายที่เกิดขึ้นนั้นสามารถส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง สิ่งที่อยู่ภายใน และคนที่อาศัยหรืออยู่ใกล้เคียงกับสิ่งปลูกสร้างนั้นๆ ดังนั้นเพื่อที่จะลดความสูญเสียเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่า มาตรการป้องกันจึงจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ ซึ่งจะสามารถหาได้จากการประเมินค่าความเสี่ยงดังต่อไปนี้

3.1 คำอธิบาย [2]

3.1.1 สัญลักษณ์และตัวย่อ

a	ค่าตัดจำหน่าย	ภาคผนวก จ
A_d	พื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟที่บริเวณซึ่งแยกจากสิ่งปลูกสร้าง	ก.2
A_d'	พื้นที่โดยรวมซึ่งมีลักษณะเป็นหลังคาสูงยื่นออกมา	ก.2.1.1
A_i	พื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค	ก.4; ตาราง ก.3
A_l	พื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟสู่สาธารณูปโภค	ก.4; ตาราง ก.3
A_m	พื้นที่ที่มีอิทธิพลต่อการวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง	ก.3
B	อาคาร	ก.2
c	ค่าความสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นได้(เป็นตัวเงิน)	ค.4; ค.5
C_A	ค่าใช้จ่ายต่อปีของสัตว์	ภาคผนวก จ
C_B	ค่าใช้จ่ายต่อปีของอาคาร	ภาคผนวก จ
C_C	ค่าใช้จ่ายต่อปีของของที่อยู่ภายใน	ภาคผนวก จ
C_d	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่	ก.2; ตาราง ก.2
C_e	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม	ก.5; ตาราง ก.5
C_L	ค่าใช้จ่ายต่อปีของความสูญเสียทั้งหมดในกรณีที่ไม่มีมาตรการป้องกัน	3.2.5; ภาคผนวก จ
C_{RL}	ค่าใช้จ่ายต่อปีของความสูญเสียที่เหลือ	3.2.5; ภาคผนวก จ
C_P	ค่าใช้จ่ายของมาตรการป้องกัน	ภาคผนวก จ
C_{PM}	ค่าใช้จ่ายต่อปีของการใช้มาตรการป้องกันที่เลือกใช้	3.2.5; ภาคผนวก จ
C_S	ค่าใช้จ่ายต่อปีของระบบที่อยู่ในสิ่งปลูกสร้าง	ภาคผนวก จ
C_T	ค่าแก้ไขสำหรับหม้อแปลง HV/LV ในสาธารณูปโภค	ก.4; ตาราง ก.4
c_t	มูลค่ารวมของสิ่งปลูกสร้าง	ค.4; ค.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D_i ระยะด้านข้างที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค.....ก.5
D1 การบาดเจ็บของมนุษย์ 3.1.2.2
D2 ความเสียหายทางกายภาพ 3.1.2.2
D3 ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 3.1.2.2

h_Z ตัวคูณเพิ่มของค่าความสูญเสียเมื่อมีอันตรายที่พิเศษเกิดขึ้น ..... ค.2; ตาราง ค.5
H ความสูงของสิ่งปลูกสร้าง ก.4
H_a ความสูงของสิ่งปลูกสร้างที่ถูกเชื่อมต่อกับจุดสิ้นสุด a ของสาธารณูปโภค ก.4
H_b ความสูงของสิ่งปลูกสร้างที่ถูกเชื่อมต่อกับจุดสิ้นสุด b ของสาธารณูปโภค ก.4
H_c ความสูงของสาธารณูปโภคที่เป็นตัวนำเหนือพื้นดิน.....ก.4

i อัตราดอกเบี้ย.....ภาคผนวก จ

K_{MS} ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของมาตรการป้องกันอิมพัลส์แม่เหล็กฟ้าผ่า.....ข.4
K_{S1} ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันที่มีประสิทธิผลของสิ่งปลูกสร้าง.....ข.4
K_{S2} ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันที่มีประสิทธิผลของการป้องกันภายในสิ่งปลูกสร้าง....ข.4
K_{S3} ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายที่อยู่ภายใน.....ข.4
K_{S4} ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความคงทนแรงดันอิมพัลส์ของระบบ ข.4

L ความยาวของสิ่งปลูกสร้าง ก.2
L_a ความยาวของสิ่งปลูกสร้างที่ถูกเชื่อมต่อกับจุดสิ้นสุด a ของสาธารณูปโภค ก.4
L_A ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับการบาดเจ็บของมนุษย์ .....3.3.2; ตาราง 3.6
L_B ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายทางกายภาพ
(การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.2; ตาราง 3.6
L_c ช่วงความยาวของสาธารณูปโภค.....ก.4
L_C ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายใน
(การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.2; ตาราง 3.6
L_f ความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพ.....ค.1
L_M ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายใน
(การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.3; ตาราง 3.6
L_O ความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากความล้มเหลวของระบบภายใน.....ค.1
L_t ความสูญเสียเนื่องจากการบาดเจ็บจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว.....ค.1
L_U ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับการบาดเจ็บของมนุษย์
(การวาบไฟสู่สาธารณูปโภค) .....3.3.4; ตาราง 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_V ความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพ (การวาบไฟสู่สาธารณูปโภค) .....3.3.4; ตาราง 3.6

L_W ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายใน (การวาบไฟสู่สาธารณูปโภค) .....3.3.4; ตาราง 3.6

L_X ความสูญเสียที่เกิดสืบเนื่องในสิ่งปลูกสร้าง 3.3.1

L_Z ความสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายใน (การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.5; ตาราง 3.6

L1 ความสูญเสียของชีวิตมนุษย์ในสิ่งปลูกสร้าง 3.1.2.3

L2 ความสูญเสียสาธารณูปโภคต่อสาธารณะในสิ่งปลูกสร้าง 3.1.2.3

L3 ความสูญเสียต่อมรดกทางวัฒนธรรมในสิ่งปลูกสร้าง 3.1.2.3

L4 ความสูญเสียต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจในสิ่งปลูกสร้าง.....3.1.2.3

m อัตราค่าบำรุงรักษา.....ภาคผนวก จ

N_X จำนวนเหตุการณ์อันตรายต่อปี.....3.3.1

N_D จำนวนเหตุการณ์อันตรายเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง.....ก.2.3

N_{Da} จำนวนเหตุการณ์อันตรายเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง ที่จุดสิ้นสุด a ของสาย..... ก.2.4; ตาราง 3.6

N_g ความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน.....ก.1

N_I จำนวนเหตุการณ์อันตรายเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค.....ก.5

N_L จำนวนเหตุการณ์อันตรายเนื่องจากการวาบไฟสู่สาธารณูปโภค.....ก.4

N_M จำนวนเหตุการณ์อันตรายเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง ก.3

n_p จำนวนคนที่อาจเกิดอันตราย..... ค.2; ค.3

n_s จำนวนการเกิดแรงดันเกินสวิชชิ่งจากการประมาณหรือการวัด .....ภาคผนวก จ

N_s จำนวนครั้งต่อปีของการเกิดแรงดันเกินสวิชชิ่งที่มากกว่า 2.5kV.....ภาคผนวก จ

n_t จำนวนคนที่คาดว่าจะอยู่ในสิ่งปลูกสร้าง ค.2; ค.3

P_A ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการบาดเจ็บของมนุษย์ (การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.2; ตาราง 3.6

P_B ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายทางกายภาพกับสิ่งปลูกสร้าง (การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.2; ตาราง 3.6

P_C ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน (การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.3.2; ตาราง 3.6

P_{LD} ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(การวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ) ข.5; ข.6; ข.7
P_{LI} ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน
(การวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ).....ข.8
P_M ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน
(การวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง) .....3.3.3; ตาราง 3.6
P_{MS} ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน (ติดตั้งมาตรการป้องกัน).....ข.4
P_{SPD} ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายในหรือสาธารณูปโภค
เมื่อติดตั้ง SPDs.....ข.3; ข.4
P_U ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการบาดเจ็บของมนุษย์
(ฟ้าผ่าสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ) .....3.3.4; ตาราง 3.6
P_V ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายทางกายภาพกับสิ่งปลูกสร้าง
(การวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ) .....3.3.4; ตาราง 3.6
P_W ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน
(การวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ) .....3.3.4; ตาราง 3.6
P_X ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง 3.3.1
P_Z ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของระบบภายใน
(การวาบไฟสู่ใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ) .....3.3.5; ตาราง 3.6

r_a ตัวคูณลดที่เกี่ยวข้องกับประเภทของพื้นผิวของดิน ค.2
r_u ตัวคูณลดที่เกี่ยวข้องกับประเภทของพื้นผิวของพื้น.....ค.2
r_p ตัวคูณลดค่าความสูญเสียก่อนการป้องกันไฟไหม้ ค.2
R_A องค์ประกอบความเสี่ยง (การบาดเจ็บของมนุษย์ – การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.1.3.2
R_B องค์ประกอบความเสี่ยง (ความเสียหายทางกายภาพกับสิ่งปลูกสร้าง –
การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.1.3.2
R_C องค์ประกอบความเสี่ยง (ความล้มเหลวของระบบภายใน –
การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.1.3.2
R_D ความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง 3.1.4.1
r_f ตัวคูณลดค่าความสูญเสียเนื่องจากไฟไหม้.....ค.2
R_F ความเสี่ยงเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพกับสิ่งปลูกสร้าง 3.1.4.2
R_I ความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากการวาบไฟ (ไม่วาบสู่สิ่งปลูกสร้าง).....3.1.4.1
R_M องค์ประกอบความเสี่ยง (ความล้มเหลวของระบบภายใน –
การวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง) 3.1.3.3
R_O ความเสี่ยงเนื่องจากความล้มเหลวของระบบภายใน 3.1.4.2
R_s ความต้านทานต่อความยาวของฉนวนของสายเคเบิล.....ข.5; ข.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_S	ความเสี่ยงเนื่องจากการบาดเจ็บของมนุษย์	3.1.4.2
R_T	ความเสี่ยงที่สามารถยอมรับได้	3.2.3
R_U	องค์ประกอบความเสี่ยง (การบาดเจ็บของมนุษย์ – การวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ)	3.1.3.4
R_V	องค์ประกอบความเสี่ยง (ความเสียหายทางกายภาพกับสิ่งปลูกสร้าง – การวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ)	3.1.3.4
R_W	องค์ประกอบความเสี่ยง (ความล้มเหลวของระบบภายใน – การวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ)	3.1.3.4
R_X	องค์ประกอบความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้าง	3.3.1
R_Z	องค์ประกอบความเสี่ยง (ความล้มเหลวของระบบภายใน – การวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อ)	3.1.3.5
R_1	ความเสี่ยงของความสูญเสียชีวิตมนุษย์ในสิ่งปลูกสร้าง	3.1.3.1
R_2	ความเสี่ยงของความสูญเสียสาธารณูปโภคต่อสาธารณะในสิ่งปลูกสร้าง	3.1.3.1
R_3	ความเสี่ยงของความสูญเสียต่อมรดกทางวัฒนธรรมในสิ่งปลูกสร้าง	3.1.3.1
R_4	ความเสี่ยงของความสูญเสียต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจในสิ่งปลูกสร้าง	3.1.3.1
S	สิ่งปลูกสร้าง	ก.2
s	เงินที่ประหยัดต่อปี	ภาคผนวก จ
S1	การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง	3.1.2.1
S2	การวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง	3.1.2.1
S3	การวาบไฟสู่สาธารณูปโภค	3.1.2.1
S4	การวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค	3.1.2.1
t	ความสูญเสียของสาธารณูปโภคในรอบปี (ในหน่วยชั่วโมง)	ค.3
t_p	เวลาที่คนอยู่ในพื้นที่ที่อันตรายในหน่วยชั่วโมงต่อปี	ค.2
T_d	วันที่มีฝนฟ้าคะนองต่อปี	ก.1
U_W	อัตราความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบ	ข.4
w	ความกว้างของตาข่าย	ข.4
W	ความกว้างของสิ่งปลูกสร้าง	ก.2
W_a	ความกว้างของสิ่งปลูกสร้างที่ถูกเชื่อมต่อกับจุดสิ้นสุด a ของสาธารณูปโภค	ก.4
Z_S	พื้นที่ของสิ่งปลูกสร้าง	3.3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ความเสียหายและความสูญเสีย

3.1.2.1 ที่มาของความเสียหาย

เนื่องจากกระแสที่เกิดจากฟ้าผ่ามีกระแสสูงดังนั้นสาเหตุหลักของความเสียหาย จึงมาจากกระแสฟ้าผ่า โดยพิจารณาที่มาของความเสียหายจากจุดที่เกิดฟ้าผ่าดังนี้

S1 : การวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง

S2 : การวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง

S3 : การวาบไฟสู่สาธารณูปโภค

S4 : การวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค

3.1.2.2 ประเภทของความเสียหาย

ความเสียหายที่เกิดกับสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีสาเหตุจากการเกิดการวาบไฟนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการจะป้องกันด้วย เช่น ชนิดของสิ่งปลูกสร้าง สิ่งที่อยู่ภายใน ลักษณะการใช้งาน ประเภทของสาธารณูปโภค และมาตรการป้องกัน ดังนั้นจึงแบ่งประเภทของความเสียหายออกเป็นดังนี้

D1 : การบาดเจ็บของมนุษย์

D2 : ความเสียหายทางกายภาพ

D3 : ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ความเสียหายที่เกิดกับสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากฟ้าผ่าอาจถูกจำกัดอยู่กับบางส่วนหรือทั้งหมดของสิ่งปลูกสร้าง และอาจจะส่งผลเกี่ยวพันถึงสิ่งที่อยู่รอบสิ่งปลูกสร้างหรือสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่นการแพร่กระจายของสารเคมีหรือกัมมันตรังสี ผลของฟ้าผ่าที่เกิดกับสาธารณูปโภคนั้นอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสาธารณูปโภคเอง (สายส่งหรือท่อ) ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และอาจมีผลกระทบไปถึงระบบภายในซึ่งเชื่อมต่อกับสาธารณูปโภคนั้นๆอีกด้วย

3.1.2.3 ประเภทของความสูญเสีย

เมื่อเกิดฟ้าผ่าความเสียหายแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นสามารถสร้างความสูญเสียแก่สิ่งปลูกสร้างที่ต้องการป้องกันได้แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะและสิ่งที่อยู่ภายในของสิ่งปลูกสร้างเอง จึงแยกพิจารณาได้ดังนี้

L1 : ความสูญเสียต่อชีวิตมนุษย์

L2 : ความสูญเสียสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ

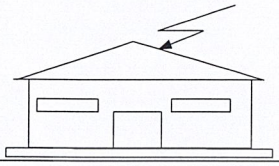
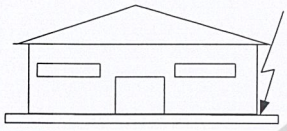
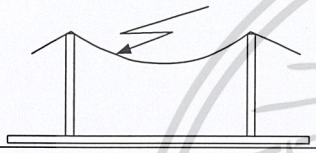
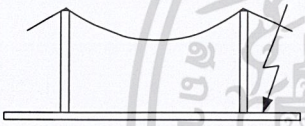
L3 : ความสูญเสียต่อมรดกทางวัฒนธรรม

L4 : ความสูญเสียต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจ

จากองค์ประกอบข้างต้นเมื่อนำองค์ประกอบต่างๆมาแสดงความสัมพันธ์โดยที่แบ่งประเภทของความเสียหาย ประเภทของความสูญเสียตามแหล่งที่มาของความเสียหายจะได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ที่มาของความเสียหาย ประเภทของความเสียหายและความสูญเสียจากแต่ละจุดที่ถูกฟ้าผ่า

		สิ่งปลูกสร้าง	
จุดที่ถูกฟ้าผ่า	**ที่มาของความเสียหาย**	**ประเภทของความเสียหาย**	**ประเภทของความสูญเสีย**
	S1	D1 D2 D3	L1 , L4[2)] L1 , L2 , L3 , L4 L1[1)] , L2 , L4
	S2	D3	L1[1)] , L2 , L4
	S3	D1 D2 D3	L1 , L4[2)] L1 , L2 , L3 , L4 L1[1)] , L2 , L4
	S4	D3	L1[1)] , L2 , L4

[1)] เฉพาะสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิด และโรงพยาบาล หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ ที่เมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในแล้วจะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตมนุษย์

[2)] เฉพาะเมื่ออาจเกิดความสูญเสียต่อสัตว์

ตารางที่ 3.2 ความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างของแต่ละประเภทของของความเสียหายและความสูญเสีย

ความสูญเสีย / ความเสียหาย	**L1 ความสูญเสียต่อชีวิตมนุษย์**	**L2 ความสูญเสียสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ**	**L3 ความสูญเสียต่อมรดกทางวัฒนธรรม**	**L4 ความสูญเสียต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจ**
D1 การบาดเจ็บของมนุษย์	R_S	-	-	R_S[1)]
D2 ความเสียหายทางกายภาพ	R_F	R_F	R_F	R_F

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างของแต่ละประเภทของของความเสียหายและความสูญเสีย (ต่อ)

ความสูญเสีย / ความเสียหาย	L1 ความสูญเสียต่อชีวิตมนุษย์	L2 ความสูญเสียสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ	L3 ความสูญเสียต่อมรดกทางวัฒนธรรม	L4 ความสูญเสียต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจ
D3 ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	R_O [2)]	R_O	-	R_O

[1)] เฉพาะเมื่ออาจเกิดความสูญเสียต่อสัตว์

[2)] เฉพาะสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิด และโรงพยาบาล หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ ที่เมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในแล้วจะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตมนุษย์

3.1.3 ความเสี่ยงและองค์ประกอบความเสี่ยง

ความเสี่ยงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้จะนิยามถึงความสูญเสียต่อปีเฉลี่ยที่อาจเกิดขึ้นได้ในส่วนของสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่า โดยที่ความเสี่ยงจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งต่อปีของการเกิดฟ้าผ่าที่ส่งผลต่อสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคเป็นต้น ฟ้าผ่าที่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคจะขึ้นอยู่กับขนาด ลักษณะ สิ่งแวดล้อมของสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภค รวมไปถึงความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าที่พื้นที่นั้นด้วย

3.1.3.1 ความเสี่ยง

เมื่อความเสี่ยง R คือค่าความสูญเสียต่อปีเฉลี่ยที่อาจเกิดขึ้น โดยแต่ละประเภทของความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะแยกประเมินได้ดังนี้

R_1 : ความเสี่ยงต่อชีวิตมนุษย์

R_2 : ความเสี่ยงสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ

R_3 : ความเสี่ยงต่อมรดกทางวัฒนธรรม

R_4 : ความเสี่ยงต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจ

เพื่อที่จะประเมินค่าความเสี่ยงจะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบความเสี่ยง แต่ละองค์ประกอบความเสี่ยงจะขึ้นอยู่กับที่มาและประเภทของความเสียหายซึ่งจะต้องนำมาคำนวณและพิจารณา โดยแต่ละค่าของความเสี่ยงจะเป็นผลรวมจากองค์ประกอบความเสี่ยง เมื่อคำนวณค่าความเสี่ยงองค์ประกอบความเสี่ยงจะมีการจัดกลุ่มตามที่มาของความเสียหายและประเภทของความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง

R_A : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการบาดเจ็บของมนุษย์เนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวในพื้นที่ตั้งแต่ 3 เมตรภายนอกสิ่งปลูกสร้าง ประเภทของความสูญเสีย L1 ในกรณีของสิ่งปลูกสร้างที่มีปศุสัตว์ และประเภทของความสูญเสีย L4 กับการสูญเสียของสัตว์ที่อาจเกิดขึ้น

หมายเหตุ 1 องค์ประกอบความเสี่ยงที่มีสาเหตุมาจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวที่เกิดภายในสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างจะไม่พิจารณา

หมายเหตุ 2 ในพื้นที่พิเศษของสิ่งปลูกสร้าง(ชั้นบนสุดของลานจอดรถ สนามกีฬา)ที่คนอาจได้รับอันตรายจากการถูกฟ้าผ่าโดยตรง กรณีเหล่านี้สามารถนำมาพิจารณาความเสี่ยงได้โดยการประเมินเบื้องต้น

R_B : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายทางกายภาพซึ่งมีสาเหตุจากการเกิดประกายไฟภายในสิ่งปลูกสร้างซึ่งกระตุ้นให้เกิดไฟไหม้และการระเบิด ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งที่อยู่รอบข้าง และความสูญเสียอาจเกิดขึ้นได้ทุกประเภท(L1, L2, L3 และ L4)

R_C : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายในซึ่งมีสาเหตุจากอิมพัลส์แม่เหล็กฟ้าผ่า ความสูญเสีย L2 และ L4 อาจเกิดขึ้นได้ในทุกกรณีพร้อมกับความสูญเสีย L1 ดังในกรณีของสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดและโรงพยาบาล หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นๆที่เมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในจะทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในทันที

3.1.3.3 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง

R_M : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายในซึ่งมีสาเหตุจากอิมพัลส์แม่เหล็กฟ้าผ่าฟ้าผ่า ความสูญเสีย L2 และ L4 อาจเกิดขึ้นได้ในทุกกรณีพร้อมกับความสูญเสีย L1 ดังในกรณีของสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดและโรงพยาบาล หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นๆที่เมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในจะทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในทันที

3.1.3.4 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง

R_U : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการบาดเจ็บของมนุษย์เนื่องจากแรงดันสัมผัสขณะที่อยู่ภายในสิ่งปลูกสร้าง เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าที่ไหลในสายที่ป้อนเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง จะเกิดความสูญเสีย L1 ในกรณีของคุณสมบัติทางการเกษตร และความสูญเสีย L4 เนื่องจากอาจเกิดความสูญเสียต่อสัตว์

R_V : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายทางกายภาพ (ไฟไหม้และการระเบิดเนื่องจากถูกกระตุ้นโดยการเกิดประกายไฟระหว่างส่วนที่เป็นฉนวนและโลหะที่จุดต่อเข้าของสายสู่สิ่งปลูกสร้าง) เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าที่ถูกส่งผ่านทางสาธารณูปโภค ความสูญเสียทุกประเภท (L1, L2, L3, L4) จึงอาจเกิดขึ้น

R_W : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายในซึ่งมีสาเหตุจากแรงดันเกินเหนี่ยวนำถูกส่งผ่านเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง ความสูญเสีย L2 และ L4 จงอาจเกิดขึ้นได้ในทุกกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามด้วยประเภท L1 ในกรณีของสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีความเสี่ยงต่อการระเบิดและโรงพยาบาล หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นเมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในจะทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในทันที

หมายเหตุ สาธารณูปโภคในการประเมินผลนี้จะพิจารณาเฉพาะสายส่งซึ่งต่อเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง ส่วนที่มาของความเสียหายที่เกิดวาบฟ้าผ่าสู่ท่อหรือใกล้กับท่อจะไม่พิจารณา ซึ่งขึ้นอยู่กับขอบเขตของท่อจนถึงขอบเขตการผสานศักย์ ถ้าไม่มีขอบเขตการผสานศักย์ความเสี่ยงดังกล่าวจะต้องถูกพิจารณา

3.1.3.5 องค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง

R_Z : องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบภายในซึ่งมีสาเหตุจากแรงดันเกินเหนี่ยวนำถูกส่งผ่านเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง ความสูญเสีย L2 และ L4 จงอาจเกิดขึ้นได้ในทุกกรณี ตามด้วยประเภท L1 ในกรณีของสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีความเสี่ยงต่อการระเบิดและโรงพยาบาล หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นเมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในจะทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในทันที

หมายเหตุ สาธารณูปโภคในการประเมินผลนี้จะพิจารณาเฉพาะสายส่งซึ่งต่อเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง ส่วนที่มาของความเสียหายที่เกิดวาบฟ้าผ่าสู่ท่อหรือใกล้กับท่อจะไม่พิจารณา ซึ่งขึ้นอยู่กับขอบเขตของท่อจนถึงขอบเขตการผสานศักย์ ถ้าไม่มีขอบเขตการผสานศักย์ความเสี่ยงดังกล่าวจะต้องถูกพิจารณา

3.1.4 ส่วนประกอบขององค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับสิ่งปลูกสร้าง

องค์ประกอบความเสี่ยงที่จะนำมาพิจารณาตามแต่ละประเภทของความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้างดังนี้

R_1 : ความเสี่ยงต่อความสูญเสียชีวิตมนุษย์

$$R_1 = R_A + R_B + R_C^{1)} + R_M^{1)} + R_U + R_V + R_W^{1)} + R_Z^{1)} \quad (3.1)$$

[1)] เฉพาะสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดและสำหรับโรงพยาบาลที่อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับช่วยชีวิต หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นเมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในจะทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในทันที

R_2 : ความเสี่ยงต่อความสูญเสียสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ

$$R_2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z \quad (3.2)$$

R_3 : ความเสี่ยงต่อความสูญเสียมรดกทางวัฒนธรรม

$$R_3 = R_B + R_V \quad (3.3)$$

R_4 : ความเสี่ยงต่อความสูญเสียมูลค่าทางเศรษฐกิจ

$$R_4 = R_A^{2)} + R_B + R_C + R_M + R_U^{2)} + R_V + R_W + R_Z \quad (3.4)$$

[2)] เฉพาะเมื่ออาจเกิดความสูญเสียต่อสัตว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของความเสี่ยงจะสอดคล้องกับแต่ละประเภทของความสูญเสียซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบความเสี่ยงที่พิจารณาสำหรับแต่ละประเภทของความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้าง

ที่มาของความเสียหาย	**วาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง S1**			**วาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง S2**	**วาบไฟสู่สาธารณูปโภค S3**			**วาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค S4**
องค์ประกอบความเสี่ยง	R_A	R_B	R_C	R_M	R_U	R_V	R_W	R_Z
ความเสี่ยงแต่ละประเภทของความสูญเสีย								
R_1	*	*	* [1)]	* [1)]	*	*	* [1)]	* [1)]
R_2		*	*	*		*	*	*
R_3		*				*		
R_4	* [2)]	*	*	*	* [2)]	*	*	*

[1)] เฉพาะสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการระเบิดและสำหรับโรงพยาบาลที่อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับช่วยชีวิต หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นเมื่อเกิดความล้มเหลวของระบบภายในจะทำให้เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในทันที

[2)] เฉพาะเมื่ออาจเกิดความสูญเสียต่อสัตว์

3.1.4.1 ส่วนประกอบขององค์ประกอบความเสี่ยงซึ่งอ้างอิงกับที่มาของความเสียหาย

$$R = R_D + R_I \tag{3.5}$$

R_D คือความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้างเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง (ที่มาความเสียหาย S_1) ซึ่งนิยามจากผลรวมของสมการ

$$R_D = R_A + R_B + R_C \tag{3.6}$$

R_1 คือความเสียหายเนื่องจากอิทธิพลของการเกิดวาบไฟแต่ไม่ผ่าสิ่งปลูกสร้างโดยตรง (ที่มาความเสียหาย S_2, S_3และS_4) ซึ่งนิยามจากผลรวมสมการ

$$R_I = R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z \tag{3.7}$$

สำหรับองค์ประกอบของความเสียหายและส่วนประกอบต่างๆสามารถดูจากตารางที่ 3.7

3.1.4.2 ส่วนประกอบขององค์ประกอบซึ่งอ้างอิงกับประเภทของความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = R_S + R_F + R_O \tag{3.8}$$

R_S คือความเสี่ยงเนื่องจากการบาดเจ็บของมนุษย์ (D1) ซึ่งนิยามจากผลรวมของสมการ

$$R_S = R_A + R_U \quad (3.9)$$

R_F คือความเสี่ยงเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพกับสิ่งปลูกสร้าง (D2) ซึ่งนิยามจากผลรวมของสมการ

$$R_F = R_B + R_V \quad (3.10)$$

R_O คือความเสี่ยงเนื่องจากความล้มเหลวของระบบภายใน (D3) ซึ่งนิยามจากผลรวมของสมการ

$$R_O = R_M + R_C + R_W + R_Z \quad (3.11)$$

สำหรับองค์ประกอบของความเสียหายและส่วนประกอบต่างๆสามารถดูจากตารางที่ 3.7

3.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของความเสี่ยง

ลักษณะและมาตรการป้องกันที่เป็นไปได้ของสิ่งปลูกสร้างที่ส่งผลต่อองค์ประกอบความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้างจะแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้าง

ลักษณะหรือระบบภายในของสิ่งปลูกสร้าง / มาตรการป้องกัน	R_A	R_B	R_C	R_M	R_U	R_V	R_W	R_Z
พื้นที่โดยรวม	x	x	x	x	x	x	x	x
ความต้านทานพื้นผิวดิน	x							
ความต้านทานพื้น				x				
ข้อจำกัดทางกายภาพ, ฉนวน, ป้ายเตือนภัย, การผสานศักย์ของดิน	x			x				
ระบบป้องกันฟ้าผ่า	x[1)]	x	x[2)]	x[2)]	x[3)]	x[3)]		
การป้องกันร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ			x	x			x	x
พื้นที่การป้องกัน			x	x				
การป้องกันสายส่งภายนอก					x	x	x	x
การป้องกันสายส่งภายใน			x	x				
แผนการระวังภัย			x	x				
เครือข่ายการเชื่อมต่อ			x					
แผนการระวังไฟไหม้		x				x		
ความไวต่อการลุกไหม้		x				x		
อันตรายพิเศษ		x				x		
ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์			x	x	x	x	x	x

[1)] ในกรณีของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยธรรมชาติหรือโดยมาตรฐานด้วยระยะห่างของตัวนำลงดินที่น้อยกว่า 10 เมตร หรือเมื่อข้อจำกัดทางกายภาพถูกกำหนด ความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการบาดเจ็บของมนุษย์ซึ่งมีสาเหตุจากแรงดันสัมผัสจะไม่นำมาพิจารณา

[2)] เฉพาะระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบตาข่ายที่อยู่ภายนอก

[3)] เนื่องจากการผสานศักย์ให้เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจัดการความเสี่ยง [2]

โดยในส่วนนี้ของปริญญานิพนธ์จัดทำขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยง เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกระดับของการป้องกันฟ้าผ่า โดยจะนำค่าความเสี่ยงที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อค่าความเสี่ยงมีค่าสูงกว่าค่าความเสี่ยงที่สามารถยอมรับได้ ก็จะต้องทำการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆเพื่อลดค่าความเสี่ยงที่มีอยู่ลง จนต่ำกว่าค่าความเสี่ยงที่สามารถยอมรับได้ จึงจะนำระดับการป้องกันที่เลือกมาคำนวณค่าความเสี่ยงไปติดตั้งกับสิ่งปลูกสร้างจริงได้

3.2.1 ขั้นตอนพื้นฐาน

ในการตัดสินใจที่จะป้องกันฟ้าผ่าแก่สิ่งปลูกสร้างหรือสาธารณูปโภค ตลอดจนถึงการเลือกมาตรการการป้องกันควรดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 62305-1 และควรปฏิบัติตามข้อกำหนดต่อไปนี้

- วิเคราะห์วัตถุและลักษณะของวัตถุที่จะป้องกัน
- วิเคราะห์ประเภทของความเสียหายทั้งหมดของวัตถุและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้อง R (R_1 ถึง R_4)
- ประเมินความเสี่ยง R สำหรับความสูญเสียแต่ละประเภท (R_1 ถึง R_4)
- ประเมินการป้องกันสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการโดยเปรียบเทียบความเสี่ยง R_1 , R_2 และ R_3 กับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ R_T
- ประเมินความคุ้มทุนในการป้องกันโดยการเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายของความสูญเสียทั้งหมดทั้งที่ไม่มีมาตรการป้องกัน ในกรณีต้องดำเนินการเรื่องการประเมินค่าใช้จ่ายดังกล่าว การประเมินองค์ประกอบของความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้างกำหนดเป็น R_4 (ดูภาคผนวก จ)

3.2.2 การจัดการความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้าง

การป้องกันที่กล่าวนี้จะไม่รวมกับระบบสาธารณูปโภคที่ต่ออยู่ด้านนอกของสิ่งปลูกสร้าง สิ่งปลูกสร้าง ที่พิจารณาจะประกอบด้วย

- ตัวสิ่งปลูกสร้างเอง
- สิ่งที่ติดตั้งอยู่ภายในสิ่งปลูกสร้าง
- สิ่งที่อยู่ภายในสิ่งปลูกสร้าง
- คนที่อยู่ในสิ่งปลูกสร้างหรือยืนอยู่ในบริเวณตั้งแต่ 3 เมตรจากด้านนอกของสิ่งปลูกสร้าง
- สิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของสิ่งปลูกสร้าง

หมายเหตุ สิ่งปลูกสร้างที่พิจารณาอาจจะแบ่งออกเป็นพื้นที่ย่อย ๆได้หลายพื้นที่ (ดูข้อ 3.3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ R_T

ค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ R_T ซึ่งเกิดจากวาบฟ้าผ่าที่มีผลต่อความสูญเสียชีวิตมนุษย์ หรือค่าความสูญเสียทางสังคมหรือวัฒนธรรม ดังค่าที่ให้มาในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าความสูญเสียที่ยอมรับได้ R_T

ประเภทความสูญเสีย	R_T (ปี$^{-1}$)
ความสูญเสียต่อชีวิตมนุษย์	10^{-5}
ความสูญเสียของสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ	10^{-3}
ความสูญเสียมรดกทางวัฒนธรรม	10^{-3}

3.2.4 ขั้นตอนเฉพาะในการประเมินการป้องกันที่ต้องการ

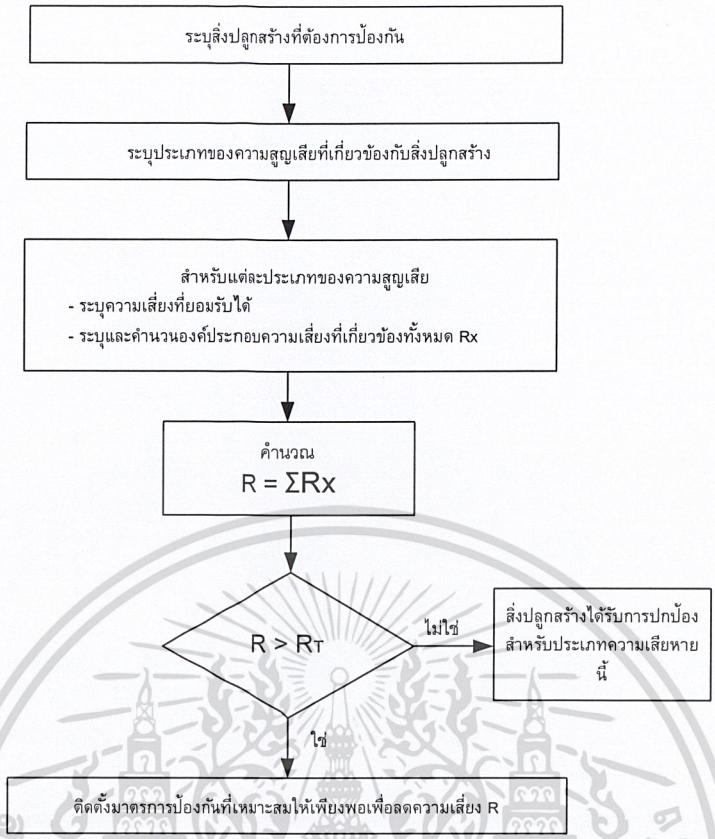
ตาม IEC 62305-1 ความเสี่ยง R_1, R_2 และ R_3 เป็นความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้าง ความเสี่ยงต่อไปนี้ควรจะได้รับการพิจารณาในการประเมินการป้องกันฟ้าผ่าแก่วัตถุที่ต้องการป้องกัน ดังรูปที่ 3.1 สำหรับความเสี่ยงแต่ละประเภทที่พิจารณาควรปฏิบัติดังขั้นตอนต่อไปนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบ R_X ที่ทำให้มีความเสี่ยงเพิ่มขึ้น
- คำนวณองค์ประกอบที่ระบุ R_X
- คำนวณค่าความเสี่ยงทั้งหมด R (หัวข้อ 3.1.4)
- วิเคราะห์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ R_T
- เปรียบเทียบความเสี่ยง R กับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ R_T

ถ้า $R \le R_T$ ไม่จำเป็นต้องป้องกันฟ้าผ่า

ถ้า $R > R_T$ มาตรการการป้องกันจะถูกนำมาใช้เพื่อลดให้ $R < R_T$ สำหรับความเสี่ยงทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนสำหรับการตัดสินใจติดตั้งการป้องกัน [2]

3.2.5 ขั้นตอนในการประเมินความคุ้มทุนในการป้องกัน

นอกจากความต้องการที่จะป้องกันสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคจากฟ้าผ่าแล้ว การป้องกันฟ้าผ่ายังส่งประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจด้วย เนื่องจากมาตรการการป้องกันที่ติดตั้งจะช่วยเพื่อลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ L4 ที่อาจเกิดขึ้นได้อีกด้วยการประเมินขององค์ประกอบความเสี่ยง R_4 สำหรับสิ่งปลูกสร้างจะช่วยให้ผู้ใช้ประเมินค่าใช้จ่ายของความสูญเสียทางเศรษฐกิจทั้งที่มีและไม่มีมาตรการการป้องกัน (ดูภาคผนวก จ) ดังรูป 3.2 และขั้นตอนในการตรวจสอบความคุ้มทุนของการป้องกันที่ต้องการจะมีดังนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบ R_X ซึ่งเกิดจากความเสี่ยง R_4 สำหรับสิ่งปลูกสร้าง
- คำนวณองค์ประกอบความเสี่ยง R_X ในกรณีที่มีมาตรการการป้องกัน
- คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีของความสูญเสียเนื่องจากแต่ละองค์ประกอบความเสี่ยง R_X
- คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีของความสูญเสียทั้งหมด C_L ในกรณีที่ไม่มีมาตรการการป้องกัน
- เลือกมาตรการการป้องกันที่นำมาใช้
- คำนวณองค์ประกอบของความเสี่ยง R_X ด้วยมาตรการการป้องกันที่เลือกที่ใช้
- คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีของความสูญเสียที่เหลือเนื่องจากแต่ละองค์ประกอบของความเสี่ยง R_X ในการป้องกันสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภค
- คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีทั้งหมด C_{RL} ของความสูญเสียที่เหลือจากมาตรการการป้องกันที่

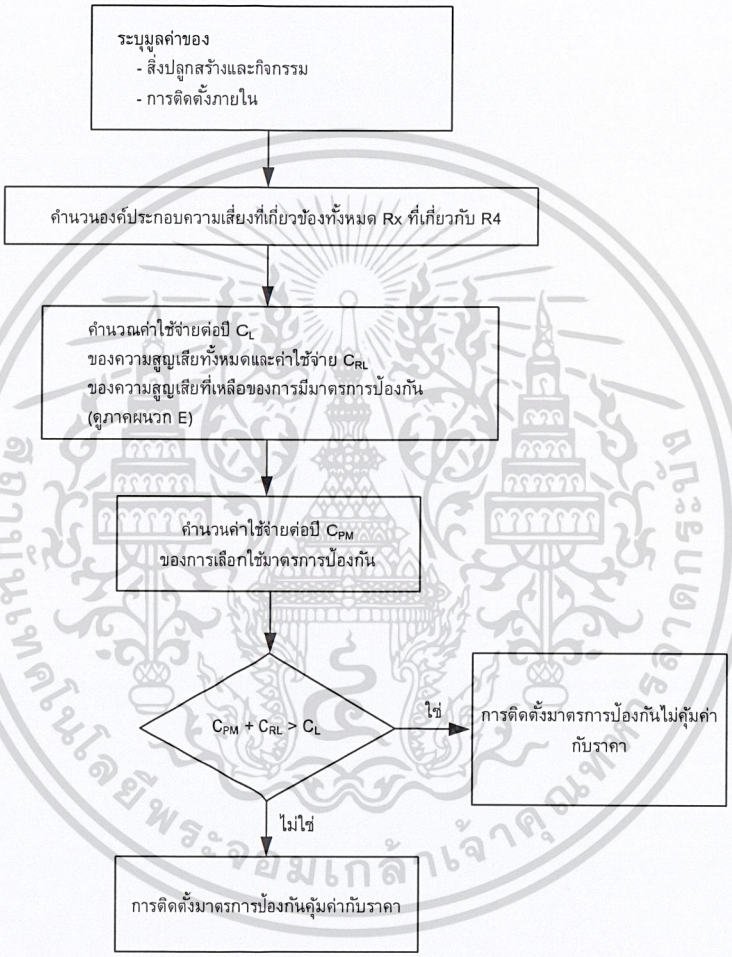
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้

- คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปี C_{PM} ของมาตรการการป้องกันที่เลือกใช้
- เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย

ถ้า $C_L < C_{RL} + C_{PM}$ การป้องกันผ่าที่ใช้อาจไม่คุ้มทุน

ถ้า $C_L \geq C_{RL} + C_{PM}$ มาตรการป้องกันที่ใช้ทำให้ประหยัดเงินมากกว่าตลอดอายุการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภค



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนสำหรับการประประเมินความคุ้มทุนของมาตรการการป้องกัน [2]

3.2.6 มาตรการการป้องกัน

มาตรการการป้องกันเป็นวิธีการที่สามารถช่วยลดความเสี่ยงตามประเภทของความเสียหายได้โดยตรง ในการเลือกใช้มาตรการการป้องกันจึงควรพิจารณาเฉพาะเรื่องประสิทธิภาพเท่านั้น ถ้ามาตรการการป้องกันสามารถทำตามข้อกำหนดในมาตรฐานที่เกี่ยวข้องต่อไปนี้ได้

IEC 62305-3 สำหรับป้องกันแก่ผู้อยู่อาศัยและความเสียหายทางกายภาพของสิ่งปลูกสร้าง

IEC 62305-4 สำหรับป้องกันความเสียหายแก่ระบบภายใน

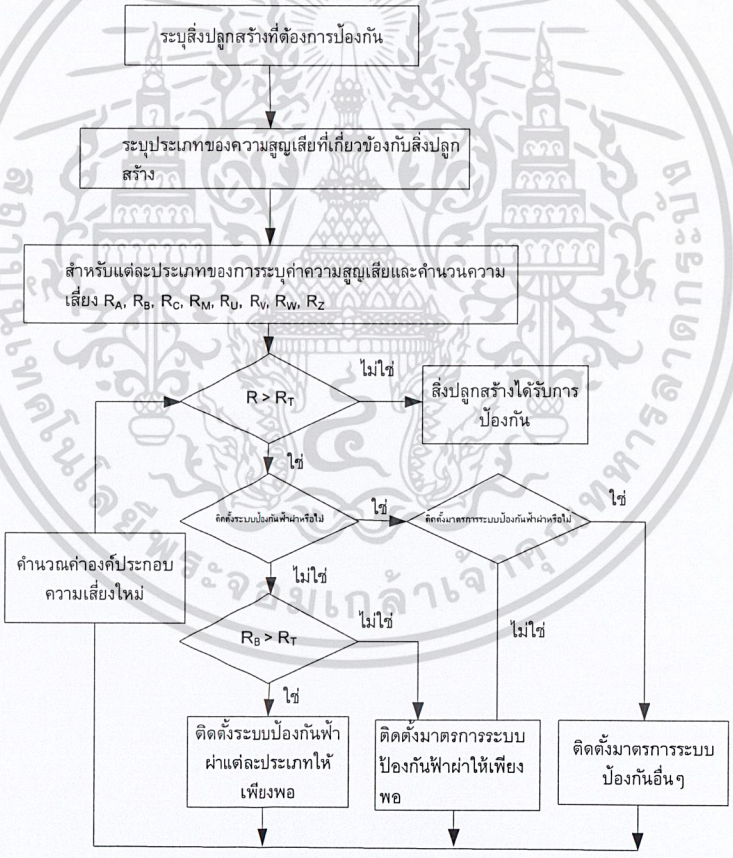
IEC 62305-5 สำหรับป้องกันสาธารณูปโภค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สงวนสิทธิ์ในการดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การเลือกมาตรการการป้องกัน

การเลือกมาตรการการป้องกันที่เหมาะสมที่สุดจะได้รับการกำหนดจากผู้ออกแบบ โดยความเสี่ยงทั้งหมด R ขององค์ประกอบความเสี่ยงตะถูกแบ่งตามวิธีการทางเทคนิคและเศรษฐกิจของมาตรการการป้องกันที่ต่างกัน

ตัวแปรที่สำคัญจะต้องได้รับการระบุเพื่อที่จะหามาตรการป้องกันที่มีประสิทธิภาพเพื่อช่วยลดค่าความเสี่ยง R สำหรับแต่ละประเภทของความสูญเสียมาตรการการป้องกันที่เลือกใช้ไม่ว่าจะใช้ทีละอย่างหรือใช้ร่วมกันจะต้องทำให้ตรงตาเงื่อนไข $R \leq R_T$ การแก้ปัญหาที่นำมาใช้จะต้องยอมรับได้ทั้งทางด้านเทคนิคและด้านเศรษฐกิจ โดยขั้นตอนที่ง่ายสำหรับการเลือกมาตรการการป้องกันสำหรับสิ่งปลูกสร้างได้แสดงดังไดอะแกรมรูปที่ 1 ในกรณีอื่นผู้ติดตั้งหรือผู้วางแผนควรระบุองค์ประกอบความเสี่ยงที่สำคัญที่สุดและการลดความเสี่ยงนั้นควรคำนึงถึงด้านเศรษฐกิจด้วย



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนสำหรับการเลือกมาตรการป้องกันในสิ่งปลูกสร้าง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้าง [2]

3.3.1 สมการพื้นฐาน

องค์ประกอบความเสี่ยงแต่ละประเภท R_A, R_B, R_C, R_M, R_U, R_V, R_Wและ R_Z ตามที่อธิบายไว้ในข้อ 3.1.3 จะแสดงด้วยสมการทั่วไปดังนี้

$$R_X = N_X \times P_X \times L_X \tag{3.12}$$

N_X คือจำนวนการเกิดเหตุการณ์อันตรายต่อปี (ดูภาคผนวก ก)

P_X คือความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง (ดูภาคผนวก ข)

L_X คือความสูญเสียที่เกิดสืบเนื่อง (ดูภาคผนวก ค)

หมายเหตุ 1 จำนวนเหตุการณ์อันตราย N_X ที่เป็นผลมาจากความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน ลักษณะทางกายภาพของวัตถุที่ป้องกัน สิ่งแวดล้อม และพื้นดิน

หมายเหตุ 2 ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหาย P_X ที่เป็นผลมาจากลักษณะของวัตถุที่ป้องกัน และมาตรการการป้องกันที่ติดตั้ง

หมายเหตุ 3 ความสูญเสียที่เกิดสืบเนื่อง L_X ที่เป็นผลมาลักษณะการใช้งาน การดูแลรักษาประเภทของสาธารณูปโภค ราคาของสินค้าที่เป็นผลมาจากความเสียหาย และมาตรการจำกัดความสูญเสีย

3.3.2 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟสู่ฟ้าผ่าสิ่งปลูกสร้าง (S1)

สำหรับการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกิดจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับการบาดเจ็บของมนุษย์ (D1)

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A \tag{3.13}$$

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับความเสียหายทางกายภาพ (D2)

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B \tag{3.14}$$

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับความเสียหายของระบบภายใน (D3)

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C \tag{3.15}$$

ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงจะแสดงในตารางที่ 3.6

3.3.3 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง (S2)

สำหรับการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกิดจากการวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับความเสียหายของระบบภายใน (D3)

$$R_M = N_M \times P_M \times L_M \tag{3.16}$$

ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงให้มาในตารางที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง (S3)

สำหรับการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกิดจากการวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับการบาดเจ็บของมนุษย์ (D1)

$$R_U = (N_L + N_{Da}) \times P_U \times L_U \tag{3.17}$$

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับความเสียหายทางกายภาพ (D2)

$$R_V = (N_L + N_{Da}) \times P_V \times L_V \tag{3.18}$$

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับความเสียหายของระบบภายใน (D3)

$$R_W = (N_L + N_{Da}) \times P_W \times L_W \tag{3.19}$$

ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงให้มาในตารางที่ 3.6

ถ้าสายส่งมีมากกว่าหนึ่งส่วน ค่า R_U, R_Vและ R_W เป็นผลรวมของ R_U, R_V และ R_W เกี่ยวข้องกับแต่ละส่วนของสายส่ง โดยส่วนที่พิจารณาจะอยู่ระหว่างสิ่งปลูกสร้างกับจุดจำหน่ายจุดแรก ในกรณีที่สิ่งปลูกสร้างมีการต่อสายส่งมากกว่าหนึ่งจุด จะต้องคำนวณแยกแต่ละเส้น

3.3.5 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง (S4)

การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกิดจากการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคที่เชื่อมต่อกับสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบที่เกี่ยวกับความเสียหายของระบบภายใน (D3)

$$R_Z = (N_I + N_L) \times P_Z \times L_Z \tag{3.20}$$

ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงให้มาในตารางที่ 3.6

ถ้าสายส่งมีมากกว่าหนึ่งส่วน ค่า R_Z เป็นผลรวมของ R_Z เกี่ยวข้องกับแต่ละส่วนของสายส่ง โดยส่วนที่พิจารณาจะอยู่ระหว่างสิ่งปลูกสร้างกับจุดจำหน่ายจุดแรก ในกรณีที่สิ่งปลูกสร้างมีการต่อสายส่งมากกว่าหนึ่งจุด จะต้องคำนวณแยกแต่ละเส้น

หมายเหตุ รายละเอียดของข้อมูลสาย TLC จะแสดงในส่วนแนะนำของมาครฐาน ITU K.46.

ในกรณีที่สิ่งปลูกสร้างมีสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่มากกว่า 1 เส้นทางการคำนวณก็จะต้องคำนวณแยกแต่ละเส้น โดยที่จุดประสงค์ในการประเมินค่า ถ้า $(N_I - N_L) < 0$ แล้ว สมมติให้ $(N_I - N_L) = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้าง

สัญลักษณ์	**ประเภท**	**ค่าตาม**
จำนวนเฉลี่ยต่อปีของเหตุการณ์อันตรายเนื่องจากการเกิดวาบไฟ		
N_D	- สิ่งปลูกสร้าง	หัวข้อย่อย ก.2
N_M	- ใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง	หัวข้อย่อย ก.3
N_L	- สายส่งที่ต่อเข้ากับสิ่งปลูกสร้าง	หัวข้อย่อย ก.4
N_I	- ใกล้สายส่งที่ต่อเข้ากับสิ่งปลูกสร้าง	หัวข้อย่อย ก.5
N_{Da}	- สิ่งปลูกสร้างที่จุดสิ้นสุด a ของสายส่ง	หัวข้อย่อย ก.2
สัญลักษณ์	**ประเภท**	**ค่าตาม**
ความเป็นไปได้ที่เกิดวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างซึ่งจะก่อให้เกิด		
P_A	- การบาดเจ็บของมนุษย์	หัวข้อย่อย ข.1
P_B	- ความเสียหายทางกายภาพ	หัวข้อย่อย ข.2
P_C	- ความเสียหายของระบบภายใน	หัวข้อย่อย ข.3
ความเป็นไปได้ที่เกิดวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้างซึ่งจะก่อให้เกิด		
P_M	- ความเสียหายของระบบภายใน	หัวข้อย่อย ข.4
ความเป็นไปได้ที่เกิดวาบไฟสู่สายส่งซึ่งจะก่อให้เกิด		
P_U	- การบาดเจ็บของมนุษย์	หัวข้อย่อย ข.5
P_V	- ความเสียหายทางกายภาพ	หัวข้อย่อย ข.6
P_W	- ความเสียหายของระบบภายใน	หัวข้อย่อย ข.7
ความเป็นไปได้ที่เกิดฟ้าผ่าใกล้กับสายส่งซึ่งจะก่อให้เกิด		
P_Z	- ความเสียหายของระบบภายใน	หัวข้อย่อย ข.8
ความสูญเสียเนื่องจาก		
$L_A = L_U = r_a \times L_t$	- การบาดเจ็บของมนุษย์	หัวข้อย่อย ค.2
$L_B = L_V = r_p \times r_f \times h_Z \times L_t$	- ความเสียหายทางกายภาพ	หัวข้อย่อย ค.2, ค.3, ค.4, ค.5
$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O$	- ความเสียหายของระบบภายใน	หัวข้อย่อย ค.2, ค.3, ค.5
หมายเหตุ ค่าความสูญเสีย L_t, L_f และ L_O ปัจจัย r_p, r_a, r_uและ r_f ซึ่งจะลดค่าความสูญเสีย ปัจจัย h_Z ซึ่งจะเพิ่มค่าความสูญเสียจะแสดงในภาคผนวก ค และตาราง ค.2, ค.3, ค.4 และ ค.5		

3.3.6 สรุปองค์ประกอบความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบความเสี่ยงสำหรับสิ่งปลูกสร้างสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.7 ตามความแตกต่างของประเภทความเสียหายและที่มาของความเสียหาย

ถ้าสิ่งปลูกสร้างถูกแบ่งพื้นที่ Z_S ออกเป็นส่วนๆ ดูหัวข้อที่ 3.3.7 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงแต่ละค่าจะถูกแยกกันพิจารณาตามแต่ละพื้นที่ Z_S โดยที่ความเสี่ยงทั้งหมด R ของสิ่งปลูกสร้างจะเป็นผลรวมขององค์ประกอบความเสี่ยงพื้นที่ Z_S ซึ่งจะประกอบรวมเป็นความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้าง

ตารางที่ 3.7 องค์ประกอบความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างสำหรับแต่ละประเภทของความเสียหายที่มาจากแต่ละที่มาของความเสียหาย

ที่มาความเสียหาย / ความเสียหาย	S1	S2	S3	S4	ความเสียหายตามความสูญเสีย
D1 การบาดเจ็บของมนุษย์	$R_A = N_D \times P_A \times r_a \times L_t$		$R_U = (N_L + N_{Da}) \times P_U \times r_U \times L_t$		$R_S = R_A + R_U$
D2 ความเสียหายทางกายภาพ	$R_B = N_D \times P_B \times r_p \times h_Z \times r_f \times L_t$		$R_V = (N_L + N_{Da}) \times P_B \times r_p \times h_Z \times r_f \times L_t$		$R_F = R_B + R_V$
D3 ความเสียหายของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	$R_C = N_D \times P_C \times L_C$	$R_M = N_M \times P_M \times L_M$	$R_W = (N_L + N_{Da}) \times P_W \times L_W$	$R_Z = (N_l - N_L) \times P_Z \times L_Z$	$R_O = R_C + R_M + R_W + R_Z$
ผลของความเสียหายตามที่มาความเสียหาย	$R_D = R_A + R_B + R_C$	$R_I = R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z$			

3.3.7 การแบ่งพื้นที่สิ่งปลูกสร้างเป็นส่วน ๆ Z_S

ในการประเมินแต่ละค่าองค์ประกอบความเสี่ยง สิ่งปลูกสร้างควรที่จะถูกแบ่งเป็นพื้นที่ Z_S ที่มีลักษณะเหมือนๆกัน อย่างไรก็ตามสิ่งปลูกสร้างสามารถถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่เดียวได้ โดยพื้นที่ Z_S มีนิยามหลักๆคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประเภทของดินหรือพื้น (องค์ประกอบความเสี่ยง R_A และ R_U)
- ส่วนที่แยกออกเพื่อป้องกันไฟไหม้ (องค์ประกอบความเสี่ยง R_B และ R_V)
- พื้นที่การป้องกัน (องค์ประกอบความเสี่ยง R_C และ R_M)

พื้นที่อื่นๆ จะถูกกำหนดตาม

- รูปแบบของระบบภายใน (องค์ประกอบความเสี่ยง R_C และ R_M)
- มาตรการป้องกันที่มีอยู่หรือกำลังจะติดตั้ง (องค์ประกอบความเสี่ยงทั้งหมด)
- ค่าความสูญเสีย L_X (องค์ประกอบความเสี่ยงทั้งหมด)

การแบ่งพื้นที่ Z_S ของสิ่งปลูกสร้างออกเป็นส่วนควรที่จะคำนึงถึงความเป็นไปได้ของการดำเนินการตามมาตรการป้องกันที่เหมาะสมที่สุด

3.3.8 การประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงในสิ่งปลูกสร้างตามพื้นที่ Z_S

กฎในการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงจะขึ้นอยู่กับประเภทของความเสี่ยง

3.3.8.1 ความเสี่ยง R_1, R_2 และ R_3

3.3.8.1.1 สิ่งปลูกสร้างพื้นที่เดียว

ในกรณีเพียงหนึ่งพื้นที่ Z_S ถูกกำหนดขึ้นจากสิ่งปลูกสร้างทั้งหมด ตามหัวข้อ 3.3.7 ความเสี่ยง R เป็นผลรวมขององค์ประกอบความเสี่ยง R_X ในสิ่งปลูกสร้าง สำหรับการประเมินองค์ประกอบความเสี่ยงและการเลือกตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะต้องปฏิบัติตามกฎด้วย

- ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับจำนวน N ของเหตุการณ์ที่เป็นอันตรายจะประเมินค่าได้ตามภาคผนวก ก
- ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความเป็นไปได้ P ของความเสียหายจะประเมินค่าได้ตามภาคผนวก ข

นอกจากนี้

- สำหรับองค์ประกอบ R_A, R_B, R_U, R_V, R_W และ R_Z จะมีเพียงค่าเดียวที่แก้ไขสำหรับแต่ละตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ในกรณีที่มีมากกว่า 1 ค่าค่าที่สูงสุดจะได้รับเลือก
- สำหรับองค์ประกอบ R_C และ R_M ถ้ามีระบบที่อยู่ภายในมากกว่า 1 ระบบในพื้นที่ที่เกี่ยวข้อง ค่าของ P_C และ P_M จะได้มาจาก

$$P_C = 1 - (1 - P_{C1}) \times (1 - P_{C2}) \times (1 - P_{C3}) \quad (3.21)$$

$$P_M = 1 - (1 - P_{M1}) \times (1 - P_{M2}) \times (1 - P_{M3}) \quad (3.22)$$

เมื่อ P_{Ci} และ P_{Mi} เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับระบบที่อยู่ภายใน i

- ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับจำนวนเงิน L ของความสูญเสียจะประเมินค่าได้ตามภาคผนวก ค ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของจะได้มาจากภาคผนวก ค และอาจสมมติได้จากพื้นที่ตามการใช้งานสิ่งปลูกสร้าง

การกำหนดสิ่งปลูกสร้างเป็นพื้นที่เดียวอาจจะทำให้นำไปสู่การใช้มาตรการป้องกันที่มีราคาสูงเพราะมาตรการป้องกันที่ใช้จะครอบคลุมไปหมดทั้งสิ่งปลูกสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8.1.2 สิ่งปลูกสร้างหลายพื้นที่

ในกรณีนี้สิ่งปลูกสร้างจะถูกแบ่งย่อยๆออกเป็นหลายพื้นที่ Z_S ความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้างจะเป็นผลรวมของความเสี่ยงของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ในแต่ละพื้นที่ความเสี่ยงจะเป็นผลรวมขององค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องใจพื้นที่ทั้งหมด สำหรับการประเมินค่าองค์ประกอบความเสี่ยงและการเลือกตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากกฎในข้อ 3.3.8.1.1

การแบ่งสิ่งปลูกสร้างออกเป็นส่วนๆนั้นจะช่วยให้ผู้ออกแบบคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละส่วนของสิ่งปลูกสร้างเพื่อนำไปประเมินองค์ประกอบของความเสี่ยง และเลือกมาตรการป้องกันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละพื้นที่เพื่อที่จะลดค่าใช่จ่าโดยรวมของการป้องกันฟ้าผ่า

3.3.8.1 ความเสี่ยง R_4

ไม่ว่าอย่างไรก็ตามการหามาตรการป้องกันเพื่อที่จะลดความเสี่ยง R_1, R_2และ R_3 ก็เป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อที่จะประเมินความเหมาะสมทางเศรษฐกิจของการนำมาตรการป้องกันไปใช้เพื่อลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ R_4 โดยหัวข้อที่จะนำไปประเมินความเสี่ยง R_4 จะดำเนินงานตามนิยามต่อไปนี้

- สิ่งปลูกสร้างทั้งหมด
- ส่วนหนึ่งของสิ่งปลูกสร้าง
- สิ่งที่ติดตั้งภายใน
- ส่วนหนึ่งของสิ่งที่ติดตั้งภายใน
- ราคาของอุปกรณ์
- สิ่งที่อยู่ภายในสิ่งปลูกสร้าง

ค่าใช้จ่ายของความสูญเสียในพื้นที่หนึ่งจะประเมินได้ตามภาคผนวก จ ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมของสิ่งปลูกสร้างจะเป็นผลรวมของค่าใช้จ่าของความสูญเสียในพื้นที่ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ระบบป้องกันฟ้าผ่า

4.1 ทฤษฎีทั่วไปของระบบป้องกันฟ้าผ่า [3]

4.1.1 กลศาสตร์ของการเกิดฟ้าผ่า

การแยกกันในการชาร์จประจุทำให้เกิดความต่างศักย์ในก้อนเมฆมีค่าสูงเนื่องจากพยายามปรับสภาวะให้อยู่ในสภาพเป็นกลางเมื่อประจุลบมีค่าเพิ่ม ทำให้มีการสร้างประจุบวกเพิ่มเติมขึ้นมา สำหรับการป้องกันฟ้าผ่าสิ่งที่กังวลมากที่สุดคือการคายประจุลงสู่กราวด์ กระบวนการเกิดฟ้าผ่าจะมีลักษณะการเริ่มต้นสองที่คือจากก้อนเมฆและจากพื้นดิน ในขั้นเริ่มแรกจะเกิดโคโรนาด้านล่างของก้อนเมฆเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามากเกินกว่าอากาศจะทนไหวจนอากาศเกิดไอออไนเซชันแล้วเกิดเป็นจังหวะก้าวหรือเกิดหัวนำล่องเพื่อกรุยทางมีลักษณะเป็นขั้นบันไดทุกกระบวนการเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในทิศทางลงสู่ดินมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขาแตกออกไปค่าแรงดันอาจมีค่าถึง 100 ล้านโวลต์ เมื่อมีจังหวะก้าวลงมาจะมีสตรีมไลน์จากพื้นดินขึ้นไปรับ ในขณะเดียวกันเมื่อทั้งสองเชื่อมต่อกันประจุที่อยู่ในก้อนเมฆจะถูกนำลงสู่พื้นดินเดินทางเป็นลำอาร์คของกระแสฟ้าผ่า จากกรณีที่เกิดขึ้นเมื่อบรรยากาศสูญเสียสภาวะการเป็นฉนวนทำให้เส้นทางนี้มีความต้านทานต่ำเป็นทางเชื่อมต่อระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสมีค่าประมาณ 10 kA/μs ค่ากระแสส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ย 30 kA ส่วนกระแสสูงสุดที่เคยบันทึกได้มีค่าสูงกว่า 200 kA

นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดฟ้าผ่าซ้ำที่ตำแหน่งเดิมเนื่องจากเหตุผลที่ว่าในเส้นทางเดิมที่ลำฟ้าผ่าเดิมผ่าเอาไว้เนื่องจากสภาพอากาศบริเวณนั้นยังไม่คืนสภาพเป็นฉนวน เมื่อมีประจุมาสะสมจำนวนหนึ่งก็อาจทำให้เกิดฟ้าผ่าซ้ำได้ทันทีในการผ่าหนึ่งครั้งอาจเกิดได้ถึง 16 ครั้ง พลังงานเฉลี่ยต่อการเกิดวาบไฟหนึ่งครั้งเท่าที่เคยบันทึกมีค่าประมาณ 55 kWhr ฟ้าผ่ามีอันตรายสูง ความเร็วของมันเพียงแค่ 100-300 μs แต่สำหรับที่กระแสสูงสุดอาจรวดเร็วสูงสุดเพียง 1-2 μs เท่านั้น ความแตกต่างระหว่างฟ้าผ่าบวกและลบ ฟ้าผ่าบวกจะมีความรุนแรงมากกว่ามากเนื่องจากประจุสะสมอยู่สูงทำให้ต้องสะสมแรงดันจนสูงมากจึงผ่าลงมา และฟ้าผ่าประจุบวกมีแค่หัวนำล่องอย่างเดียวจากนั้นก็ผ่าลงดินเลย

4.1.2 พารามิเตอร์ฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ทางคณะกรรมการระหว่างประเทศของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ (CIGRE) ที่การศึกษาข้อมูลและออกแบบวิธีทางสถิติมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วิเคราะห์ผลของฟ้าผ่าแสดงดังนี้:

5% ของการเกิดฟ้าผ่าครั้งแรกกระแสฟ้าลบผ่าเกิน 90 kA (โดยเฉลี่ยประมาณ 33 kA)

5% ของการเกิดฟ้าผ่าครั้งแรกกระแสฟ้าบวกผ่าเกิน250 kA (โดยเฉลี่ยประมาณ 34 kA)

5% ของการเกิดฟ้าผ่าตามมาเกินกว่าอัตราปัจจุบันเพิ่มขึ้นที่ 161 kA / μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในมาตรฐาน IEC 62305 ระบุกฎเกณฑ์การออกแบบและการเลือกระดับการป้องกันนั้น ทำให้ได้ความสามารถในการป้องกันสูงสุด รวมถึงประสิทธิภาพและขนาดการป้องกัน และเพื่อความคุ้มค่าของการก่อสร้างขั้นตอนการออกแบบจะต้องประเมินถึงระดับต่ำสุดหรือสูงสุดให้เหมาะสมเพื่อความคุ้มทุน ในตารางที่ 4.1 แสดงระดับการป้องกัน ค่ากระแสสูงสุดในแต่ละระดับเพื่อบอกให้ทราบถึงการเลือกใช้แท่งตัวนำที่เหมาะสมกับระดับการป้องกัน

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสสูงสุด (เพื่อประสิทธิภาพการปรับขนาด) สำหรับระดับการป้องกันตั้งแต่ I ถึง IV และความน่าจะเป็น

	LPL I	**LPL II**	**LPL III**	**LPL IV**
Maximum peak current (kA 10/350 μs)	200	150	100	100
Probability current is greater (%)	1	2	3	3

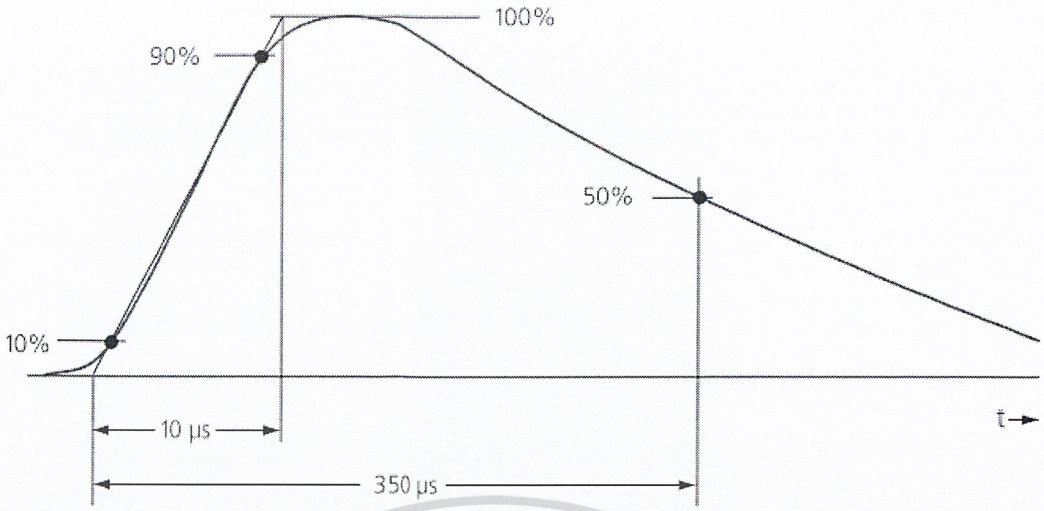
สำหรับแต่ละระดับการป้องกันค่ากระแสต่ำสุดในแต่ละระดับป้องกันที่จะได้รับการคุ้มครองกำหนดตาม ตารางที่ 4.2 รายละเอียดค่ากระแสและโอกาสที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่อาจจะเกิดฟ้าผ่าในแต่ละระดับการป้องกัน ตัวอย่างเช่นที่ LPL I โอกาสเป็น 99% หมายถึงโอกาสที่จะดักฟ้าผ่าที่ขนาดกระแสมากกว่า 3 kA ส่วนที่เหลืออีก 1% คือฟ้าผ่าขนาดเล็กขนาดกระแสน้อยกว่า 3 kA ในกรณีนี้ที่ LPL I เป็นการเกิดน้อยมากที่จะเกิดฟ้าผ่าขนาดกระแสน้อยกว่า 3 kA ถึงแม้ว่าเกิดขึ้นก็มีโอกาสเป็นอันตรายต่อสิ่งปลูกสร้างน้อยมากหรืออาจจะไม่เกิดอันตราย และการออกแบบที่ระดับการป้องกัน LPL I ต้องมีความสำคัญมาก ส่วนใหญ่จะไม่นำมาออกแบบในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสต่ำสุด (เพื่อประสิทธิภาพการปรับขนาด) สำหรับระดับการป้องกันตั้งแต่ I ถึง IV และความน่าจะเป็น

	LPL I	**LPL II**	**LPL III**	**LPL IV**
Minimum Current (kA)	3	5	10	16
Probability current is greater than minimum (%)	99	97	91	84
Rolling sphere radius (m)	20	30	45	60

ในขณะที่เกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าจริงรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจริงจะแสดงออกมาแตกต่างกันแล้วแต่สถานการณ์ งานวิจัยที่มีแสดงความน่าจะเป็นของรูปคลื่นเพื่อวางแผนการรับมือ ตามตารางที่ 4.2 แสดงผลของกระแสที่อ้างอิงรูปคลื่นดังรูปที่ 4.1 ที่ค่า 10/350 μs

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้นำไฟล์นี้ขึ้นเผยแพร่ต่อในอินเทอร์เน็ต ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า [12]

4.1.3 ระยะฟ้าผ่า [11]

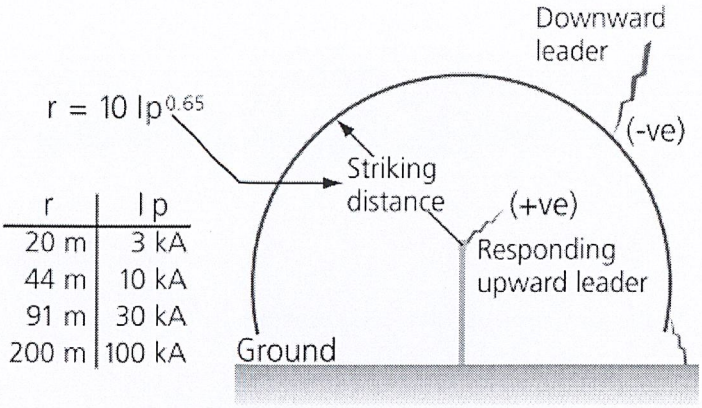
ระยะฟ้าผ่า หมายถึงระยะทางระหว่างลำฟ้าผ่านำทางและจุดที่ภาคพื้นดินหรือวัตถุนั้นๆ เริ่มเกิดดิจชาร์จ ระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับประจุบนก้อนเมฆหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่า รูปที่ 4.2 แสดงระยะฟ้าผ่าซึ่งเป็นระยะระหว่างลำฟ้าผ่านำทางและเสาส่ง เมื่อเริ่มเกิดดิจชาร์จที่หัวเสาทำให้ทราบว่าฟ้าผ่าจะลงที่ใด ปกติฟ้าผ่าจะลงมาจากก้อนเมฆยังไม่ทราบว่าจะลงที่จุดใดที่พื้นแต่จะเกิดดีจชาร์จและเคลื่อนที่ลงมาตามทางเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อลำฟ้าผ่านำทางใกล้พื้นดินและถ้าเริ่มเกิดดีจชาร์จที่ภาคพื้นดิน เนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่นจึงจะทราบว่าฟ้าผ่าจะลงที่จุดใด ดังนั้นลำฟ้าผ่านำทางเคลื่อนตัวลงมาเกือบถึงภาคพื้นดินจึงเริ่มเกิดดีจชาร์จที่หัวเสา ระยะ S_1 ในรูป 4.2 มีค่าน้อยเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีค่าน้อยหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กระแสฟ้าผ่ามีค่าน้อย

สำหรับตำแหน่งแท่งตัวนำล่อฟ้าส่วนหลักที่พิจารณาคือค่าสูงสุดของกระแสที่ยอมรับได้และความสามารถของระบบป้องกันที่จะป้องกันขนาดฟ้าผ่าขนาดเล็กได้ ตามที่ได้ระบุเอาไว้ก่อนหน้านี้สำหรับป้องกันหัวนำร่องที่จะลงมาจากก้อนเมฆสู่ดินหรือสิ่งปลูกสร้าง เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้นขนเกิดหัวนำร่องของฟ้าผ่าซึ่งอาจลงสู่กราวนด์หรือโครงสร้าง ในที่นี้ได้กำหนดระยะที่อาจเกิดฟ้าผ่าเป็นระยะที่เรียกว่า (ระยะฟ้าผ่า) เพื่อทราบระยะทางที่อาจเกิดฟ้าผ่าลงสู่สิ่งปลูกสร้างและสามารถประเมินบริเวณผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่าได้ชัดเจน โดยระยะฟ้าผ่าหาได้จาก

$$r = 10I^{0.65} \tag{4.1}$$

เมื่อ I คือกระแสสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระยะฟ้าผ่า [12]

4.2 ระดับการป้องกันของระบบป้องกันฟ้าผ่า [3]

ระดับการป้องกันของระบบป้องการฟ้าผ่าถูกกำหนดโดยคุณลักษณะของโครงสร้างของสิ่งที่จะป้องกันและพิจารณาตามระดับของป้องกันฟ้าผ่า (LPL) ระดับของการป้องกันฟ้าผ่าแบ่งออกเป็น 4 ระดับ กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 62305-1 แต่ละลักษณะของระดับ LPS มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการป้องกันฟ้าผ่า (LPL) และชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า (LPS)

LPL	Class of LPS
I	I
II	II
III	III
IV	IV

โดยแต่ละชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า (LPS) ควรเป็นลักษณะดังต่อไปนี้

1.ข้อมูลที่ขึ้นอยู่กับระดับการป้องกันของระบบป้องกันฟ้าผ่า (LPS)

- พารามิเตอร์ฟ้าผ่าต่างๆ
- รัศมีทรงกลมกลิ้ง ขนาดตาข่ายป้องกัน และมุมป้องกัน
- ระยะระหว่างตัวนำลงดินกับตัวนำวงแหวน
- ระยะอันตรายที่อาจจะเกิดจากการสปาร์คจากผลของฟ้าผ่า
- ความยาวที่น้อยสุดของแท่งตัวนำอิเล็กโตรด

2.ข้อมูลที่ไม่ได้ขึ้นกับระดับการป้องกันของระบบป้องกันฟ้าผ่า (LPS)

- การประสานให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากันของระบบป้องกันฟ้าผ่า
- ความหนาของแผ่นเหล็ก หรือท่อเหล็กของระบบตัวนำล่อฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเลือกใช้วัสดุของระบบป้องกันฟ้าผ่า (LPS)
- -ขนาดของวัสดุตัวนำในอากาศ ตัวนำลงดิน และตัวนำในดิน
- ขนาดของการเชื่อมต่อของตัวนำ

4.3 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก [3]

4.3.1 ระบบตัวนำล่อฟ้า

4.3.1.1 ทั่วไป

เมื่อมีการออกแบบระบบตัวนำล่อฟ้าให้มีความเหมาะสมแล้ว โอกาสที่กระแสฟ้าผ่าจะทะลุเข้าโครงสร้างนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งระบบตัวนำล่อฟ้าจะประกอบด้วย

1. แท่งตัวนำ
2. สายตัวนำขึง
3. ตัวนำแบบตาข่าย

4.3.1.2 การจัดวางตำแหน่งตัวนำ

องค์ประกอบของตัวนำล่อฟ้าที่ถูกติดตั้งที่โครงสร้างควรอยู่ที่บริเวณมุม, จุดเสี่ยงและบริเวณขอบ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่อยู่บนสุดของโครงสร้าง) โดยวิธีที่ยอมรับในการจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้านั้นมีทั้งหมด 3 วิธีคือ

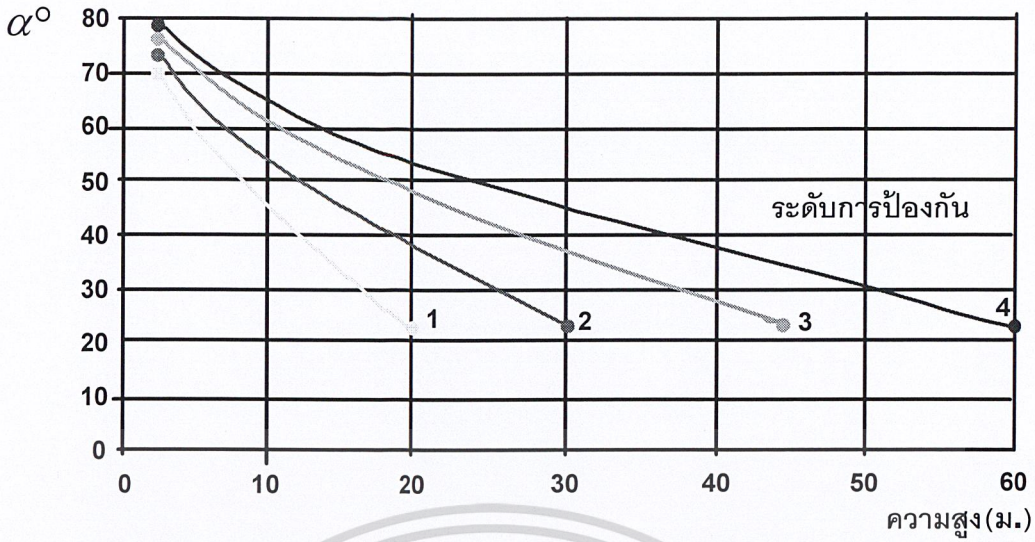
1. วิธีมุมป้องกัน
2. วิธีทรงกลมกลิ้ง
3. วิธีตาข่าย

โดยวิธีทรงกลมกลิ้งนั้นจะเหมาะสมกับทุกๆกรณี ส่วนวิธีมุมป้องกันนั้นจะเหมาะกับสิ่งปลูกสร้างที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน แต่จะถูกจำกัดในเรื่องของความสูงของตัวนำล่อฟ้าดังในตารางที่ 4.4 สุดท้ายวิธีตาข่ายจะเหมาะกับบริเวณที่มีลักษณะเป็นระนาบ ซึ่งค่าของมุมป้องกัน รัศมีของวิธีทรงกลมกลิ้งและขนาดของตาข่ายสำหรับแต่ละระดับของระบบป้องกันฟ้าผ่าแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสูงสุดของรัศมีทรงกลมกลิ้ง ขนาดของตาข่ายและมุมป้องกันที่สอดคล้องกับระดับป้องกันฟ้าผ่า

	วิธีป้องกัน		
ระดับป้องกันฟ้าผ่า	**รัศมีทรงกลมกลิ้ง (เมตร)**	**ขนาดตาข่าย (เมตร)**	**มุมป้องกัน α (องศา)**
1	20	5 × 5	ดูกราฟรูปที่ 4.3
2	30	10 × 10	
3	45	15 × 15	
4	60	20 × 20	

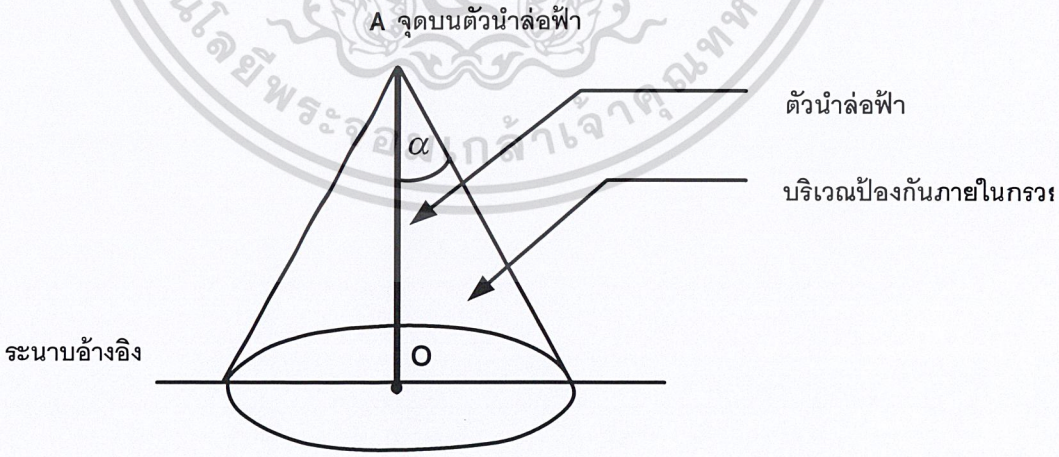
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



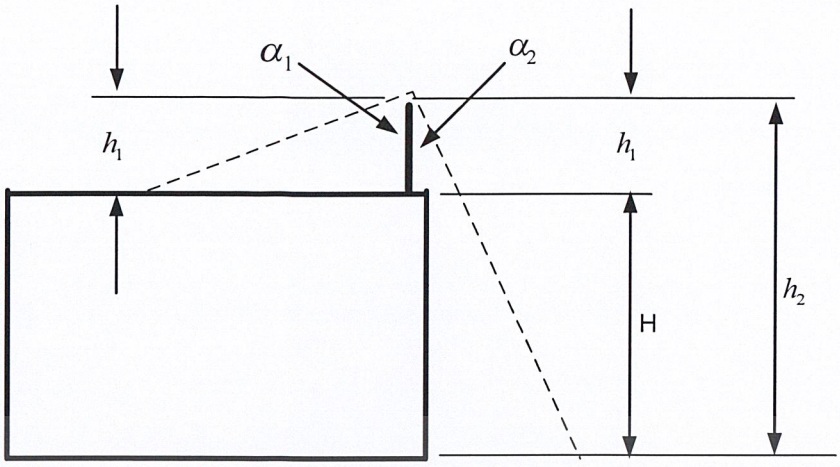
รูปที่ 4.3 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน [3]

- **วิธีมุมป้องกัน**

ตำแหน่งของระบบตัวนำล่อฟ้าควรพิจารณาให้มีความเหมาะสม ถ้าโครงสร้างที่จะป้องกันตั้งอยู่เต็มในบริเวณป้องกันจากระบบตัวนำล่อฟ้า สำหรับบริเวณในการป้องกันโดยระบบตัวนำล่อฟ้าแนวตั้งนั้นจะสมมติให้มีรูปร่างเป็นกรวยคว่ำโดยจุดยอดจะวางอยู่ที่แท่งตัวนำล่อฟ้าและทำมุม α กับแท่งตัวนำป้องกันซึ่งขึ้นอยู่กับระดับการป้องกันฟ้าผ่าและความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้าในตารางที่ 4.4 ซึ่งตัวอย่างในการป้องกันด้วยวิธีนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ h_1 คือ ความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้า

h_2 คือ ความสูงของตัวนำล่อฟ้าโดยวัดจากพื้นดิน

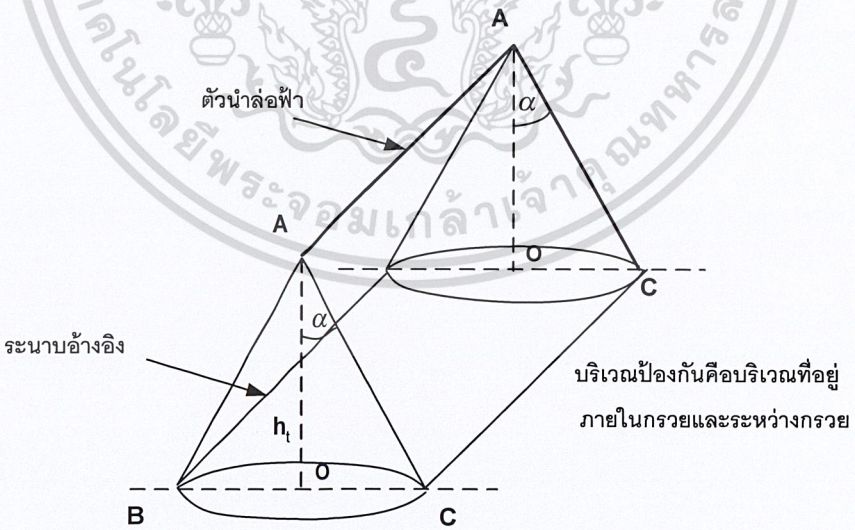
H คือ ความสูงของสิ่งปลูกสร้าง

α_1 คือ มุมป้องกันที่สอดคล้องกับความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้า h_1

α_2 คือ มุมป้องกันที่สอดคล้องกับความสูงของตัวนำล่อฟ้า $h_2 = h_1+H$

รูปที่ 4.4 บริเวณป้องกันด้วยแท่งตัวนำในแนวตั้ง [3]

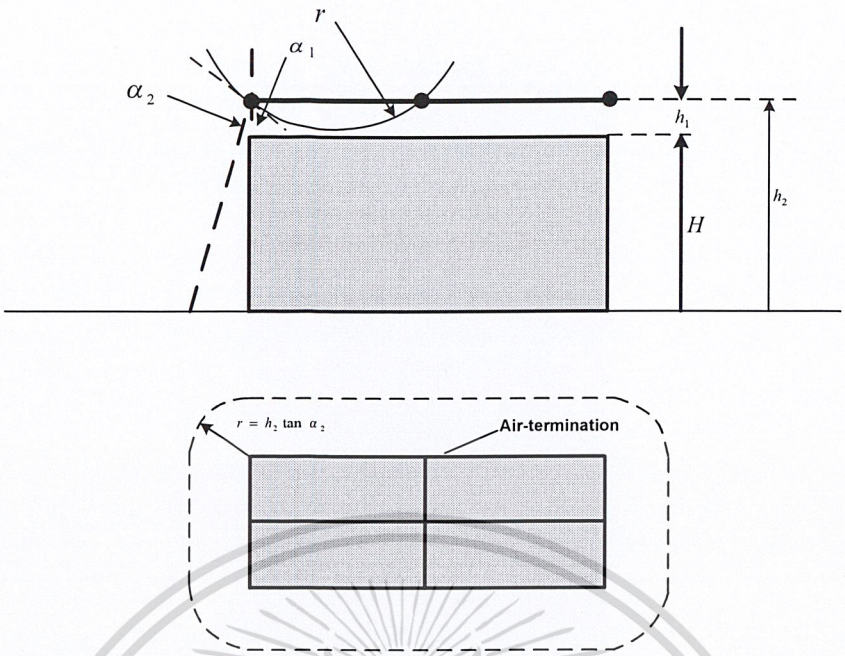
สำหรับบริเวณการป้องกันในกรณีที่มีตัวนำในแนวตั้ง 2 อัน บริเวณในการป้องกันจะครอบคลุมในบริเวณที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



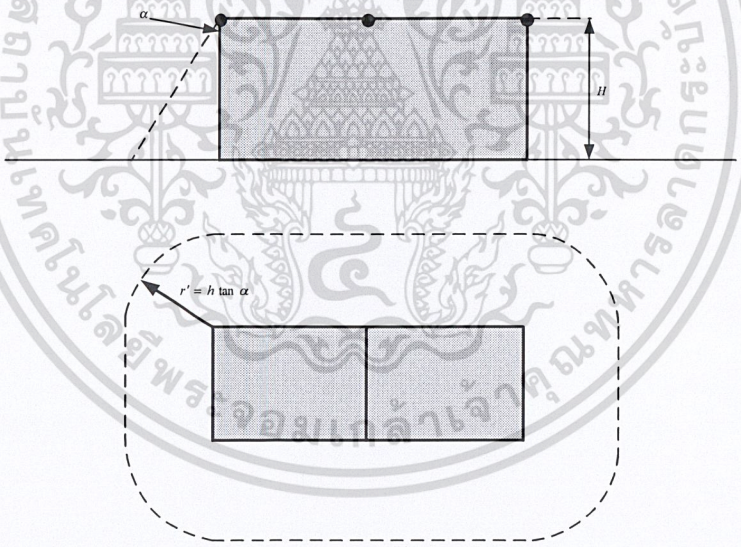
รูปที่ 4.5 บริเวณป้องกันที่เกิดจากแท่งตัวนำล่อฟ้าในแนวตั้งสองอัน [3]

และบริเวณการป้องกันด้วยลวดแบบตาข่าย ซึ่งจะนิยามจากบริเวณการป้องกันที่หาได้มาจากแท่งตัวนำร่วมกับวิธีตาข่ายตัวอย่างแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



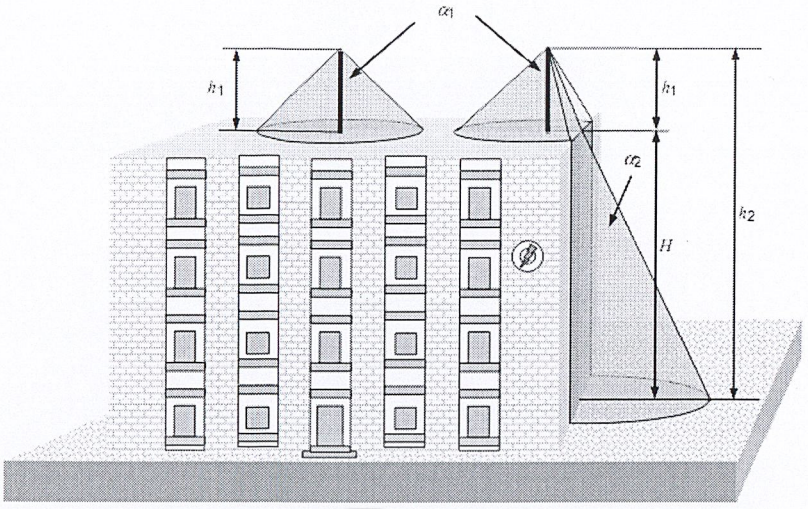
รูปที่ 4.6 บริเวณที่ถูกป้องกันที่ได้มาจากแท่งตัวนำร่วมกับวิธีตาข่ายด้วยวิธีมุมป้องกันและวิธีทรงกลมกลิ้ง [3]



รูปที่ 4.7 บริเวณที่ถูกป้องกันด้วยขดลวดแยกกับวิธีตาข่ายด้วยวิธีมุมป้องกันและวิธีทรงกลมกลิ้ง [3]

จากตารางที่ 4.4 มุมป้องกัน α คือความต่างของความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้าเหนือบริเวณพื้นผิวที่ป้องกันดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

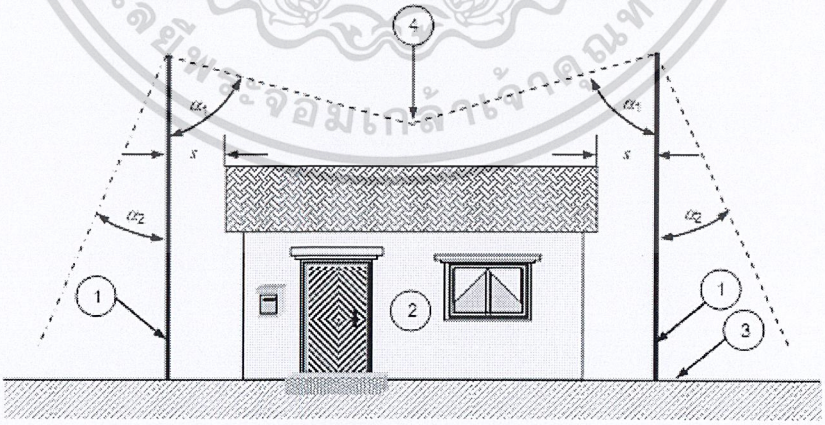


เมื่อ

H	คือ	ความสูงของอาคารโดยวัดจากพื้นดิน
h_1	คือ	ความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้า
h_2	คือ	h_1+H
α_1	คือ	มุมป้องกันที่สอดคล้องกับความสูงของแท่งตัวนำ h_1
α_2	คือ	มุมป้องกันที่สอดคล้องกับความสูง h_2

รูปที่ 4.8 การออกแบบตัวนำล่อฟ้าด้วยวิธีมุมป้องกันสำหรับความสูงที่แตกต่างกันตามตารางที่ 4.4 [3]

ในการออกแบบของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยใช้มุมป้องกันซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9 (ก),(ข) ส่วนในรูปที่ 4.10 สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแยกอิสระและรูปที่ 4.11 และ 4.12 สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบไม่แยกอิสระ



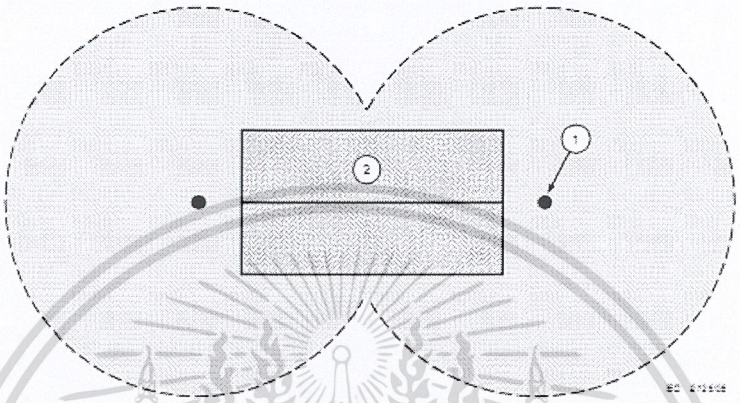
(ก)

เมื่อ

หมายเลข	1	คือ แท่งตัวนำล่อฟ้า
	2	คือ โครงสร้างที่จะป้องกัน
	3	คือ พื้นดินโดยให้เป็นระนาบอ้างอิง

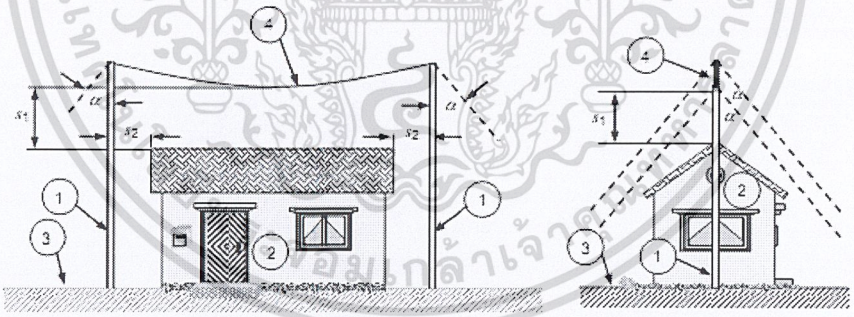
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	คือ จุดตัดระหว่างพื้นที่ป้องกันรูปกรวย
S	คือ ระยะห่างตามเงื่อนไขข้อ
α_1, α_2	คือ มุมป้องกันที่สอดคล้องตามตารางที่ 4.4

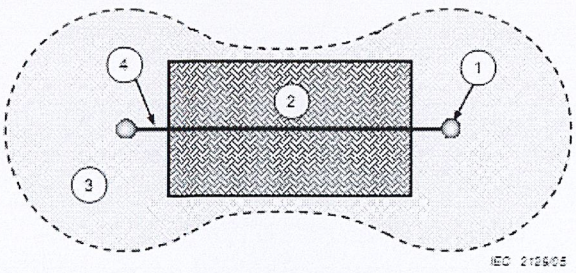


(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) การป้องกันในระนาบแนวตั้ง (ข) ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแยกอิสระโดยใช้เสาตัวนำล่อฟ้าสองอันแยกอิสระโดยออกแบบด้วยวิธีมุมป้องกัน [3]



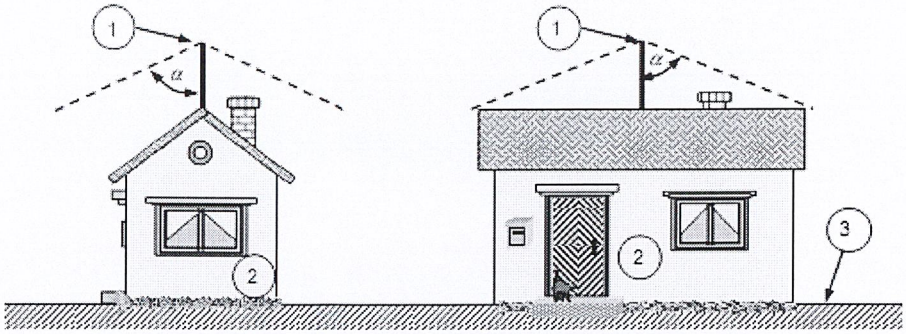
(ก) (ข)



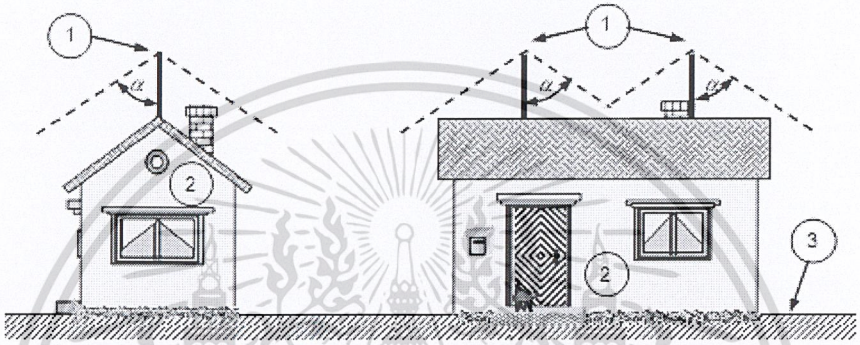
(ค)

รูปที่ 4.10 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแยกอิสระโดยใช้เสาตัวนำล่อฟ้าสองอันแยกอิสระโดยเชื่อมต่อจากสายตัวนำขึง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



เมื่อ

1 คือ ความสูงของแท่งตัวนำ

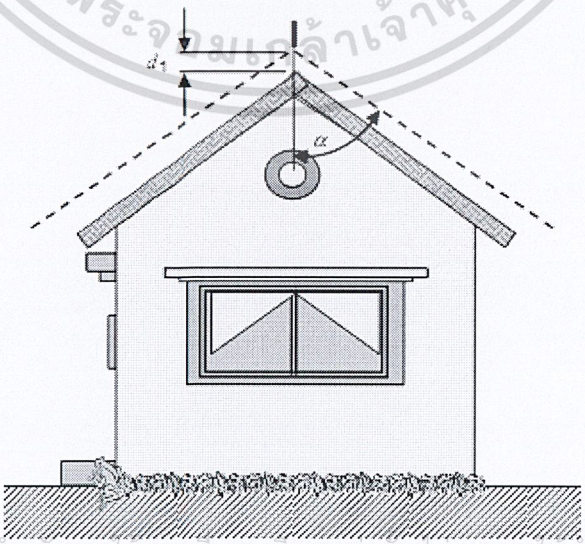
2 คือ โครงสร้างที่ถูกป้องกัน

3 คือ ระนาบอ้างอิงสมมติ

α คือ มุมป้องกันที่สอดคล้องตามตารางที่ 4.4

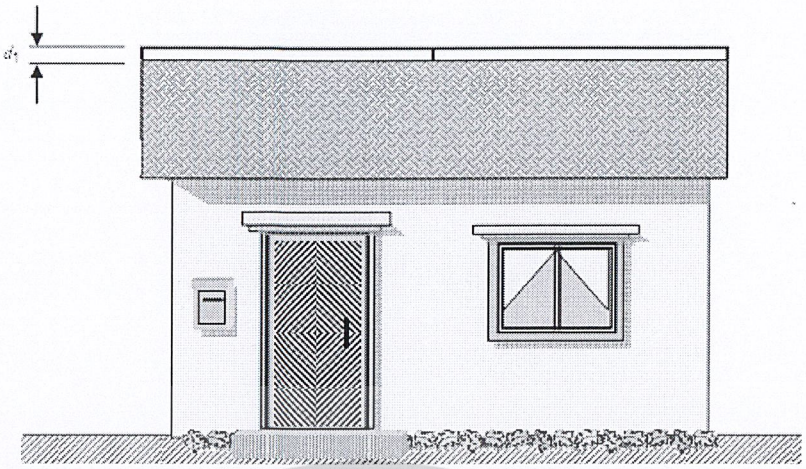
(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) ตัวอย่างการใช้แท่งตัวนำหนึ่งอัน (ข) ตัวอย่างการใช้แท่งตัวนำสองอัน [3]



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ

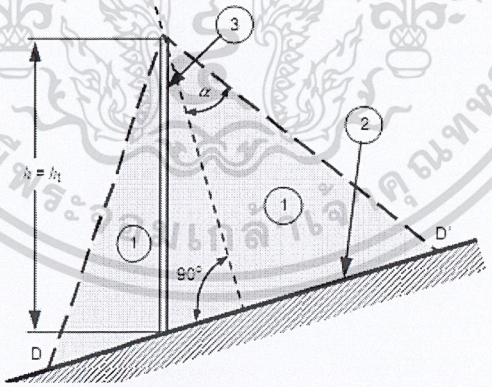
α คือ มุมป้องกันที่สอดคล้องกับตารางที่ 4.4

d_1 คือ ระยะตัวนำในแนวราบจากหลังคา

(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) ภาพฉายในระนาบแนวตั้งที่ตั้งฉากกับระนาบที่ประกอบด้วยเสาตัวนำ (ข) ภาพฉายในระนาบแนวตั้งที่ประกอบด้วยเสาตัวนำ [3]

ถ้าพื้นผิวที่ติดตั้งระบบตัวนำล่อฟ้าเป็นพื้นเอียง แกนของกรวยบริเวณที่ป้องกันควรตั้งฉากกับพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.13



เมื่อ หมายเลข 1 คือ พื้นที่ที่ถูกป้องกัน

2 คือ ระนาบอ้างอิง

3 คือ แท่งตัวนำล่อฟ้า

α คือ มุมป้องกัน

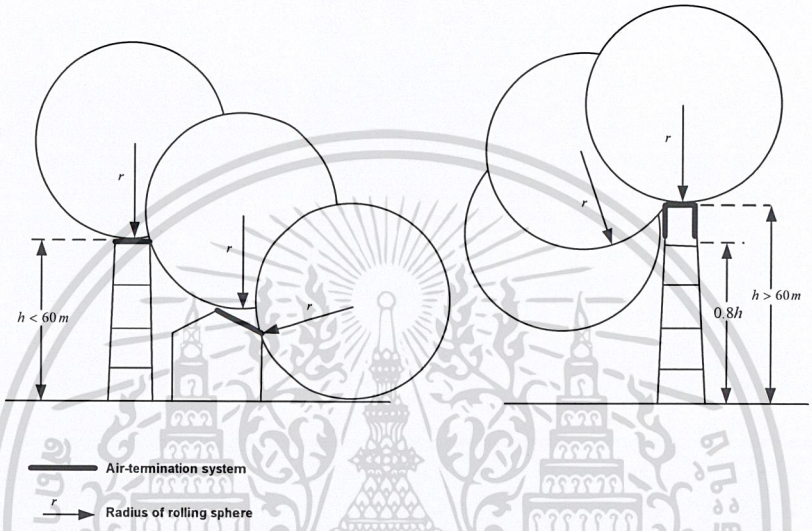
h คือ ความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้าตามตารางที่ 4.4

รูปที่ 4.13 พื้นที่ที่ถูกป้องกันโดยแท่งตัวนำล่อฟ้าบนพื้นผิวเอียงโดยใช้วิธีมุมป้องกันในการออกแบบ [3]

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือจำหน่ายเพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **วิธีทรงกลมกลิ้ง**

การใช้วิธีการนี้การจัดวางของตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าให้เหมาะสม ถ้าไม่มีจุดของโครงสร้างที่ถูกป้องกันสัมผัสกับทรงกลมที่มีรัศมี r ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับการป้องกัน (ดูตารางที่ 4.4) โดยทรงกลมกลิ้งจะ กลิ้งไปบริเวณรอบ ๆโครงสร้าง และบริเวณด้านบนของโครงสร้างในทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ด้วยวิธีการนี้ทรงกลมจะสัมผัสกับระบบตัวนำล่อฟ้าเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.14

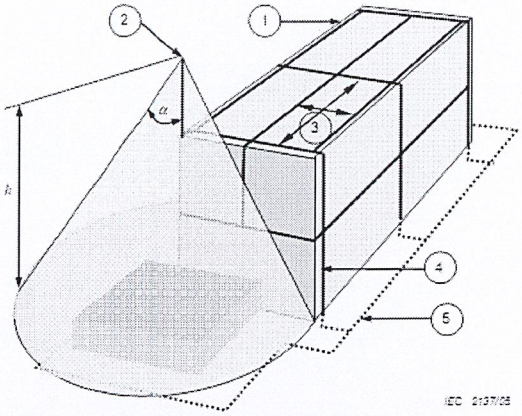


รูปที่ 4.14 การออกแบบระบบตัวนำล่อฟ้าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง [3]

สำหรับโครงสร้างที่สูงกว่ารัศมี r ของทรงกลมกลิ้งอาจเกิดการวาบไฟด้านข้างของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละจุดของโครงสร้างที่สัมผัสกับทรงกลมกลิ้งเป็นไปได้ที่จะเกิดจุดฟ้าผ่าขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ของการเกิดวาบไฟด้านข้างจะเกิดกับโครงสร้างที่สูงไม่เกิน 60 เมตร สำหรับโครงสร้างสูงการเกิดวาบไฟส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณด้านบนและขอบตามแนวนอนของโครงสร้าง และบริเวณมุมของโครงสร้าง มีเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่จะเกิดวาบไฟด้านข้างของโครงสร้าง

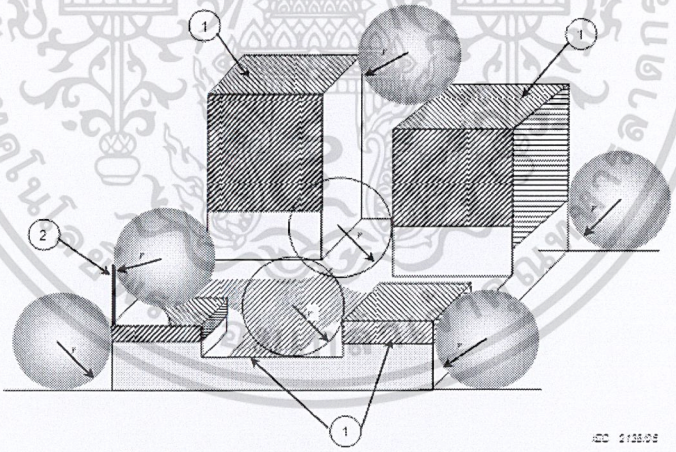
นอกจากนี้จากข้อมูลจะสังเกตว่าความน่าจะเป็นในการเกิดวาบไฟบริเวณด้านข้างตึกจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความสูงของจุดที่เกิดฟ้าผ่าบนโครงสร้างสูงเมื่อวัดจากพื้นดิน ดังนั้นการพิจารณาการติดตั้งระบบตัวนำล่อฟ้าควรอยู่สูงกว่าโครงสร้าง (โดยทั่วไปจะสูงกว่า 20% ของความสูงโครงสร้าง) ในกรณีนี้วิธีทรงกลมกลิ้งจะถูกนำมาใช้เฉพาะกับการวางตำแหน่งของระบบตัวนำล่อฟ้าของด้านบนของโครงสร้าง โดยในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ได้แสดงการนำไปวิธีทรงกลมกลิ้งไปใช้งานกับความสูงที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ 1 คือ ตัวนำล่อฟ้า
2 คือ แท่งตัวนำล่อฟ้า
3 คือ ขนาดตาข่าย
4 คือ ตัวนำลงดิน
5 คือ ระบบต่อลงดินด้วยตัวนำแบบวงแหวน
h คือ ความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้าเหนือระดับพื้นดิน
α คือ มุมป้องกัน

รูปที่ 4.15 การจัดวางตัวนำล่อฟ้าทั่วไป [3]



เมื่อ 1 คือ พื้นที่ที่แรเงาเป็นบริเวณที่ต้องการป้องกันจากฟ้าผ่า
2 คือ เสาตัวนำล่อฟ้าบนโครงสร้าง
r คือ รัศมีทรงกลมกลิ้งตามตารางที่ 4.4

รูปที่ 4.16 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของโครงข่ายตัวนำล่อฟ้าบนโครงสร้างที่รูปร่างที่ซับซ้อน [3]

เมื่อนำวิธีทรงกลมกลิ้งมาใช้กับแบบแปลนของโครงสร้าง โครงสร้างควรได้รับการพิจารณาจากทุกทิศทุกทางเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าไม่มีส่วนที่ยื่นออกมาในบริเวณที่ไม่มีการป้องกัน พื้นที่ที่ป้องกันโดยทั่วๆไปด้วยตัวนำล่อฟ้า ในระบบป้องกันฟ้าผ่าจะเป็นบริเวณที่วิธีทรงกลมกลิ้งนั้นไม่สามารถเข้าไปได้เมื่อมันไม่มีการเชื่อมต่อด้วยตัวนำล่อฟ้าและกับโครงสร้าง

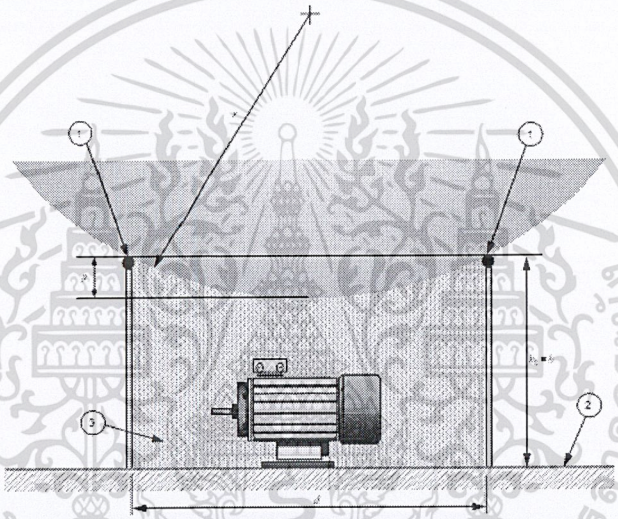
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปสร้างประโยชน์ด้านการค้าในรูปแบบใดๆ

สำหรับในรูปที่ 4.17 จะแสดงการป้องกันด้วยระบบตัวนำล่อฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าตามวิธีตาข่าย วิธีทรงกลมกลิ้งและวิธีมุมป้องกันด้วยการจัดวางของตัวนำล่อฟ้าแต่ละอัน

สำหรับในกรณีที่ต้องใช้ตัวนำในแนวราบขนานกัน 2 ตัวควรทำการติดตั้งไว้เหนือระนาบอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยระยะช่วงล้ำของทรงกลมกลิ้ง p ใต้ระดับของตัวนำในบริเวณที่จะป้องกันสามารถหาได้จาก

$$p = r - [r^2 - (d/2)^2]^{1/2} \qquad (4.2)$$

โดยระยะช่วงล้ำ p ควรมีค่าไม่น้อยกว่า h_1 ลบกับความสูงของวัตถุที่ถูกป้องกัน (ดูรูปที่ 4.17)



รูปที่ 4.17 บริเวณป้องกันด้วยตัวนำล่อฟ้าในแนวระนาบ 2 ชุดขนานกันหรือแท่งตัวนำล่อฟ้า 2 ชุด ($r > h_t$) [3]

เมื่อ หมายเลข 1 คือ ลวดในแนวระนาบ

2 คือ ระนาบอ้างอิง

3 คือ ระยะที่ป้องกันด้วยแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ขนานกัน 2 ชุดในแนวระนาบ

h_t คือ ความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้าเหนือระนาบอ้างอิง

p คือ ระยะช่วงล้ำของทรงกลมกลิ้ง

h คือ ความสูงของตัวนำล่อฟ้าตามตารางที่

r คือ รัศมีทรงกลมกลิ้ง

d คือ ระยะห่างของตัวนำล่อฟ้าในแนวระนาบ 2 ชุดขนานกันหรือแท่งตัวนำล่อฟ้า 2 ชุด

หมายเหตุ ระยะล่วงล้ำ p ของทรงกลมกลิ้งควรมีค่าน้อยกว่า h_t ลบกับความสูงของวัตถุที่ถูกป้องกัน สูงสุดเพื่อป้องกันบริเวณทั้งหมดระหว่างตัวนำ

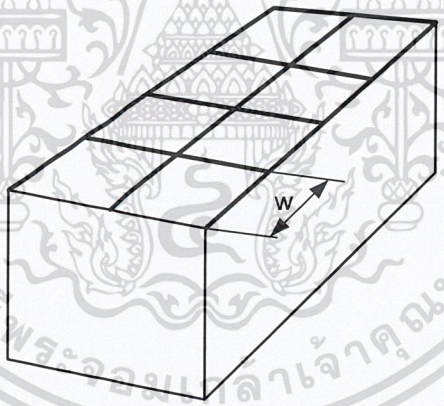
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **วิธีตาข่าย**

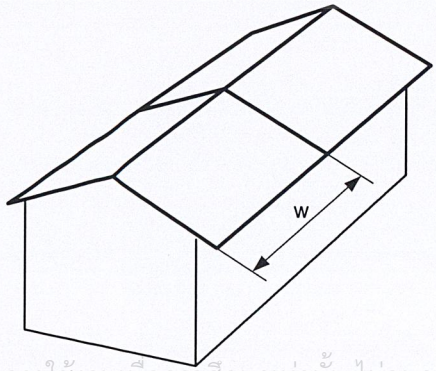
  วิธีป้องกันแบบตาข่ายนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันบริเวณพื้นราบ โดยที่พื้นราบทั้งหมดมีเงื่อนไขต่อไปนี้

  1. ตำแหน่งของตัวนำล่อฟ้า
     - บริเวณขอบของหลังคา
     - บริเวณของหลังคาที่ยื่นออกมา
     - บริเวณสันของหลังคา ถ้าความชันของหลังคาสูงกว่า 1/10
  2. ขนาดของตาข่ายของโครงข่ายตัวนำล่อฟ้าต้องมีขนาดไม่ใหญ่กว่าค่าในตารางที่ 4.4
  3. โครงข่ายของระบบตัวนำล่อฟ้าจะมีการก่อสร้างในลักษณะที่กระแสฟ้าผ่ามีทางเดินอย่างน้อยสองเส้นทางที่จะลงสู่รากสายดิน
  4. ไม่มีการติดตั้งส่วนของโลหะยื่นออกมาจากบริเวณป้องกันจากระบบตัวนำล่อฟ้า
  5. ตัวนำล่อฟ้าเท่าที่เป็นไปได้ต้องมีเส้นทางสั้นสุดและตรงที่สุด

ตัวอย่างของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแยกอิสระโดยใช้แท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยวิธีตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.18 สำหรับโครงสร้างที่มีหลังคาเรียบ และรูปที่ 4.19 สำหรับโครงสร้างที่หลังคามีความชัน ส่วนรูปที่ 4.20 แสดงระบบป้องกันฟ้าผ่าของอาคารอุตสาหกรรม



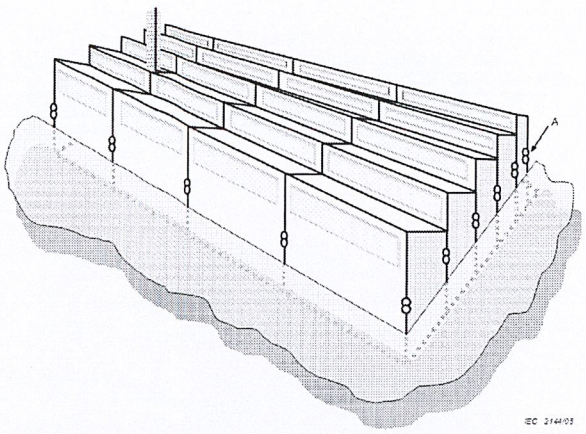
รูปที่ 4.18 ระบบป้องกันฟ้าผ่าของตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาเรียบ [3]



เมื่อ w คือ ขนาดของตาข่าย

รูปที่ 4.19 ระบบป้องกันฟ้าผ่าของตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาที่มีความชัน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

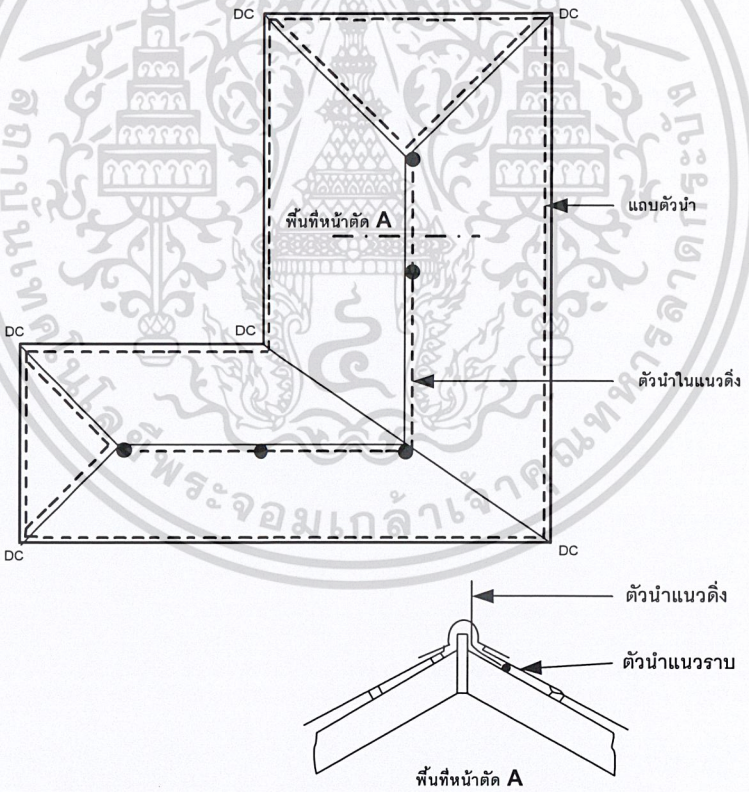


เมื่อ A คือ จุดทดสอบ

หมายเหตุ ขนาดทั้งหมดควรเลือกตามระดับการป้องกันในตารางที่ 4.3 และ 4.4

รูปที่ 4.20 ตัวอย่างของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนโครงสร้างที่มีหลังคาเอียง [3]

ในรูปที่ 4.21 ได้แสดงตัวอย่างของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ได้ซ่อนตัวนำไว้



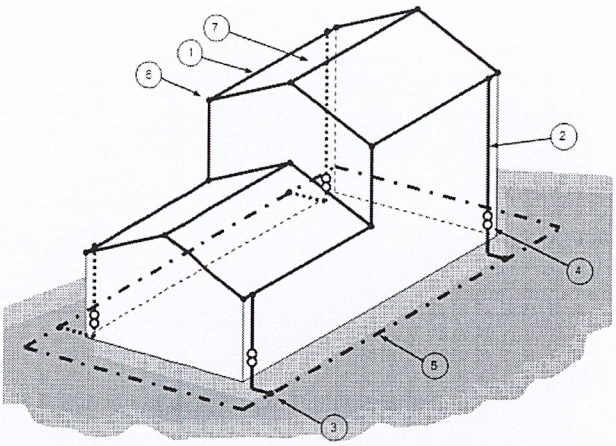
เมื่อ – – - คือ ตัวนำซ่อน

● คือ ตัวนำล่อฟ้าในแนวดิ่ง

DC คือ ตัวนำลงดิน

รูปที่ 4.21 ตัวอย่างตัวนำล่อฟ้าและตัวนำที่ติดตั้งซ่อนในอาคารที่สูงไม่เกิน 20 เมตร หลังคาเอียง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกบนสิ่งปลูกสร้างที่มีหลังคาต่างระดับ [3]

4.3.1.3 องค์ประกอบทางธรรมชาติ [3]

ตามที่กล่าวมาในส่วนของโครงสร้างที่ควรพิจารณาองค์ประกอบของระบบตัวนำล่อฟ้าและในส่วนของระบบป้องกันฟ้าผ่า

1. แผ่นโลหะที่ครอบคลุมโครงสร้างที่ป้องกันต้องมีเงื่อนไขต่อไปนี้
   - ชิ้นส่วนต่าง ๆที่ต่อกันจะต้องมีความคงทนและมีความต่อเนื่องทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการเชื่อม การขัน ฯลฯ
   - ความหนาของแผ่นโลหะจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่า t' ตามตารางที่ 4.5 ถ้ามันไม่มีความสำคัญที่จะป้องกันในการเจาะทะลุของแผ่นโลหะหรือพิจารณาการเผาไหม้ของวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย
   - ความหนาของแผ่นโลหะจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่า t ในตารางที่ 4.5 ถ้าหากจำเป็นที่จะต้องระวังต่อการเจาะหรือพิจารณาปัญหาจุดที่มีความร้อน
   - วัสดุไม่มีการหุ้มฉนวน

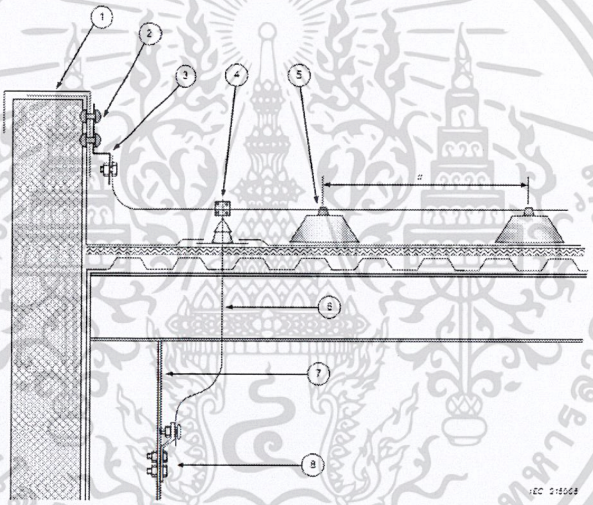
ตารางที่ 4.5 ความหนาน้อยสุดของแผ่นโลหะหรือท่อโลหะของระบบตัวนำล่อฟ้า

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า	วัสดุ	ความหนา t (มม.)	ความหนา t' (มม.)
1 - 4	ตะกั่ว	-	2.0
	เหล็ก (สแตนเลส,กัลวาไนซ์)	4	0.5
	ไทเทเนียม	4	0.5
	ทองแดง	5	0.5
	อลูมิเนียม	7	0.65
	สังกะสี	-	0.7
เมื่อ t คือพิจารณาถึงการระวังในเรื่องของการเจาะ จุดที่ได้รับความร้อนหรือเผาไหม้ t' คือไม่พิจารณาถึงการระวังในเรื่องของการเจาะ จุดที่ได้รับความร้อนหรือเผาไหม้			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชิ้นส่วนของโลหะที่ใช้ในการก่อสร้างหลังคา (โครงถัก การเชื่อมเหล็กเสริมแรงและอื่นๆ) ภายใต้หลังคาที่ไม่ใช่โลหะโดยมีเงื่อนไขว่าส่วนหลังนี้สามารถแยกออกจากโครงสร้างที่ถูกป้องกัน
3. ส่วนของโลหะเช่น ราว, ท่อ, การเคลือบลูกกรงและอื่นๆ จะต้องมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดไม่น้อยกว่าขนาดในมาตรฐานของส่วนประกอบระบบตัวนำล่อฟ้า
4. ท่อโลหะและถังน้ำบนหลังคาจะต้องทำมาจากวัสดุที่มีความหนาและขนาดพื้นที่หน้าตัดตามตารางที่ 4.7
5. ท่อโลหะหรือถังผสมสารที่พร้อมติดไฟและระเบิดได้ต้องมีเงื่อนไขคือต้องมีความหนาไม่น้อยกว่าค่าที่เหมาะสม t ในตารางที่ 4.5 และการเพิ่มของอุณหภูมิที่พื้นผิวภายในที่จุดการเกิดฟ้าผ่าที่ไม่เป็นอันตราย

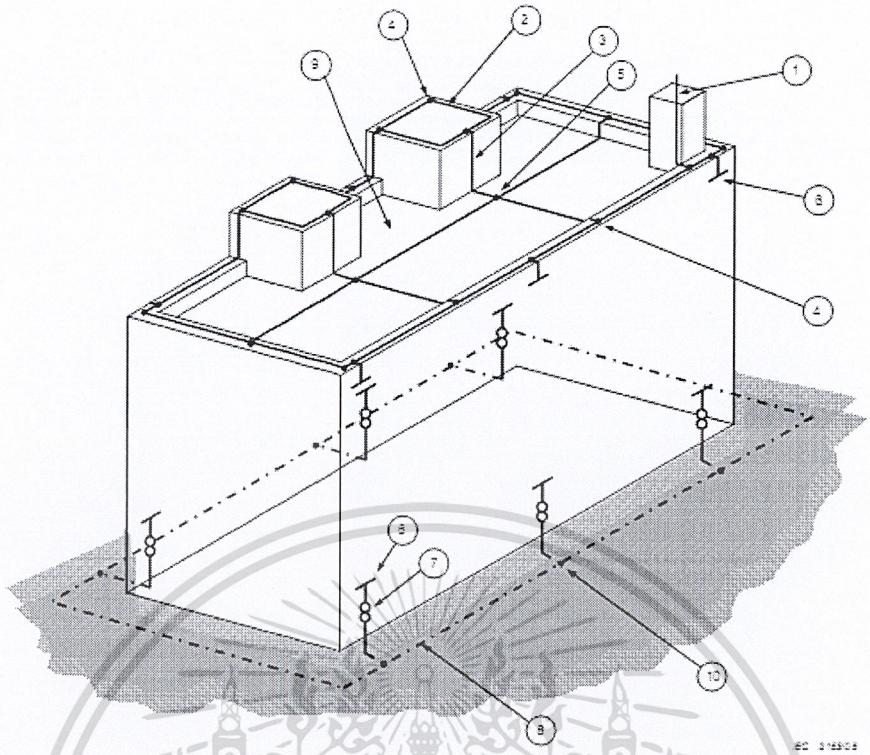
ในรูปที่ 4.23 แสดงถึงรายละเอียดโครงสร้างสำหรับติดตั้งบนหลังคาแบน



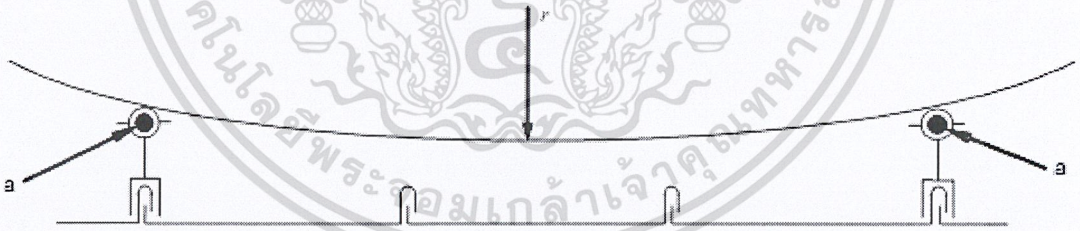
รูปที่ 4.23 การก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้องค์ประกอบทางธรรมชาติบนหลังคาของโครงสร้าง [3]

ในรูปที่ 4.24 ได้แสดงถึงการวางตำแหน่งของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในโครงสร้างที่มีหลังคาแบนและทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ไม้หรืออิฐ และในรูปที่ 4.25 ได้แสดงถึงตัวอย่างการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาซึ่งคลุมด้วยตัวนำและไม่ต้องให้เกิดฟ้าผ่าทะลุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



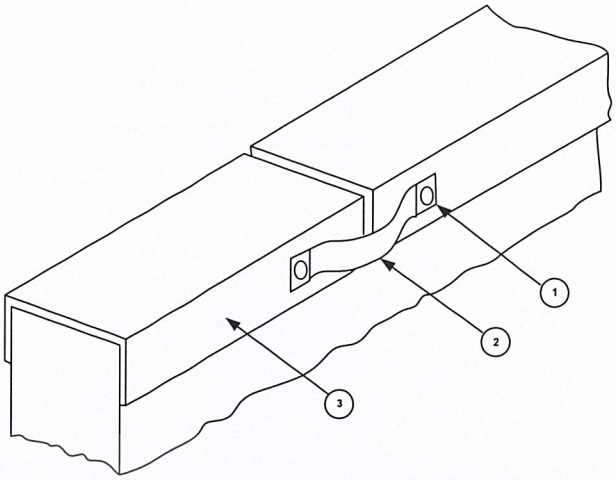
รูปที่ 4.24 การก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกบนโครงสร้างคอนกรีตเสริมแรงโดยใช้เหล็กเสริมเป็นองค์ประกอบทางธรรมชาติ [3]



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าบนหลังคาซึ่งคลุมด้วยตัวนำและไม่ต้องให้เกิดฟ้าผ่าทะลุ [3]

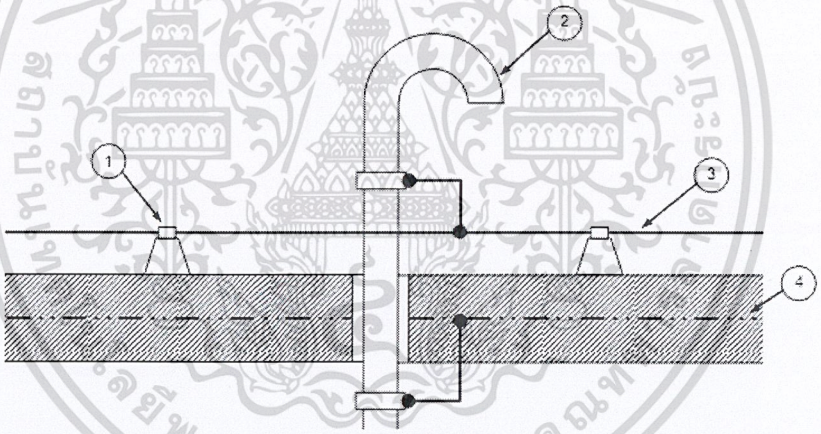
สำหรับการประสานศักย์ให้เท่ากันบนหลังคาโดยใช้ตัวนำวงแหวน จุดต่อของครอบโลหะบนกำแพงบังหน้าของหลังคาแสดงได้ดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 การประสานจุดต่อของครอบโลหะบนกำแพงบังหน้าของหลังคา [3]

ในรูปที่ 4.27 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดการติดตั้งของหลังคาที่เป็นสื่อนำไฟฟ้ากับแท่งตัวนำล่อฟ้า



รูปที่ 4.27 การต่อแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยธรรมชาติกับตัวนำล่อฟ้า [3]

4.3.2 ระบบตัวนำลงดิน [3]

4.3.2.1 ทั่วไป

เพื่อลดโอกาสของความเสียหายของกระแสฟ้าผ่าที่ไหลในระบบป้องกันฟ้าผ่า ตัวนำลงดินควรมีการจัดในลักษณะดังกล่าวจากจุดที่เกิดฟ้าผ่าลงดินดังนี้

1. มีเส้นทางการไหลของกระแสขนานกันหลายเส้นทาง
2. ความยาวของกระแสต้องสั้นสุด
3. ทำการประสานศักย์ให้เท่ากันในทุกๆจุด

4.3.2.2 การวางตำแหน่งระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแยกอิสระ

1. ถ้าตัวนำล่อฟ้าประกอบด้วยแท่งตัวนำบนเสาวิทยุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะ หรือต่อกับเหล็กเสริมแรงที่เชื่อมต่อแล้วจำเป็นที่ต้องมีตัวนำลงดิน ในกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เสาวิทยุทำมาจากโลหะหรือเหล็กเสริมแรงที่เชื่อมต่อแล้วไม่จำเป็นที่จะต้องเพิ่มตัวนำลงดิน

2. ถ้าตัวนำล่อฟ้าประกอบกันเป็นโครงข่ายจะต้องมีตัวนำลงดินอย่างน้อยหนึ่งชุดที่โครงยึดแต่ละอัน
3. ตัวนำล่อฟ้าจากโครงข่ายตัวนำต้องมีตัวนำลงดินอย่างน้อยหนึ่งอันที่ปลายของตัวนำแต่ละอัน

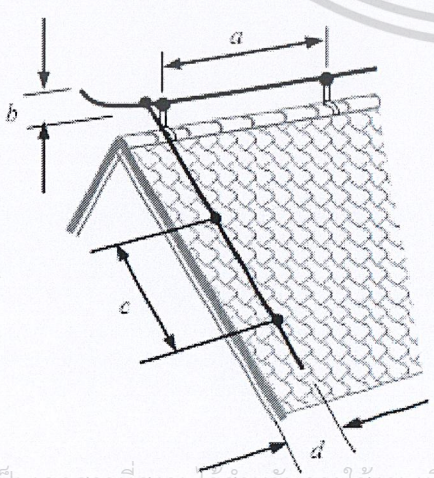
4.3.2.3 การวางตำแหน่งระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบไม่แยกอิสระ

สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบไม่แยกอิสระจะต้องมีจำนวนตัวนำลงดินอย่างน้อยสองอันและควรจะกระจายออกไปบริเวณรอบๆ โครงสร้างที่ถูกป้องกันและต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดทางสถาปัตยกรรมและข้อกำหนดในทางปฏิบัติ โดยระยะห่างระหว่างตัวนำลงดินรอบๆ โครงสร้างควรมีระยะที่เท่ากัน ซึ่งค่าทั่วไปของระยะห่างแต่ละระดับการป้องกันจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.6

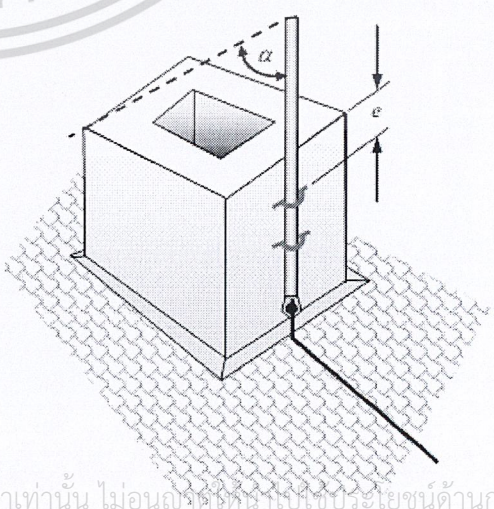
ตารางที่ 4.6 ค่าทั่วไปของระยะห่างระหว่างตัวนำลงดินและระหว่างตัวนำแบบวงแหวนแต่ละระดับการป้องกันฟ้าผ่า

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า	ค่าทั่วไปของระยะห่าง (เมตร)
1	10
2	10
3	15
4	20

ในการติดตั้งตัวนำลงดินเป็นไปได้ควรติดตั้งบริเวณมุมของโครงสร้างและรูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างการจัดตัวนำบนหลังคาและตัวนำลงดินสำหรับโครงสร้างที่มีหลังคาเอียง

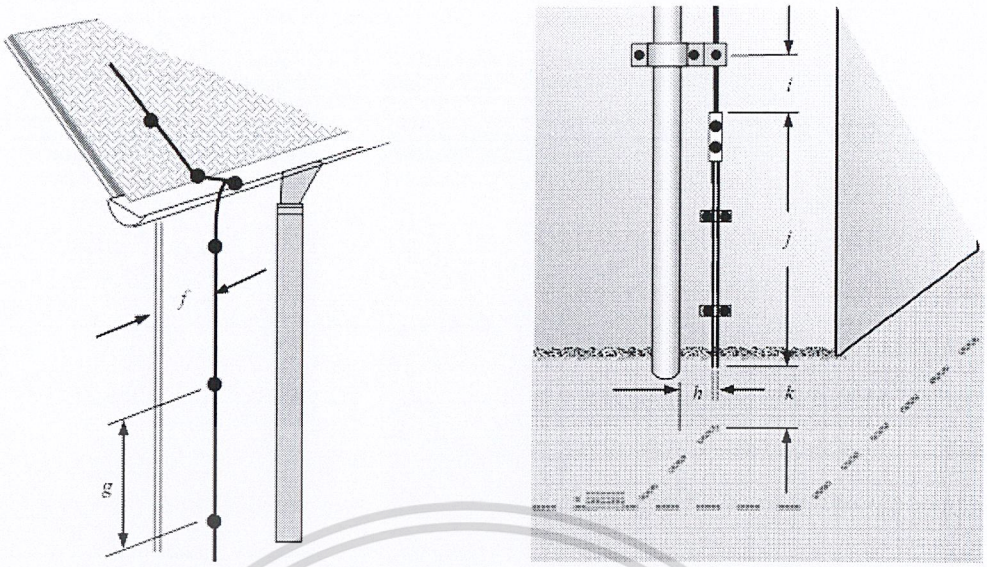


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

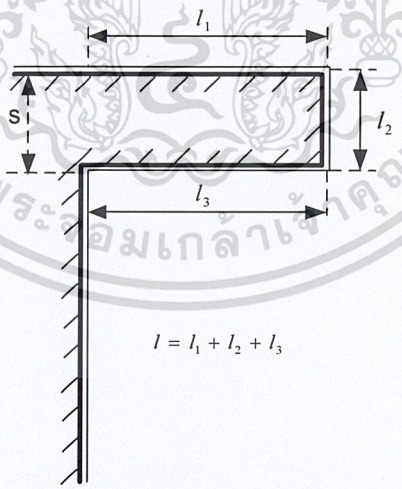


(ค) (ง)

รูปที่ 4.28 ตัวอย่างรายละเอียดระบบป้องกันฟ้าผ่าของสิ่งปลูกสร้างที่มีหลังคาเอียง [3]

4.3.2.4 การติดตั้งตัวนำลงดิน

ตัวนำลงดินจะถูกติดตั้งในทางปฏิบัติโดยมันจะมีรูปแบบโดยตรงกับตัวนำล่อฟ้า ตัวนำลงดินที่ติดตั้งควรมีลักษณะที่ตั้งตรงให้สั้นที่สุดและมีเส้นทางลงดินตรงสุด ควรหลีกเลี่ยงการสร้างลูป แต่ในที่นี้ไม่สามารถเป็นไปได้ เมื่อระยะ s ที่วัดคร่อมระหว่างช่องว่างของตัวนำสองจุดและความยาวของตัวนำ l ระหว่างจุดเหล่านั้น (ดูรูปที่ 4.29)



รูปที่ 4.29 ลูปในตัวนำลงดิน [3]

ตัวนำลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบไม่แยกอิสระจากโครงสร้างที่ป้องกันอาจต้องติดตั้งตามเงื่อนไขต่อไปนี้

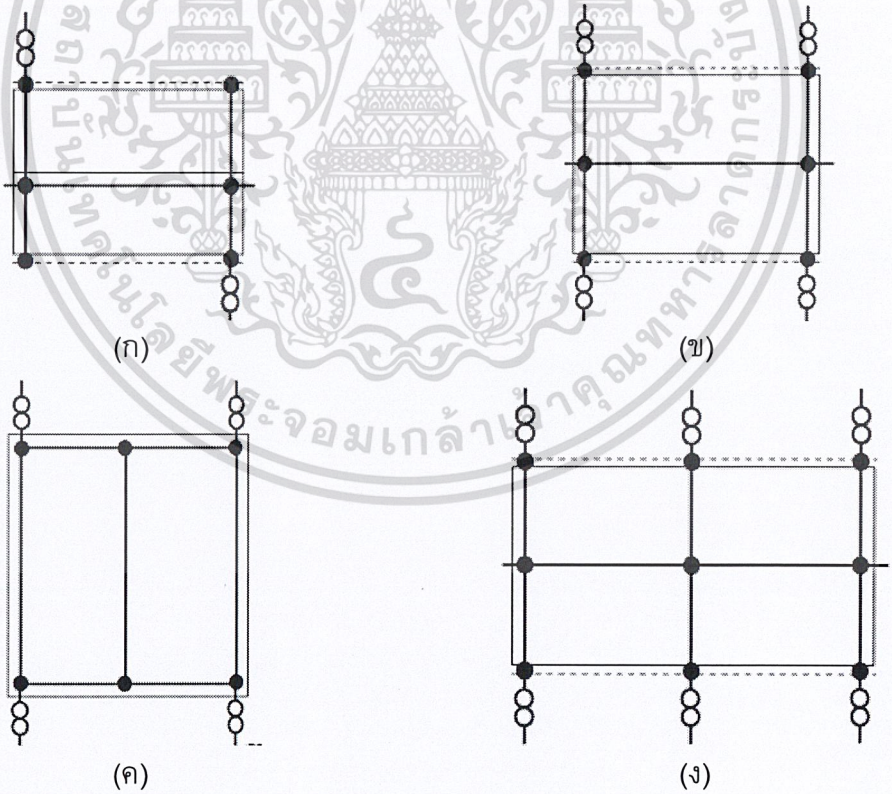
1. ถ้าผนังทำจากวัสดุที่ไม่ติดไฟ ตัวนำลงดินอาจจะต้องวางอยู่บนพื้นผิวหรืออยู่ภายในผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

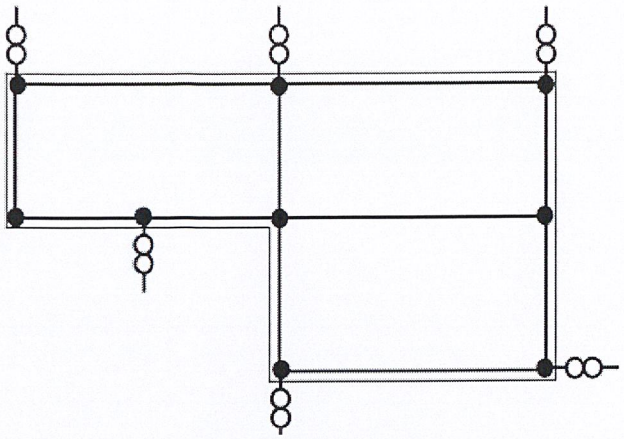
2. ถ้าผนังทำจากวัสดุติดไฟตัวนำลงดินอาจต้องวางในตำแหน่งบนพื้นผิวของผนัง โดยมีเงื่อนไขว่าถ้าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลผ่านของกระแสฟ้าผ่าจะต้องไม่เป็นอันตรายต่อวัสดุที่ผนัง
3. ถ้าผนังทำจากวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตัวนำลงดินควรว่างให้มีระยะห่างระหว่างตัวมันเองและผนังมากกว่า 0.1 เมตรเสมอ ตัวยึดแบบติดพื้นผิวอาจจะสัมผัสกับผนังได้

หากไม่มั่นใจว่าระยะห่างระหว่างตัวนำกับวัสดุที่ติดไฟง่าย พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ก็ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 100 mm^2

สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีส่วนที่เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง กระแสฟ้าผ่าจะไหลผ่านตัวนำลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการกำหนดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในของโครงสร้างดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 ได้แสดงถึงการก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้ตัวนำลงดิน 2 ชุดและรากสายดินฐานราก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

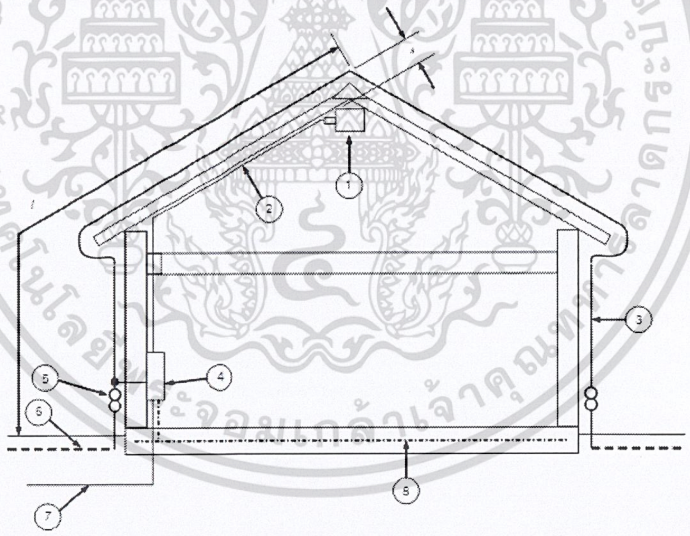
------ คือ องค์ประกอบทางธรรมชาติของระบบป้องกันฟ้าผ่า

——— คือ ตัวนำระบบป้องกันฟ้าผ่า

—oo— คือ Test Joint

—●— คือ จุดร่วม

รูปที่ 4.30 ตัวอย่างการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกของสิ่งปลูกสร้าง [3]



รูปที่ 4.31 การก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้ตัวนำลงดิน 2 ชุดและรากสายดินฐานราก [3]

4.3.2.5 องค์ประกอบทางธรรมชาติ

ส่วนของโครงสร้างต่อไปนี้ควรได้รับการพิจารณาเป็นตัวนำลงดินโดยธรรมชาติได้

1. เงื่อนไขการติดตั้งโลหะ
   - มีความต่อเนื่องทางไฟฟ้าระหว่างส่วนต่างๆ
   - ขนาดน้อยสุดต้องเท่ากับขนาดตัวนำลงดินมาตรฐานในตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

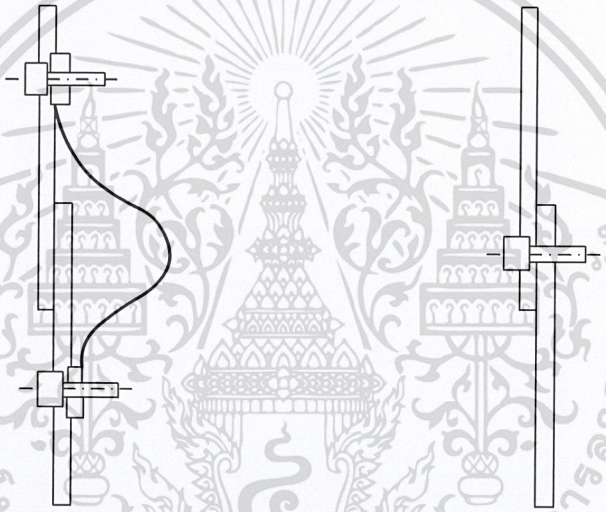
2. การเชื่อมต่อโครงโลหะของโครงสร้าง

3. โลหะของโครงคอนกรีตรับแรงของโครงสร้างต้องมีความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

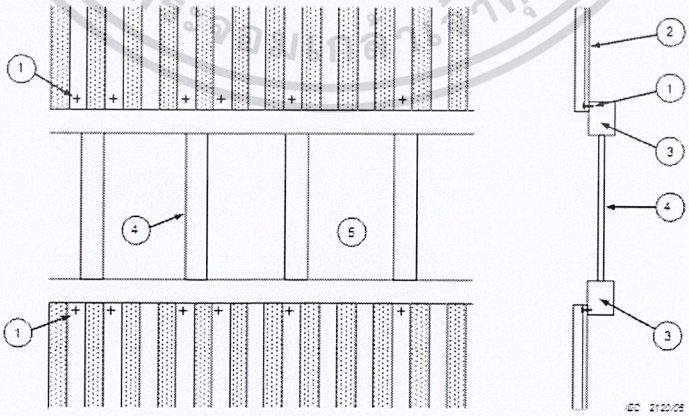
4. องค์ประกอบด้านหน้าตึก ราวและมุขโลหะต้องมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ขนาดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของตัวนำลงดินและสำหรับแผ่นโลหะหรือท่อโลหะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 0.5 มม.
- ความต่อเนื่องทางไฟฟ้าตามแนวดิ่งต้องเป็นไปตามข้อกำหนด

ในรูปที่ 4.32 เป็นตัวอย่างของตัวนำที่เชื่อมระหว่างแผ่นโลหะด้านหน้าโครงสร้างที่ใช้งานซึ่งแผ่นโลหะนี้จะใช้เป็นตัวนำลงดินธรรมชาติ รูปที่ 4.33 แสดงการต่อแถบโลหะต่อเนื่องของหน้าต่างเข้ากับแผ่นโลหะที่ตกแต่งส่วนหน้าของสิ่งปลูกสร้าง และรูปที่ 4.34 แสดงตัวนำลงดินภายในโครงสร้างทางอุตสาหกรรม

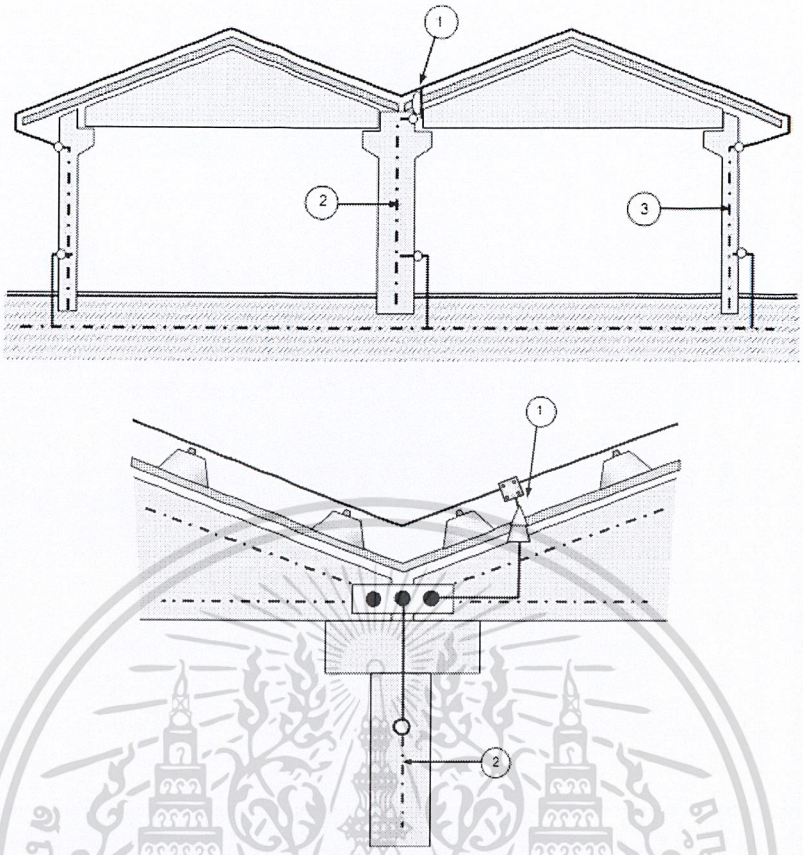


รูปที่ 4.32 การเชื่อมกันระหว่างแผ่นโลหะแต่ละอันที่ตกแต่งส่วนหน้าของสิ่งปลูกสร้าง [3]



รูปที่ 4. 33 การต่อแถบโลหะต่อเนื่องของหน้าต่างเข้ากับแผ่นโลหะที่ตกแต่งส่วนหน้าของสิ่งปลูกสร้าง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ตัวนำลงดินภายในโครงสร้างทางอุตสาหกรรม [3]

4.3.3 ระบบรากสายดิน [3]

4.3.3.1 ทั่วไป

เมื่อกระแสฟ้าผ่ากระจายตัวลงสู่พื้นดินเพื่อลดอันตรายจากแรงดันเกิน รูปร่างและขนาดของระบบรากสายดินนั้นมีกฎเกณฑ์ที่สำคัญ โดยทั่วๆไปค่าความต้านทานดินนั้นจะมีค่าต่ำ (ถ้าเป็นไปได้ค่าความต้านทานดินจะต่ำกว่า 10Ω เมื่อวัดที่ความถี่ต่ำ)

จากมุมมองของระบบป้องกันฟ้าผ่าควรใช้ระบบโครงสร้างรากสายดินแบบร่วมชุดเดียวและมีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ทั้งหมด (ตัวอย่างเช่น ระบบป้องกันฟ้าผ่า ระบบไฟฟ้ากำลังและระบบไฟฟ้าสื่อสาร) การต่อรากสายดินควรต้องมีการประสานศักย์ให้เท่ากันตามข้อกำหนด

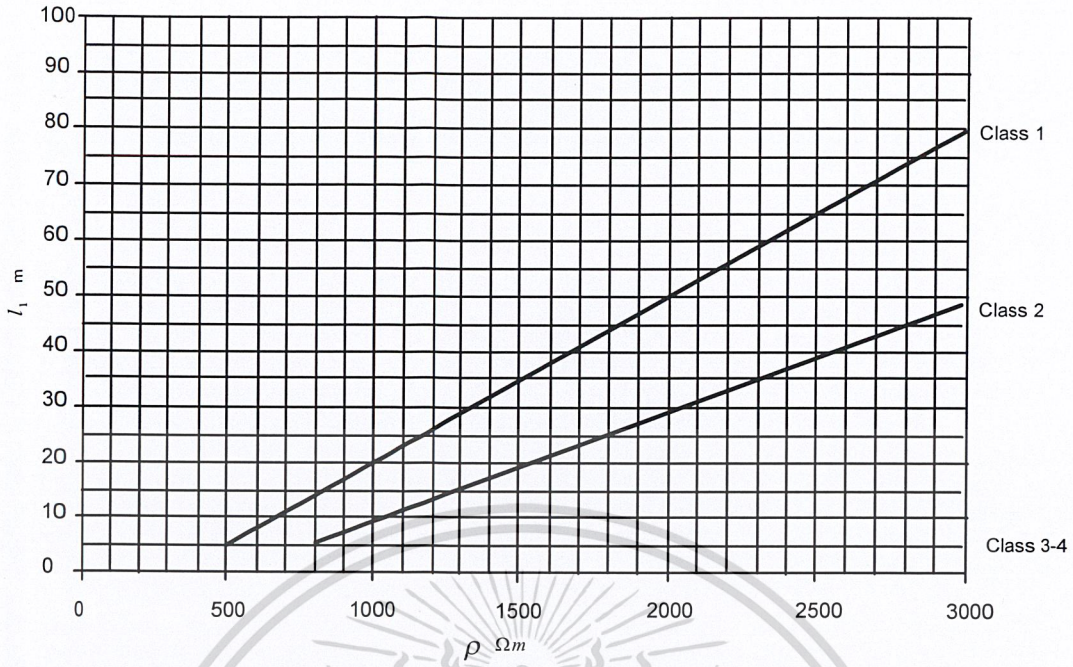
4.3.3.2 การจัดการระบบรากสายดินตามเงื่อนไขทั่วไป

สำหรับระบบรากสายดินมีการจัดอยู่ 2 ประเภทคือ

1. การจัดการระบบรากสายดินแบบ A

การจัดการระบบรากสายดินจะประกอบด้วยรากสายดินในแนวนอนและแนวดิ่งซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ภายนอกโครงสร้างที่ป้องกันที่ต่ออยู่กับตัวนำลงดินแต่ละอัน โดยในประเภทนี้จำนวนรากสายดินต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่า 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ความยาวน้อยสุด l_1 ของรากสายดินแต่ละอันตามเงื่อนไขของระบบป้องกันฟ้าผ่า[3]

ความยาวน้อยสุดของรากสายดินแต่ละอันที่ตัวนำลงดินคือ

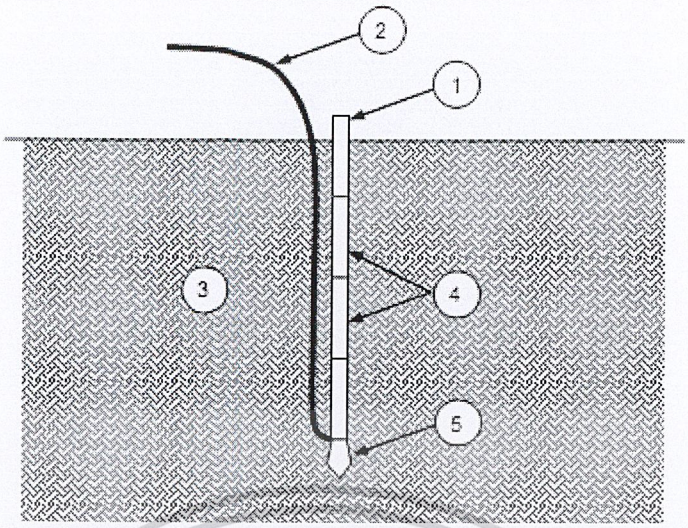
- l_1 สำหรับอิเล็กโตรดแนวราบ
- $0.5l_1$ สำหรับอิเล็กโตรดในแนวราบ

เมื่อ l_1 คือความยาวน้อยสุดของอิเล็กโตรดแนวราบที่แสดงในรูปที่ 4.35 สำหรับรากสายดินทั้งสองแบบ (แนวราบและแนวดิ่ง) ควรพิจารณาความยาวทั้งหมดด้วย

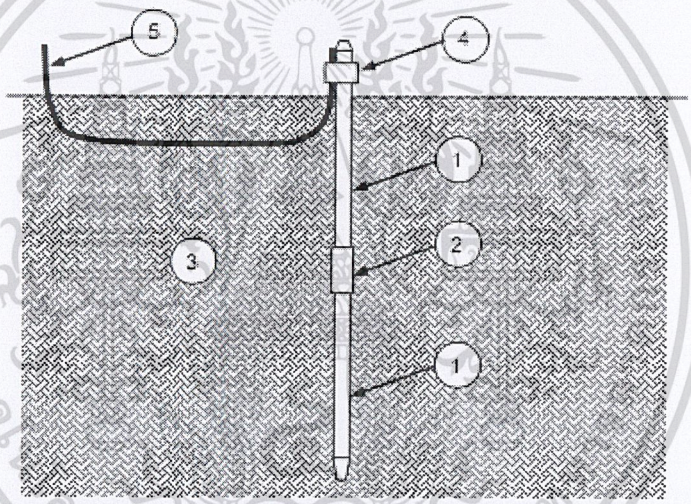
ความยาวน้อยสุดที่ระบุไว้ในรูปที่ 4.35 อาจจะไม่นำค่าความต้านทานดินมาพิจารณา เนื่องจากค่าความต้านทานของดินนั้นมีค่าต่ำของระบบรากสายดินที่มีค่าน้อยกว่า 10 Ω

ในรูปที่ 4.36 และ 4.37 แสดงการจัดระบบรากสายดินแบบ A ซึ่งมีตัวนำฟ้าผ่าตามตารางที่ 4.7 โดยจะฝังลงไปในดิน โดยเทคนิคการต่อลงดินนี้มีข้อดีหลายประการและหลีกเลี่ยงในการใช้แคลมป์และจุดต่อร่วมในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ตัวอย่างการจัดการระบบตัวนำลงดินแบบ A ด้วยรากสายดินแนวดิ่ง [3]



รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการจัดการระบบตัวนำลงดินแบบ A ด้วยแท่งตัวนำแนวดิ่ง [3]

2. การจัดการระบบรากสายดินแบบ B

การจัดวางรากสายดินประเภทนี้ประกอบด้วยตัวนำแบบวงแหวนของโครงสร้างภายนอกที่ป้องกันที่ติดต่อกับดินอย่างน้อย 80% ของความยาวทั้งหมดหรือรากสายดินฐานราก

สำหรับรากสายดินวงแหวน (หรือรากสายดินฐานราก) มีรัศมีเฉลี่ย r_e ของพื้นที่ที่รากสายดินแบบวงแหวนนี้ล้อมรอบอยู่ควรมีค่าไม่น้อยกว่าค่าของ l_1

$$r_e \geq l_1 \tag{4.3}$$

เมื่อ l_1 ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.35 ตามระดับการป้องกันฟ้าผ่า 1, 2, 3 และ 4

เมื่อต้องการให้ค่าของ l_1 มีค่ามากกว่าค่าที่เหมาะสมของ r_e ควรทำการเพิ่มรากสายดินในแนวราบและแนวดิ่ง โดยที่ค่าความยาวตามแนวราบ l_r และความยาวในแนวดิ่ง l_v สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$l_r = l_1 - r_e \tag{4.4}$$

และ $$l_v = (l_1 - r_e)/2 \quad (4.5)$$

จำนวนรากสายดินที่แนะนำควรไม่น้อยกว่าจำนวนของตัวนำลงดิน 2 ชุด ในการเพิ่มรากสายดินควรต่อกับรากสายดินแบบวงแหวนที่จุดต่อ

3.3.3.3 การติดตั้งรากสายดิน

รากสายดิน (การจัดรากสายดินแบบ B) ควรฝังโดยใช้ความลึกอย่างน้อย 0.5 เมตรและห่างจากกำแพงเป็นระยะ 1 เมตร สำหรับรากสายดิน (การจัดรากสายดินแบบ A) ควรใช้ความลึกไม่น้อยกว่า 0.5 เมตรและติดตั้งให้กระจายสม่ำเสมอเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดผลของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าภายในดิน การติดตั้งรากสายดินต้องติดตั้งให้สามารถตรวจสอบได้ในขณะที่ทำการก่อสร้างอยู่

ความลึกในการฝังและประเภทของรากสายดินควรที่จะช่วยลดผลกระทบเรื่องการกัดกร่อน ดินแห้งและดินแข็งจะทำให้ค่าความต้านทานดินนั้นมีค่าคงที่

3.3.3.4 รากสายดินธรรมชาติ

ในการต่อรากสายดินระหว่างแผ่นโลหะเสริมแรงในฐานคอนกรีตตามข้อกำหนดหรือโครงสร้างโลหะที่อยู่ใต้ดินอื่นๆ ควรใช้เป็นรากสายดิน เมื่อใช้โลหะรับแรงในคอนกรีตเป็นรากสายดินจะต้องดูแลเป็นกรณีพิเศษเพื่อเป็นการป้องกันปัญหาทางกลของคอนกรีต

3.3.5 การเลือกวัสดุและขนาด

3.3.5.1 วัสดุ

วัสดุและขนาดควรจะพิจารณาในเรื่องของการกัดกร่อนของโครงสร้างที่ถูกป้องกันหรือระบบป้องกันฟ้าผ่า

3.3.5.2 ขนาด

รูปทรงและขนาดของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำล่อฟ้า แท่งตัวนำล่อฟ้าและตัวนำลงดินในตารางที่ ส่วนรูปทรงและขนาดของพื้นที่หน้าตัดของรากสายดินที่ให้ดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 วัสดุ รูปทรงและขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำล่อฟ้า, แท่งตัวนำล่อฟ้าและตัวนำลงดิน

วัสดุ	รูปทรง	ขนาด พื้นที่หน้าตัด mm^2	คำอธิบาย
ทองแดง	Solid tape Solid round Stranded Solid round	50 50 50 200	ความหนาอย่างน้อย 2 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม.
แผ่นทองแดงเคลือบดีบุก	Solid tape Solid round Stranded	50 50 50	ความหนาอย่างน้อย 2 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม.
อลูมิเนียม	Solid tape Solid round Stranded	70 50 50	ความหนาอย่างน้อย 3 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม.
อลูมิเนียมอัลลอยด์	Solid tape Solid round Stranded Solid round	50 50 50 200	ความหนาอย่างน้อย 2.5 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม.
เหล็กกัลวาไนซ์จุ่มร้อน	Solid tape Solid round Stranded Solid round	50 50 50 200	ความหนาอย่างน้อย 2.5 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม.
เหล็กสเตนเลส	Solid tape Solid round Stranded Solid round	50 50 70 200	ความหนาอย่างน้อย 2 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 วัสดุ, รูปทรงและขนาดน้อยสุดของรากสายดิน

วัสดุ	รูปทรง	ขนาดน้อยสุด			คำอธิบาย
		หลักดิน Ø mm	ตัวนำลงดิน	แผ่นตัวนำลงดิน mm.	
ทองแดง	-Stranded		50 mm^2		เส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 1.7 มม.
	- Solid round		50 mm^2		เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม.
	- Solid tape		50 mm^2		ความหนาอย่างน้อย 2 มม.
	- Solid round	15			
	- Pipe	20			ความหนาอย่างน้อย 2 มม.
	-Solid plate			500 × 500	ความหนาอย่างน้อย 2 มม.
	-Lattice plate			600 × 600	ขนาดของช่องตาข่าย 25 มม. × 2 มม.
เหล็ก	-Galvanized solid round	16	Ø 10 mm.		
	- Galvanized pipe	25			ความหนาอย่างน้อย 2 มม.
	- Galvanized solid tape		90 mm^2		ความหนาอย่างน้อย 3 มม.
	- Galvanized solid plate			500 × 500	ความหนาอย่างน้อย 3 มม.
	- Galvanized lattice plate			600 × 600	ขนาดตาข่าย 30 มม. × 3 มม.
	- Copper coated solid round	14			รัศมีทองแดงอย่างน้อย 250 µm โดยมีทองแดงผสมอยู่ 99.9%
	-Bare solid round		Ø 10 mm.		
	- Bare or Galvanized solid tape		75 mm^2		ความหนาอย่างน้อย 3 มม.
	- Galvanized Stranded		70 mm^2		เส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละอันอย่างน้อย 1.7 มม.
	- Galvanized cross profile	50 × 50 × 3			
สเตนเลส	- Solid round	15	Ø 10 mm.		
	- Solid tape		100 mm^2		ความหนาอย่างน้อย 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายใน [3]

4.4.1 ทั่วไป

ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในควรหลีกเลี่ยงอันตรายที่เกิดจากประกายไฟภายในโครงสร้างที่ป้องกันเนื่องจากกระแสฟ้าผ่าที่ไหลในระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกหรือส่วนของตัวนำภายในโครงสร้าง

อันตรายอาจเกิดจากประกายไฟระหว่างระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกกับส่วนประกอบอื่นๆเช่น

1. การติดตั้งโลหะ
2. ระบบภายใน
3. ส่วนของตัวนำภายนอกและสายที่ต่อไปเข้าในโครงสร้าง

อันตรายที่เกิดจากประกายไฟระหว่างส่วนที่แตกต่างกันสามารถหลีกเลี่ยงได้โดย

1. การประสานศักย์ให้เท่ากันตามข้อกำหนด
2. ฉนวนทางไฟฟ้าระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ตามข้อกำหนด

4.4.2 การประสานให้ศักย์เท่ากัน

4.4.2.1 ทั่วไป

การทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากันนั้นสามารถทำได้โดยต่อระบบป้องกันฟ้าผ่าเข้ากับ

1. ส่วนของโครงสร้างที่เป็นโลหะ
2. การติดตั้งส่วนที่เป็นโลหะ
3. ระบบภายใน
4. ส่วนที่เป็นตัวนำภายนอกและสายที่ต่อเข้าในโครงสร้าง

เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นต้องมีการประสานศักย์ให้เท่ากันเข้ากับระบบภายใน โดยจะมีกระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งไหลเข้าระบบดังกล่าวและผลกระทบนี้จะต้องนำมาพิจารณา

การเชื่อมต่อกันได้หมายถึง

- ตัวนำต่อประสานที่มีความต่อเนื่องทางไฟฟ้าที่ไม่ได้มาจากการประสานจากธรรมชาติ
- อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่เชื่อมต่อกันโดยตรงกับตัวนำต่อประสานไม่สามารถทำได้

การต่อประสานศักย์ให้เท่ากันนั้นเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นที่ต้องปรึกษากับผู้ประกอบการการสื่อสารโทรคมนาคม ผู้ประกอบการพลังงานไฟฟ้าและผู้ประกอบการอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากอาจมีความคิดเห็นที่แตกต่างกัน อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จต้องติดตั้งไว้ในส่วนที่สามารถตรวจสอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 การประสานให้ศักย์เท่ากันสำหรับการติดตั้งงานโลหะ

ในกรณีของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันควรติดตั้งไว้ในระดับของพื้นดินเท่านั้น

สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบไม่แยกอิสระ การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันควรติดตั้งไว้ในบริเวณต่อไปนี้

1. ในชั้นใต้ดินหรือที่ระดับพื้นดินโดยประมาณ ตัวนำต่อประสานควรต่อเข้ากับแท่งตัวนำต่อประสานที่โครงสร้างและในบริเวณที่ง่ายแก่การตรวจสอบ แท่งตัวนำต่อประสานควรต่อเข้ากับระบบรากสายดิน สำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่(โดยทั่วไปความสูงที่มากกว่า 20 เมตร) สามารถติดตั้งแท่งตัวนำต่อประสานได้มากกว่าหนึ่งอันแต่ต้องมีการเชื่อมต่อถึงกัน
2. บริเวณที่ไม่มีข้อกำหนดเรื่องฉนวน

การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันของระบบฟ้าผ่าถ้าเป็นไปได้ควรต่อในแนวเส้นตรง สำหรับค่าของพื้นที่หน้าตัดน้อยสุดของตัวนำต่อประสานที่ต่อกับแท่งตัวนำต่อประสานแบบต่างๆและตัวนำที่ต่อกับแท่งตัวนำเข้ากับระบบรากสายดินได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 และค่าพื้นที่หน้าตัดน้อยสุดของแท่งตัวนำต่อประสานเข้ากับการติดตั้งโลหะภายในไปยังแท่งตัวนำต่อประสานได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ขนาดของตัวนำน้อยสุดที่ต่อกับแท่งตัวนำต่อประสานแบบต่างๆหรือที่ต่อเข้ากับแท่งตัวนำต่อ ประสานกับระบบรากสายดิน

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า	วัสดุ	ขนาดพื้นที่หน้าตัด mm^2
1 ถึง 4	ทองแดง	14
	อลูมิเนียม	22
	เหล็ก	50

ตารางที่ 4.10 ขนาดของตัวนำน้อยสุดที่ต่อเข้ากับการติดตั้งโลหะภายในเข้ากับแท่งตัวนำต่อประสาน

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า	วัสดุ	ขนาดพื้นที่หน้าตัด mm^2
1 ถึง 4	ทองแดง	5
	อลูมิเนียม	8
	เหล็ก	16

อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จควรมีคุณลักษณะต่อไปนี้

- ทดสอบระดับการป้องกันระดับที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $I_{imp} \geq k_c I$ ด้วย $k_c I$ กระแสฟ้าผ่าที่ไหลไปในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก
- ระดับการป้องกัน U_p ควรมีค่าน้อยกว่าระดับแรงดันอิมพัลส์ของฉนวน
- คุณลักษณะอื่นๆที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 61643-12

4.4.2.3 การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันสำหรับส่วนของตัวนำภายนอก

สำหรับส่วนของตัวนำภายนอกการต่อประสานศักย์ให้เท่ากันนั้นถ้าเป็นไปได้ควรติดตั้งใกล้กับจุดที่จะเข้าไปยังโครงสร้างที่ป้องกัน ตัวนำการต่อประสานควรเป็นส่วนที่สามารถทนกระแสฟ้าผ่าที่ไหลผ่านได้ ถ้าการต่อประสานโดยตรงนั้นไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ใช้ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- ทดสอบระดับการป้องกันระดับที่ 1
- $I_{imp} \geq I_f$
- ระดับการป้องกัน U_p ควรมีค่าน้อยกว่าระดับแรงดันอิมพัลส์ของฉนวน
- คุณลักษณะอื่นๆที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 61643-12

4.4.2.4 การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันสำหรับระบบภายใน

การต่อประสานให้ศักย์เท่ากันนั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการติดตั้ง ถ้าตัวนำในระบบภายใน ตัวนำที่ถูกป้องกันหรือร้อยอยู่ในท่อโลหะ การประสานกับตัวป้องกันโดยทั่วไปเราถือว่าความต้านทานของตัวป้องกันไม่สามารถทำให้เกิดความต่างศักย์มากจนทำให้เกิดความเสียหายแก่สายไฟและอุปกรณ์ที่ต่ออยู่

ตัวนำควรต่อประสานควรต่อเข้ากับระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยผ่านอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ซึ่งในระบบ TN, PE และPEN ตัวนำควรมีการต่อประสานโดยตรงกับระบบป้องกันฟ้าผ่าหรือต่อเข้ากับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ตัวนำต่อประสานและอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จควรมีคุณลักษณะคล้ายกันตามที่ได้กำหนดไว้

ถ้าหากจำเป็นที่จะป้องกันเสิร์จแก่ระบบภายในตำแหน่งของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ใช้ควรเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 62305-4

4.4.2.5 การต่อประสานศักย์ให้เท่ากันสำหรับสายไฟที่ต่อกับโครงสร้างที่ถูกป้องกัน

การต่อประสานศักย์ให้เท่ากันนั้นสำหรับสายไฟฟ้าและสายสื่อสารควรมีการติดตั้งตามข้อกำหนด

ตัวนำทั้งหมดของสายแต่ละเส้นควรต่อประสานโดยตรงหรือต่อกับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ตัวนำที่มีอยู่ควรต่อประสานเข้ากับแท่งตัวนำต่อประสานผ่านทางอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จเท่านั้น ในระบบ TN, PE และ PEN ตัวนำควรต่อประสานโดยตรงหรือผ่านทางแท่งตัวนำต่อประสานไปยังแท่งตัวนำต่อประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีการเลือกสายหรือการวางท่อโลหะ สายหรือท่อโลหะเหล่านี้ต้องมีการต่อประสาน การประสานศักย์ให้เท่ากันของตัวนำนั้นไม่จำเป็นถ้าพื้นที่หน้าตัดของสายหรือท่อโลหะมีค่าไม่น้อยกว่าค่าน้อยสุด S_{Cmin} ที่ถูกติดตั้ง

การต่อประสานศักย์ให้เท่ากันของสายเคเบิลหรือท่อโลหะควรวางในตำแหน่งที่ใกล้กับจุดที่เข้าไปในโครงสร้าง ตัวนำต่อประสานหรืออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จควรมีคุณลักษณะคล้ายกันและเป็นไปตามข้อกำหนดของ

ถ้าหากจำเป็นที่จะป้องกันเสิร์จแก่ระบบภายในตำแหน่งของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ใช้ควรเป็นไปตามข้อกำหนดของ IEC 62305-4

4.4.2.6 ฉนวนไฟฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

ฉนวนทางไฟฟ้าระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้าหรือตัวนำลงดินและส่วนของโครงสร้างที่เป็นโลหะ การติดตั้งส่วนที่เป็นโลหะและระบบภายในสามารถทำได้โดยให้ระยะ d อยู่ระหว่างส่วนที่ใหญ่กว่าระยะส่วนที่แยก s

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l \qquad (4.6)$$

เมื่อ

k_i ขึ้นกับการเลือกระดับการป้องกัน (ดูตารางที่ 4.11)

k_c ขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่าที่ไหลไปสู่ตัวนำลงดิน (ดูตารางที่ 4.12)

k_m ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำฉนวน (ดูตารางที่ 4.13)

l คือความยาวในหน่วยเมตร

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์ k_i ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ

ระดับการป้องกัน	k_i
1	0.08
2	0.06
3 ถึง 4	0.04

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ k_c ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ

จำนวนตัวนำลงดิน (n)	k_i
1	1
2	1...0.5
4 หรือมากกว่า	1...1/n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์ k_m ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ

วัสดุ	k_m
อากาศ	1
คอนกรีต, อิฐ	0.5
หมายเหตุ 1. เมื่อมีวัสดุฉนวนหลายตัวต่อกันในทางปฏิบัติควรใช้ต่ำกว่าค่า k_m 2.การใช้วัสดุฉนวนอื่นๆควรอยู่ภายใต้การพิจารณา	

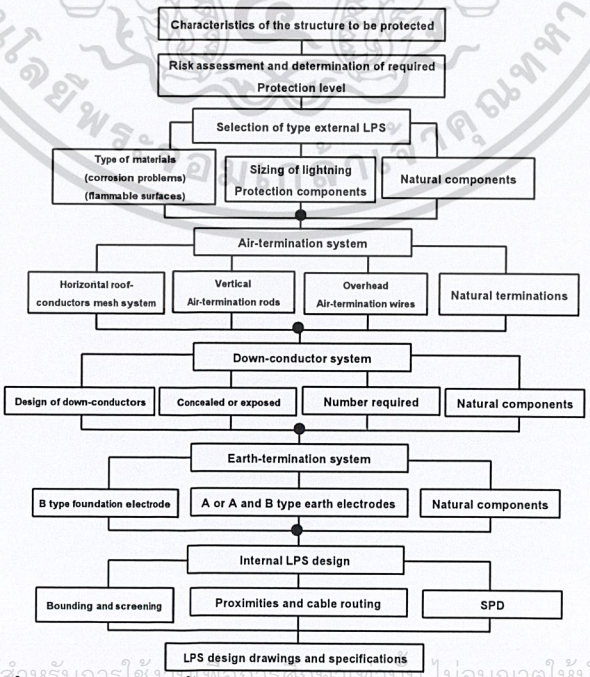
ในกรณีที่เป็นส่วนของตัวนำที่เป็นสายส่งหรือส่วนตัวนำที่อยู่ภายนอกที่ต่อเข้ากับโครงสร้างมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่งในการประสานศักย์ไฟฟ้าฟ้าผ่าให้เท่ากัน (โดยการต่อโดยตรงหรือต่อจากอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ) บริเวณจุดที่ต่อเข้าภายในโครงสร้าง

4.5 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า [3]

4.5.1 ขั้นตอนการวางแผน

ก่อนการเริ่มงานออกแบบใดๆ สามารถเริ่มจากรายละเอียดของระบบป้องกันฟ้าผ่า ผู้ออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าควรมีการออกแบบให้เหมาะสมและควรมีข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานทั่วไปเช่นการออกแบบการก่อสร้างหรือการออกแบบตำแหน่งของโครงสร้าง

ระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ไม่ได้ระบุไว้จากผู้ที่มีอำนาจออกใบอนุญาติ บริษัทประกันภัยหรือผู้ซื้อเอง ผู้ออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าควรมีการพิจารณาหรือป้องกันโครงสร้างจากระบบป้องกันฟ้าผ่าตามเงื่อนไขของการประเมินความเสี่ยงในมาตรฐาน IEC 62305-2



รูปที่ 4.38 แผนผังขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐาน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การประชุม [3]

4.5.2.1 ข้อมูลทั่วไป

ในขั้นตอนการออกแบบและการก่อสร้างโครงสร้างใหม่ ผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ผู้ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าและคนอื่นๆที่รับผิดชอบการติดตั้งโครงสร้างหรือข้อกำหนดสำหรับการใช้งานโครงสร้าง (เช่น ผู้ซื้อ สถาปนิกและผู้ก่อสร้าง) ควรมีการให้คำปรึกษาอยู่เสมอ

ขั้นตอนในการออกแบบและก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโครงสร้างเดิมควรมีการให้คำปรึกษาในการปฏิบัติที่เหมาะสมแก่ผู้ที่รับผิดชอบโครงสร้าง

การปรึกษาอาจจะต้องผ่านเจ้าของ ช่างรับเหมาก่อสร้างหรือตัวแทนที่ได้รับการแต่งตั้ง สำหรับสิ่งปลูกสร้างเดิมผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าควรเขียนแบบที่ได้รับการแก้ไขแล้วโดยการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่จำเป็นเข้าไป

การปรึกษาอย่างสม่ำเสมอจะทำให้มีประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าดีโดยมีค่าใช้จ่ายต่ำสุด ตัวอย่างเช่น การประสานงานของงานออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยงานก่อสร้างที่จำเป็นต้องใช้ตัวนำประสานและลดความยาวของตัวนำถ้าจำเป็นค่าใช้จ่ายจะลดลงมากถ้ามีการจัดเส้นทางทั่วไปสำหรับการติดตั้งภายในโครงสร้าง

การให้คำปรึกษาเป็นสิ่งสำคัญตลอดระยะเวลาในการสร้างเช่น อาจจะต้องมีการแก้ไขระบบป้องกันฟ้าผ่าเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงการออกแบบโครงสร้าง การให้คำปรึกษายังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเป็นการเตรียมข้อตกลงเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบส่วนของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ไม่สามารถมองเห็นได้หลังการก่อสร้างเสร็จ การให้คำปรึกษาดังล่าวตำแหน่งของการต่อระหว่างองค์ประกอบทางธรรมชาติและระบบป้องกันฟ้าผ่าควรได้รับการพิจารณา โดยปกติแล้วสถาปนิกจะเป็นผู้เตรียมและประสานงานการประชุมให้คำปรึกษาสำหรับโครงการสิ่งปลูกสร้างใหม่

4.5.2.2 ฝ่ายที่ปรึกษาหลัก

ผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าควรปรึกษาด้านเทคนิคกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องที่มีส่วนร่วมในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างรวมถึงเจ้าของโครงสร้างเอง โดยเฉพาะเรื่องความรับผิดชอบในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าควรจะกำหนดโดยผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกับสถาปนิก ผู้รับเหมาระบบไฟฟ้า อาคารผู้รับเหมา(ผู้จัดจำหน่ายระบบป้องกันฟ้าผ่า) หรือผู้ที่เกี่ยวข้องและเจ้าของ

ความชัดเจนในการรับผิดขอบฝ่ายต่างๆที่เกี่ยวข้องในการจัดการการออกแบบและการก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ตัวอย่างเช่นอาจจะมีสารกันน้ำของโครงสร้างที่สามารถเจาะทะลุได้ด้วยองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าหรือการต่อด้วยตัวนำลงดินเข้าที่ฐานของโครงสร้าง

4.5.2.2.1 สถาปนิก

ข้อตกลงควรเข้าถึงกับสถาปนิกในรายการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การจัดวางตัวนำระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้งหมด
2) วัสดุสำหรับองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า
3) รายละเอียดของท่อโลหะ ราง ราวและอื่นๆ
4) รายละเอียดของอุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้งอาคารและอื่นๆ ที่ติดตั้งภายในหรือใกล้กับโครงสร้างที่อาจจะต้องมีการย้ายการติดตั้งหรืออาจจะต้องใช้การต่อประสานกับระบบป้องกันฟ้าผ่าเนื่องจากมีระยะทางห่างไกล ตัวอย่างเช่น ระบบเตือนภัย ระบบความปลอดภัย ระบบสื่อสารภายในสัญญาณและการประมวงผลข้อมูล วงจรวิทยุและโทรทัศน์
5) ขอบเขตของการฝั่งตัวนำระบบสาธารณูปโภคอาจจะมีผลต่อการวางตำแหน่งของโครงข่ายตัวนำลงดินและต้องวางในระยะที่ปลอดภัยจากระบบป้องกันฟ้าผ่า
6) พื้นที่ทั่วไปสามารถใช้โครงข่ายตัวนำลงดิน
7) ขอบเขตของงานและการแบ่งความรับผิดชอบระบบป้องกันฟ้าผ่าแก่โครงสร้าง
8) วัสดุตัวนำที่ใช้ในโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะต่อเนื่องอาจจะต้องมีการต่อประสานเข้ากับระบบป้องกันฟ้าผ่า ตัวอย่างเช่น เหล็กเสริมและโลหะที่เข้าระบบสาธารณูปโภคหรือภายในโครงสร้าง
9) ผลกระทบด้านการมองเหนของระบบป้องกันฟ้าผ่า
10) ผลกระทบของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนองค์ประกอบของโครงสร้าง
11) ตำแหน่งในการต่อโลหะเสริมแรงโดยเฉพาะส่วนที่เป็นตัวนำ
12) การเชื่อมต่อระบบป้องกันฟ้าผ่าไปยังระบบป้องกันฟ้าผ่าของอาคารที่อยู่ใกล้กัน

4.5.2.2.2 สาธารณูปโภค

การต่อประสานระบบสาธารณูปโภคไปยังระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยตรง ถ้าหากไม่สามารถทำได้ต้องต่อผ่านสปาร์คแกปหรืออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ควรมีการปรึกษากับผู้ประกอบการหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งอาจจะมีความต้องการที่ขัดแย้งกัน

4.5.3 ข้อกำหนดทางไฟฟ้าและทางกล [3]

4.5.3.1 การออกแบบระบบไฟฟ้า

ผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าควรเลือกระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสมเพื่อให้การก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าการพิจารณาในการออกแบบด้านสถาปัตยกรรมของโครงสร้างเพื่อตรวจสอบว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าเป็นแบบแยกอิสระหรือไม่แยกอิสระ หรืออาจจะรวมทั้งสองแบบของการป้องกันฟ้าผ่าที่ควรใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความต้านทานดินควรจะดำเนินการก่อนสรุปผลการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าและควรคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานดินตามฤดูกาลด้วย

ในระหว่างที่เสร็จสิ้นการออกแบบระบบไฟฟ้าพื้นฐานของระบบป้องกันฟ้าผ่าควรใช้ส่วนของตัวนำที่เหมาะสมแก่โครงสร้างควรพิจารณาองค์ประกอบทางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่าหรือทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ถือว่าเป็นความรับผิดชอบของผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในการประเมินสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพขององค์ประกอบทางธรรมชาติของระบบป้องกันฟ้าผ่า และเพื่อให้แน่ใจว่าสอดคล้องกับข้อกำหนดขั้นต่ำของมาตรฐาน

การใช้โลหะเสริมแรงเช่นเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นตัวนำในการป้องกันฟ้าผ่าที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบและมีความรู้เกี่ยวกับมาตรฐานการก่อสร้างแห่งชาติของสิ่งปลูกสร้างที่ป้องกัน โครงสร้างของคอนกรีตเสริมแรง อาจจะต้องใช้ตัวนำในระบบป้องกันฟ้าผ่าหรืออาจใช้ตัวนำที่มีการชิลด์เพื่อลดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าในโครงสร้าง โดยกระแสฟ้าผ่าจะแยกออกที่ระบบป้องกันฟ้าผ่า ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าทำให้การป้องกันง่ายขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างเฉพาะที่มีการติดตั้งระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ควรมีข้อกำหนดในการก่อสร้างอย่างเคร่งครัดสำหรับตัวนำลงดินเพื่อให้ตรงกับข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับองค์ประกอบทางธรรมชาติ

4.5.3.2 การออกแบบทางกล

ผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าควรปรึกษากับผู้ที่รับผิดชอบออกแบบทางกลของโครงสร้าง ซึ่งการออกแบบนี้จะต้องทำหลังที่การออกแบบระบบไฟฟ้าแล้วเสร็จ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิจารณาความสวยงามเช่นเดียวกับการเลือกวัสดุที่ถูกต้องเพื่อลดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อน

ขนาดต่ำสุดของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าสำหรับส่วนต่างๆของระบบป้องกันฟ้าผ่าได้แสดงในตารางที่ 4.5 , 4.7 , 4.8 , 4.9 และ 4.10 และวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าได้ระบุไว้

กรณีที่มีความเบี่ยงเบนในเรื่องของขนาดและวัสดุที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ให้ใช้พารามิเตอร์การถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในการเลือกประเภทการป้องกันฟ้าผ่าในตารางที่ 4.3ผู้ออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าควรคาดการณ์อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเทประจุเมื่อเกิดฟ้าผ่าและขนาดของตัวนำที่สอดคล้อง

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินไปสำหรับพื้นผิวที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นส่วนที่แนบติดกัน (เนื่องจากมีการติดไฟได้หรือมีจุดหลอมเหลวต่ำ) ไม่ว่าจะเป็นขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำขนาดใหญ่ควรมีการระบุหรือพิจารณาป้องกันความปลอดภัยอื่นๆ เช่น การใช้ขาตั้งอุปกรณ์หรือการใส่ชั้นทนไฟเข้าไป

ผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าควรระบุพื้นที่ที่มีปัญหาการกัดกร่อนและควรระบุมาตรการที่เหมาะสม ผลของการกัดกร่อนในระบบป้องกันฟ้าผ่าอาจจะลดลงได้โดยการเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของวัสดุโดยใช้องค์ประกอบของความต้านทานการกัดกร่อนหรือการใช้มาตรการการป้องกันการกัดกร่อนอื่นๆ

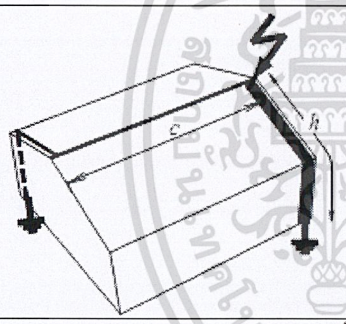
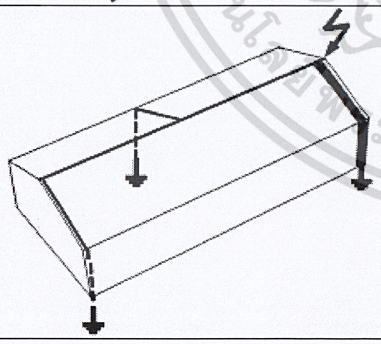
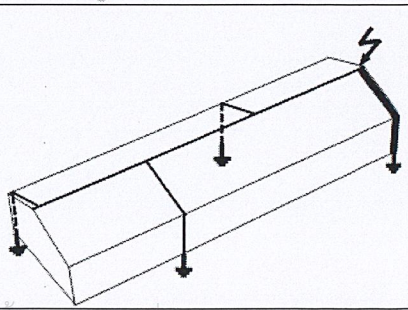
ผู้ออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าควรระบุตัวนำที่ยึดและการติดตั้งที่ทนต่อแรงไฟฟ้าพลวัตของกระแสฟ้าผ่าได้ และยอมในเรื่องการยืดหรือหดตัวของตัวนำเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

4.5.4 การคำนวณการออกแบบ [3]

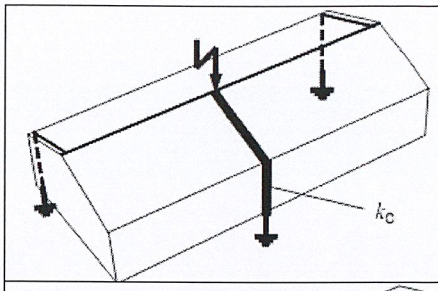
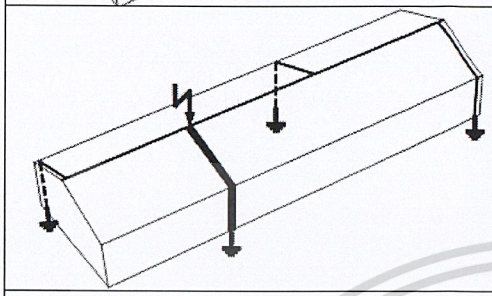
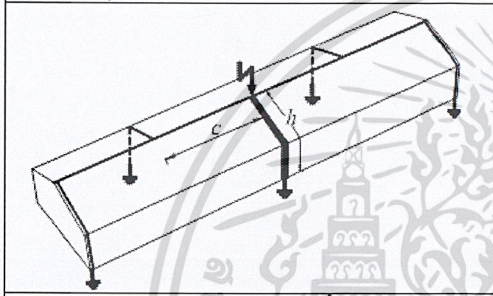
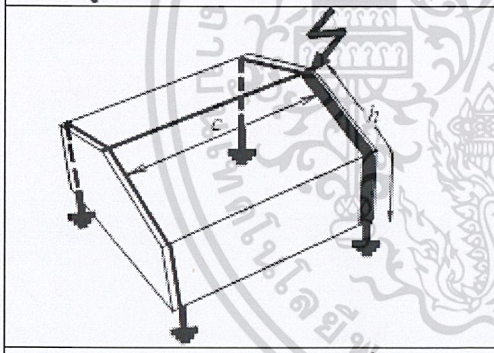
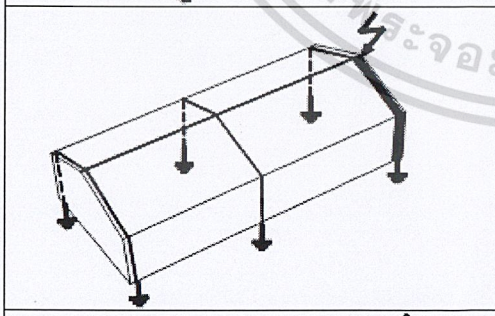
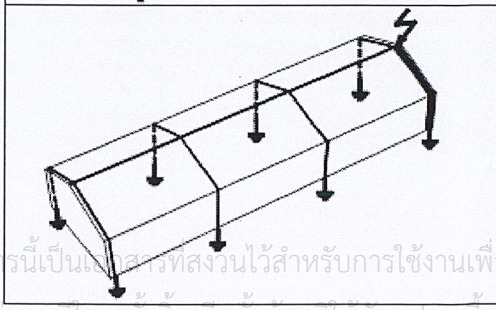
4.5.4.1 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์ k_c

การแบ่งค่าสัมประสิทธิ์ k_c ของกระแสฟ้าผ่าของตัวนำลงดินขึ้นอยู่กับจำนวนโดยรวม n และตำแหน่งของตัวนำลงดินที่เชื่อมต่อกับตัวนำวงแหวน ระบบตัวนำล่อฟ้าและประเภทของตัวนำลงดิน

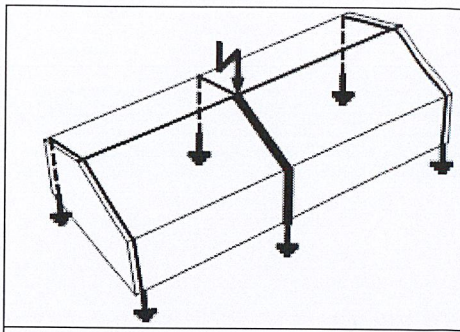
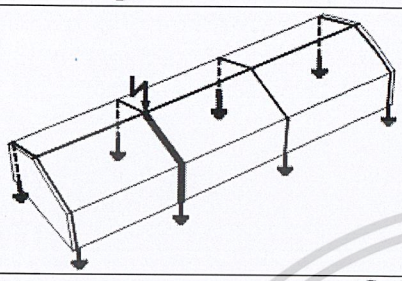
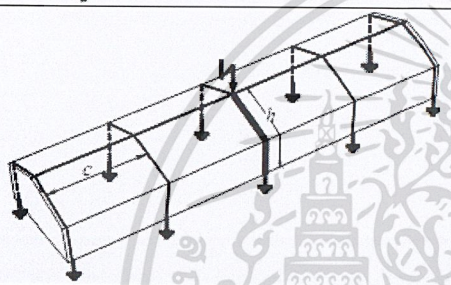
สำหรับการหาค่า k_c บนหลังคาเมื่อมีการจัดเรียงตัวนำลงดินแบบ A ดังรูปที่ 4.36 อาจจะถูกใช้ ความจำเป็นของการแยกระยะทางขึ้นอยู่กับแรงดันตกของส่วนที่สั้นที่สุดจากจุดที่ระยะทางแยกที่ถูกพิจารณาลงสู่ตัวนำลงดินหรือใกล้กับจุดที่มีการต่อประสาน

	$\frac{c}{h}=$	**0.33**	**0.50**	**1.00**	**1.00**	**2.00**
	k_C	0.57	0.60	0.66	0.66	0.75
	k_C	0.47	0.52	0.62	0.62	0.73
	k_C	0.44	0.50	0.62	0.62	0.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	k_C	0.40	0.43	0.50	0.50	0.60
	k_C	0.35	0.39	0.47	0.47	0.59
	k_C	0.31	0.35	0.45	0.45	0.58
	k_C	0.31	0.33	0.37	0.37	0.41
	k_C	0.28	0.33	0.37	0.37	0.41
	k_C	0.27	0.33	0.37	0.37	0.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	k_C	0.23	0.25	0.30	0.30	0.35
	k_C	0.21	0.24	0.29	0.29	0.35
	k_C	0.20	0.23	0.29	0.29	0.35

c คือ ระยะใกล้สุดของตัวนำลงดินตามแนวสันของหลังคา

h คือ ความยาวของตัวนำลงดินจากสันหลังคาไปยังจุดที่ต่อประสานศักย์ให้เท่ากัน

ค่า k_C ได้แสดงในตาราง

รูปที่ 4.39 ค่าสัมประสิทธิ์ k_C ในกรณีของหลังคาซันด้วยตัวนำล่อฟ้าบนสันของหลังคาและเป็นระบบต่อลงดินแบบ B [3]

ถ้าตัวนำมีกระแสไหลลงด้านล่างตามความยาวทั้งหมด สูตรที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$s = k_i \times k_c \times l \tag{4.7}$$

ถ้าตัวนำมีค่าของกระแสไฟฟ้าไหลลงที่แตกต่างกันตามความยาวเนื่องจากการแบ่งกระแส สมการที่ได้ต้องพิจารณากระแส (ลดลง) ที่ไหลลงแต่ละส่วนของตัวนำ ในกรณี

$$s = k_i \ (k_{c1} \times l_1 + k_{c2} \times l_2 + ... + k_{cn} \times l_n) \tag{4.8}$$

จุดที่เกิดการปะทะจำเป็นสำหรับค่า k_C และจุดที่แยกจากกันที่พิจารณาอาจมีความแตกต่างกัน

4.5.4.2 โครงสร้างส่วนที่เป็นคาน

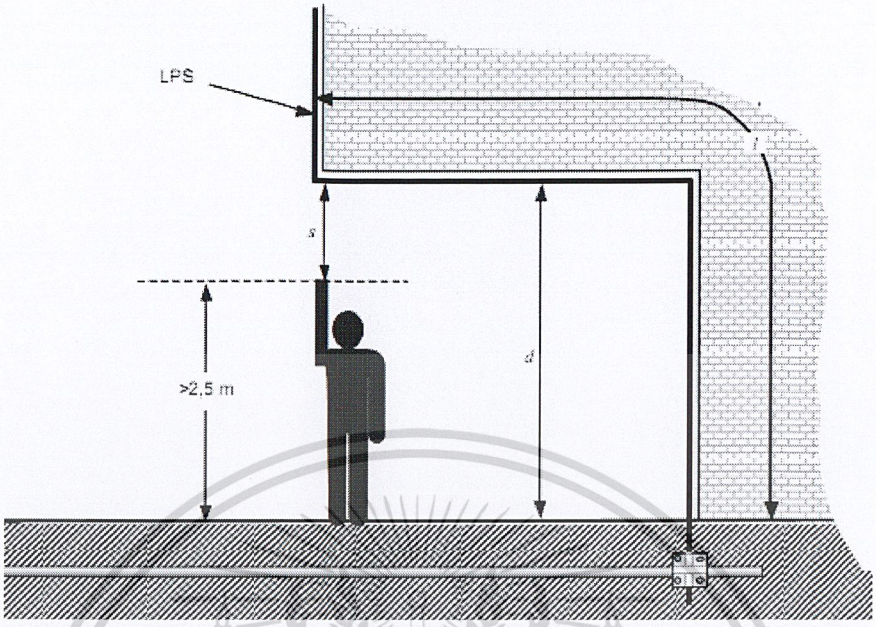
การลดความน่าจะเป็นของคนที่ยืนอยู่ระหว่างคานที่ก่อสร้างจากส่วนอื่นสำหรับกระแสไหลลงในตัวนำลงดินที่ทำงานบนผนังคานซึ่งมีระยะห่างจากพื้นถึงคานเป็นระยะ d หน่วยเป็นเมตร และควรมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$d > 2.5 + s$$

เมื่อ s คือระยะห่างในหน่วยเมตรโดยคำนวณจากหัวข้อที่ 4.4.2.6

ค่า 2.5 แทนความสูงปลายนิ้วมือเมื่อเหยียดแขนตามแนวตั้ง (ดูรูปที่ 4.40)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



D เป็นระยะทางจริง > s

S คือระยะห่าง

รูปที่ 4.40 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับส่วนของคานในโครงสร้าง [3]

ลูปของตัวนำที่แสดงดังรูปที่ 4.29 สามารถทำให้เกิดแรงดันตกสูงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการคายประจุฟ้าผ่าผ่านผนังของโครงสร้างทำให้เกิดอันตราย

4.6 มาตรการการป้องกันแก่สิ่งมีชีวิต [3]

4.6.1 มาตรการการป้องกันจากแรงดันสัมผัส

สำหรับเงื่อนไขบางประการของบริเวณที่ใกล้กับตัวนำลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่านอกโครงสร้างอาจจะเกิดอันตรายแก่ชีวิตได้ แม้ว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าถูกออกแบบและก่อสร้างตามความต้องการแล้วก็ตาม

อันตรายจะลดลงสู่ระดับที่ยอมรับได้ถ้าเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

1. ความน่าจะเป็นที่คนจะเข้าใกล้หรือช่วงเวลาที่อยู่นอกโครงสร้างเข้าใกล้กับตัวนำลงดินมีค่าน้อยมาก
2. ระบบตัวนำลงดินโดยธรรมชาติประกอบด้วยเสาโครงโลหะหลายต้นของสิ่งปลูกสร้าง หรือเสาเหล็กที่เชื่อมต่อกันหลายโครงสร้าง
3. ความต้านทานของชั้นผิวดินภายในระยะ 3 เมตรของตัวนำลงดินควรมีค่าไม่น้อยกว่า 5 kΩm

ถ้าหากเงื่อนไขดังกล่าวไม่ครบจะต้องนำมาตรการการป้องกันมาใช้ หากมนุษย์ที่อาศัยอยู่ได้รับบาดเจ็บจากแรงดันสัมผัสต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฉนวนตัวนำลงดินต้องทนระดับแรงดัน 100 kV , 1.2/50 μs ได้ ตัวอย่างเช่นฉนวนคลอสลิงค์โพลิเอททิลีนหนา 3 มม.
2. ข้อจำกัดทางด้านกายภาพและ/หรือการเตือนการลดความน่าจะเป็นที่สัมผัสมาตรการการป้องกันควรให้เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

4.6.2 มาตรการการป้องกันจากแรงดันช่วงก้าว

สำหรับเงื่อนไขบางประการของบริเวณที่ใกล้กับตัวนำลงดินนอกโครงสร้างอาจจะเกิดอันตรายแก่ชีวิตได้ แม้ว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าถูกออกแบบและก่อสร้างตามมาตรฐานแล้วก็ตามอันตรายจะลดลงสู่ระดับที่ยอมรับได้ถ้าเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

1. ความน่าจะเป็นที่คนจะเข้าไปใกล้กับตัวนำลงดินในระยะ 3 เมตรนั้นมีค่าน้อยมาก
2. ความต้านทานของชั้นผิวดินภายในระยะ 3 เมตรของตัวนำลงดินควรมีค่าไม่น้อยกว่า 5 kΩm

ถ้าหากเงื่อนไขดังกล่าวไม่ครบจะต้องนำมาตรการการป้องกันมาใช้ หากมนุษย์ที่อาศัยอยู่ได้รับบาดเจ็บจากแรงดันสัมผัสต่อไปนี้

1. การทำให้ศักย์เท่ากันโดยระบบลงดินแบบตาข่าย
2. ข้อจำกัดทางด้านกายภาพและ/หรือการเตือนการลดความน่าจะเป็นที่สัมผัสมาตรการการป้องกันควรให้เป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.41 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าว (step voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การบำรุงรักษาและตรวจสอบระบบป้องกันฟ้าผ่า [3]

4.7.1 ขอบเขตการตรวจสอบ

วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบคือต้องการตรวจสอบให้แน่ใจว่า

1. ระบบป้องกันฟ้าผ่าต้องสอดคล้องกับการออกแบบตามมาตรฐาน
2. ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบป้องกันฟ้าผ่าต้องอยู่ในสภาพดีและสามารถทำการออกแบบฟังก์ชั่นได้และไม่มีการกัดกร่อน
3. การเพิ่มระบบสาธารณูปโภคหรือเพิ่มการก่อสร้าง สามารถรวมเข้าไปในบริเวณที่ติดกันป้องกันได้โดยประสานหรือต่อเติมระบบป้องกันฟ้าผ่า

4.7.2 ลำดับการตรวจสอบ

การตรวจสอบควรเป็นไปตามหัวข้อ 4.7.1 ดังต่อไปนี้

1. ในระหว่างการก่อสร้างควรมีการตรวจสอบรากสายดินที่ฝังลงไปด้วย
2. ตรวจสอบหลังจากที่ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าแล้ว
3. ตรวจสอบเป็นระยะ ๆตามที่ได้กำหนดไว้ ตามสภาพการป้องกันเช่นปัญหาการกัดกร่อนและระดับการป้องกันฟ้าผ่า
4. มีการตรวจสอบหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือซ่อมแซมหลังจากที่ได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่า

ในระหว่างการตรวจสอบเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อไปนี้

1. การเสื่อมสภาพและการกัดกร่อนขององค์ประกอบตัวนำล่อฟ้า, ตัวนำและการเชื่อมต่อ
2. การกัดกร่อนของรากสายดิน
3. ค่าความต้านทานดินสำหรับระบบตัวนำลงดิน
4. เงื่อนไขในการเชื่อมต่อ การประสานศักย์ให้เท่ากันและการประกอบ

4.7.3 การซ่อมบำรุง

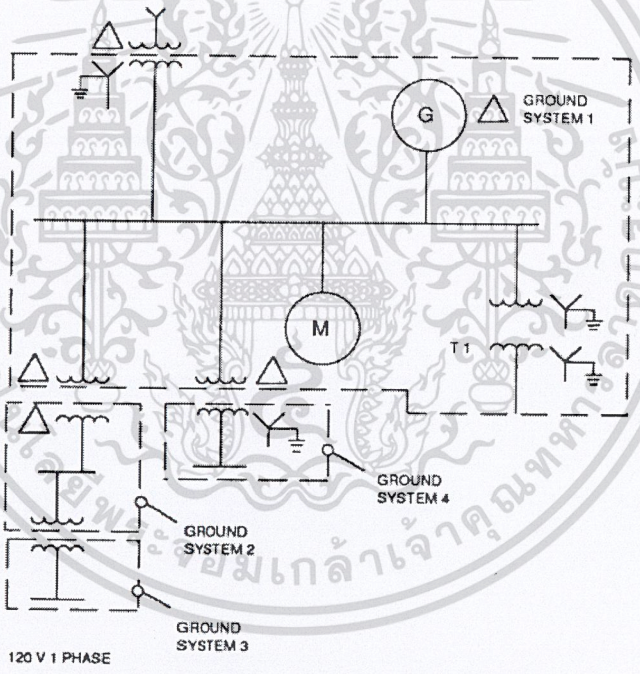
การตรวจสอบให้ปกติเป็นเงื่อนไขพื้นฐานในเรื่องของการดูแลความน่าเชื่อถือของระบบป้องกันฟ้าผ่า หากเจ้าของทรัพย์สินตรวจพบความเสียหายต้องได้รับการซ่อมแซมทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ระบบการต่อลงดิน

5.1 ทฤษฎีทั่วไปของระบบการต่อลงดิน [6]

การต่อลงดิน คือการใช้ตัวนำหรือสายไฟฟ้าต่อจากส่วนที่ต้องการต่อลงดินเข้ากับดิน การต่อลงดินจึงไม่ใช่เป็นเพียงการขุดหลุมแล้วเอาตัวนำหรือสายไฟฟ้าใส่ลงในหลุมแล้วกลบดิน เพื่อให้อิเล็กตรอนไหลลงดินเท่านั้น แต่ต้องต่อกันเป็นอย่างดีในทางไฟฟ้า ต้องมีความต้านทานต่ำสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้มากตามต้องการและใช้งานได้นาน ตัวนำที่ทำหน้าที่ต่อสายดินเข้ากับดินคือหลักดิน การต่อนี้ต่างจากการต่อสายไฟฟ้าเข้าด้วยกัน เพราะไม่ใช่เป็นการต่อระหว่างตัวนำสองตัว แต่เป็นการต่อระหว่างตัวนำ(หลักดิน)กับปริมาณของดินที่มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำทั้งหลักดินและดินจึงมีความสำคัญในการต่อลงดินทั้งคู่



รูปที่ 5.1 ระบบการต่อลงดิน [6]

5.1.1 ความหมายของดินในระบบไฟฟ้ากำลัง

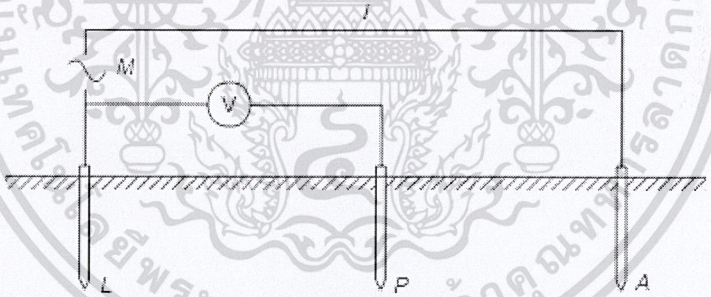
ในระบบขนาดเล็กเช่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์คำว่า “ดินหรือกราวด์” อาจเป็นแผ่นโลหะหรือแท่นโลหะขนาดเล็กๆ แต่ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีขนาดใหญ่มาก ดินจึงหมายยถึงพื้นโลกหรือพื้นดิน พื้นโลกส่วนใหญ่จะประกอบด้วยซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) ซึ่งเป็นแนวนไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารละลายเกลือและความชื้นซึ่งเป็นตัวนำที่ดี ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 2 ถึง 30,000 โอห์ม-เมตร อุณหภูมิของดินจะมีผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนไปด้วยอุณหภูมิดินสูงขึ้นจะมีผลให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานจำเพาะของดินลดลง ความต้านทานของดินหาได้จากค่าความต้านทานจำเพาะของดินซึ่งมีหลายตัวแปรหลายตัวด้วยกันเช่น ชนิดของดิน ความชื้นในดิน ส่วนประกอบของดินในเกลือแร่ในดินและอุณหภูมิของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินกำหนดเป็นค่าโอห์ม-เมตร โอห์ม-เมตรหรือโอห์ม-นิ้ว เขียนแทนด้วยอักษร r (rho)

5.1.2 หลักดินกับความต้านทานการต่อลงดิน

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลักดินลงดินจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในดินรอบๆ หลักดินโดยเฉพาะที่ผิว เนื่องจากมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) สูงที่สุด การที่จะให้ค่าความต้านทานโดยรวมต่ำจึงต้องทำให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใกล้กับหลักดิน โดยเฉพาะพื้นที่ตรงส่วนกลางหลักดินให้มีค่าต่ำที่สุด การออกแบบจึงควรให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางที่ห่างออกไป วิธีดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการใช้หลักดินที่มีความยาวด้านหนึ่งมากกว่าอีกสองด้านที่เหลือ ดังนั้นการใช้หลักดินที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเป็นเส้นจะให้ค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าหลักดินที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ถึงแม้ว่าจะมีพื้นที่เท่ากันก็ตามเช่น แท่งต่อหลักดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 2.40 เมตร ที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 10 โอห์ม-เมตร จะมีค่าความต้านทานการต่อลงดินประมาณ 4 โอห์ม ขณะที่แผ่นหลักดิน (Plate) ที่มีพื้นที่เท่ากันจะมีความต้านทานการต่อลงดินประมาณ 9 โอห์ม



รูปที่ 5.2 วิธีการวัดความต้านทานดิน [6]

5.1.3 จุดประสงค์ของการต่อลงดิน

จุดประสงค์หลักของการต่อลงดินก็เพื่อลดอันตรายต่อบุคคล และลดความเสียหายที่อาจเกิดแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือต่อระบบไฟฟ้า โดยการต่อลงดินจะทำหน้าที่ดังนี้

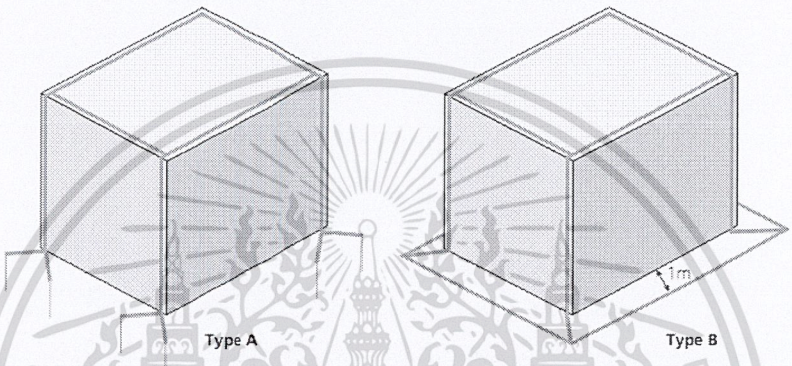
1. จำกัดแรงดันไฟฟ้าของวงจรไม่ให้สูงจนอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายเมื่อเกิดแรงดันเกินเนื่องจาก surge หรือฟ้าผ่า(ฟ้าผ่าเป็น surge ชนิดหนึ่ง) และลดแรงดันไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นจากการรั่วหรือการเหนี่ยวนำที่เปลือกโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนประกอบหรือโครงสร้างอื่นๆซึ่งในสภาวะปกติไม่มีไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายจากการสัมผัสของบุคคล (หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ)

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้า ในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสที่เกิดขึ้นนี้ไม่ให้ไหลผ่านในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device) ทำงานได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด

การต่อลงดินในทางไฟฟ้าจึงแยกออกเป็น

1) การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (System Grounding)
2) การต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Eqiupment Grounding)
3) การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection Grounding)



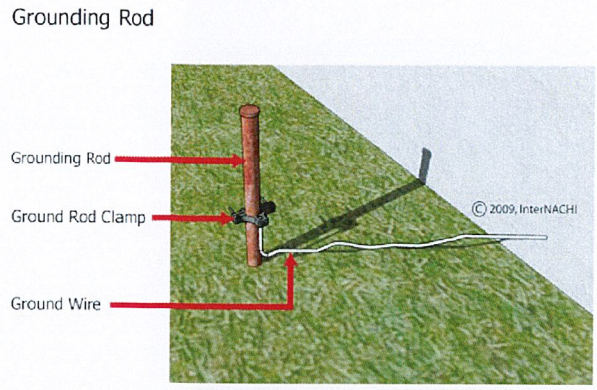
รูปที่ 5.3 รูปแบบการต่อลงดิน [12]

1) การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (System Grounding)

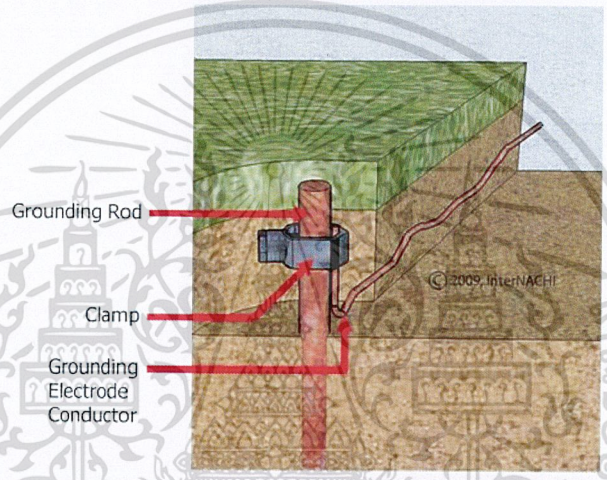
การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าก็คือการต่อจุดใดจุดหนึ่งในระบบการจ่ายไฟฟ้าลงดิน ซึ่งปกติแล้วจะเป็นการต่อจุดหรือสายนิวตรอลลงดิน โดยมีวัตถุประสงค์หลายประการด้วยกันพอสรุปได้ดังนี้

1. ลดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินในกรณีที่เกิดสายไฟเส้นใดเส้นหนึ่งรั่วลงสู่พื้นดิน (Single line to ground fault)
2. ลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่สายส่งมีระยะทางมากๆ ค่าความจุที่เกิดขึ้นระหว่างสายไฟกับดินของสายส่งที่ไม่มีการต่อลงดินจะมีค่าสูงซึ่งจะเป็นผลให้ Capacitive current มีค่าสูงและไหลอยู่ตลอดเวลาซึ่งก็คือพลังงานไฟฟ้าสูญเสียนั่นเอง
3. การตรวจสอบเมื่อเกิด Single line to ground fault ในกรณีของระบบที่ไม่มีการต่อลงดินทำได้ยาก เนื่องจากกระแสนี้มีค่าไม่แน่นอน และอาจมีค่าน้อยจนอุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถตรวจจับได้ การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าจะทำให้กระแสที่รั่วลงดินนี้มีค่าน้อยมากพอที่จะเป็นผลให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้ตามจุดประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



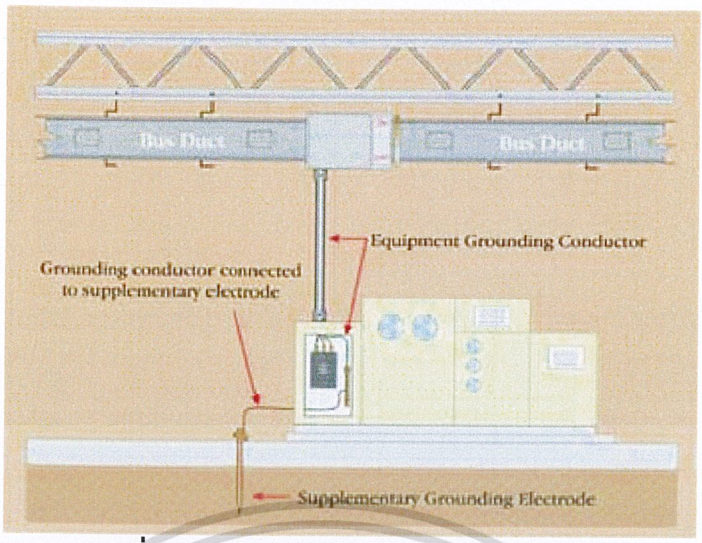
(ข)

รูปที่ 5.4 การฝังแท่งตัวนำลงดินและการต่อสายตัวนำในดิน

2) การต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Eqiupment Grounding)

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเปลือกนอกเป็นโลหะรวมทั้งส่วนประกอบในการก่อสร้างและโครงสร้างอื่นๆที่เป็นโลหะซึ่งอาจมีแรงดันไฟฟ้าได้ (เกิดจากการรั่วหรือการเหนี่ยวนำ) ต้องต่อลงดินโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความปลอดภัยต่อบุคคลและเพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

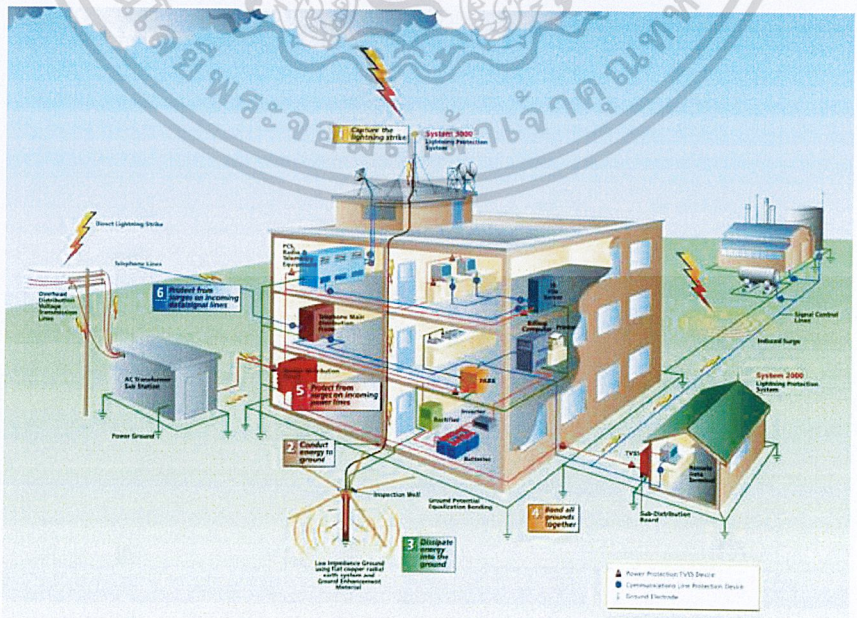


รูปที่ 5.5 การต่อลงดินของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

3) การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection Grounding)

1. Lightning Arrester คืออุปกรณ์ที่ช่วยลดแรงดันจากฟ้าผ่าไม่ให้มีค่าสูงจนเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้า

2. Overhead Ground Wire (หรือ Static Wire) คือสายที่ขึงอยู่ปลายบนสุดของเสาไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในระบบสายป้อนเขตชานเมือง การติดตั้งมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับเสาล่อฟ้าที่ติดอยู่ตามอาคารสูงๆ คือช่วยให้ฟ้าผ่าลงที่ Overhead Ground Wire แทนที่จะลงที่สายไฟหรืออุปกรณ์อื่นๆที่เสาไฟฟ้า



รูปที่ 5.6 ระบบและการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การจัดระบบต่อลงดิน [5]

5.2.1 ข้อกำหนดทั่วไป

สำหรับการจัดการระบบต่อลงดินนั้นบางครั้งอาจจะต้องมีการต่อร่วมหรือแยกกันเพื่อสำหรับป้องกันและใช้ตามจุดประสงค์ที่ต้องการในการติดตั้งระบบไฟฟ้า หากเป็นรากสายดินภายในการติดตั้งควรถูกต่อระบบรากสายดินหลักโดยใช้ตัวนำลงดิน ในการพิจารณาว่าระบบต่อลงดินนั้นจะใช้เป็นระบบแรงดันสูงหรือแรงดันต่ำนั้นสามารดูได้จาก IEC 60364-4-44

ข้อกำหนดของการจัดการระบบต่อลงดิน มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับข้อกำหนดการป้องกันของการติดตั้ง
2. สามารถเป็นสื่อนำกระแสฟอลต์ให้ลงสู่ดินได้ และสามารถป้องกันกระแสตัวนำลงดินเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายจากความร้อน ความร้อนทางกลและความเข้มสนามไฟฟ้าหรือจากการการสะท้อนของไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสดังกล่าว

5.2.2 รากสายดิน (Earth electrodes)

วัสดุและขนาดของรากสายดินควรเลือกวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและมีความแข็งแรงทางกลมากพอ โดยวัสดุและขนาดทั่วไปที่ใช้แสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างรากสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 Common minimum sizes of each electrodes of commonly use material from the point of view of corrosion and mechanical strength where embedded in the soil.

Material	Surface	Shape	Minimum size				
			Diameter mm	Cross – section Area (mm^2)	Thickness mm	Thickness of coating / sheathing	
						Individual Value µm	Average Value µm
Steel	Hot – dip galvanized or stainless	Strip		90	3	63	70
		Section		90	3	63	70
		Round rod for deep earth electrodes	16			63	70
		Round wire for surface electrodes	10				50[e]
		Pipe	25		2	47	55
	Copper – sheathed	Round rod for deep earth electrodes	15			2000	
	With electro – deposited copper coating	Round wire for surface electrodes	14			90	100
Copper	Bare	Strip		50	2		
		Round wire for surface electrodes		25[f]			
		Rope	1.8 for individual strands of wire	25			
		Pipe	20		2		
	Tin – Coated	Rope	1.8 for individual strands of wire	25		1	5
	Zinc - coated	Strip		50	2	20	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของหลักดินนั้นขึ้นอยู่กับสภาพดินในบริเวณนั้นๆ โดยอาจจะมีหลักดินที่เหมาะสมตรงตามสภาพของดินมากกว่าหนึ่งอัน และค่าความต้านทานดินที่เลือกใช้ควรตรงตามที่เราต้องการ

ตัวอย่างของการนำหลักดินไปใช้

- โครงข่ายของโครงสร้างใต้ดินจะถูกฝังไว้ที่ฐาน
- แผ่นโลหะ
- โลหะรับแรงของคอนกรีตที่ฝังในดิน
- ร็อดหรือท่อ
- เทปหรือลวด
- Metal sheaths โลหะที่หุ้มสายเคเบิล ตามสภาพพื้นที่นั้นๆ หรือตามข้อกำหนด
- งานโลหะใต้ดินอื่นๆ ตามสภาพพื้นที่นั้นๆ หรือตามข้อกำหนด

เมื่อเราเลือกชนิดและความลึกที่จะฝังหลักดินลงไปแล้ว เราจะพิจารณาถึงสถาพแวดล้อมและข้อกำหนด ดังนั้นดินแห้งและดินแข็งไม่น่าที่จะเพิ่มความต้านทานดินถึงรากสายดิน ดังนั้นค่าความต้านทานดินจะทำให้มาตรการการป้องกันเสียหายได้

เมื่อมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกันในการจัดการกับระบบลงดินควรพิจารณาถึงเรื่องการกัดกร่อนทางไฟฟ้าด้วย ท่อโลหะที่ใช้สำหรับของเหลวหรือแก๊สที่ไวไฟไม่ควรใช้กับรากสายดิน

5.2.3 สายต่อหลักดิน (Earthing conductors)

สายต่อหลักดินควรปฏิบัติตามข้อกำหนด ซึ่งการฝังลงในดินรากสายดินควรมีพื้นที่หน้าตัดที่สอดคล้องกับตารางที่ ในระบบ TN กระแสฟอลต์ที่มองไม่เห็นคาดว่าจะผ่านสายต่อหลักดิน

ตารางที่ 5.2 ขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยสุดของสายต่อหลักดินที่ฝังลงในดิน

	ป้องกันทางกล	ไม่ป้องกันทางกล
ป้องกันจากการกัดกร่อน	2.5 mm^2 Cu 10 mm^2 Fe	16 mm^2 Cu 16 mm^2 Fe
ไม่ป้องกันจากการกัดกร่อน	25 mm^2 Cu 50 mm^2 Fe	

ในการต่อตัวนำลงดินเข้ากับรากสายดินควรทำด้วยความสมบูรณ์และให้มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้า สำหรับในการต่อนั้นควรต่อแบบการเชื่อมแบบหลอมระเบิด การต่อด้วยความดัน แคลมป์ หรือการต่อเชิงกล ในการต่อเชิงกลนั้นควรต่อตามข้อกำหนดที่ทางบริษัทกำหนด ถ้าหากใช้แคลมป์ในการต่อควรระวังในเรื่องของความเสียหายที่จะเกิดกับตัวนำและรากสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 จุดต่อรากสายดินหลัก

ในการติดตั้งทุกๆครั้ง การป้องกันการต่อประสานที่ใช้กับจุดต่อรากสายดินหลักควรจะถูกต่ออยู่กับสิ่งต่อไปนี้

1. ตัวนำป้องกันการต่อประสาน
2. ตัวนำลงดิน
3. ตัวนำป้องกัน
4. การทำงานของตัวนำลงดิน (ถ้ามี)

ตัวนำแต่ละอันที่ถูกต่อเข้ากับจุดต่อรากสายดินควรจะไม่เชื่อมต่อแยกต่างหาก ในการเชื่อมต่อควรมีความเชื่อถือและไม่ต่อกับอุปกรณ์เพียงอย่างเดียว

5.3 การออกแบบและติดตั้งระบบการต่อลงดิน [6]

5.3.1 รูปแบบของระบบต่อลงดิน

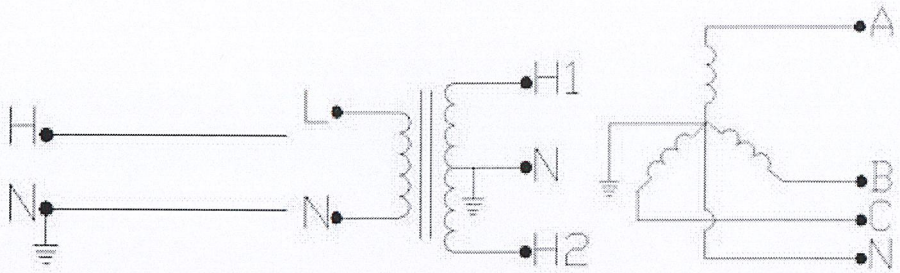
ระบบการต่อลงดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท คือ Equipment Ground, System Ground, Lightning Ground, Electronic Ground, Static Ground, และ Maintenance Safety Ground ระบบการต่อลงดินทุกประเภทที่กล่าวมา จะมีวิธีการติดตั้งคล้าย ๆ กัน แต่เป้าประสงค์ของการต่อลงดินจะแตกต่างกันออกไป

1) System Ground คือ การต่อลงดินระหว่างจุดนิวตรอล (Neutral) ของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าไปยัง Grounding Electrode System เพื่อให้เกิดจุดอ้างอิงของค่าแรงดันไฟฟ้า และช่วยให้เกิด Return Path สำหรับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน ให้ไหลกลับมาที่จุดนิวตรอล ซึ่งทำให้เราสามารถใช้รีเลย์ป้องกันการลัดวงจรลงดินสามารถตรวจสอบฟอลต์และสั่งปลดวงจรได้อย่างรวดเร็ว

ระบบไฟฟ้าบางแห่ง อาจจะไม่มีการต่อลงดินจากจุดนิวตรอล หรือจะมีการต่อลงดินโดยผ่าน Resistor หรือ Reactor เพื่อจุดประสงค์ด้านความปลอดภัยต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าหรือระบบการผลิตที่ต้องการความต่อเนื่อง

เงื่อนไขของการเลือกวิธีการต่อลงดิน จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ระบบไฟฟ้า โดยวิธีการต่อลงดินจากจุดนิวตรอล (Neutral Earthing Method) แต่ละวิธีจะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังนั้นไม่ว่าเราจะเลือกวิธีใด เราก็จะต้องออกแบบระบบป้องกันให้เหมาะสมกับระบบการต่อลงดินแบบนั้น ๆ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 5.8 (ก) ระบบ 1 เฟส 2 สาย (ข) ระบบ 1 เฟส 3 สาย (ค) ระบบ 3 เฟส 4 สาย [6]

2) Equipment Ground คือ การต่อลงฝากและลงดินจากโครงสร้างภายนอกที่เป็นตัวนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าและส่วนประกอบสำหรับการติดตั้งระบบไฟฟ้าซึ่งไม่มีเครื่องป้องกัน ทำให้เราสามารถจับต้องได้ โดยปกติโครงสร้างดังกล่าวไม่ได้มีไว้เพื่อเป็นเส้นทางไหลของกระแสไฟฟ้า (Non-Current Carrying Metal Parts)

ถ้าเกิดการลัดวงจรหรือความเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าอาจจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบนโครงสร้างดังกล่าว ดังนั้นการฝากและต่อลงดินจะช่วยให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรสามารถไหลกลับไปที่ System Ground และทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การต่อลงดินลักษณะนี้จะช่วยป้องกันบุคคลที่อาจจะสัมผัสกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและเกิดไฟฟ้าดูด (Electric Shock) ขณะที่เกิดการลัดวงจรลงดินได้ เพราะการต่อลงดินจะทำให้โครงโลหะของอุปกรณ์มีค่าแรงดันไฟฟ้าเกือบเท่ากับค่าศูนย์โวลต์อยู่ตลอดเวลา การติดตั้ง Equipment Grounds จะต้องทำให้เกิดเส้นทางทางผ่านของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ต่อเนื่องกันและมีค่าความต้านทานต่ำที่สุด (Path of Lowest Impedance)

3) Lightning Ground คือ การต่อลงดินสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection System) ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่ง (Transient Discharge) ระหว่างก้อนเมฆที่มีการสะสมประจุไฟฟ้า และพื้นโลกหรือเมฆก้อนอื่น ๆ เป้าหมายหลักของระบบป้องกันฟ้าผ่าก็คือ การควบคุมพลังงานไฟฟ้ามหาศาลจากการฟ้าผ่าให้ไหลกระจายลงสู่พื้นดินอย่างรวด เร็ว ก่อนที่จะเข้าอาคาร

4) Electronic and Computer Ground คือ การต่อลงดินสำหรับ ระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด การต่อลงดินของระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นกรณีพิเศษของ Equipment Ground และ System Ground กล่าวคือ ระบบการต่อลงดินของระบบอิเล็กทรอนิกส์ ไม่ได้เพียงแค่ต้องการจะควบคุม (Stabilize) ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังจะต้องการจุดอ้างอิงที่มีระดับแรงดันที่ศูนย์โวลต์ตลอดเวลา และยังจะช่วยป้องกันไฟฟ้าสถิตที่อาจจะเกิดสะสมบนพื้นผิวของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาต่อวงจรไฟฟ้าอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการต่อลงดินสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังจะมีประสิทธิผลกับค่า ความถี่ไฟฟ้าในระดับต่ำเท่านั้น แต่สำหรับสัญญาณไฟฟ้าที่มีค่าความถี่สูงมากขึ้น สายตัวนำและจุดต่อต่าง ๆ ของระบบการต่อลงดินจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย อันเนื่องมาจากค่า Inductive Reactance และ Capacitive Reactance ที่เพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้าซึ่งมีค่าความถี่ 50Hz ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณรบกวนจะยาวเป็นพันไมล์ แต่ค่าความยาวคลื่นของสัญญาณรบกวนระดับ 10MHz คือ 98 ฟุต และสายไฟฟ้าที่มีค่าความยาวไม่เกิน 1/4 ของ Disturbance Wavelength จะไม่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนนั้น ในกรณีนี้ จึงควรจะใช้ Ground Wire ที่มีความยาวไม่เกิน 4.9 ฟุต

5) Maintenance Safety Ground หรือ **Protective Ground** คือ ระบบการต่อลงดินแบบชั่วคราวจาก Phase Conductors เพื่อความปลอดภัยในงานติดตั้งเพิ่มวงจร งานซ่อมบำรุง และงานปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้า การต่อลงดินลักษณะนี้จะกระทำหลังจาก De-Energize ระบบไฟฟ้าไปแล้ว และจะต้องปลดออกทันทีเมื่อทำงานบำรุงรักษาเสร็จเรียบร้อยแล้ว

จุดประสงค์หลักของการใช้ Protective Grounding คือ เพื่อป้องกัน Electric Shock เมื่อผู้ปฏิบัติงานจะต้องจับต้องสายไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกปลดวงจร ไฟฟ้า (De-Energize) ออกไปแล้ว โดยการต่อฝากและต่อลงดินที่ Phase Conductors ขณะปฏิบัติงานบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า หากมีความผิดพลาดในการจ่ายไฟฟ้ากลับเข้าระบบอีก

กระแสไฟฟ้าจะลัดวงจรผ่าน Protective Ground ลงพื้นดิน โดยไม่ผ่านตัวคน ซึ่งจะช่วยให้รีเลย์ป้องกันกระแสเกินตรวจวัดฟอลต์และสับปลดวงจรได้ทันที จะเห็นได้ว่าค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของ Protective Ground Conductor จะต้องสามารถรองรับค่ากระแสลัดวงจรที่สูงที่สุดได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

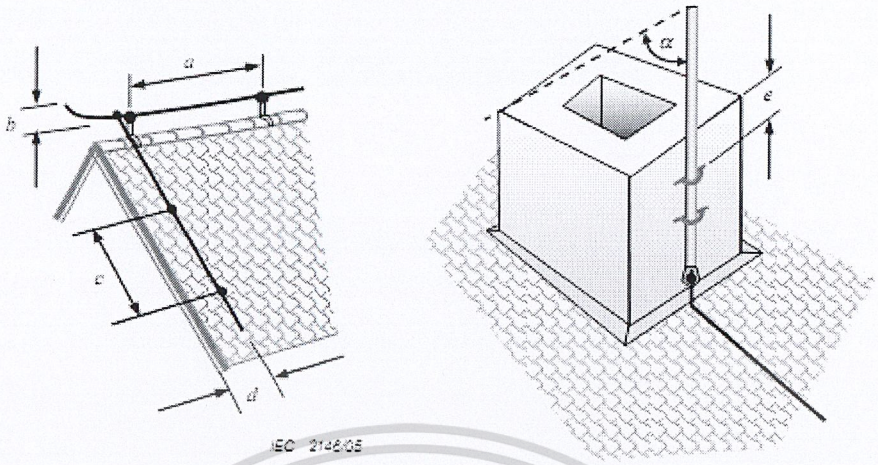
6) Static Grounds คือ การต่อฝากและต่อลงดินระหว่างอุปกรณ์หรือโครงสร้างใด ๆ ที่ทำจากโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต (Static Electricity Charge) บนผิวของตัวนำดังกล่าว หากไม่ทำการต่อฝากและต่อลงดิน ประจุไฟฟ้าสถิตที่สะสมเพิ่มขึ้นอาจจนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัตถุสอง ชิ้นที่อยู่ใกล้กัน สูงขึ้นเกินกว่าค่า Spark-Over Potential

การสปาร์กจากวัตถุชิ้นหนึ่งผ่านช่องอากาศไปยังวัตถุอีกชิ้น หนึ่งเนื่องจากไฟฟ้าสถิตนี้จะเรียกว่า “Electrostatic Discharges (ESD)” หาก ESD นั้นเกิดขึ้นในบริเวณที่มีสารไวไฟอยู่มาก ก็อาจจะเป็นสาเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ขึ้นได้ โดยทั่วไปค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าสถิตอาจจะสูงได้ถึง 8 kV ซึ่งถือว่าอันตรายอย่างมาก

ไฟฟ้าสถิตสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย ๆ บนพื้นผิวของวัตถุทุกชนิด สาเหตุของการเกิดไฟฟ้าสถิตที่สำคัญ คือ การเกิด Triboelectric Charging กล่าวคือ เมื่อวัตถุสองชนิดมีการเสียดสีกันหรือสัมผัสกันจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ จากผิวของวัตถุหนึ่งไปอยู่บนผิวของวัตถุอีกชิ้นหนึ่ง

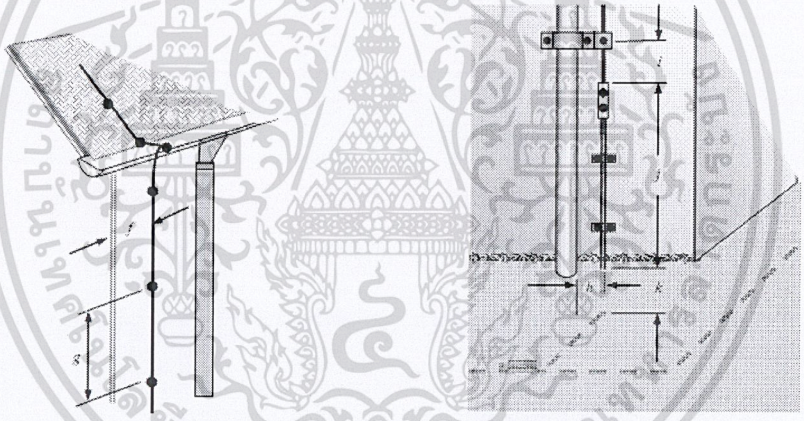
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ตำแหน่งการติดตั้งระบบต่อลงดิน



(ก) (ข)

รูปที่ 5.9 การติดตั้งแท่งตัวนำล่อฟ้า



(ก) (ข)

รูปที่ 5.10 (ก) การติดตั้งสายตัวนำลงดิน (ข) การติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน

5.4 การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า [6]

การต่อลงดินสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection System) ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าชั่วขณะหนึ่ง (Transient Discharge) ระหว่างก้อนเมฆที่มีการสะสมประจุไฟฟ้า และพื้นโลกหรือเมฆก้อนอื่น ๆ เป้าหมายหลักของระบบป้องกันฟ้าผ่าก็คือการควบคุมพลังงานไฟฟ้ามหาศาลจากการฟ้าผ่าให้ไหลกระจายลงสู่พื้นดินอย่างรวด เร็ว ก่อนที่จะเข้าอาคาร

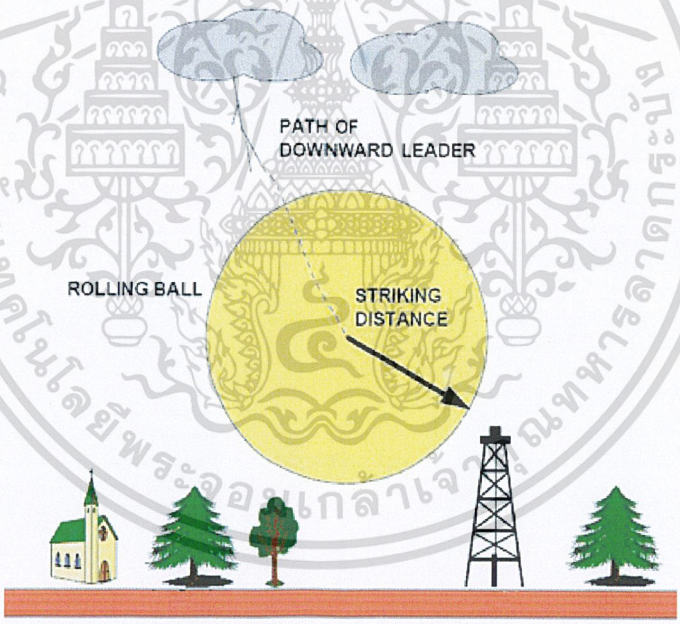
จากข้อมูลในอดีต ค่ากระแสฟ้าผ่า (Stroke Current) ประมาณ 95% จะมีค่าอยู่ในช่วง 10-100 kA ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยของค่ากระแสฟ้าผ่าประมาณ 31kA (Anderson 1987) และค่าความถี่ไฟฟ้าของ Lightning Surge Voltage จะมีหลายช่วง (ระดับ kHz ถึง MHz) โดยส่วนใหญ่จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น มีทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความถี่ที่สูงมากเมื่อเทียบกับค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า 50Hz ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวนำไฟฟ้าสำหรับ Lightning Surge Current จึงมีค่าสูงมากกว่าค่าที่เราวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดโดยทั่วไป

จากรูปที่ 5.11 เมื่อ Downward Leader ของประจุไฟฟ้าจากก้อนเมฆเข้าใกล้วัตถุบนพื้นโลก จะต้องเกิด Last Stepped Leader เพื่อถ่ายเทประจุฟ้าผ่าลงที่จุดที่ใกล้ที่สุด ระยะห่างจากจุดสุดท้ายที่จะตัดสินว่าฟ้าจะผ่าลงที่ใด จะเรียกว่า “Striking Distance” เพื่อการป้องกันมิให้ฟ้าผ่าลงบนเสาสูงหรืออาคารโดยตรง

ดังนั้นจึงต้องติดตั้งเสาล่อฟ้า (Air Terminal) หรือ Overhead Ground Wire ให้ครอบคลุมพื้นที่บนหลังคาหรือบนยอดเสาเพื่อรับผลจาก Direct Strike แล้วถ่ายเทประจุไฟฟ้าเหล่านั้นลงสู่พื้นดิน โดยใช้หลักการของ Rolling Sphere ขอบเขตของการป้องกัน (Zone of Protection) ก็คือพื้นที่ที่อยู่ใต้แนวรัศมีของ Rolling Sphere นั่นเอง ซึ่งค่ารัศมีของทรงกลมควรจะกำหนดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ เพราะไม่สามารถบอกได้ว่า Strike Distance จะมีระยะเท่าใด

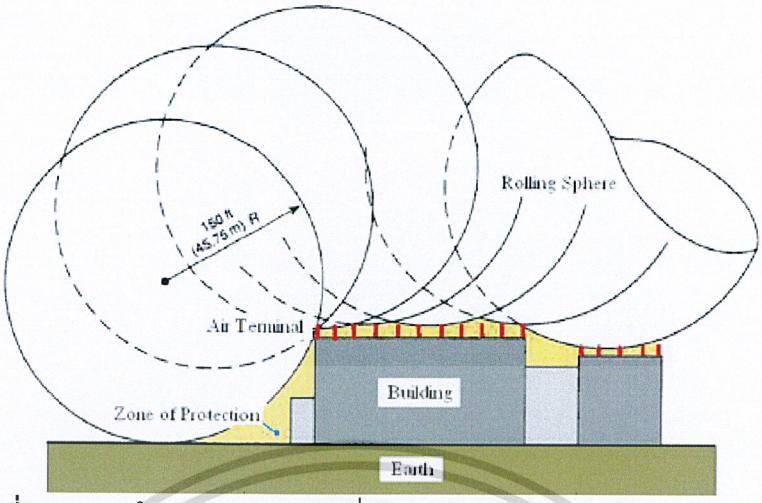


รูปที่ 5.11 Rolling Sphere Model ของฟ้าผ่าที่จะมุ่งไปหาจุดลงดินที่อยู่ใกล้ที่สุด

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงที่จุดใด (Direct Strike) ประจุไฟฟ้าปริมาณมหาศาลจะพยายามไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าเพื่อกระจายลงพื้นดินใน เวลาประมาณ 20 s ดังนั้นเราจึงจำเป็นจะต้องออกแบบติดตั้งเส้นทางลง (Down Conductor) สำหรับกระแสฟ้าผ่าเพื่อเชื่อมต่อไปยัง Grounding Electrode System ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ (Resistance และ Inductance) ที่น้อยที่สุด

และเนื่องจาก Stroke Current มีค่าความถี่สูงมาก ทำให้เกิด Skin Effect (กระแสไฟฟ้าไหลเฉพาะที่ผิวของตัวนำไฟฟ้า) ดังนั้น ตัวนำไฟฟ้าที่ควรใช้สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงควรเป็น Flat Electrode & Conductor มากกว่าที่จะเป็น Round Electrode & Conductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

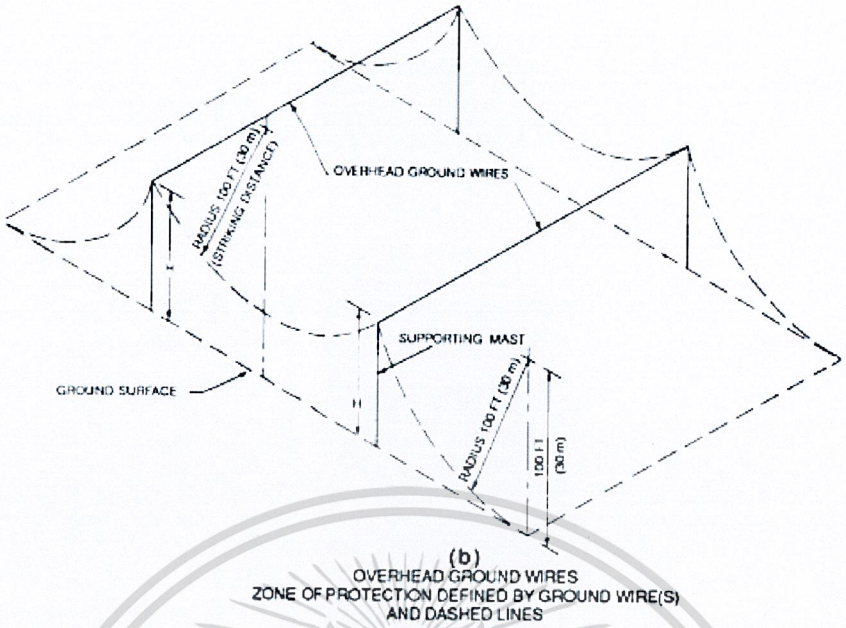


รูปที่ 5.12 การใช้ Air Terminal เพื่อป้องกัน Direct Strike บนตัวอาคาร



รูปที่ 5.13 ขอบเขตการป้องกันของเสาเหล็กสูง จะอยู่ภายในพื้นที่รอบ ๆ เสาใต้ Rolling Sphere [6]

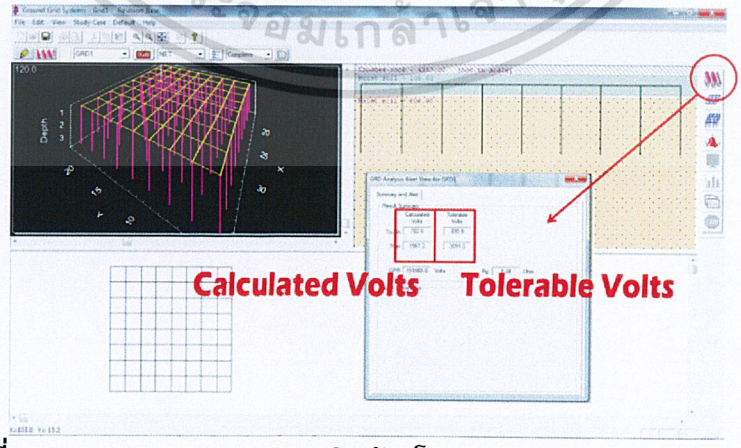
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 การติดตั้ง Overhead Ground Wire เพื่อป้องกัน Direct Strike ใต้แนวพาดสาย [6]

5.5 โปรแกรมจำลองระบบการต่อลงดิน ETAP Power Station

โปรแกรม ETAP Power Station เป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง รวมไปถึงสร้างสถานการณ์ต่างๆ ทั้งการเกิดไฟตก ไฟดับ การเกิดฟอลท์ในระบบ เกิดฟ้าผ่า หรือคลื่นความถี่ที่ทำให้การทำงานของระบบผิดไป นอกจากนี้ ยังสามารถวิเคราะห์และวาดระบบการต่อลงดินได้ และเมื่อจำลองสถานการณ์ต่างๆ ลงไปในระบบ สามารถเทียบกับค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมเพื่อให้ผู้ศึกษารู้ว่าระบบที่ทำการทดสอบนั้นเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่



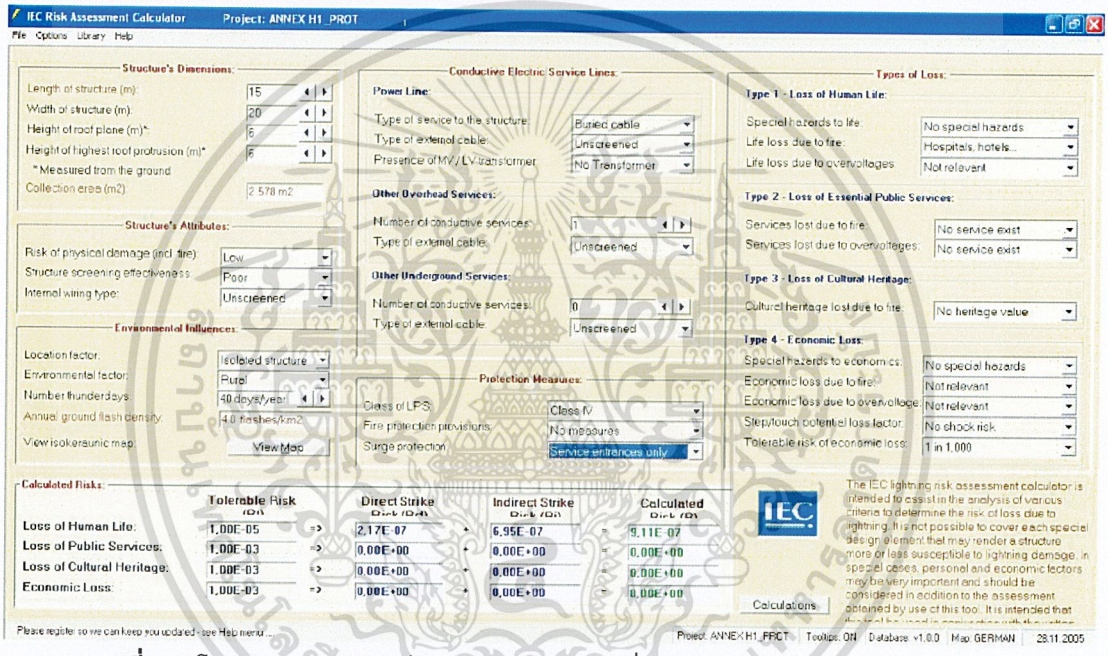
รูปที่ 5.15 การจำลองระบบต่อลงดินด้วยโปรแกรม ETAP Power Station

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
โปรแกรมวิเคราะห์ความเสี่ยง

6.1 แนวคิดในการออกแบบโปรแกรม

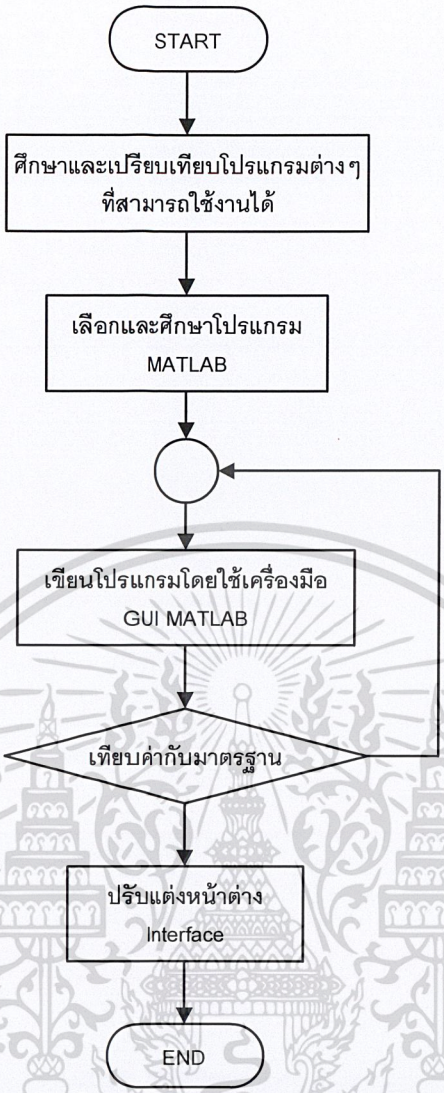
ตามมารตฐานใน IEC 62305-2 ได้มีการเขียนโปรแกรมประเมิณและวิเคราะห์ความเสี่ยงโดยการคำนวณเป็นไปตามเนื้อหาในตัวมาตรฐานเอง ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ เป็นลักษณะของตัวอาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ ได้กล่าวถึงไว้ในหัวข้อของการจัดการและบริหารความเสี่ยง



รูปที่ 6.1 โปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงต่างมาตรฐาน IEC 62305-2

จึงเป็นที่มาของการศึกษาและเขียนตัวโปรแกรมการวิเคราะห์ความเสี่ยงตามการคำนวณในมาตรฐาน IEC 62305-2 ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายกับตัวโปรแกรมที่มีอยู่ โดยมีหลักการในการออกแบบ ดังรูป 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



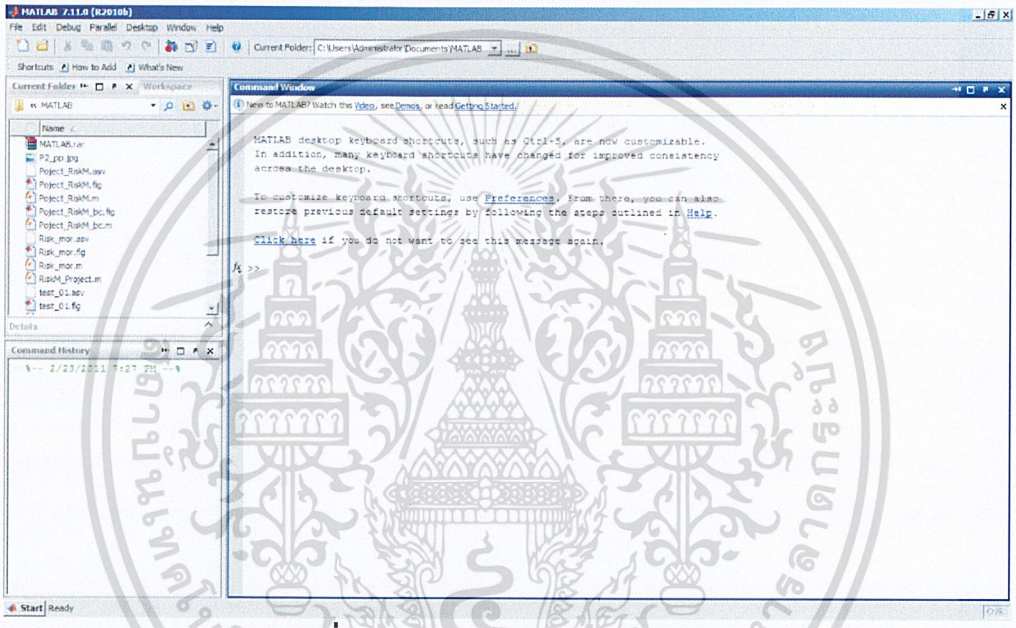
รูปที่ 6.2 แผนผังแนวคิดการเขียนโปรแกรม

จากแนวคิดในการออกแบบโปรแกรมข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาโปรแกรมหลายๆ ประเภทที่สามารถใช้งานในเชิงการคำนวณและมีรูปแบบเหมาะสมและสะดวกต่อผู้ใช้งาน ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียหลายๆ ด้าน พบว่าโปรแกรม MATLAB มีการใช้งานที่สะดวกเหมาะสมต่อการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง

โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงเพื่อใช้ในการคำนวณทางเทคนิค MATLAB ได้รวมการคำนวณ การเขียนโปรแกรมและการแสดงผลรวมกันอยู่ในตัวโปรแกรมเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ลักษณะของการเขียนสมการในโปรแกรมก็จะเหมือนการเขียนสมการคณิตศาสตร์ที่เราคุ้นเคยดีอยู่แล้ว งานที่ทั่วไปที่ใช้ MATLAB ก็เช่นกันการทำการคำนวณทั่วไป การสร้างแบบจำลองและการทดสอบแบบจำลอง การวิเคราะห์ข้อมูล การแสดงผลในรูปกราฟทั้งโดยทั่วไปและกราฟทางด้านทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม สามารถสร้างโปรแกรมในลักษณะที่ติดต่อกับผู้ใช้ทางกราฟฟิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ MATLAB จะสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของการติดต่อโดยตรง (Interactive) คือการเขียนคำสั่งเข้าไปทีละคำสั่ง เพื่อให้ MATLAB ประมวลผลไปเรื่อยๆ หรือสามารถที่จะรวบรวมชุดคำสั่งเรานั้นเป็นโปรแกรมก็ได้ ข้อสำคัญอย่างหนึ่งของ MATLAB ก็คือข้อมูลทุกตัวจะถูกเก็บในลักษณะของ array คือในแต่ละตัวแปรจะได้รับการแบ่งเป็นส่วนย่อยเล็กๆ ขึ้น (หรือจะได้รับการแบ่งเป็น element นั่นเอง) ซึ่งการใช้ตัวแปรเป็น array ใน MATLAB นี้ เราไม่จำเป็นที่จะต้องจอง dimension เหมือนกับการเขียนโปรแกรมในภาษาขั้นต่ำ ซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแก้ปัญหาของตัวแปรที่อยู่ในลักษณะของ matrix และ vector ได้โดยง่าย ซึ่งทำให้เราลดเวลาการทำงานลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมโดย C หรือ Fortan



รูปที่ 6.3 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB

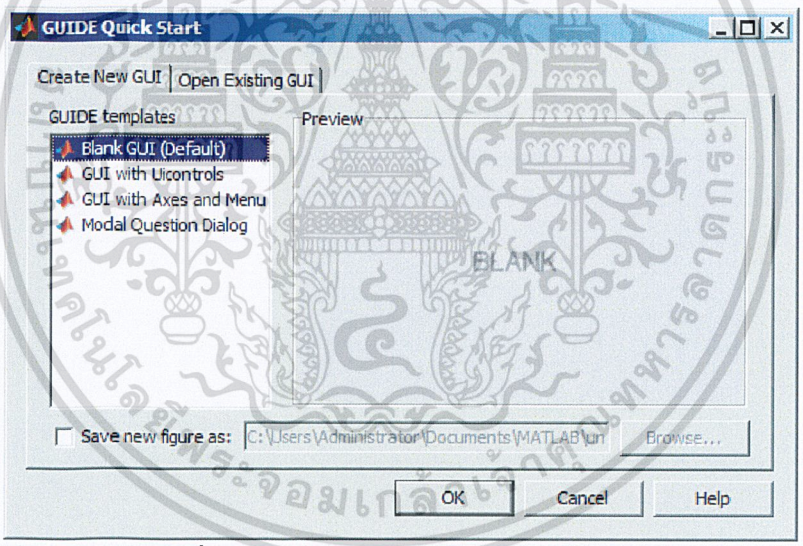
MATLAB เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแวดวงของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในปัจจุบัน ชื่อโปรแกรม MATLAB นั้นย่อมาจาก MATrix LABoratory โดย MATLAB นั้นได้เริ่มต้นขึ้นเพื่อต้องการให้เราสามารถแก้ปัญหาตัวแปรที่มีลักษณะเป็น Matrix ได้ง่ายขึ้นสำหรับ MATLAB ได้เริ่มพัฒนาครั้งแรกโดย Dr.Cleve Molor ซึ่งเขียนโปรแกรมนี้ขึ้นมาด้วยภาษา Fortran โดยโปรแกรมนี้ได้พัฒนาภายใต้โครงการ LINPACK และ ARPACK ถ้าหากเราจะเริ่มนับจากโปรแกรมที่ออกเผยแพร่เป็นครั้งแรกที่มีผู้ร่วมเขียนโปรแกรมไม่กี่คน จนกระทั่งทุกวันนี้มีทีมงานขนาดใหญ่ที่ทำงานในการพัฒนาโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งทำให้ทุกวันนี้ MATLAB เป็นโปรแกรมที่สุดยอดในการคำนวณที่คำนวณด้าน matrix สำหรับงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมโปรแกรมหนึ่ง นับจากวันแรกที่ได้เริ่มโครงการขึ้นจนกระทั่งในไตรมาสสุดท้ายของปี ค.ศ. 2000 ได้พัฒนาเป็น MATLAB 6.0 ซึ่งเป็นการปรับปรุงใหม่และออกสู่ตลาดเป็นครั้งที่ 12 สำหรับในมุมมองของการศึกษานั้น MATLAB ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับนักศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณ และขณะนี้หลายๆ มหาวิทยาลัยได้ยกอันดับของ MATLAB ขึ้นจากโปรแกรมสำเร็จรูปให้เป็นภาษาสำหรับการใช้งานทางด้านเทคโนโลยี นั่นคือมีระดับเป็นภาษาเหมือนกับภาษา C หรือ Fortran นั่นเองนอกเหนือจากเพื่อการเรียนการสอนในสถาบันการศึกษาแล้ว MATLAB ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในงานวิจัย งานพัฒนาและการวิเคราะห์ของหน่วยงานต่างๆ มากมาย

นอกเหนือจากตัวโปรแกรม MATLAB เองแล้ว บริษัท MathWorks ผู้ผลิต MATLAB ยังได้ผลิตเครื่องมือที่เรียกว่า toolbox ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อประกอบการใช้ MATLAB สำหรับงานที่เฉพาะเจาะจงหลายประเภท โดยในส่วนที่ใช้ทำการศึกษาและเขียนโปรแกรมนั้นได้ทำการศึกษาในส่วนของการใช้งาน GUI (Graphic User Interface)

Graphical User Interface (GUI) เป็น user interface ที่สร้างขึ้นด้วย graphical object แบบต่างๆ เช่น ปุ่มเมนู slider โดยทั่วไป objects เหล่านี้ ผู้ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่เข้าใจถึงความหมายและวิธีการใช้ object เหล่านี้เป็นอย่างดีอยู่แล้ว สิ่งสำคัญที่เราจะกล่าวถึงคือหลังจากผู้ใช้ได้มีการกดปุ่มเมาส์ เลื่อน slider หรือเลือกเมนู เราจะมีวิธีการกำหนดให้เกิดขึ้นตอนต่อๆ ไปตามที่เราต้องการได้อย่างไร



รูปที่ 6.4 หน้าต่างเรียกใช้งาน GUI GUIDE

Application ต่างๆ ที่ออกแบบมาเป็น GUI จะพบว่าสามารถทำให้ผู้ใช้เข้าใจการใช้ Application นั้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะแทบจะไม่มีชุดคำสั่งใดให้จดจำ การทำงานของ application จะเกิดขึ้นทันทีที่ได้ input จากผู้ใช้

MATLAB จะสร้าง GUI อยู่บนหน้าต่างรูปภาพ (figure window) ซึ่งภายใต้หน้าต่างนี้จะมีส่วนประกอบต่างๆ อยู่ได้ไม่ว่าจะเป็น axes, uicontrol หรือวัตถุอื่นๆ ตามที่เราได้กล่าวถึงมาแล้วในบทก่อนหน้านี้ใน MATLAB version ก่อนหน้านี้ เราสามารถที่จะสร้าง uicontrol, uimenu แบบต่างๆ ลงในหน้าต่างรูปภาพได้แต่เป็นไปด้วยความลำบากเพราะการสร้างเป็น text

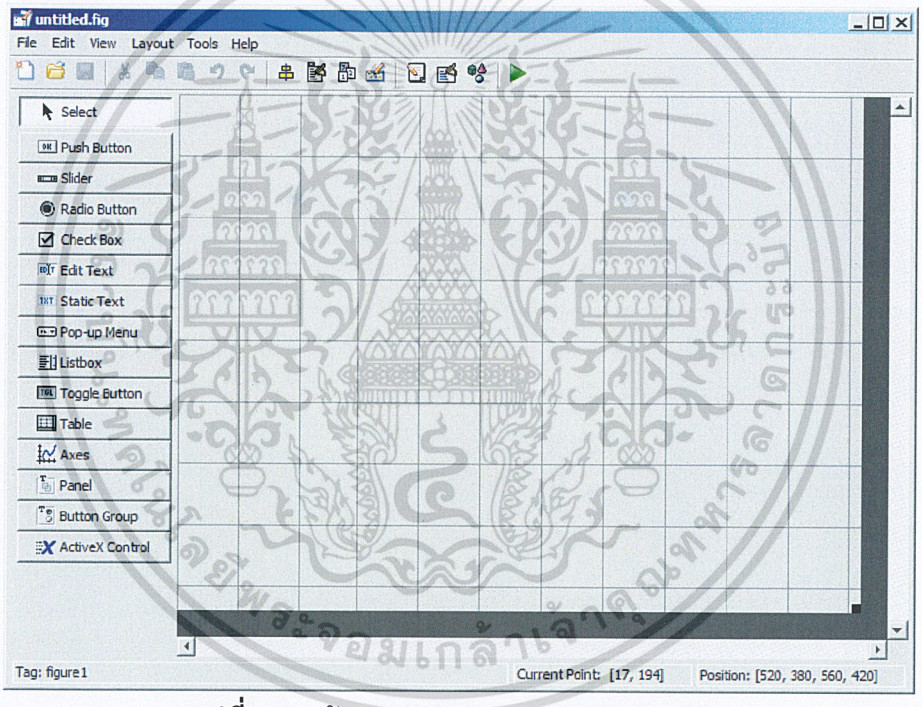
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือจำหน่ายเพื่อการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

base ต่อมาจนกระทั่ง version 5 MATLAB ได้สร้าง Graphical User Interface Development Environment หรือ GUIDE ขึ้นเพื่อช่วยให้เราสร้าง บันทึก และแก้ไข GUI ได้สะดวกขึ้น

- **การสร้าง GUI จะประกอบด้วยขั้นตอนสองขั้นตอน**

1) กำหนดและวางส่วนประกอบต่างๆลงบนGUI
2) เขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ใน GUI

GUIDE นั้นโดยหลักใหญ่แล้วจะมีหน้าที่ในการวงส่วนประกอบที่เราต้องการให้มีลงใน GUI จากนั้น GUIDE จะสร้าง M-file ที่บรรลุ handle ของวัตถุหรือ object ทั้งหมดที่เราสร้างขึ้น รวมทั้งคำสั่งให้ GUI ทำงาน นอกเหนือจากนั้น M-file จะให้แนวทางในการเขียนฟังก์ชั่น ทำงานหลังจากผู้ใช้กดเมาส์ปุ่มซ้ายหรือปรับเปลี่ยนค่าของวัตถุนั้น ซึ่งเราเรียกว่า callback ของวัตถุนั้น



รูปที่ 6.5 หน้าต่างการออกแบบ GUI Interface

ส่วนประกอบของ GUI ใน MATLAB ดังที่ได้กล่าวมาก่อนแล้วว่าเราสามารถสร้าง GUI ขึ้นมาได้โดยการเขียนเป็น M-file ขึ้นมาล้วนๆ แต่การใช้ GUIDE จะทำให้การทำงานง่ายขึ้นมากเพราะจะช่วยให้เรากำหนดตำแหน่งของวัตถุต่างๆ ได้โดยง่าย หลังจากนั้น GUIDE จะสร้างไฟล์ขึ้นมา 2 ไฟล์เพื่อเก็บและนำ GUI ของเรามาใช้ต่อไปซึ่งจะประกอบด้วย

1) FIG-file ซึ่งจะบรรจุรายละเอียดของวัตถุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในหน้าต่างรูปภาพที่เป็น GUI ของเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) M-file ที่จะบรรจุฟังก์ชั่นที่กำหนดการทำงานของ GUI ของเรา รวมถึง callback ทั้งหมดซึ่ง callback เหล่านี้จะบรรจุเป็น sub function อยู่ใน M-file และเราจะเรียก M-file ที่ควบคุมการทำงานของ GUI นี้ว่า Application M-file

ดังนั้น Application M-file จะไม่มีข้อมูลใดๆ เกี่ยวกับรูปแบบของส่วนประกอบที่บรรจุอยู่ใน GUI เช่น สี ขนาด ตำแหน่ง หรือ อื่นๆ เลยเพราะข้อมูลเหล่านั้นจะบรรจุอยู่ใน FIG-file

GUIDE จะรวบรมองค์ประกอบต่างๆ ภายใน GUI แล้วสร้าง Application M-file โดยอัตโนมัติ โดยมีรูปแบบของการสร้างที่ชัดเจน เพื่อให้เราได้โครงสร้างของ Application M-file จากนั้นเราสามารถนำโครงสร้างที่สร้างโดยอัตโนมัตินั้นมาปรับแก้ เพื่อให้เกิดการควบคุม GUI ตามที่เราต้องการ การกระทำดังกล่างทำให้เราได้ข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น

- M-file จะประกอบด้วยคำสั่งที่จำเป็นในการควบคุม GUI ครบถ้วน
- M-file จะทำให้เราส่งข้อมูลไปที่ส่วนต่างๆ ได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว
- การใช้ M-file จะทำให้เราส่งข้อมูลไปที่ส่วนต่างๆ ภายใต้ MATLAB ได้ง่ายขึ้น
- Application M-file จะสร้าง Sub function สำหรับ uicontrols ทุกแบบที่มีใน GUI เพื่อทำให้เราเขียน callback ต่างๆ ได้สะดวกขึ้น

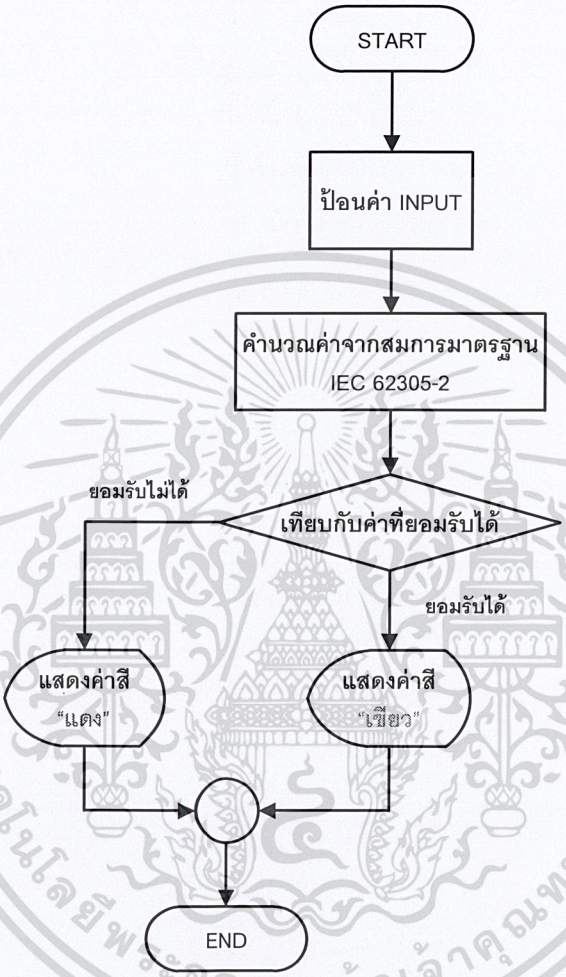
แม้ว่า GUIDE จะให้ทางเลือกกับเราว่าจะให้ GUIDE สร้างเฉพาะ FIG-file เพื่อเก็บและใช้เป็นข้อมูลของ GUI ที่สร้างขึ้นเพียงอย่างเดียว แล้วเราเขียน M-file ขึ้นมาเอง แต่สำหรับผู้เริ่มเขียน GUI บน MATLAB เราคิดว่าการสร้าง GUI ด้วย GUIDE จะสะดวกกว่า หากเราให้ GUIDE สร้าง Application M-file ให้เราด้วย ดังนั้นการสร้าง GUI ด้วย GUIDE ที่เรานำเสนอนี้จะมีการกำหนดขั้นตอนดังนี้

1) เลือก GUIDE Application option แล้วเลือกให้ GUIDE สร้างทั้ง FIG-file และ M-file
2) การใช้ Layout Editor เพื่อวางรูปแบบของGUI
3) เรียนรู้การสร้าง Application M-file จาก GUIDE และเข้าใจถึงวิธีการทำเพื่อจะนำไปใช้ต่อ
4) ปรับแก้ Application M-file ให้ทำงานตามที่เรากำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การออกแบบและเขียนโปรแกรม

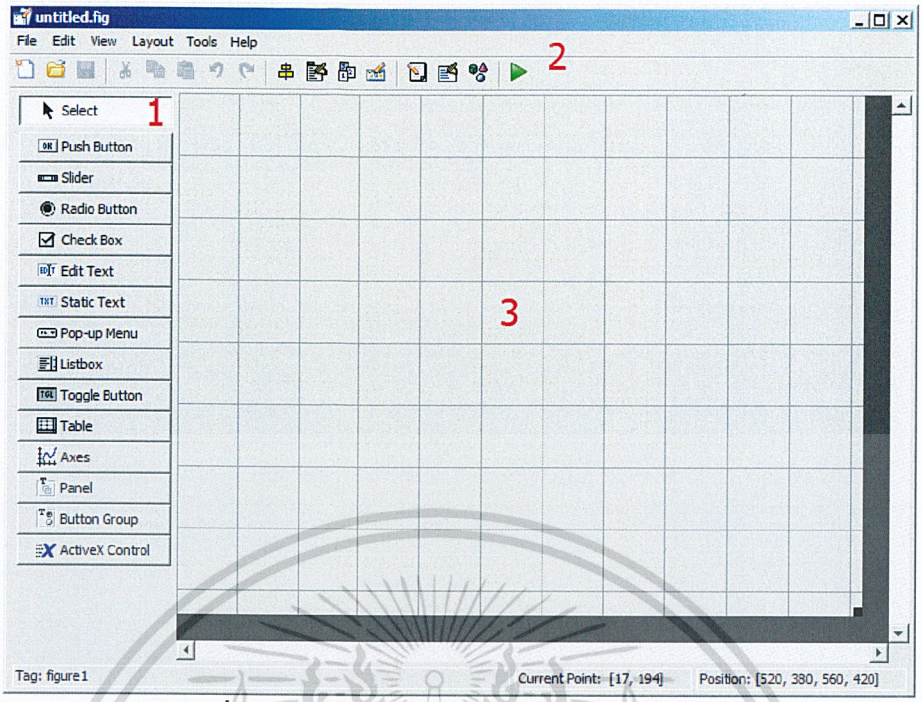
การออกแบบและเขียนโปรแกรมนั้นหลังจากมีการศึกษาวิธีการและค่าต่าง ๆตามมาตรฐานแล้วนั้นจะได้วิธีการคำนวณค่าต่างๆ และได้ทำการเลือกศึกษาในส่วนของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้เป็นตัวเครื่องมือที่ใช้เขียนโปรแกรมซึ่งได้ออกแบบโปรแกรมไว้ดังนี้



รูปที่ 6.6 แผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง

ในส่วนแรกได้มีการศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB 2008b ซึ่งมีตัวช่วยการทำงาน คือ GUIDE GUI ทำให้การทำงานด้านการตกแต่งหน้าต่างการใช้งานหรือ Interface ของตัวโปรแกรมทำงานได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 ส่วนประกอบของหน้าต่าง GUIDE GUI

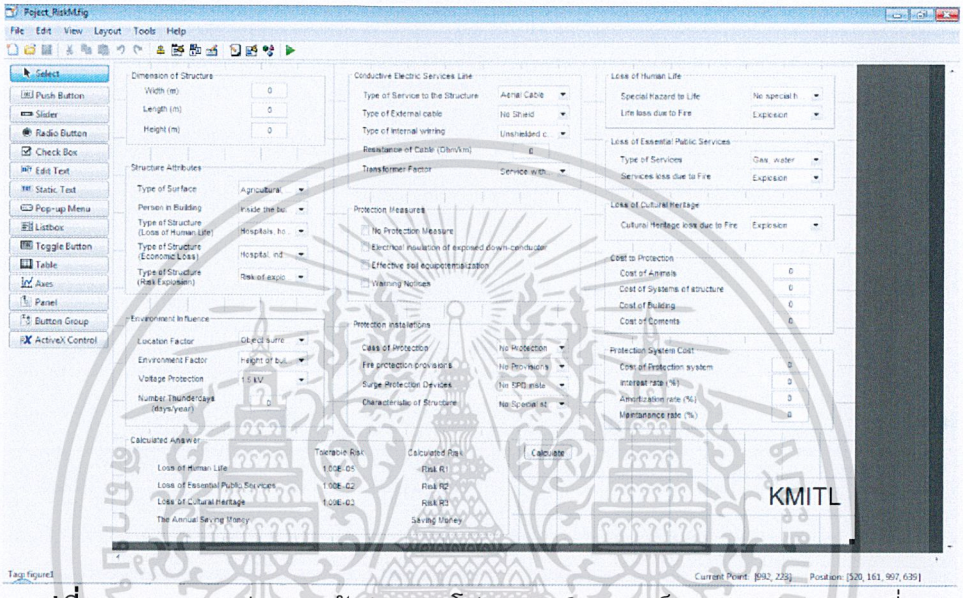
1) ส่วนของเครื่องมือที่เราสามารถนำมาใช้งานโดยแบ่งเป็น
   - Select Tools : เป็นเครื่องมือในการเลือก object ท่าสร้างแล้วในการปรับแก้ค่าต่างๆ
   - Push Button : เป็นเครื่องมือสร้างปุ่มกด
   - Slider : เป็นเครื่องมือสร้างปุ่มเลื่อนหน้าจอ
   - Radio Button : เป็นเครื่องมือเลือกอันใดอันหนึ่ง (เลือกได้แค่ 1 อัน)
   - Check Box : เป็นเครื่องมือเลือกหลายอัน (เลือกได้มากกว่า 1 อัน)
   - Edit Text : เป็นเครื่องมือแก้ค่าเป็นข้อความ (String)
   - Static Text : เป็นเครื่องมือโชว์ข้อความ (String)
   - Pop-up Menu : เป็นเครื่องมือสร้างการเลือกแบบหัวข้อที่แสดงแบบเลื่อนลงมา
   - List Box : เป็นเครื่องมือสร้างการเลือกแบบหัวข้อที่แสดงข้อมูลทั้งหมด
   - Toggle Button : เครื่องมือสร้างปุ่มที่กดแล้วติด และกดแล้วดับ
   - Panel : ไว้สร้างหน้าต่างซ้อนหน้าต่างเดิมในตัว GUI
2) ส่วนของปุ่มเมนูและคำสั่งต่างๆทั่วไป เช่นการเรียก การบันทึก การตั้งค่ามุมมองของโปรแกรม การกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ และการดำเนินเริ่มต้นโปรแกรมก็อยู่ในส่วนนี้
3) พื้นที่การทำงานของตัว GUI ซึ่งสามารถเพิ่มหรือลดขนาดได้บริเวณปุ่มสี่เหลี่ยมทึบสีดำด้านขวาล่างของพื้นที่ดังกล่าว

หลังจากเข้าใจหลักการใช้งานหน้าต่างของ GUIDE แล้วจึงทำการออกแบบรูปแบบหน้าต่างการใช้งานของตัวโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง โดยแบ่งแต่ละหัวข้อโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือ Panel Box และภายในจะมีตัวแปรที่ต้องการเป็น Input หลายค่าซึ่งแตกต่างกันไป ตามแต่ลักษณะ ซึ่งแบ่งเป็นเรื่องใหญ่ๆ ได้ดังนี้

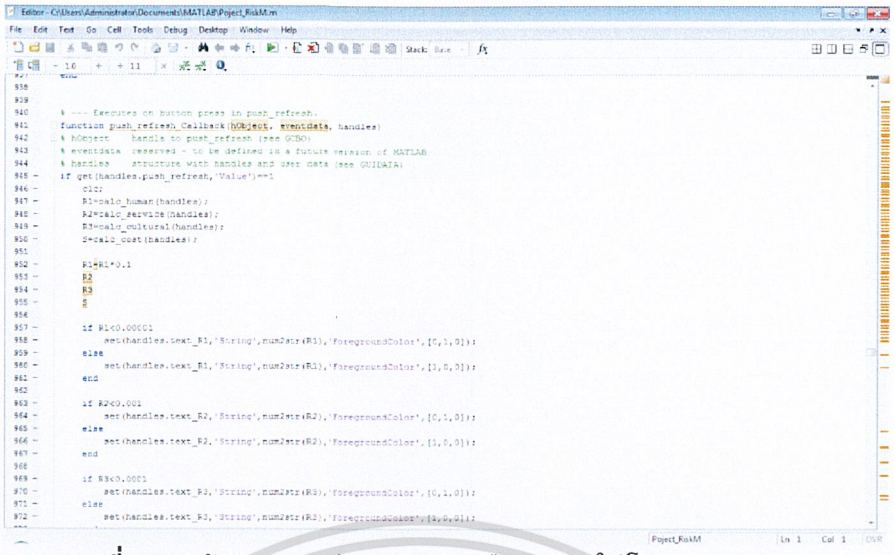
1) ข้อมูลของตัวอาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง
2) การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า
3) ระบบสายส่งหรือตัวนำเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง
4) ค่าความเสียหายต่างๆ ของตัวสิ่งปลูกสร้าง



รูปที่ 6.8 การวางรูปแบบหน้าต่างของโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง

เมื่อทำการออกแบบหน้าต่างโปรแกรมแล้วจะทำการเขียนคำสั่งหรือการทำให้โปรแกรมสร้างรับค่าและนำค่าที่รับหรือจากการป้อนค่า Input ไปสามารถใช้งานซึ่งในส่วนนี้เราเรียกว่าการ callback ซึ่งใช้การเขียน m-file ในการสั่งให้ object แต่ละตัวของโปรแกรมสั่งการทำอะไรให้เป็นค่าที่รับเข้าแล้ว คำนวณแล้วส่งค่ากลับไป ซึ่งจะได้เป็นผลลัพธ์ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 หน้าต่างการเขียน m-file หรือการทำให้โปรแกรมทำงาน

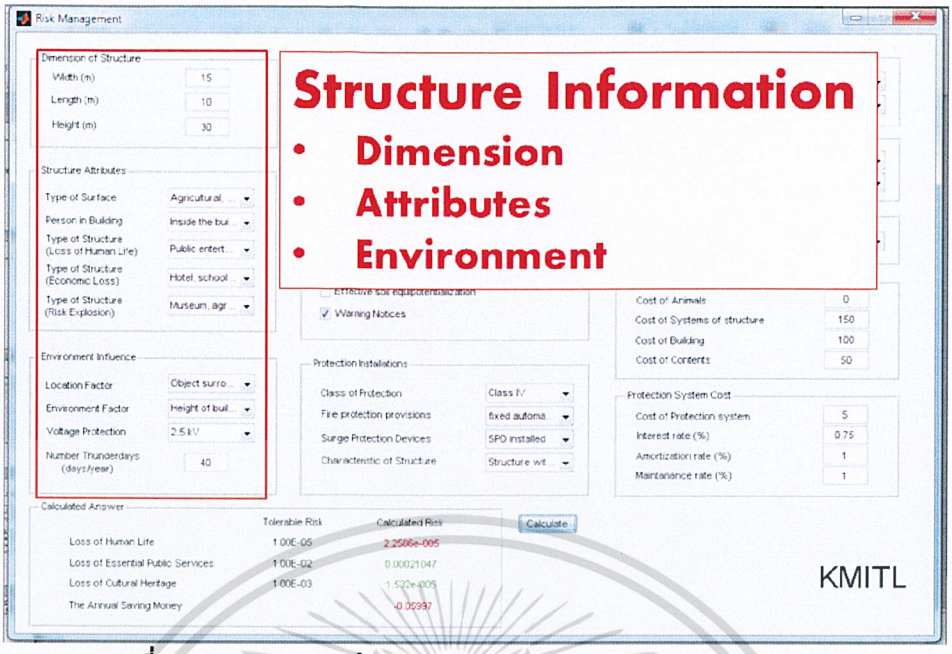
ซึ่งผลเมื่อทำการเขียน m-file และ callback แล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความเสี่ยงที่คำนวณได้ออกมาที่ Panel Box Result เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และป้องกันระบบฟ้าผ่าได้ดีขึ้น

6.3 แนะนำและการใช้งานโปรแกรม

โปรแกรมที่ทำการออกแบบสมบูรณ์แล้วจะมีการทำงานดังแผนผังที่ได้ทำการ แสดงแนวคิดถึงการทำงานของโปรแกรม โดยในส่วนแรกคือการป้อนค่า Input นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของตัวสิ่งปลูกสร้าง สภาพแวดล้อมขณะนั้น ข้อมูลทางสถิติของแต่ละพื้นที่การวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งเป็นส่วนๆ ดังนี้

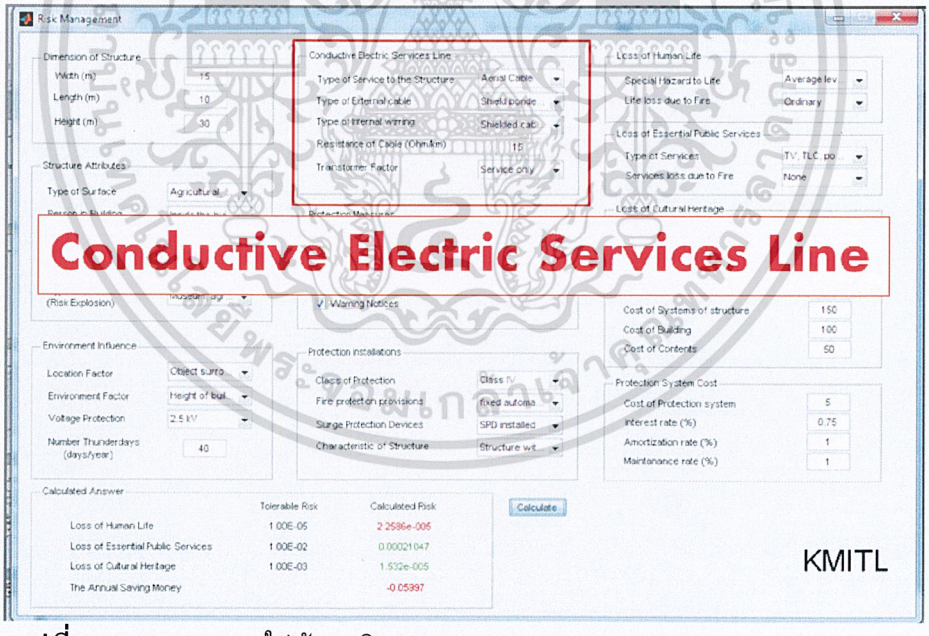
1) ส่วนของข้อมูลสิ่งปลูกสร้าง (Structure Information) แบ่งเป็น
   - ขนาดรูปร่าง (Dimension)
   - คุณสมบัติ (Attributes)
   - สิ่งแวดล้อม (Environment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Structure Information

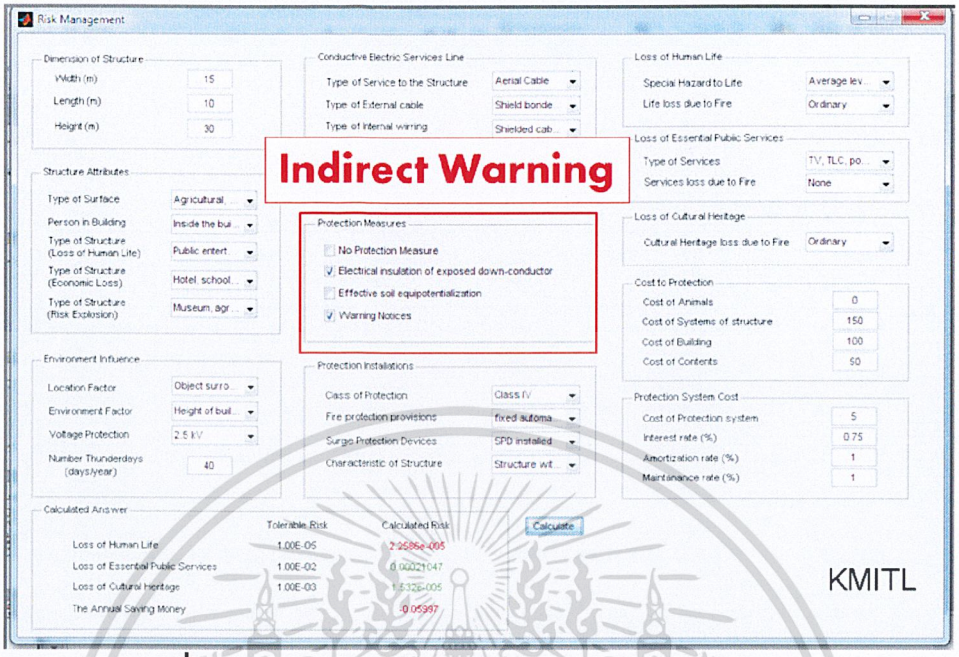
2) ส่วนของข้อมูลทางด้านตัวนำเข้าสู่อาคาร (Conductive Electric Services Line)



รูปที่ 6.11 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Conductive Electric Services Line

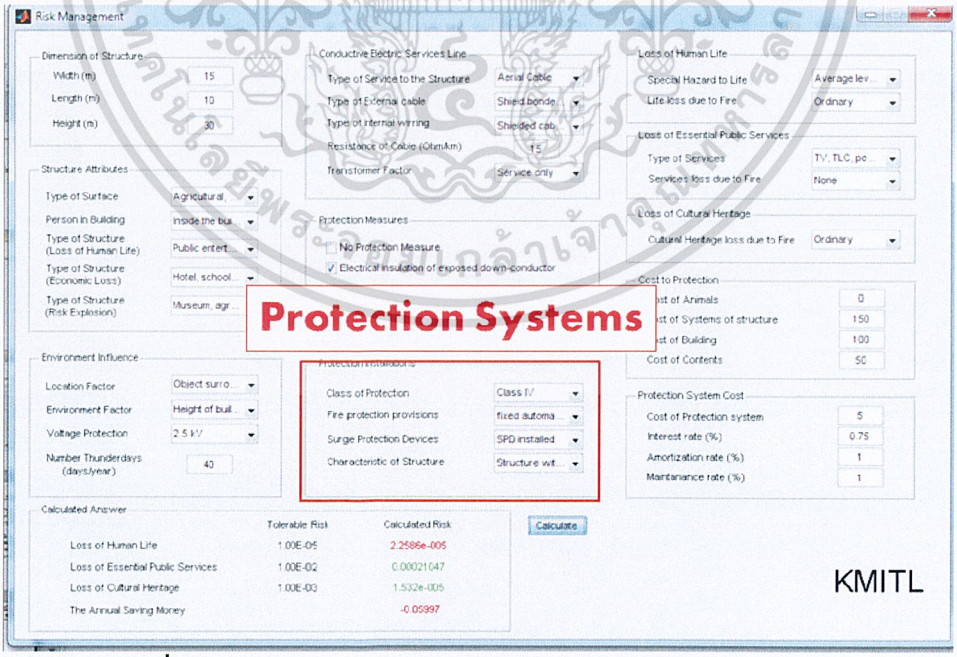
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ส่วนของข้อมูลด้านการแสดงการเตือน (Indirect Warning)



รูปที่ 6.12 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Indirect Warning

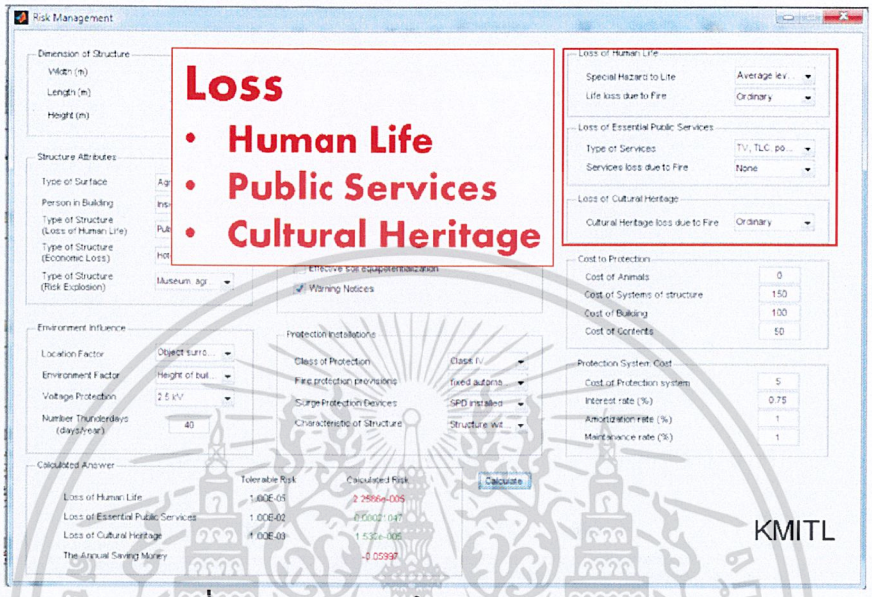
4) ส่วนของข้อมูลด้านระบบป้องกันที่จะติดตั้ง (Protection Systems)



รูปที่ 6.13 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Protection Systems

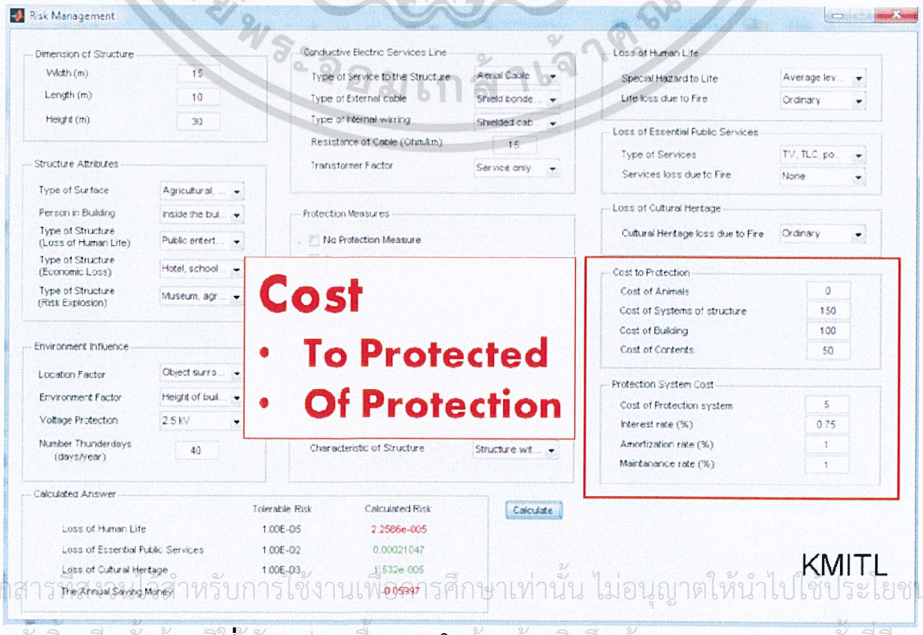
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ส่วนของข้อมูลด้านของความสูญเสีย (Loss) แบ่งเป็น
   - ชีวิตของมนุษย์ (Human Life)
   - ระบบสาธารณสุข (Public Services)
   - สิ่งมีคุณค่าทางวัฒนธรรม (Cultural Heritage)



รูปที่ 6.14 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Loss

6) ส่วนของข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ (Cost) แบ่งเป็น
   - มูลค่าที่ต้องป้องกัน (To be protected)
   - มูลค่าการลงทุนให้กับระบบป้องกัน (Cost of protection systems)



รูปที่ 6.15 Panel การใส่ข้อมูลอินพุทของ Cost

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้ทำการป้อนค่าอินพุทครบแล้ว จะมาถึงในส่วนของการแสดงผล ซึ่งเมื่อเราทำการกด Calculate แล้วนั้นจะทำการคำนวณค่าในตัวโปรแกรม โดยสมการต่างๆ เป็นไปตามาตรฐานของ IEC 62305-2 ซึ่งในส่วนของการแสดงผลจะมีอยู่ 4 ส่วนด้วยกันคือ

1) Loss of Human Life

เป็นส่วนของค่าที่ยอมรับได้ในความสูญเสียต่อชีวิตเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมถ้าตัวเลขที่ได้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่ามีค่าความเสี่ยงต่ำกว่ามาตรฐานเป็นเรื่องดี แสดงว่าระบบป้องกันที่ออกแบบนั้นเหมาะสม

2) Loss of Essential Public Services

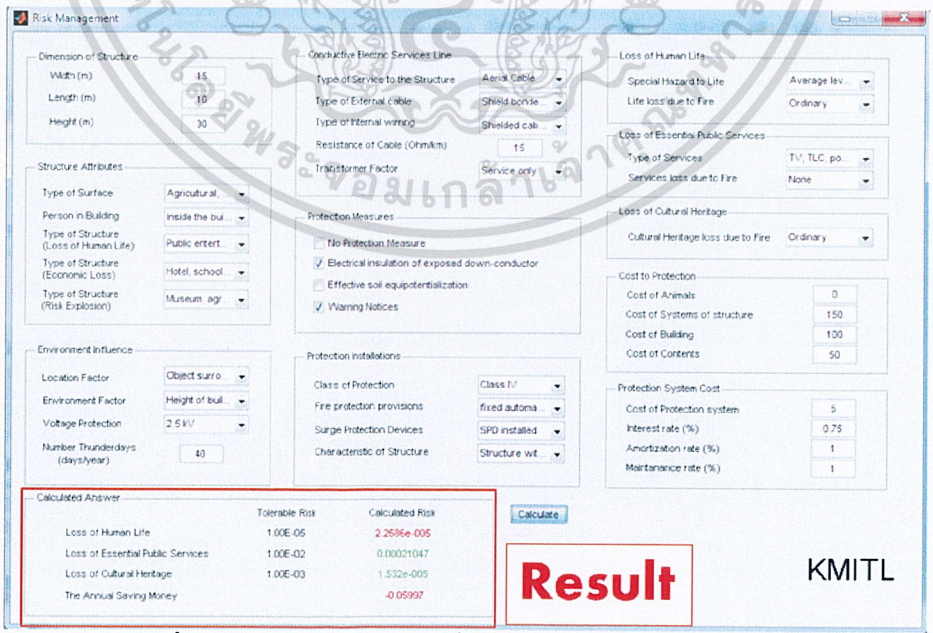
เป็นส่วนของค่าที่ยอมรับได้ในความสูญเสียต่อระบบสาธารณูปโภคเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมถ้าตัวเลขที่ได้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่ามีค่าความเสี่ยงต่ำกว่ามาตรฐานเป็นเรื่องดี แสดงว่าระบบป้องกันที่ออกแบบนั้นเหมาะสม

3) Loss of Cultural Heritage

เป็นส่วนของค่าที่ยอมรับได้ในความสูญเสียต่อสถานที่สำคัญทางสังคมเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมถ้าตัวเลขที่ได้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่ามีค่าความเสี่ยงต่ำกว่ามาตรฐานเป็นเรื่องดี แสดงว่าระบบป้องกันที่ออกแบบนั้นเหมาะสม

4) The Annual Saving Money

เป็นค่าที่คำนวณได้จากราคาหรือมูลค่าของการติดตั้งเทียบกับมูลค่าของสิ่งที่ต้องถูกป้องกันโดยหากเราลงทุนระบบป้องกันในราคาที่สูงเกินกว่ามูลค่าของสิ่งที่ต้องป้องกันจะกลายเป็นว่า ไม่เป็นการประหยัดแต่ทำให้เกิด

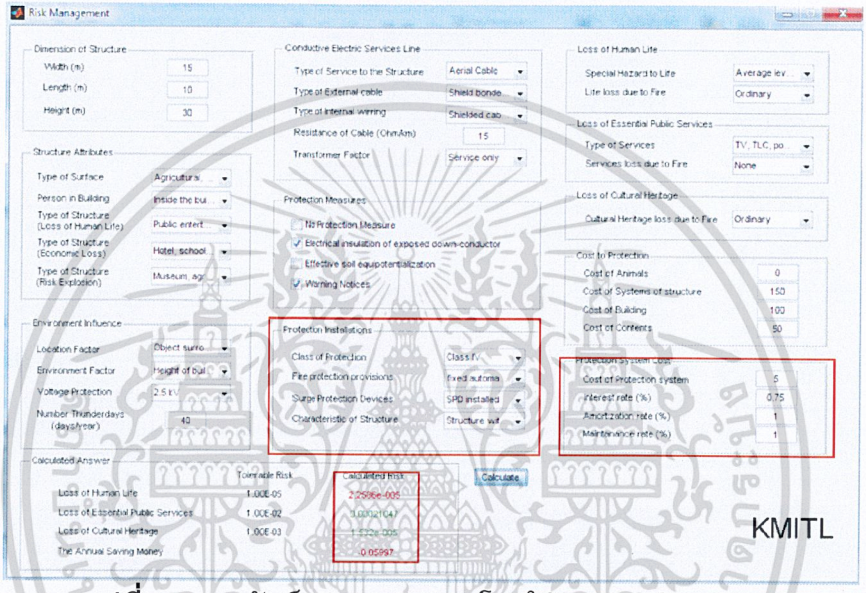


รูปที่ 6.16 ส่วนของหน้าต่างที่แสดงผลลัพธ์ทางการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

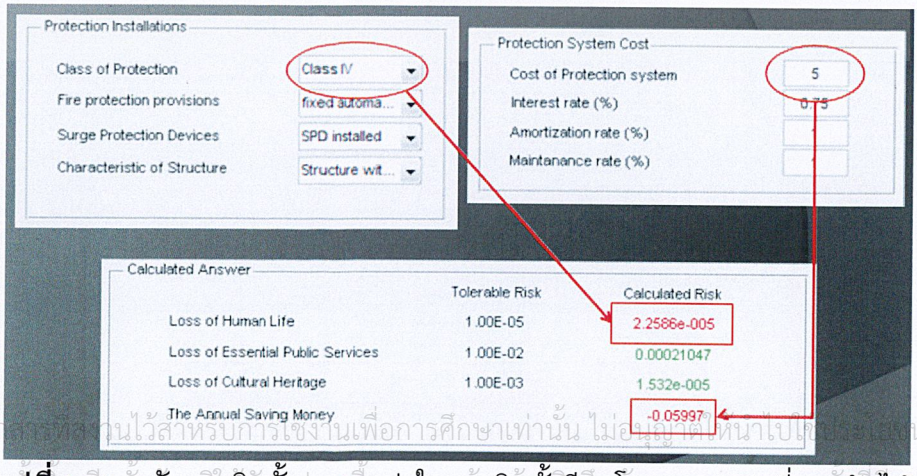
6.4 ผลที่ได้จากการใช้งานโปรแกรม

เมื่อทำการออกแบบและเขียนโปรแกรมแล้ว ได้ทำการลองแทนค่าตาม case study ที่ได้จากในมาตรฐาน IEC 62305-2 โดยทำการป้อนค่าตัวแปรต่างๆ และในส่วนของการเลือกระบบป้องกัน (Protection System) ได้ทำการเลือกให้เป็นระดับต่ำสุดก่อนนั่นคือที่ Class 4 สังเกตผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าเป็นอาคารพักอาศัยผลต่อชีวิตจึงมาเป็นอันดับแรก ในการเลือกการป้องกันที่ระดับต่ำนั้นค่าที่ออกมาจากการคำนวณแสดงว่า ยังไม่สามารถยอมรับการติดตั้งดังกล่าวได้เพราะมีค่าจากการคำนวณมากกว่าค่าที่สามารถยอมรับได้จากมาตรฐาน



รูปที่ 6.17 ผลลัพธ์จากการคำนวณโดยใช้การป้องกันระดับ4

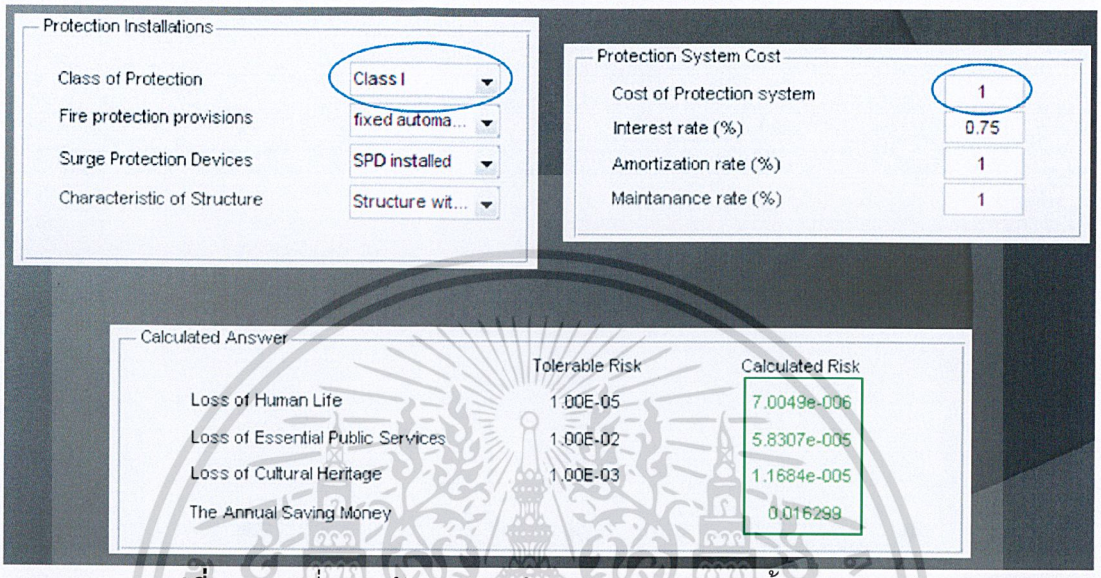
นอกจากนี้ในการลงทุนหรือมูลค่าของระบบป้องกันนั้น เป็นตัวแดงแสดงว่าไม่สามารถยอมรับได้เพราะมีการลงทุนให้แก่ระบบป้องกันมากเกินไป ทำให้ค่าของความคุ้มในเชิงเศรษฐศาสตร์ไม่คุ้ม เป็นการลงทุนที่เกินกว่าความจำเป็น



รูปที่ 6.18 ระดับการติดตั้ง และมูลค่าในการติดตั้งมีผลโดยตรงต่อค่าที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนำไปใช้

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นโดยการติดตั้งระดับป้องกันที่ต่ำทำให้ค่าการยอมรับได้ของตัวโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงยังไม่สามารถใช้งานได้ จึงได้ทำการทดลองโดนการเพิ่มระดับการป้องกันเป็นการป้องกันระดับ 1 ซึ่งดีที่สุด และลดค่าการลงทุนในส่วนของมูลค่าการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าลง



รูปที่ 6.19 เปลี่ยนระดับการป้องกัน และมูลค่าการติดตั้งระบบป้องกัน

เห็นได้จากรูปที่ 6.19 ว่าเมื่อเราทำการเปลี่ยนระดับการป้องกันเป็นระดับที่ 1 ซึ่งดีกว่าเดิม ทำให้ค่าที่คำนวณมาจากโปรแกรม และค่าที่ยอมรับได้จากมาตรฐานนั้น ค่าจากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าแสดงว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ได้ติดตั้งใหม่ สามารถยอมรับได้ และเหมาะสมต่อการติดตั้งในระดับกรณีศึกษานี้

และในส่วนของมูลค่าความคุ้มทางด้านเศรษฐศาสตร์นั้นได้ทำการลดมูลค่าการติดตั้งลง และปรากฏว่าทำให้ค่านั้นเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ คือไม่เกิดการลงทุนที่สูญเปล่า การลงทุนดังกล่าวเหมาะสมและมีมูลค่าที่เหมาะแก่การลงทุนเพื่อป้องกันระบบที่มีมูลค่าตามที่ควรแก่การป้องกัน

โปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงนี้จัดทำขึ้นตามสมการและวิธีการในการคำนวณตามมาตรฐาน IEC 62305-2 ซึ่งทำให้การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการลงทุนติดตั้ง หรือการออกแบบการติดตั้งจริง ยังต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์และขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย โปรแกรมวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงนี้เป็นแค่การวิเคราะห์อย่างง่าย ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความเป็นจริงที่ทำได้เป็นหลัก

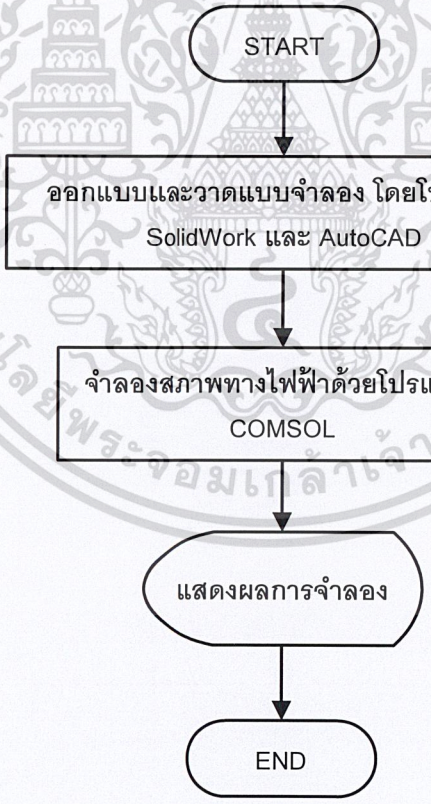
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
การศึกษา จำลองชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL

7.1 บทนำ

การจำลองการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์คือโปรแกรม COMSOL Version 3.5 มาช่วยในการวิเคราะห์ผลการกระจายสนามไฟฟ้าเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือในการทดสอบ โดยมีการจำลองแผ่นอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดสอบทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1200 มม. และ 2400 มม. ตามลำดับ ว่ามีการกระจายของสนามไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งได้มีการจำลองโดยใช้โปรแกรม COMSOL Version 3.5 ก่อนที่จะทำการทดสอบจริง

โดยก่อนเริ่มการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้านั้นได้ทำการวางแผนในการออกแบบวาดแบบจำลอง รวมไปถึงการจำลองสภาพทางไฟฟ้าทั้งค่าแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าจุดสูงสุดและต่ำสุดของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับตัวแท่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 7.1

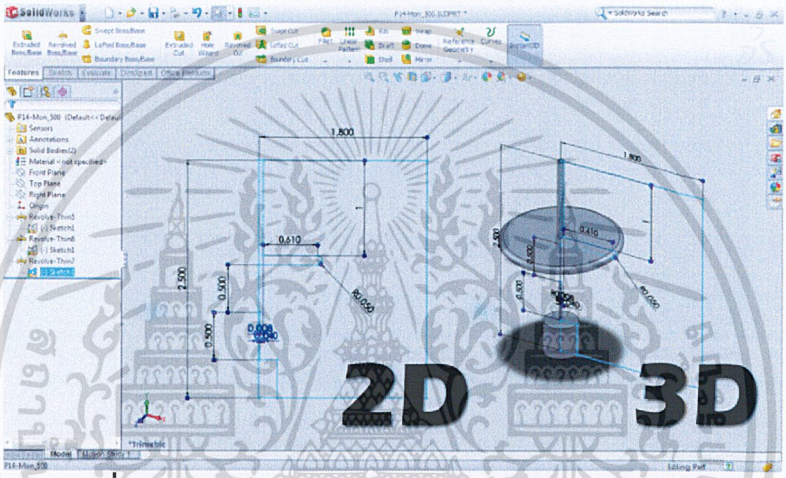


รูปที่ 7.1 แผนภาพแนวคิดและวิธีการในการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

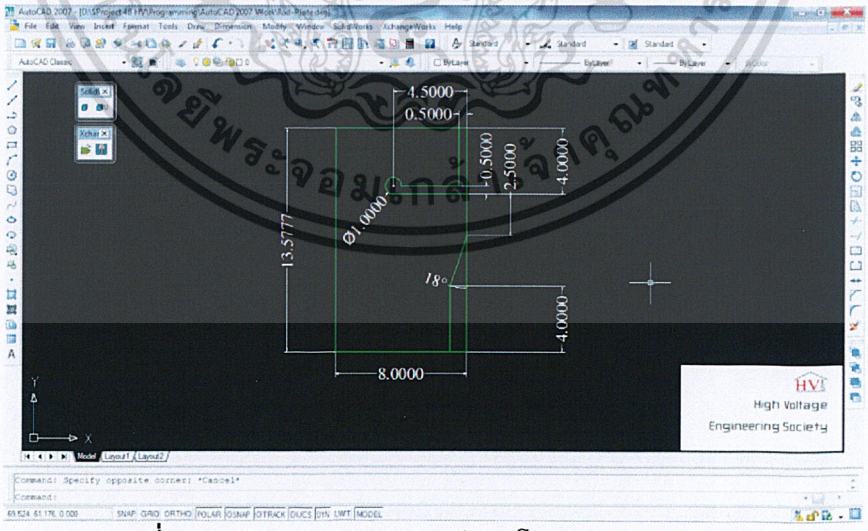
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาการใช้โปรแกรมในการจำลองสภาพทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้านั้นเราแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ช่วงคือ ออกแบบและวาดแบบจำลอง และการจำลองสภาพทางไฟฟ้า โดยในแต่ละส่วนจะมีการใช้โปรแกรมและวิธีการที่แตกต่างกัน

ในส่วนแรกการออกแบบและวาดแบบจำลองของแท่งตัวนำล่อฟ้า จะใช้โปรแกรมในการวาดและออกแบบวัสดุทางวิศวกรรมคือ SolidWork และ AutoCAD ซึ่งมีความเหมาะสมแตกต่างกันในการออกแบบ โดยตัวโปรแกรม SolidWork จะสามารถวาดงานที่เป็นลักษณะ 2 และ 3 มิติได้สะดวกและเข้าใจง่าย ส่วนตัวโปรแกรม AutoCAD นั้นใช้ในการวาด 2 มิติ เพราะมีการ Export ไฟล์เป็นข้อมูลที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้อย่างกว้างขวาง



รูปที่ 7.2 หน้าต่างและรูปร่างหน้าตาโปรแกรม SolidWork

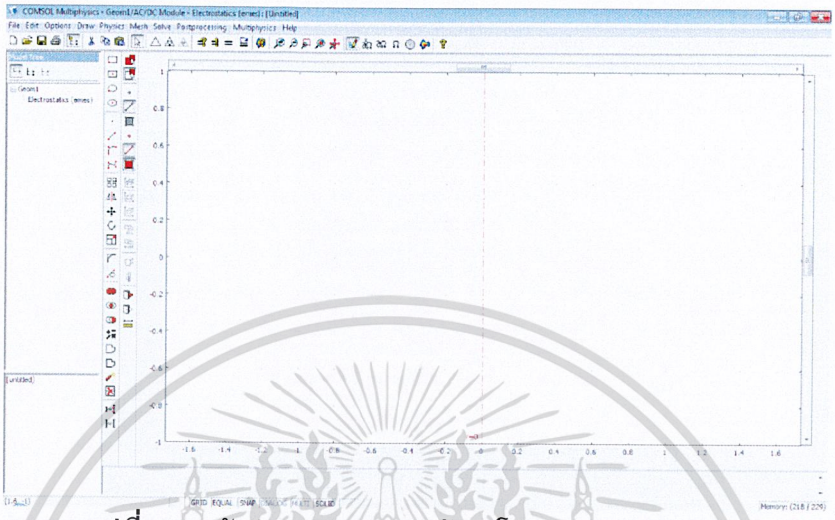


รูปที่ 7.3 หน้าต่างและรูปร่างหน้าตาโปรแกรม AutoCAD

ในส่วนที่สองเป็นการจำลองสภาพทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองสภาพต่างๆ ของวัสดุทดสอบที่ได้ทำการวาดจากโปรแกรมข้างต้น และยังสามารถใช้ตัวโปรแกรม COMSOL เองในการวาดและออกแบบวัสดุทดสอบได้อีกด้วย แต่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อยมีความสะดวกมากนัก โดยเราสามารถเลือกตัวแปรต่างๆ ให้กับวัสดุทดสอบได้อย่างหลากหลาย เพื่อให้การวิเคราะห์แท่งตัวนำล่อฟ้าออกมาได้ผลที่สามารถนำไปวิเคราะห์และส่งผลไปถึงการทดสอบจริงต่อไป



รูปที่ 7.4 หน้าต่างและรูปร่างหน้าตาโปรแกรม COMSOL

7.2 การศึกษา จำลองชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า

สำหรับการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าควรมีความตระหนักถึงเรื่องของความเครียดของสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมที่ใช้ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูง จึงต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงใช้แผ่นอิเล็กโตรดที่เป็นระนาบขนาดใหญ่และบริเวณขอบโดยรอบจะเป็นขอบโค้งแบบโรกอฟสกี้ ซึ่งขอบของอิเล็กโตรดจะโค้งตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นการศึกษาว่าแผ่นอิเล็กโตรดที่เป็นระนาบขนาดใหญ่นั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอกว่าแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเล็กหรือไม่ เพื่อหาข้อเปรียบเทียบของทั้งสองกรณี

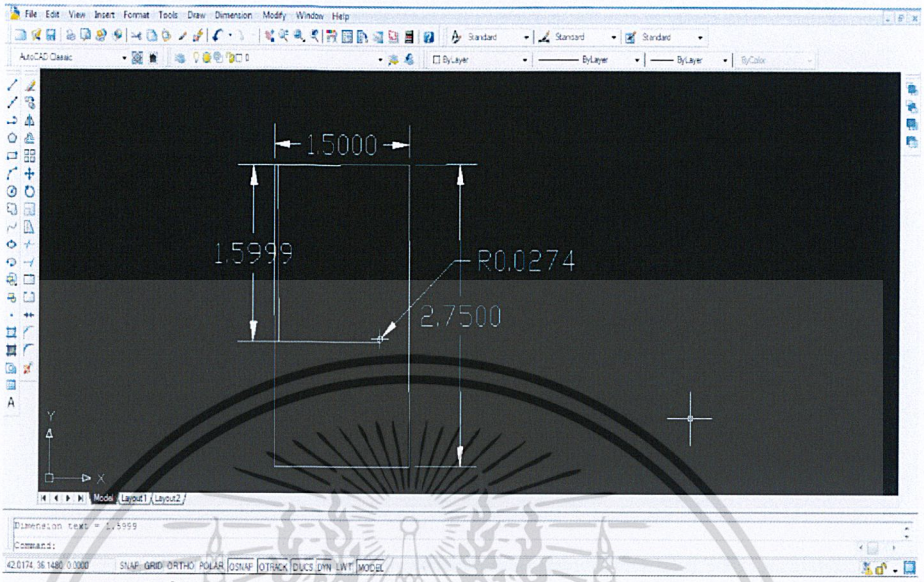
7.2.1 การจำลองชุดทดสอบ

สำหรับการจำลองชุดทดสอบวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างควรมีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยขณะทำการทดสอบ โดยแผ่นอิเล็กโตรดที่นำมาใช้ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงนั้นทำมาจากวัสดุอลูมิเนียม และโครงสร้างที่นำมาใช้เป็นที่รองรับแผ่นอิเล็กโตรดนั้นทำมาจากวัสดุ Polyvinyl Choride (PVC) และแผ่นอะคลีลิค ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ดังนั้นจึงจำลองแผ่นอิเล็กโตรดเป็นวัสดุอลูมิเนียมและได้จำลองสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดทั้งสองขนาดกับแท่งตัวนำล่อฟ้าแบบต่างๆ เพื่อดูว่าทั้งสองขนาดนี้มีผลแตกต่างกันอย่างไร โดยมีขั้นตอนในการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ดังนี้

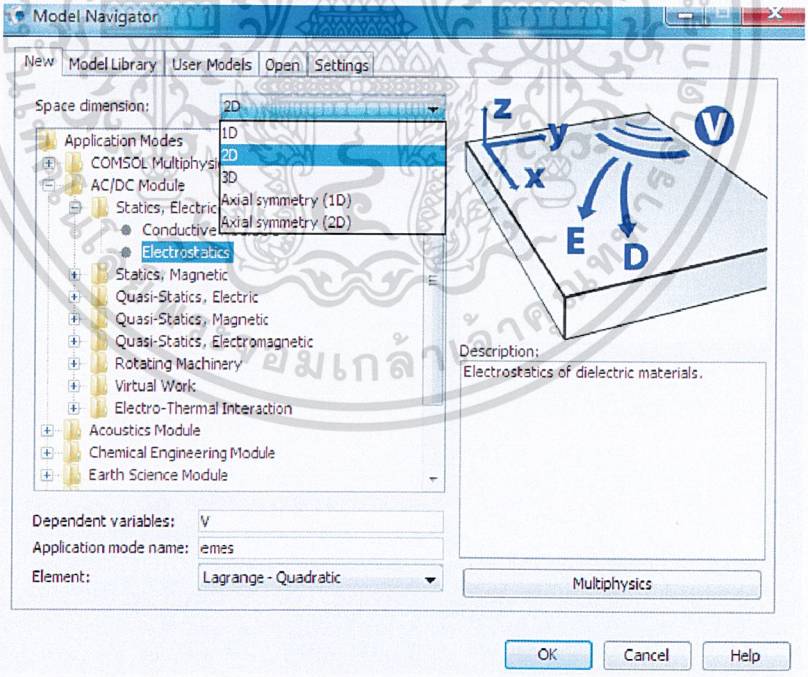
1. เขียนแบบแผ่นอิเล็กโตรดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2400 มม. ความหนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรมในการเขียนคือ โปรแกรม Solid Work ดังรูปที่ และทำการบันทึกรูปที่ได้เป็นนามสกุล (.dxf) ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้กับโปรแกรม COMSOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปิดโปรแกรม COMSOL Version 3.5  โดยมีรูปแบบหน้าต่างการใช้งานดังรูปที่ 7.5



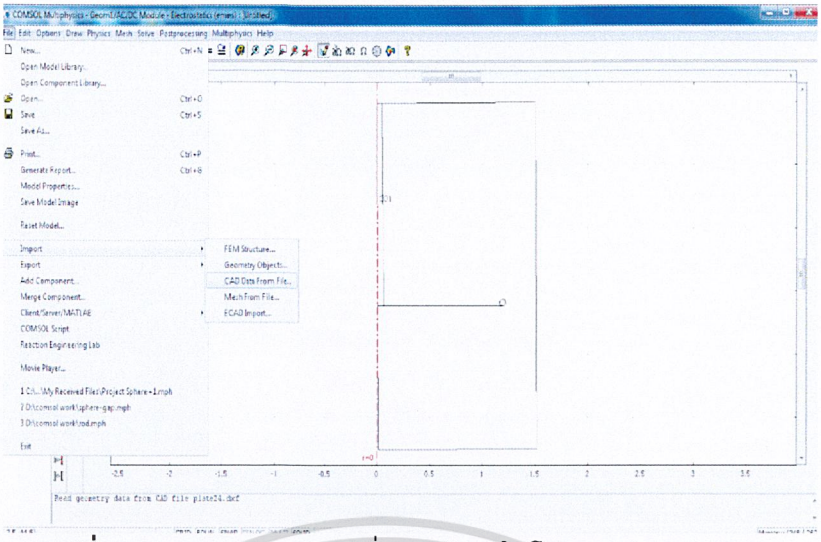
รูปที่ 7.5 แผ่นอิเล็กโตรดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ความหนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรม Solid Work



รูปที่ 7.6 รูปแบบหน้าต่างการเลือกใช้งานของโปรแกรม COMSOL Version 3.5

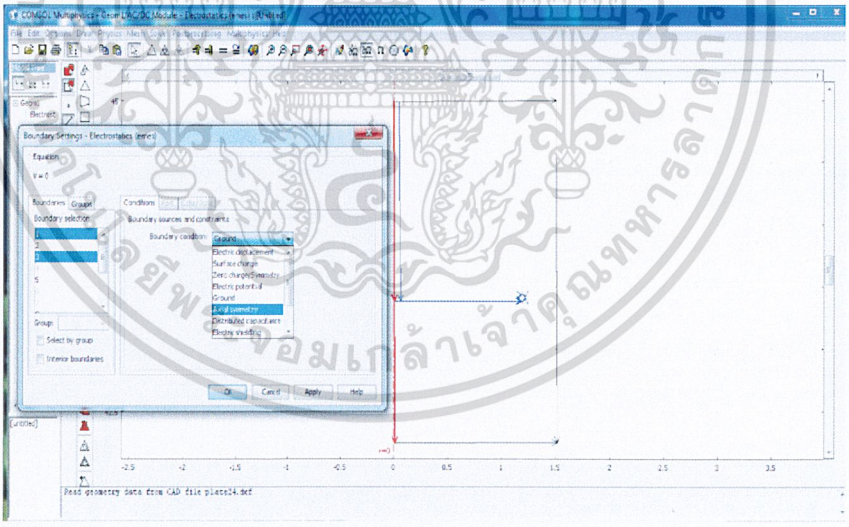
3. เมื่อเลือกรูปแบบดังรูปที่ 7.6 แล้ว จากนั้นทำการนำแบบจำลองที่วาดในโปรแกรม Solid Work เข้ามาในโปรแกรม COMSOL ดังรูปที่ 7.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



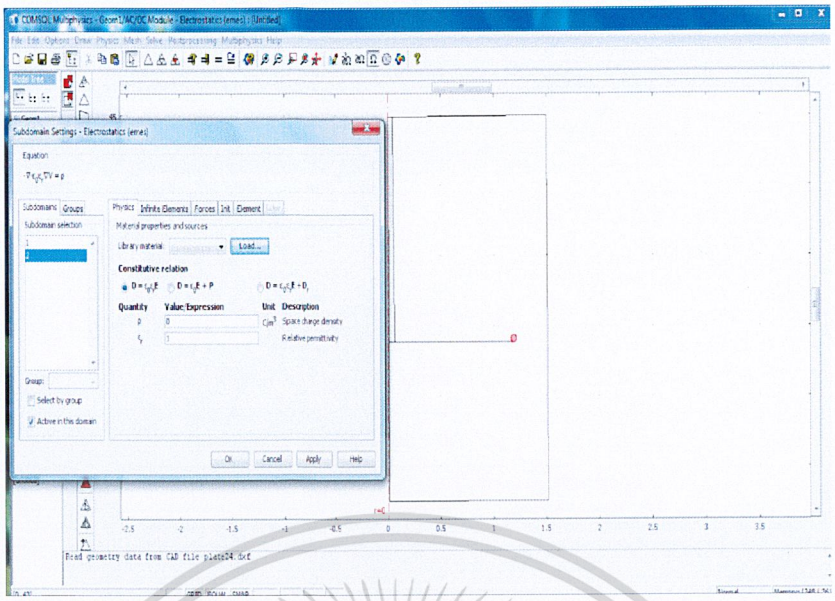
รูปที่ 7.7 การนำแบบจำลองที่วาดเข้ามาในโปรแกรม COMSOL

4. ทำการกำหนดค่าต่างๆ คือ การกำหนดขอบเขตการจำลอง (Boundary settings) เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นอิเล็กโตรดโดยในการจำลองนี้ได้ป้อนแรงดัน 600 kV เพื่อจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานสูงสุด กำหนดตำแหน่งกราวน์ และกำหนดขอบเขตอื่นๆในการจำลอง รวมถึงกำหนดวัสดุที่ใช้ในการจำลอง (Subdomain settings) ดังรูปที่ 7.8 (ก) และ 7.8 (ข)



(ก)

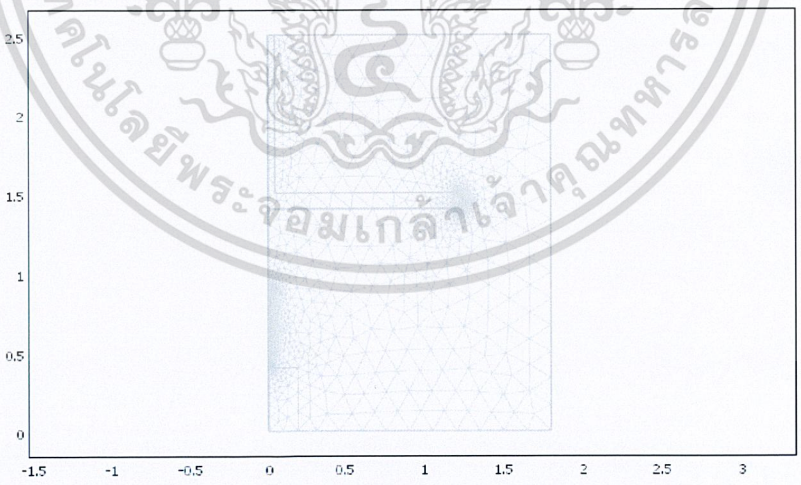
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

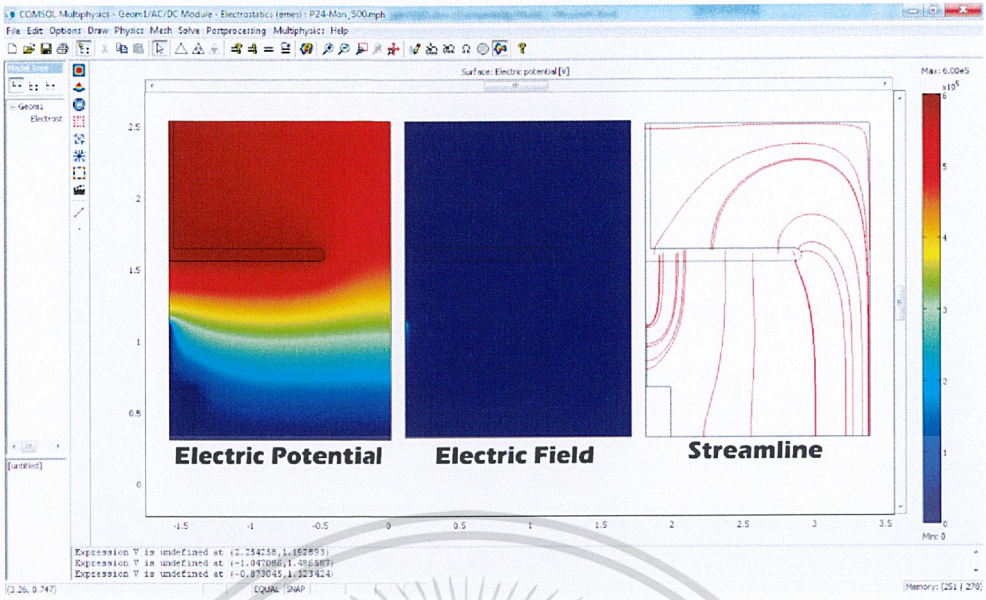
รูปที่ 7.8 การกำหนดค่าต่าง ๆ ใน Boundary settings และ Subdomain settings ในโปรแกรม COMSOL

5. เมื่อทำการป้อนค่าต่างๆเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสั่งให้โปรแกรม COMSOL Version 3.5 ทำการประมวลผล โดยใช้คำสั่ง Mesh เพื่อสร้างเอลิเมนต์ย่อยๆ และทำการประมวลผลที่อยู่ในรูปของฟังก์ชั่น Solve Problem ดังรูปที่ 7.9 (ก) และ 7.9 (ข)



(ก)

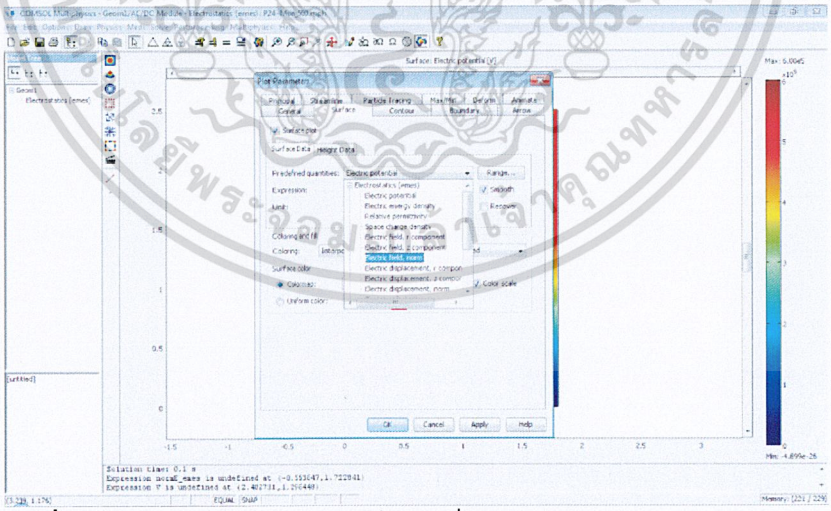
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 7.9 การสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการประมวลผลโดยโปรแกรม COMSOL

6. กำหนดรูปแบบการประมวลที่ต้องการในฟังก์ชั่น Postprocessing และเลือก Post Parameter ดังรูปที่ 7.10 ซึ่งสามารถเลือกรูปแบบการประมวลผลที่ต้องการได้เช่น การกระจายเส้นศักย์ไฟฟ้า การกระจายเส้นสนามไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด

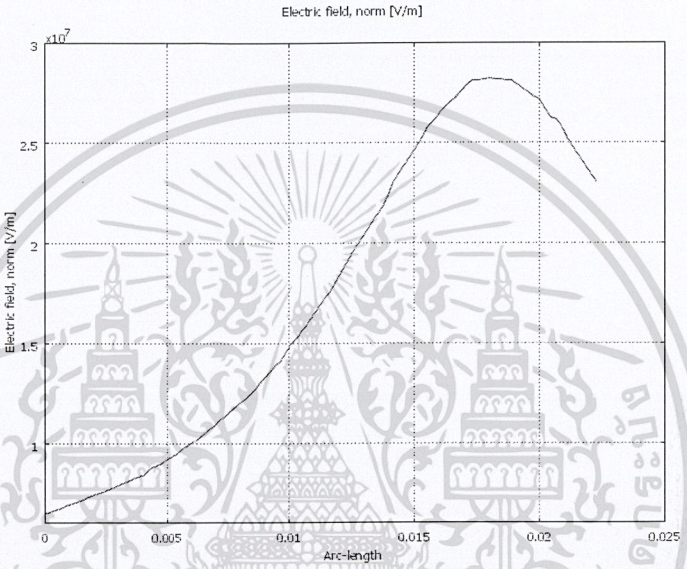


รูปที่ 7.10 กำหนดรูปแบบการประมวลที่ต้องการในโปรแกรม COMSOL

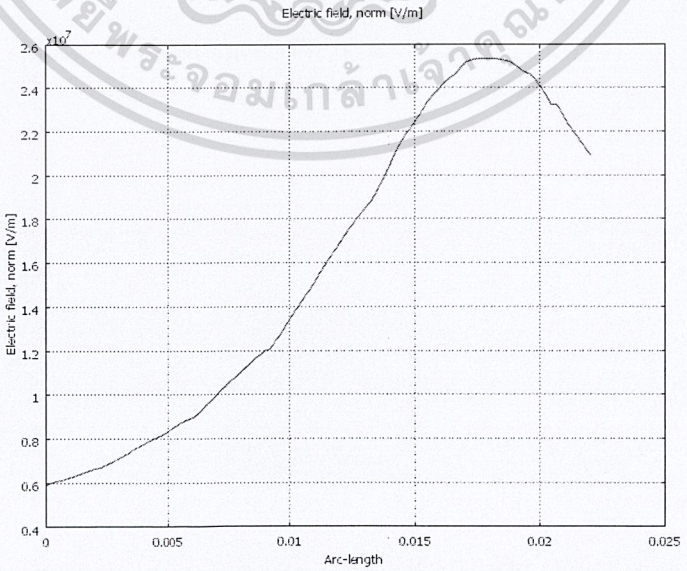
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองชุดทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า กับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.400 ม. ด้วยโปรแกรม COMSOL Version 3.5

จากการออกแบบชุดตัวนำเสาล่อฟ้า สิ่งสำคัญที่ต้องวิเคราะห์และออกแบบคือ การออกแบบแผ่นอิเล็กโตรดที่ไว้สำหรับป้อนแรงดันสูง เนื่องจากแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเล็กนั้นจะมีสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดโคโรน่าขึ้นที่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากกว่าแผ่นอิเล็กโตรดขนาดใหญ่



รูปที่ 7.11 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดขนาด 2.4 เมตร หนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรม COMSOL Version 3.5 ในการวิเคราะห์



รูปที่ 7.12 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดและเส้นศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอิเล็กโตรดขนาด 1.2 เมตร หนา 2 มม. โดยใช้โปรแกรม COMSOL Version 3.5 ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของ ห้ามนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้

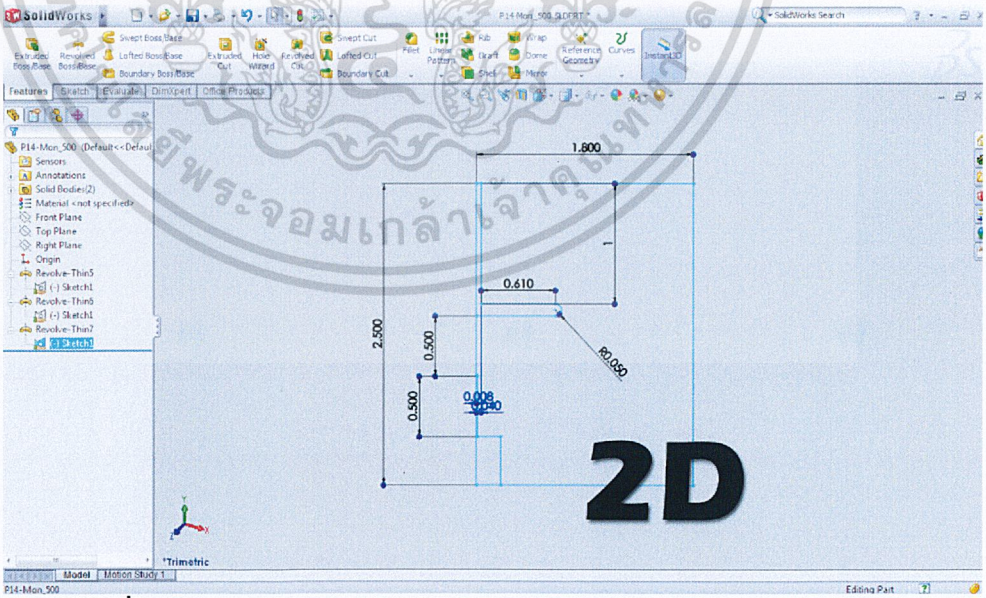
7.3 การวิเคราะห์แบบจำลองของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยโปรแกรม COMSOL Version 3.5

การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของศักย์ไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีการใช้งานและขายตามท้องตลาดในปัจจุบัน เพื่อทำการทดสอบว่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าเท่าไหร่ จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับการทดสอบจริงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแท่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีรูปร่างที่แตกต่างกันคือ ปลายมน ,ปลายแหลม ,ปลายแฉก และแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีลักษณะเดียวกันคือแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนแต่วัสดุที่ใช้ทำนั้นแตกต่างกันคือ ทองแดง ,อลูมิเนียมและดีบุก ซึ่งทั้งหมดนี้มีความยาว 500 มม.

7.3.1 การจำลองศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม COMSOL Version 3.5

การจำลองแท่งตัวนำล่อฟ้าเพื่อดูผลของค่าสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าแต่ละแท่งตัวนำจากนั้นนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงและทำการวิเคราะห์ผล โดยมีการจำลองลักษณะของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน และจำลองแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มำมาจากวัสดุที่ต่างกัน เพื่อดูผลว่าวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้านั้นมีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าอย่างไร ซึ่งวิธีการจำลองโดยโปรแกรม COMSOL มีวิธีการดังต่อไปนี้

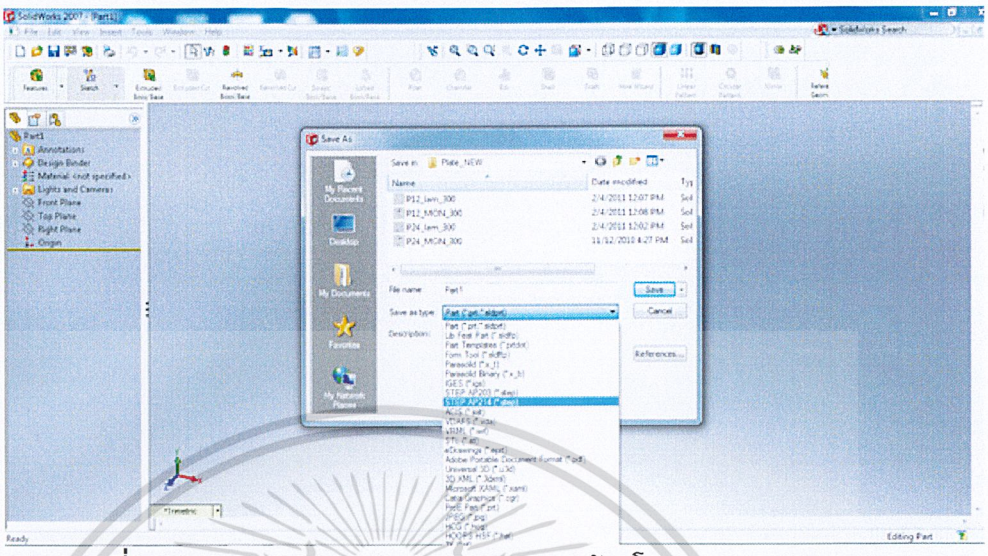
1) วาดโครงสร้างของแท่งตัวนำแต่ละแบบดังรูปที่ 7.13 โดยใช้โปรแกรม Solid Work ในการวาดแบบ



รูปที่ 7.13 การออกแบบและวาดแบบจำลองด้วยโปรแกรม SolidWork

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

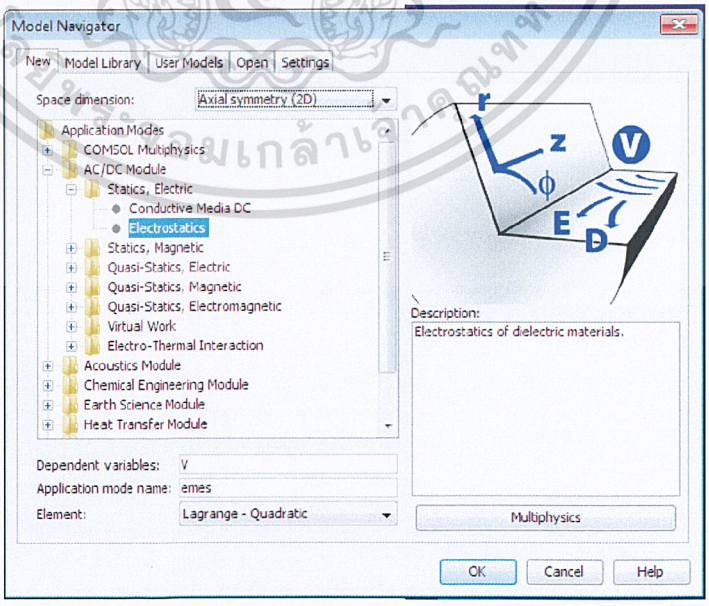
2) ทำการบันทึกแบบโดยบันทึกเป็นนามสกุล .dxf



รูปที่ 7. 14 การออกแบบและวาดแบบจำลองด้วยโปรแกรม SolidWork

3) เปิดโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (COMSOL Multiphysics 3.5)

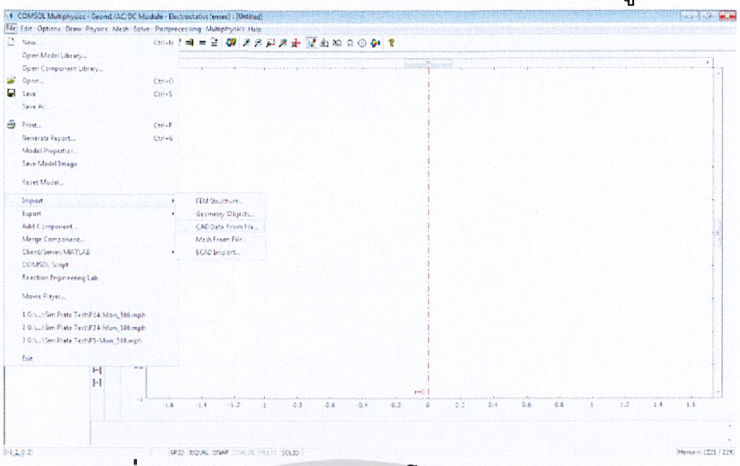
4) เมื่อทำการเปิดโปรแกรมแล้วให้ใส่ Space Dimension เพื่อเลือกประเภทของแบบที่จำลอง และเลือก Application modes เพื่อเลือกปัญหาที่จะวิเคราะห์ดังรูปที่ 7.15 โดยเลือกเป็น 2D Axial Symmetry และ AC/AC Module -> Statics -> Electrostatics



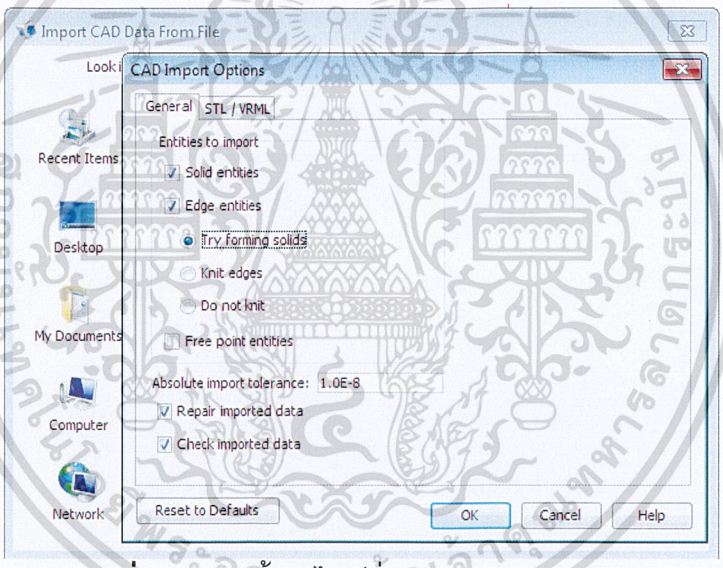
รูปที่ 7.15 เลือกรูปแบบการจำลองสภาพทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ทำการ import และตั้งค่าแบบจำลองที่ต้องการวิเคราะห์ดังรูปที่ 7.16 และ 7.17

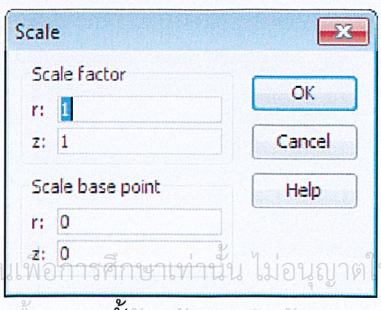


รูปที่ 7.16 Import File เข้าสู่โปรแกรม COMSOL



รูปที่ 7.17 การตั้งค่าไฟล์ที่ทำการ Import เข้ามา

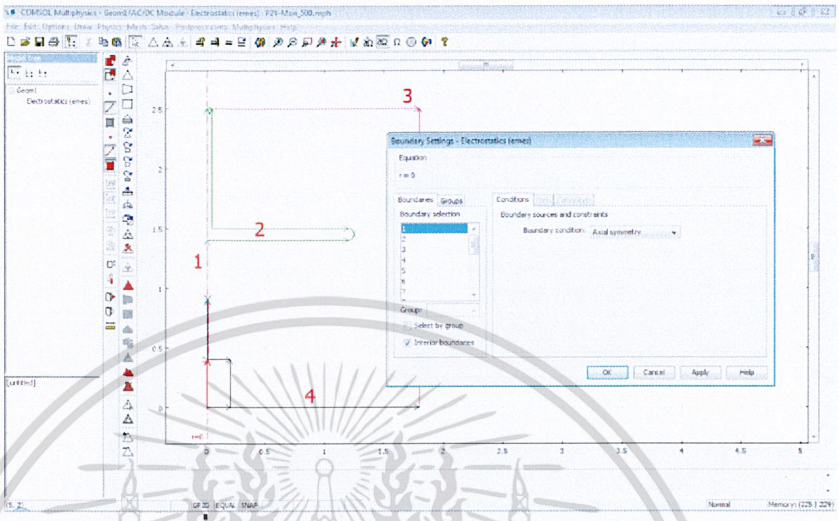
6) ทำการตั้งค่าขนาดสเกลขนาดแบบจำลองซึ่งแบบจำลองมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร แต่ในโปรแกรม COMSOL หน่วยเป็นเมตร ดังรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 การตั้งสเกลขนาดของแบบจำลอง

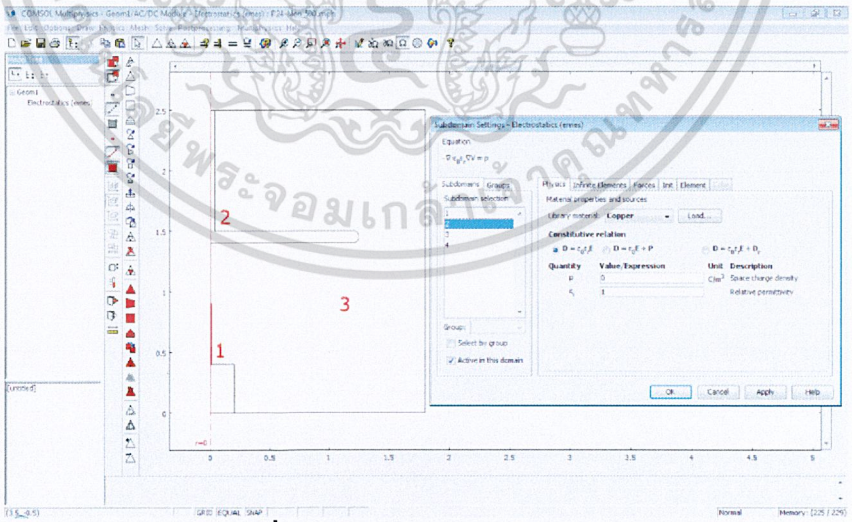
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ทำการกำหนดค่า Boundary Conditions ดังรูปที่ 7.19 โดยหมายเลข 1 คือ Axial Symmetry หมายเลข 2 คือ Electric potential หมายเลข 3 คือ Zero charge หมายเลข 4 คือ Ground



รูปที่ 7.19 การกำหนด Boundary Conditions

8) ทำการกำหนดค่า Subdomain setting ดังรูปที่ 7.20 โดย หมายเลข 1 คือ วัสดุของแท่งตัวนำที่เป็นทองแดง หมายเลข 2 คือ วัสดุของแผ่นอิเล็กโตรดเป็นอลูมิเนียม หมายเลข 3 คือ อากาศ



รูปที่ 7. 20 การกำหนด Subdomain Setting

9) ทำการสร้าง mesh ให้กับแบบจำลองเพื่อที่โปรแกรมจะทำการประมวลผล

10) ทำการ solve โปรแกรม เพื่อคำนวณหรือประมวลผลขอบเขตปัญหาที่ต้องการทราบ ดังรูปที่ และกำหนดค่าต่างๆที่ต้องการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือจำหน่าย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2 การจำลองสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ

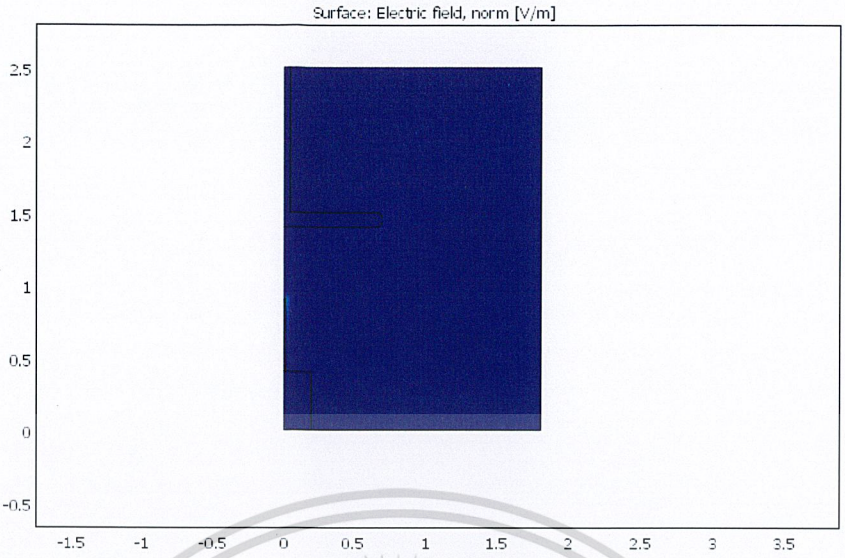
การทดลองทำการเปรียบเทียบ 2 ลักษณะคือ ทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและดูการกระจายเส้นศักย์ไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีวัสดุที่แตกต่างกัน โดยที่ปลายของตัวนำเป็นปลายมน ยาว 500 มม. และทำการเปรียบเทียบแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มีรูปแบบต่างๆกัน โดยการทดลองจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า (Electric Potential) ในโปรแกรม 600 กิโลโวลต์ที่ระยะแกป 50 , 100 , 150 , 200 , 250 และ 300 มม.

1) การจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 500 มม. ที่มีวัสดุที่แตกต่างกัน คือ ทองแดง อลูมิเนียม และดีบุก โดยทำการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร หนา 2 มม.
2) การจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 500 มม. ที่มีวัสดุที่แตกต่างกัน คือ ทองแดง อลูมิเนียม และดีบุก โดยทำการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร หนา 2 มม.
3) การจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันคือ ปลายแหลม ปลายมน และปลายแฉกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 500 มม. โดยทำการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตรหนา 2 มม.
4) การจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าของตัวนำล่อที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันคือ ปลายแหลม ปลายมน และปลายแฉกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 500 มม. โดยทำการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร หนา 2 มม.

7.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองสภาพทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ขนาดแผ่นอิเลคโตรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 , 2.4 และ 5 เมตร มีการสะสมของความ เครียดสนามไฟฟ้านะบริเวณปลายแผ่นอิเลคโตรด และบริเวณปลายของแท่งตัวนำสูงที่สุด

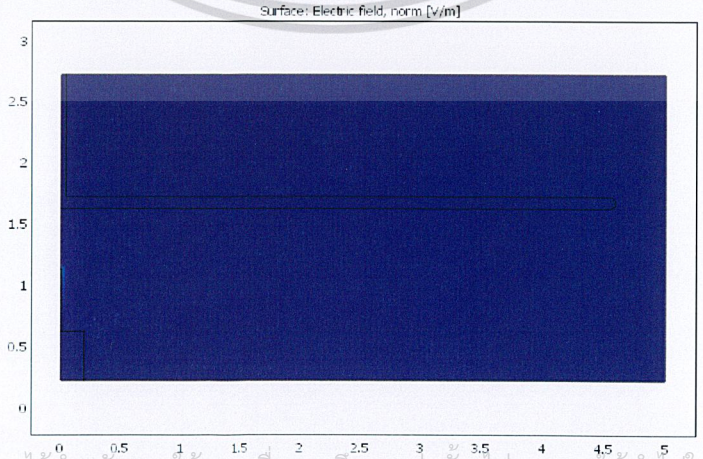
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.21 ความเครียดของสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร



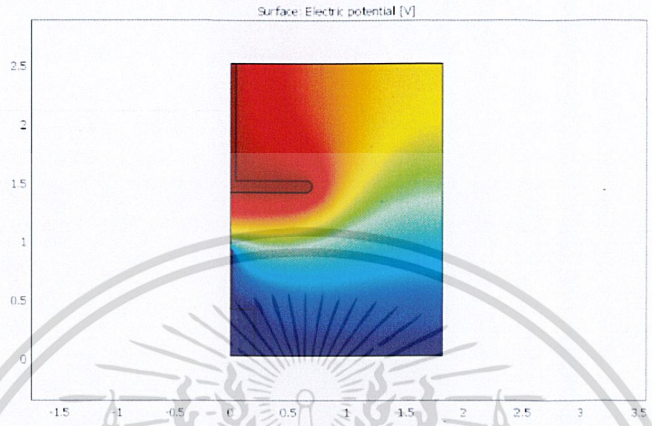
รูปที่ 7.22 ความเครียดของสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร



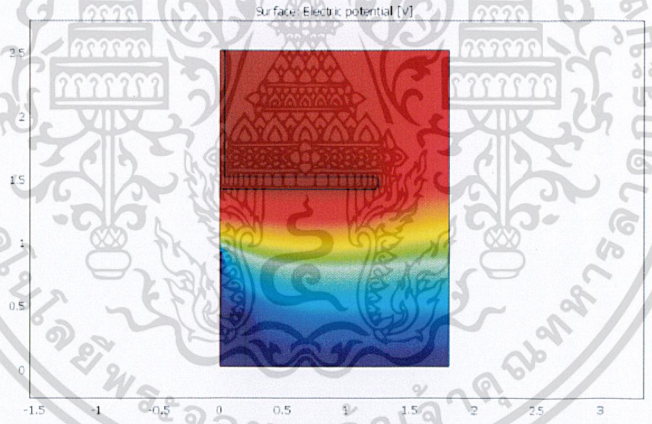
รูปที่ 7. 23 ความเครียดของสนามไฟฟ้าของแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

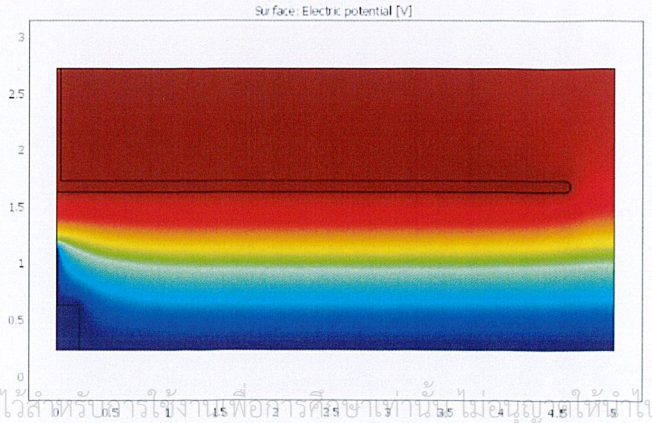
เมื่อทำการจำลองโดยดู Electric Potential แบบ Surface จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของความเข้มความต่างศักย์ของแผ่นอิเลคโตรดแผ่นเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร) มีความเข้มสูงสุดที่แผ่นอิเลคโตรด และน้อยลงเมื่อระยะใกลออกไป ซึ่งในส่วนของแผ่นอิเลคโตรดที่ใหญ่กว่า ความเข้มนี้จะกระจายไปทั่วแผ่นและไกลกว่าก่อนที่จะน้อยลงมาเรื่อยๆ



รูปที่ 7.24 ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าโดยแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร

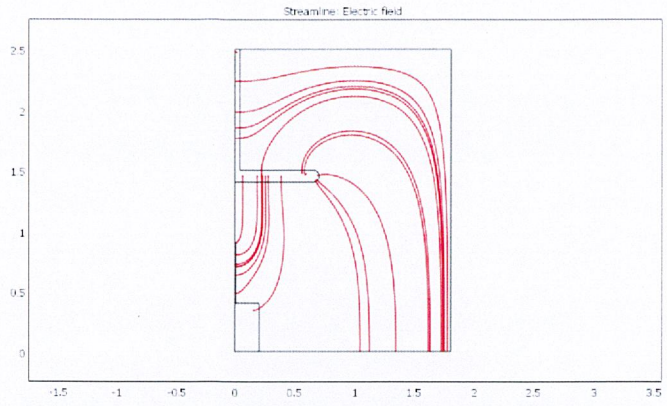


รูปที่ 7.25 ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าโดยแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร

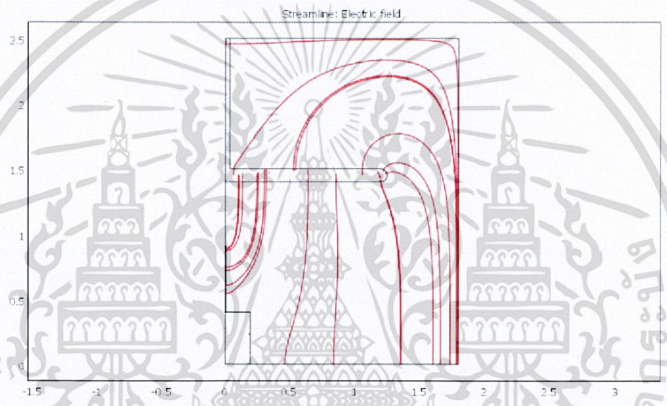


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

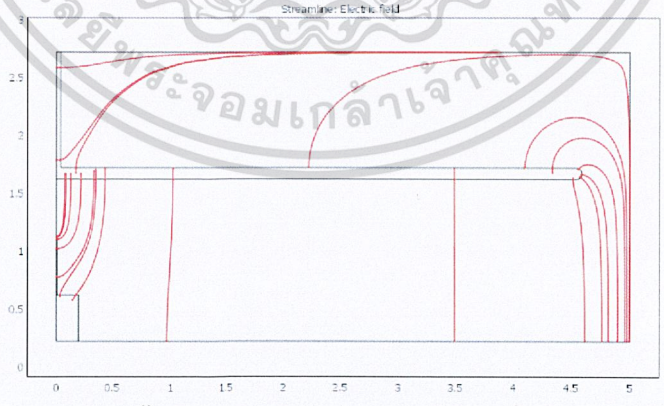
รูปที่ 7.26 ความต่างศักย์ของสนามไฟฟ้าโดยแผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร



รูปที่ 7.27 เส้นทางเดินสนามไฟฟ้า (Stream Line) แผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร



รูปที่ 7. 28 เส้นทางเดินสนามไฟฟ้า (Stream Line) แผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร



รูปที่ 7.29 เส้นทางเดินสนามไฟฟ้า (Stream Line) แผ่นอิเลคโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร

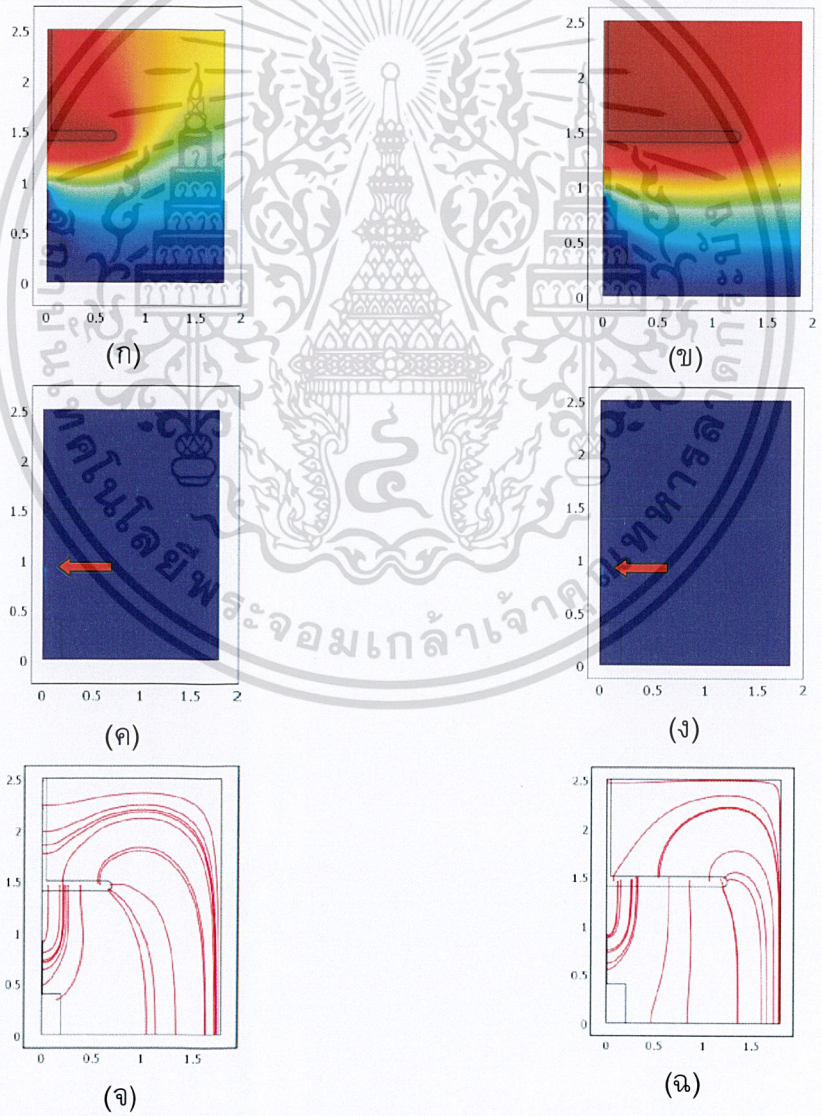
เมื่อเราทำการจำลองทางเดินสนามไฟฟ้าหรือ Stream Line แล้วจะพบว่าแผ่นอิเลคโตรดขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร) นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
การทดสอบ และวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้า

8.1 บทนำ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เรื่องคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาล่อฟ้าชนิดต่างๆ นั้นได้ทำการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.2 m. เมื่อนำไปจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แล้วพบว่าแผ่นอิเล็กโตรดไม่มีความสม่ำเสมอทางไฟฟ้าเพียงพอ ดังรูปที่ 8.1 ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบแผ่นอิเล็กโตรดให้มีขนาด 2.4 m. เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าให้มากขึ้น แล้วทำการทดสอบเพื่อดูค่าแรงดันเบรกดาวน์และจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำ



รูปที่ 8.1 การจำลองสภาพทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL

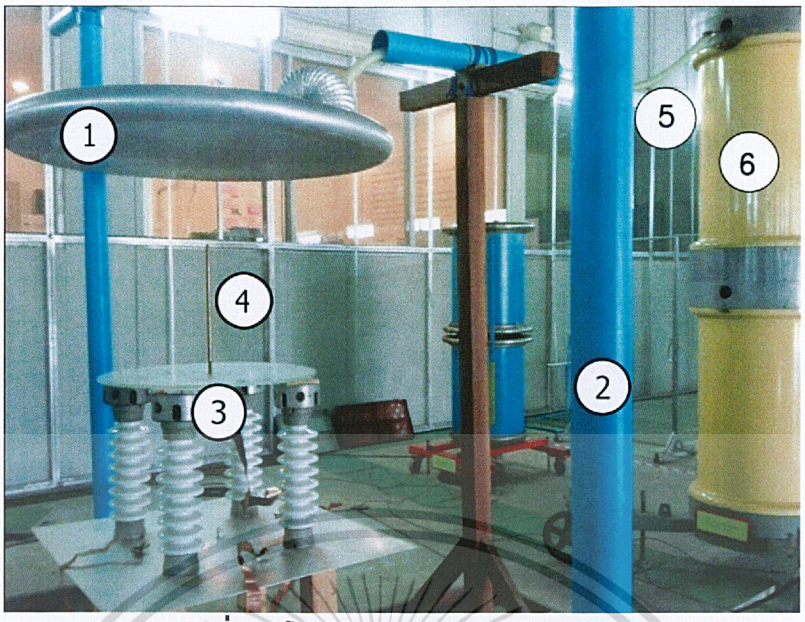
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 อุปกรณ์ทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า

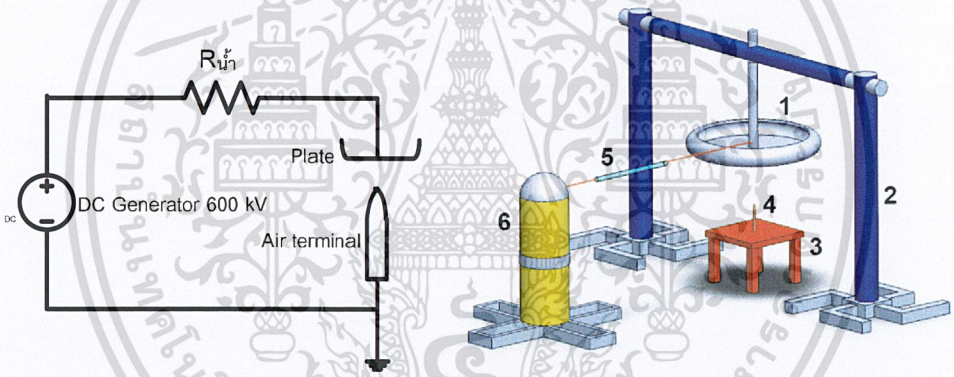
ชุดทดสอบได้ทำการออกแบบให้มีความปลอดภัยระหว่างทำการทดสอบและมีขนาดของแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมลักษณะวงกลมที่ใหญ่ขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 8.2 และมีวงจรในการทดสอบดังรูปที่ 8.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมลักษณะวงกลม โดยแผ่นตัวนำที่ใช้แทนก้อนเมฆทำจากวัสดุอลูมิเนียม และออกแบบให้ขอบมีลักษณะแบบโรกอฟสกีซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 เมตร ความหนาของแผ่นอิเล็กโตรด 2 มิลลิเมตร ขนาดท่อที่ใช้ทำขอบโค้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว
2. เสาโครงสร้างและคานเป็นวัสดุ Polyvinyl chloride (PVC) โดยมีส่วนฐานเป็นเหล็กยึด
3. ฐานรองรับแท่งตัวนำล่อฟ้า
4. แท่งตัวนำที่นำมาติดตั้งสำหรับการทดสอบ
5. ความต้านทานน้ำ
6. DC Generator 600 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.2 โครงสร้างชุดสอบตัวนำล่อฟ้า



รูปที่ 8.3 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

8.3 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกัน

การทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างสตรีมเมอร์เมื่อทำการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุแบบต่างๆ ภายใต้ความเครียดของสนามไฟฟ้าเดียวกันและทดสอบพร้อมกัน รวมทั้งบันทึกจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนแต่ละวัสดุ

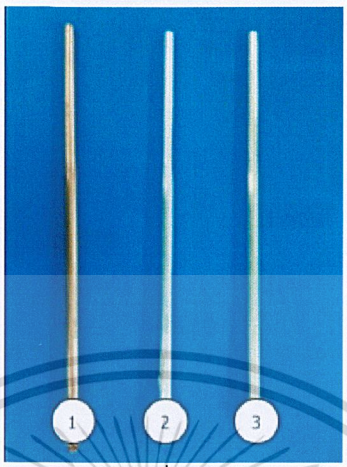
8.3.1 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบได้ทำการทดสอบขึ้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีขั้นตอนเตรียมการทดสอบดังนี้

1) แท่งตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร และทำมาจากวัสดุที่ต่างชนิดกัน โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้าคือ ทองแดง, อลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และดีบุก ที่มีลักษณะของปลายแท่งตัวนำล่อฟ้าเป็นแบบปลายมน และเตรียมความพร้อมของแท่งตัวนำล่อฟ้าในการทดสอบดังกล่าวดังรูปที่ 8.4



รูปที่ 8. 4 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกันที่ใช้ในการทดสอบ

แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ มีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นทองแดง
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นอลูมิเนียม
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุเป็นดีบุก

2) จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบดูคุณลักษณะทางไฟฟ้าจะทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ โดยมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ 600 kV 10 mA
2. ความต้านทานจำกัดกระแสขนาด 6 MΩ
3. แผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm
4. แท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ
5. ฐานรองรับแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทดสอบ

8.3.2 ขั้นตอนการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกัน

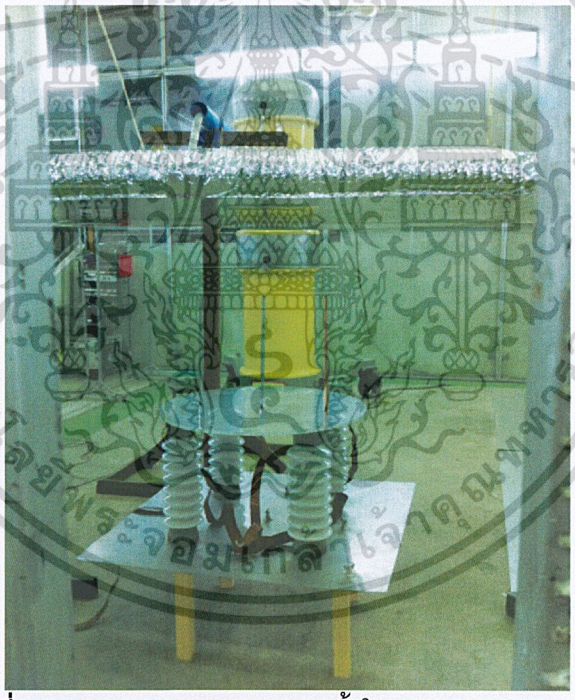
การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้าและบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ โดยมีขั้นตอนทำการทดสอบดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ทดสอบดังรูปที่ 8.4
2. ต่อวงจรดังรูปที่ 8.2
3. ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นตรวจจับโดยมัลติมิเตอร์ สามารถอ่านค่าทางด้านแรงดันต่ำได้แล้วเปรียบเทียบมาทางด้านแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการติดตั้งแท่งตัวนำล่อฟ้าที่จะทำการทดสอบที่ระยะต่าง ๆโดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามที่กล่าวมาข้างต้นโดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าคือ ทองแดง อลูมิเนียมและดีบุก

5. ทำการทดสอบที่ระยะ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิเมตร โดยการทดสอบเริ่มจากทำการ จ่ายแรงดันสูง กระแสตรงขั้วลบไปยังแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขอบโค้งโรกอฟสกี้ซึ่งทำการจำลองเป็นเมฆเทียมจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้ โดยแต่ละระยะจะทำการป้อนแรงดันสูงกระแสตรงจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ทั้งหมด 5 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวน์ที่วัดได้ และนำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำมาจากวัสดุที่ต่างกันมาทำการทดสอบพร้อมกันดังรูปที่ 8.5 เพื่อดูจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ผ่านอากาศเป็นแท่งแรก โดยจะทำการทดสอบแต่ละระยะ 20 ครั้งแล้วบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 8.5 การทดสอบหาจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์

8.3.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกัน

1) การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกันเพื่อดูการเกิดสตรีมเมอร์และค่าแรงดันเบรกดาวน์เพื่อดูประสิทธิภาพในการสร้างสตรีมเมอร์กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมดังนี้ ความดันบรรยากาศ 762.5 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 65.5% และอุณหภูมิ 27 องศาเซลซียส ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm

วัสดุตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ระยะแกปต่าง ๆ (kv)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
ทองแดง	1	27.55	44.56	64.85	86.37	111.90	133.42
	2	28.75	44.10	65.78	88.06	107.65	132.90
	3	28.15	45.60	64.64	90.03	109.77	132.71
	4	28.61	46.17	66.00	84.19	112.20	130.61
	5	28.42	44.62	65.78	90.93	113.40	134.35
	ค่าเฉลี่ย	**28.29**	**45.01**	**65.41**	**87.92**	**110.98**	**132.80**
อลูมิเนียม	1	29.35	47.24	67.47	91.06	111.60	133.72
	2	29.32	46.72	67.77	93.82	113.02	134.75
	3	29.43	45.46	67.50	90.82	110.75	133.20
	4	29.10	46.61	68.70	91.09	113.51	135.16
	5	29.05	47.07	68.21	91.12	114.41	134.21
	ค่าเฉลี่ย	**29.25**	**46.62**	**67.93**	**91.58**	**112.66**	**134.21**
ดีบุก	1	28.99	43.96	64.85	92.75	109.04	134.73
	2	29.10	46.01	65.86	87.57	109.28	136.36
	3	29.15	44.51	66.33	93.79	110.24	133.96
	4	28.20	44.32	65.48	93.14	109.47	136.42
	5	28.69	44.37	66.11	91.64	110.75	135.71
	ค่าเฉลี่ย	**28.83**	**44.63**	**65.73**	**91.78**	**109.76**	**135.44**

ทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมดังนี้ ความดันบรรยากาศ 763 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 67 % และอุณหภูมิ 26 องศาเซลซียส ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 8.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

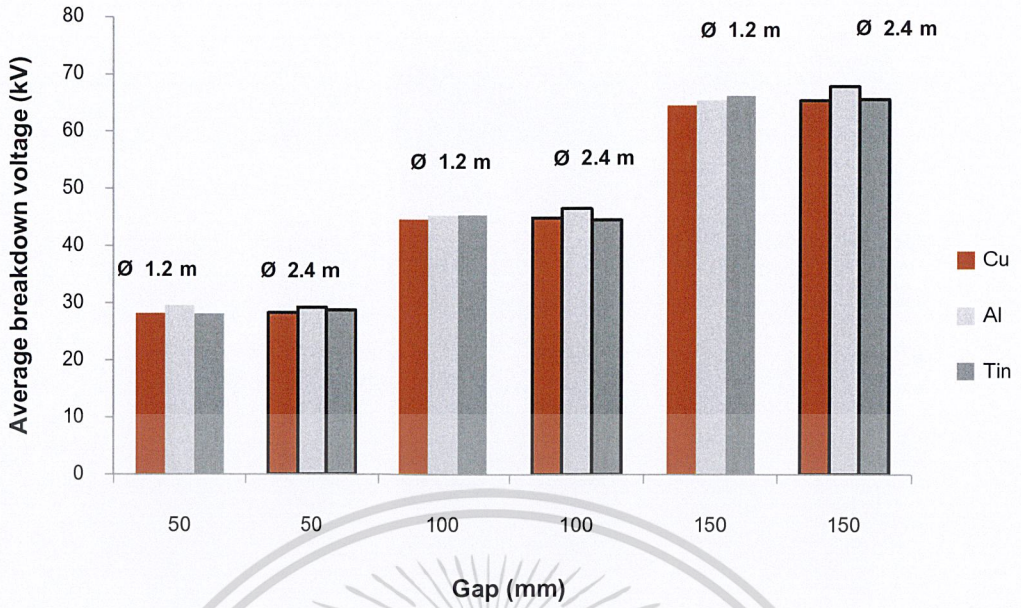
ตารางที่ 8.2 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียม เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm

วัสดุตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ระยะแกปต่าง ๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
ทองแดง	1	28.55	44.51	63.93	89.21	112.80	135.41
	2	28.66	45.79	64.80	85.17	112.80	135.30
	3	28.12	44.05	64.69	89.40	112.75	134.02
	4	28.23	44.78	64.45	89.95	113.89	135.25
	5	28.04	44.26	65.07	87.93	109.28	135.14
	ค่าเฉลี่ย	**28.32**	**44.68**	**64.59**	**88.33**	**112.30**	**135.02**
อลูมิเนียม	1	29.24	45.79	65.32	86.45	112.42	133.83
	2	29.92	44.56	65.81	88.09	112.23	131.65
	3	29.62	46.15	66.00	89.40	110.51	135.68
	4	29.84	44.45	65.86	88.20	109.15	131.86
	5	29.62	45.65	64.80	89.40	110.35	136.12
	ค่าเฉลี่ย	**29.65**	**45.32**	**65.56**	**88.31**	**110.93**	**133.83**
ดีบุก	1	27.98	45.60	65.26	89.32	111.60	133.36
	2	27.93	46.20	64.75	90.93	113.78	135.49
	3	28.61	45.93	68.05	89.51	111.87	134.26
	4	28.50	44.84	66.25	90.49	112.25	131.48
	5	27.90	45.05	67.15	89.35	113.37	134.43
	ค่าเฉลี่ย	**28.18**	**45.52**	**66.29**	**89.92**	**112.58**	**133.81**

8.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์จากแผ่นอิเล็กโตรดทั้ง 2 ขนาดในวัสดุแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากตำแหน่งที่วางแท่งตัวนำล่อฟ้านั้นอยู่กึ่งกลางของแผ่นอิเล็กโตรดทั้งสองขนาดนั้นมีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 8.1 (จ) และ (ฉ) ซึ่งทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 8.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m

2) ผลการทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละชนิดพร้อมกันทั้งหมดลงบนฐานทดสอบ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์และบันทึกผลจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ 20 ครั้งของแต่ละระยะ 200, 300 และ 400 มิลลเมตร ซึ่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบมีทั้งหมด 3 ชนิดดังรูปที่ โดยทำการทดสอบที่แผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาด 2.4 m และ 1.2 m หนา 2 mm โดยผลการทดสอบจำนวนครั้ง ของการเกิดเบรกดาวน์เป็นไปตามตารางที่ 8.3 และ 8.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.3 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm

วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์		
	200 มม	300 มม	400 มม
ทองแดง	16	19	19
อลูมิเนียม	3	0	1
ดีบุก	1	1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ



(ก) ทองแดง (ข) อลูมิเนียม (ค) ดีบุก

รูปที่ 8.7 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเมื่อแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m

ตารางที่ 8.4 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm

วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้า	**จำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์**		
	200 มม	**300 มม**	**400 มม**
ทองแดง	11	8	13
อลูมิเนียม	9	3	7
ดีบุก	0	9	0

ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ



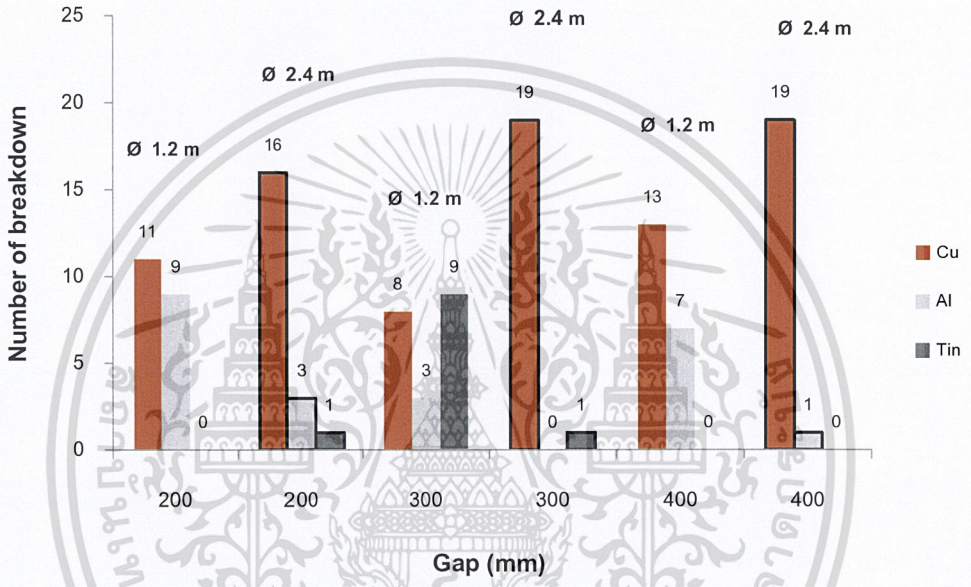
(ก) ทองแดง (ข) อลูมิเนียม (ค) ดีบุก

รูปที่ 8.8 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเมื่อแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ของวัสดุแต่ละชนิดพบว่าเมื่อใช้แผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันขณะที่อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์จะเป็นไปในทิศทางเดียวดังรูปที่ 8.9 เนื่องจากแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m นั้นได้รับผลของสนามไฟฟ้าจากบริเวณขอบเข้ามายังแท่งตัวนำล่อฟ้าดังแสดงในรูป 8.1 (จ) และ (ฉ) จึงทำให้ผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m.

8.3.6 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันเบรกดาวน์จากแผ่นอิเล็กโตรดทั้ง 2 ขนาดในวัสดุแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้จากตำแหน่งของตัวนำที่วาง ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นอิเล็กโตรดผลที่ได้คือค่าแรงดันเบรกดาวน์ใกล้เคียงกันบ่งบอกว่ากึ่งกลางของแผ่นทั้งสองขนาดนั้นตัวนำมีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอและการทดสอบจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ของวัสดุแต่ละชนิดพบว่าเมื่อใช้แผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันขณะที่อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์จะเป็นไปในทิศทางเดียวดังรูปที่ จึงสรุปได้ว่าการทดลองในลักษณะนี้ขนาดที่แตกต่างกันของแผ่นอิเล็กโตรดมีผลต่อจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ และทำให้สรุปได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำจากทองแดงสามารถล่อฟ้าได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น

เอกสารนี้จัดเตรียมขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่าง ๆ

การทดสอบจะเป็นลักษณะเดียวกับหัวข้อที่ 8.3 เพียงแต่เป็นการทดสอบถึงรูปแบบของตัวนำล่อฟ้าที่สามารถสร้างสตรีมเมอร์และล่อฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ 1. แบบปลายแฉกทองแดง 2. แบบปลายแหลมทองแดง 3. แบบปลายมนทองแดง โดยทั้ง 3 รูปแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 มม.ความยาว 50 ซม. เพื่อนำมาเปรียบเทียบแท่งตัวนำแต่ละแท่ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

8.4.1 การเตรียมการทดสอบ

เตรียมแท่งตัวนำล่อฟ้าทั้ง 3 รูปแบบดังรูปที่ 8.10



รูปที่ 8. 10 แท่งตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่างๆ

ซึ่งแท่งตัวนำที่นำมาทดสอบมีดังนี้

1. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมน วัสดุทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 มม.
2. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม วัสดุทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 มม.
3. แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายแฉก วัสดุทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 มม.

8.4.2 ขั้นตอนการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่าง ๆ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1. การทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า 2. การทดสอบเปรียบเทียบตัวนำล่อฟ้าและบันทึกจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ โดยมีขั้นตอนทำการทดสอบเหมือนในหัวข้อที่ 8.3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่าง ๆ

1) การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่าง ๆเพื่อดูการเกิดสตรีมเมอร์และค่าแรงดันเบรกดาวน์เพื่อดูประสิทธิภาพในการสร้างสตรีมเมอร์กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm

ซึ่งทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมดังนี้ ความดันบรรยากาศ 765 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 69 % และอุณหภูมิ 24.5 องศาเซลซียส ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่8.5

ตารางที่ 8.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้ารูปแบบต่างๆ ภายใต้เงื่อน - ไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm

วัสดุตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ระยะแกปต่าง ๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
ปลายมน	1	35.78	49.72	69.87	92.29	112.69	136.39
	2	35.89	49.66	69.38	92.07	114.82	135.11
	3	36.41	49.12	70.06	93.60	113.89	134.81
	4	36.25	49.72	70.39	91.17	113.29	135.05
	5	36.57	50.84	71.18	92.78	114.49	135.30
	ค่าเฉลี่ย	**36.18**	**49.81**	**70.18**	**92.38**	**113.84**	**135.33**
ปลายแหลม	1	32.45	50.84	71.18	91.36	115.99	136.61
	2	33.00	50.26	71.92	90.79	114.71	135.76
	3	31.47	50.15	73.99	92.62	114.76	136.23
	4	31.80	50.45	73.01	90.93	113.95	136.66
	5	32.51	50.21	73.04	92.29	114.68	136.28
	ค่าเฉลี่ย	**32.25**	**50.38**	**72.63**	**91.60**	**114.82**	**136.31**
ปลายแฉก	1	31.36	48.82	69.08	91.23	116.78	136.17
	2	35.84	50.32	70.34	93.85	116.02	135.25
	3	35.48	51.03	69.79	92.02	112.50	136.50
	4	35.05	51.87	70.96	93.90	116.48	136.23
	5	34.77	50.73	71.84	93.25	114.57	136.28
	ค่าเฉลี่ย	**34.50**	**50.55**	**70.40**	**92.85**	**115.27**	**136.09**

ทำการทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมดังนี้ ความดันบรรยากาศ 763.5 มิลลิเมตรปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 70 % และอุณหภูมิ 26.5 องศาเซลซียส ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 8.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

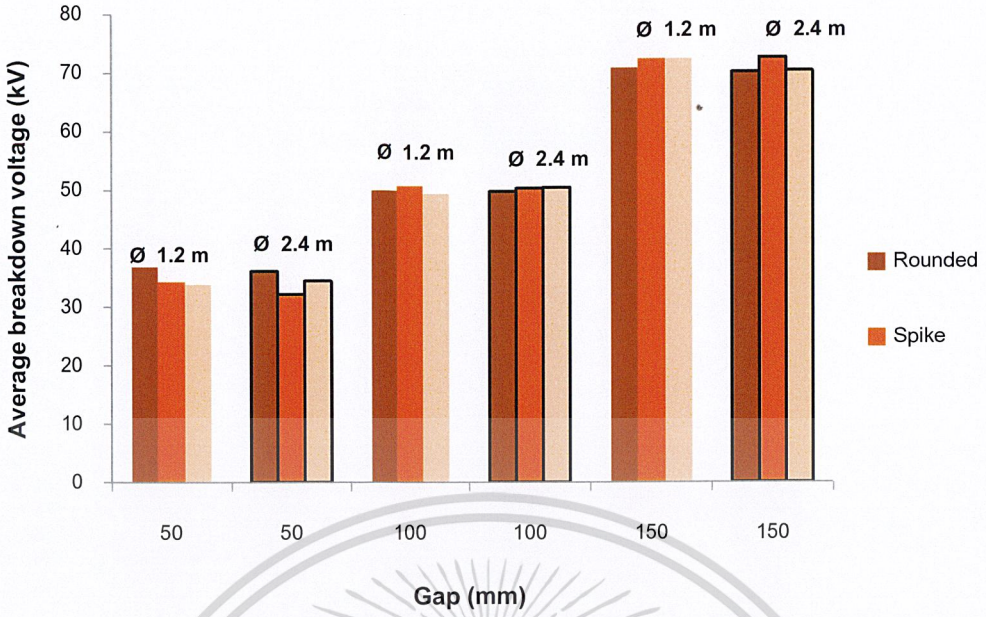
ตารางที่ 8.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียม เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mหนา 2 mm

วัสดุตัวนำล่อฟ้า	ครั้งที่	ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ระยะแกปต่าง ๆ (kV)					
		50 มม	100 มม	150 มม	200 มม	250 มม	300 มม
ปลายมน	1	36.93	50.05	71.35	93.35	115.80	136.20
	2	36.35	50.18	70.58	91.85	114.57	136.17
	3	37.09	49.80	70.47	93.19	116.84	134.56
	4	37.04	49.72	70.39	92.89	115.58	136.04
	5	37.31	50.43	71.54	91.23	114.68	136.53
	ค่าเฉลี่ย	**36.94**	**50.03**	**70.87**	**92.50**	**115.49**	**135.90**
ปลายแหลม	1	35.10	50.24	70.88	94.42	116.56	136.99
	2	35.81	49.72	73.85	95.21	118.39	137.59
	3	32.95	51.05	73.23	92.78	116.95	137.48
	4	33.14	51.55	73.75	93.79	117.38	137.02
	5	34.83	51.35	70.64	94.66	116.95	138.11
	ค่าเฉลี่ย	**34.36**	**50.78**	**72.47**	**94.17**	**117.25**	**137.44**
ปลายแฉก	1	33.05	49.06	74.32	91.31	113.40	138.19
	2	35.51	50.95	71.86	92.43	114.87	136.69
	3	33.25	49.72	72.41	92.18	115.50	136.31
	4	35.02	47.97	74.29	93.35	117.05	137.95
	5	32.95	49.45	71.07	93.00	117.33	137.70
	ค่าเฉลี่ย	**33.95**	**49.43**	**72.79**	**92.45**	**115.63**	**137.37**

8.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบ พบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้าทั้ง 3 ประเภทที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันทั้งกรณีแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m และ 2.4 m เนื่องจากตำแหน่งที่วางแท่งตัวนำล่อฟ้านั้นอยู่กึ่งกลางของแผ่นอิเล็กโตรดทั้งสองขนาดนั้นมีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 8.1 (จ) และ (ฉ) ซึ่งทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 8.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8. 11 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m.

2) ผลการทดสอบโดยการวางแท่งตัวนำล่อฟ้าแต่ละแบบพร้อมกันทั้งหมดลงบนฐานทดสอบ และป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์และบันทึกผลจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ 20 ครั้งของแต่ละระยะ 200, 300 และ 400 มิลลเมตร ซึ่งตัวนำล่อฟ้าที่นำมาเปรียบเทียบมีทั้งหมด 3 ชนิด โดยทำการทดสอบที่แผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาด 2.4 m และ 1.2 m หนา 2 mm โดยผลการทดสอบจำนวนครั้ง ของการเกิดเบรกดาวน์เป็นไปตามตารางที่ 8.7 และ 8.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.7 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีรูปแบบต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m หนา 2 mm

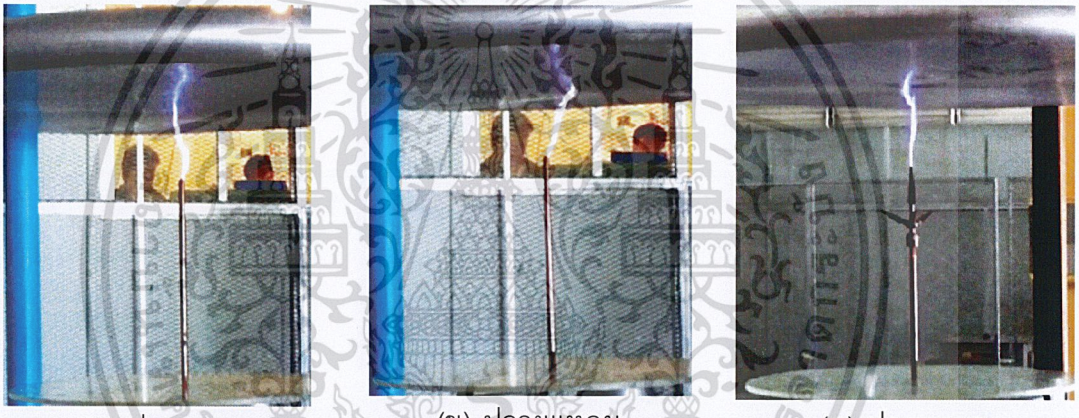
วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์		
	200 มม	300 มม	400 มม
ปลายมน	3	1	0
ปลายแหลม	1	0	0
ปลายแฉก	16	19	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.8 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า โดยมีรูปแบบต่างชนิดกัน ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบกรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m หนา 2 mm

วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์		
	200 มม	300 มม	400 มม
ปลายมน	2	5	15
ปลายแหลม	0	3	0
ปลายแฉก	20	12	5

ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบ



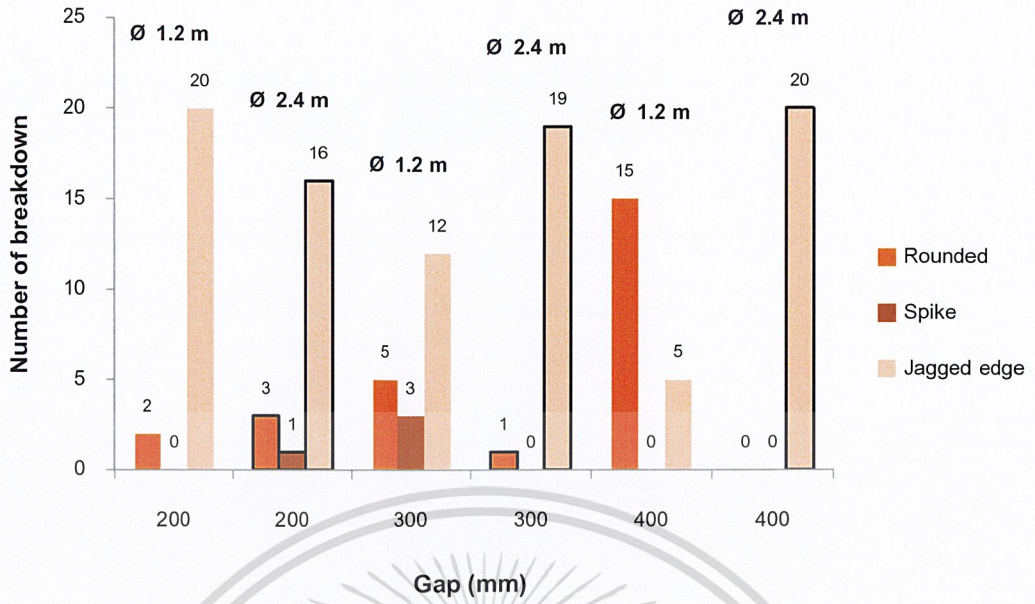
(ก) ปลายมน (ข) ปลายแหลม (ค) ปลายแฉก

รูปที่ 8.12 การเกิดเบรกดาวน์ของอากาศผ่านแท่งตัวนำล่อฟ้า ในกรณีทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเมื่อแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m

8.4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ของแท่งตัวนำแต่ละรูปแบบพบว่าเมื่อใช้แผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันขณะที่อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์จะเป็นไปในทิศทางเดียวดังรูปที่ เนื่องจากแผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m นั้นได้รับผลของสนามไฟฟ้าจากบริเวณขอบเข้ามายังแท่งตัวนำล่อฟ้าดังแสดงในรูป 8.1 (จ) และ (ฉ) จึงทำให้ผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 8.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.13 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m.

8.4.6 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์จากแผ่นอิเล็กโตรดทั้ง 2 ขนาดในรูปแบบที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้จากตำแหน่งของตัวนำที่วาง ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นอิเล็กโตรดผลที่ได้คือค่าแรงดันเบรกดาวน์ใกล้เคียงกันบ่งบอกว่ากึ่งกลางของแผ่นทั้งสองขนาดตัวนำมีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ และจากผลการทดสอบจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ของรูปแบบต่างๆ พบว่าเมื่อทำการทดสอบโดยใช้แผ่นอิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันขณะที่อิเล็กโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์จะเป็นไปในทิศทางเดียว จึงสรุปได้ว่าการทดลองในลักษณะนี้ขนาดที่แตกต่างกันของแผ่นอิเล็กโตรดมีผลต่อจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ และทำให้สรุปได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ลักษณะปลายแฉกสามารถล่อฟ้าได้ดีกว่ารูปแบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9
สรุปผลการทดสอบ

9.1 สรุป

จากการศึกษามาตรฐานต่างๆทั้งในและต่างประเทศทำให้ได้องค์ความรู้ทั้งหมดที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ในส่วนแรกกล่าวถึงทฤษฎีที่สำคัญเกี่ยวกับฟ้าผ่าตั้งแต่ลักษณะของการเกิด ความเสียหายและผลกระทบจากความเสียหายที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ในขณะที่เมื่อทราบถึงผลกระทบและความเสียหายจึงต้องมีการหาวิธีป้องกันโดยเริ่มต้นจากการค้นคว้าเกี่ยวกับการบริหารและจัดการความเสี่ยงที่เป็นผลจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เมื่อทำการศึกษามาตรฐาน IEC 62305-2 จึงทราบถึงวิธีการประเมินและวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นโดยมีสมการตามมาตรฐานประเมินความเสี่ยงรองรับ ตัวแปรที่นำมาใช้พิจารณาคือตัวแปรสำคัญต่อความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้ เมื่อทำการศึกษาตัวแปรทั้งหมดนำไปสู่การสร้างโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงขึ้น จากผลที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมจะนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน

จากการประมวลผลของโปรแกรมประเมินความเสี่ยงจะได้ข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและการเลือกระดับการป้องกันฟ้าผ่าที่ชัดเจนทำให้ผู้ออกแบบเลือกระดับการป้องกันที่ถูกต้องเหมาะสม ในแง่เทคนิคการออกและความคุ้มค่าในการก่อสร้าง จากการศึกษารวบรวมรายละเอียดที่เกี่ยวกับวิธีการออกแบบทั้งหมดรวมถึงข้อกำหนดต่างๆสำหรับการติดตั้งทุกส่วนของระบบป้องกันฟ้าผ่าเช่น การออกแบบและการวางตำแหน่งแท่งตัวนำล่อฟ้า ออกแบบเส้นทางการวางของแท่งตัวนำลงดิน สุดท้ายการออกแบบระบบต่อลงดิน ในหัวข้อระบบการต่อลงดินเป็นส่วนที่มีสำคัญมากสำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าและระบบไฟฟ้าภายใน ระบบต่อลงดินที่ดีต้องมีการออกแบบให้ได้ความต้านทานดินต่ำที่สุดเพื่อความปลอดภัยต่อของระบบป้องกันทั้งสองระบบรวมถึงได้ทำการจำลองการต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP ผลที่ได้ออกมาช่วยให้ผู้ออกแบบทำการออกแบบได้ง่ายขึ้นทำให้ได้ระบบต่อลงดินที่มีประสิทธิภาพดี

ในหัวข้อการทดลองเป็นการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าที่มาของการทดลองเนื่องจากข้อมูลที่มีอยู่มีสมมติฐานว่าเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าด้านข้างของแผ่นอิเล็กโทรดจึงการจำลองสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL แสดงความแตกต่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด Ø 1.2 m และ Ø 2.4 m จากผลการจำลองพบว่าสนามไฟฟ้าที่แผ่นอิเล็กโทรด Ø 1.2 m มีความสม่ำเสมอน้อยกว่า Ø 2.4 m การทดลองในขั้นแรกเป็นขั้นตอนการทดสอบชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำด้วย ทองแดง อลูมิเนียม และดีบุก ผลการทดลองสรุปได้ว่าทองแดงสามารถล่อฟ้าได้ดีสุด ในขั้นที่สองเป็นการทดสอบรูปแบบของแท่งตัวนำมีทั้งหมดสามแบบคือ หัวมน หัวแหลม และหัวแฉก ผลการทดลองสรุปได้ว่าแท่งตัวนำรูปแบบหัวแฉกสามารถล่อฟ้าได้ดีสุด การทดลองตอนที่สองจากสมมติฐานขั้นต้นได้ออกแบบการทดลองหาจำนวนครั้งที่เกิดการเบรกดาวน์โดยใช้แผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดในการทดสอบ Ø 1.2 m และ Ø 2.4 m ผลการทดลองชนิดของวัสดุ และรูปแบบที่ใช้ของแท่งตัวนำสรุปได้ว่าวัสดุทองแดง และรูปแบบปลายแฉกสามารถล่อฟ้าได้ดีสุดเหมือนผลการทดลองตอนที่หนึ่งและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด Ø 1.2 m และ Ø 2.4 m แนวโน้มการเกิดเบรกดาวน์ของวัสดุและรูปแบบที่แผ่นอิเล็กโทรด Ø 1.2 m ค่อนข้างกระจายตัว ส่วนแนวโน้มการเกิดเบรกดาวน์ของวัสดุและรูปแบบที่แผ่นอิเล็กโทรด Ø 2.4 m ค่อนข้างเห็นได้ชัดเจน จึงสรุปจากสมมุติฐานได้ว่าสนามไฟฟ้ามีผลต่อการทดสอบแท่งตัวนำทำให้ค่าที่ได้ออกมาเกิดความคลาดเคลื่อนเป็นไปตามผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในตอนแรก

9.2 อุปสรรคและการแก้ไข

1. ในการคำนวณค่าความเสี่ยงและการสร้างโปรแกรมในการคำนวณค่าความเสี่ยงจะต้องมีการใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอาคารและสภาพแวดล้อมมาก ซึ่งค่าปัจจัยในการคำนวณบางค่าที่ไม่สามารถหาค่าที่แน่ชัดได้ในประเทศ ซึ่งค่านั้นๆจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ในการหาค่าความเสี่ยงจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าตัวแปรนั้นๆจากต่างประเทศมาใช้ เพื่อที่จะทำการคำนวณหาค่าความเสี่ยง

2. การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ระยะห่างมากๆ จำเป็นที่จะต้องใช้แรงดันที่สูง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในห้องทดสอบคือเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นั้นมีพิกัดไม่พอสำหรับทำการทดสอบ จึงทำการทดสอบที่ระยะที่เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทดสอบได้แทน

3.ในการทำการทดสอบแต่ละครั้งจะไม่สามารถที่จะทำการทดสอบติดๆกันได้ จะต้องมีการหยุดพักเพื่อให้ความต้านทานน้ำ และเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากลับมาอยู่ในสภาพปกติก่อนแล้วค่อยทำการทดสอบต่อไป จึงทำให้ในการทดสอบแต่ละชุดจะใช้เวลานาน ทำให้ต้องมีการแบ่งการทดสอบออกเป็นส่วนย่อยๆ และทยอยทำการทดสอบ

9.3 ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความเสี่ยงที่คำนวณได้จากโปรแกรมนั้น ควรที่จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่คำนวณได้จากโปรแกรมคำนวณค่าความเสี่ยงของมาตรฐาน IEC 62305-2 เพื่อความถูกต้องของการคำนวณค่าความเสี่ยง แต่เนื่องจากโปรแกรมคำนวณค่าความเสี่ยงของมาตรฐาน IEC 62305-2 นั้นไม่ได้มีการแจกจ่ายเพื่อการศึกษาโปรแกรมที่ได้จัดทำออกมานี้จึงยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบค่า

2. ในการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ได้ทำการทดลองไปนั้น อาจมีประเด็นอื่นๆที่สามารถสรุปได้อีก ถ้ามีอุปกรณ์ในการตรวจวัดเช่น กล้องโคโรนา และกล้องเทอร์โมสแกน ซึ่งสองประเด็นนี้จะไม่ได้กล่าวถึงในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ดังนั้นในการศึกษาเบื้องลึกต่อไปจึงควรที่จะนำทั้งสองประเด็นนี้เข้ามาศึกษาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEC 62305-1, **"Protection against lightning – General principles"** ,First edition 2006-1

[2] IEC 62305-2, **"Protection against lightning – Risk management"** ,First edition 2006-1

[3] IEC 62305-3, **"Protection against lightning – Physical damage to structure and life hazard"** ,First edition 2006-1

[4] IEC 62305-4, **"Protection against lightning – Genaral principles"** ,First edition 2006-1

[5] IEC 60354-4, **"Electrical installations of buildings"** Second edition 2002

[6] IEEE Std.142-1991, **"IEEE Recommended Practice for Grounding of industrial and commercial Power system"** ,June 27,1991, page 110 - 112

[7] EN 50164, **"Lightning protection components (LPC)- Part 1: Requirements for connection components"**,2006

[8] BS 6651, **"Code of practice for protection of structures againstlightning"**, 2006

[9] BS 50164-2, **"Past 2 Requirements for conductors and earth electrode"**, 2002

[9] NFPA, **"Standard for the Installation of Lightning Protection Systems"**,2008 edition.

[10] สำรวย สังข์สะอาด, **"วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง"** ,มีนาคม ,2549

[11] ศรัณย์ ชีวทวีทรัพย์,**"คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาล่อฟ้าชนิดต่าง ๆ"**, วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2552

[12] eritect, **"Lightning Protection Handbook"**,2009

[13] National Lightning Safety Institude, **"World Lightning Map-Average World Thunderstorm day/year"**,www.lightningsafety.com

[14] National Space Science and Technology Center, **"Lightning even during the daytime reveal on Earth"**, www.science.nasa.gov

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การประเมินจำนวนเหตุการณ์อันตรายต่อปี N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การประเมินจำนวนเหตุการณ์อันตรายต่อปี N

ก.1 ทั่วไป [2]

จำนวนเหตุการณ์อันตรายเฉลี่ยต่อปี N เนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าซึ่งมีอิทธิพลต่อวัตถุที่ป้องกัน โดยจะขึ้นกับการเกิดฝนฟ้าคะนองของบริเวณที่ตั้งของวัตถุนั้นๆและคุณลักษณะทางกายภาพของวัตถุเอง การคำนวณจำนวน N โดยทั่วไปจะคูณความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่า N_g ด้วยพื้นที่สมมูลโดยรวมของวัตถุ และต้องคำนึงถึง ค่าปัจจัยแก้ไขสำหรับคุณลักษณะทางกายภาพของวัตถุด้วย

ความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่า N_g คือจำนวนของการเกิดวาบฟ้าผ่าต่อตารางกิโลเมตรต่อปี โดยค่านี้จะได้จากเครือข่ายการตรวจจับการวาบไฟจากภาคพื้นดินในหลายๆ พื้นที่ในโลก

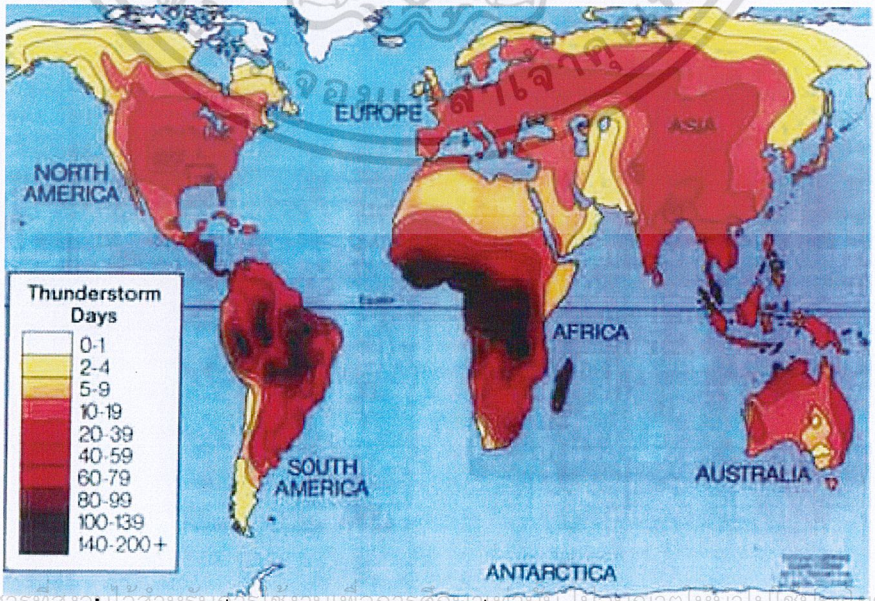
หมายเหตุ หาก N_g ไม่ปรากฏในแผนที่หรือบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสามารถประมาณค่าได้จาก

$$N_g = 0.1T_d \qquad (ก.1)$$

เมื่อ T_d คือวันที่เกิดฝนฟ้าคะนองต่อปี (หาได้จากแผนที่ isokeraunic)

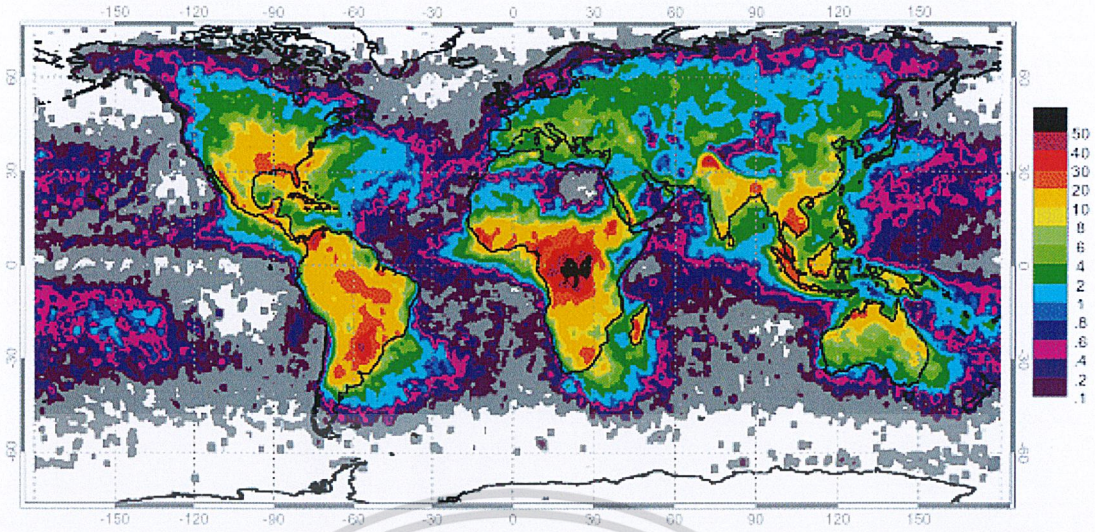
เหตุการณ์ต่อไปนี้ถูกพิจารณาแล้วว่าเป็นอันตรายแก่สิ่งปลูกสร้างที่ป้องกัน

- วาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง
- วาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง
- วาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่ป้อนเข้าสิ่งปลูกสร้าง
- วาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคที่ป้อนเข้าสิ่งปลูกสร้าง
- วาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างซึ่งต่อเข้ากับสาธารณูปโภค



รูปที่ ก.1 แผนที่โลกบอกจำนวนวันเฉลี่ยพายุฝนฟ้าคะนองต่อปี [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 แผนที่โลกบอกจำนวนความหนาแน่นวาบฟ้าผ่าลงดิน (ครั้ง/ตารางกิโลเมตร/ปี)[14]

ก.2 การประเมินจำนวนเหตุการณ์อันตรายเฉลี่ยต่อปีเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง N_D และสิ่งปลูกสร้างที่จุดสิ้นสุด a ของสาย N_{Da}

ก.2.1 การหาพื้นที่โดยรวม A_d

สำหรับการแยกสิ่งปลูกสร้างบนพื้นราบ พื้นที่โดยรวม A_d จะนิยามจากจุดตัดระหว่างผิวดินและเส้นตรงที่เป็น 1/3 ของความชันที่สัมผัสผ่านจากส่วนบนของสิ่งปลูกสร้างและวนรอบสิ่งปลูกสร้าง การหาค่า A_d อาจจะหาได้จากวิธีการทางกราฟฟิคหรือการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สิ่งปลูกสร้างสี่เหลี่ยม

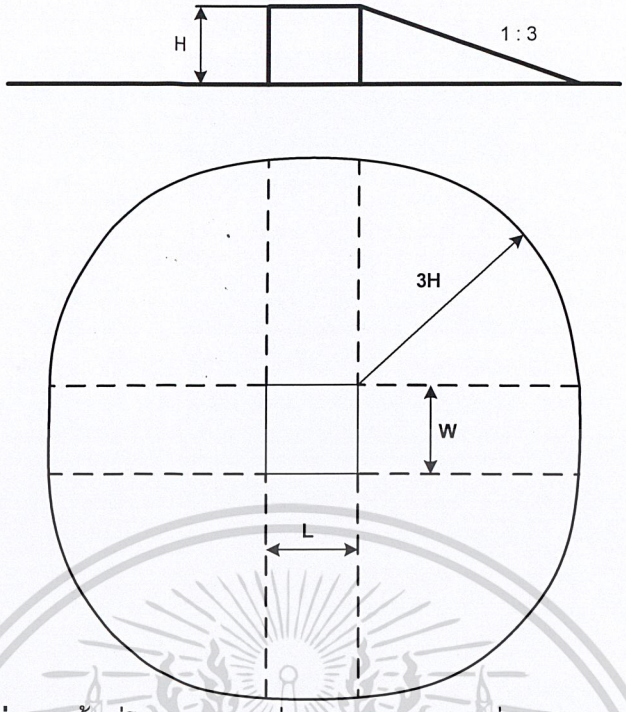
สำหรับสิ่งปลูกสร้างสี่เหลี่ยมที่ถูกแยกโดยความยาว L ความกว้าง W และความสูง H บนพื้นราบ ค่าพื้นที่โดยรวมจะเท่ากับ

$$A_d = L \times W + 6 \times H \times (L + W) + 9 \times \pi \times (H)^2 \qquad \text{(ก.2)}$$

ซึ่ง L , W และ H มีหน่วยเป็นเมตร (ดูรูป ก.3)

หมายเหตุ เพื่อการประเมินที่แม่นยำควรที่จะได้รับการพิจารณาในเรื่องความสูงที่เกี่ยวข้องกันของสิ่งปลูกสร้างกับวัตถุโดยรอบหรือภายในพื้นดินระยะ 3H จากสิ่งปลูกสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 พื้นที่โดยรวม A_d ซึ่งถูกแยกออกจากสิ่งปลูกสร้าง [2]

ก.2.1.1 สิ่งปลูกสร้างรูปร่างซับซ้อน

ถ้าสิ่งปลูกสร้างมีรูปร่างซับซ้อนเช่น หลังคาสูงที่ยื่นออกมา (ดูรูป ก.4) ควรจะใช้วิธีการทางกราฟฟิคในการประเมินค่า A_d (ดูรูป ก.5) ถ้าขนาดสูงสุด A_{dmax} หรือขนาดต่ำสุด A_{dmin} เพราะว่ามีความแตกต่างที่มีมากเกินไป (ดูตาราง ก.1)

ค่าประมาณที่ยอมรับได้ของพื้นที่โดยรวมสูงสุดจะอยู่ระหว่าง A_{dmin} และค่าพื้นที่โดยรวมซึ่งหลังคายื่นออกมา A_d' ซึ่ง A_d' อาจจะคำนวณได้จาก

$$A'_d = 9\pi \times (H_p)^2 \qquad \text{(ก.3)}$$

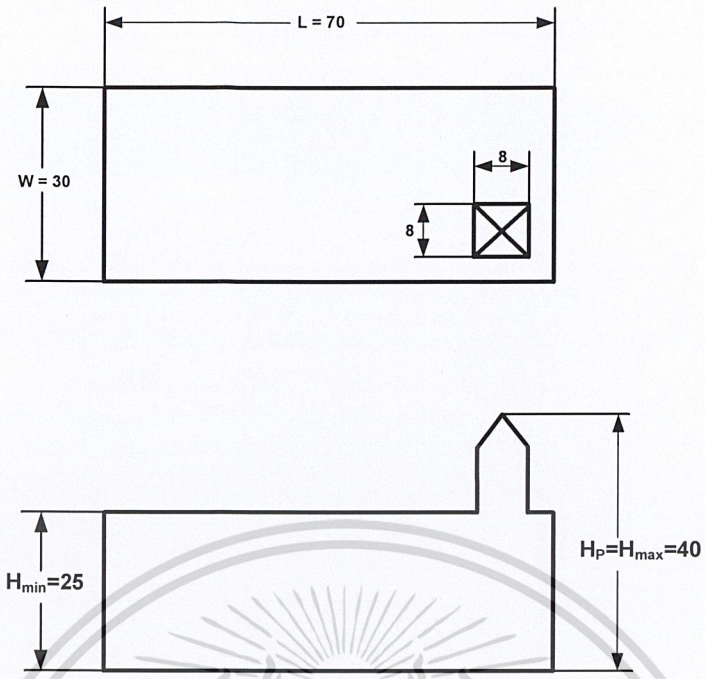
เมื่อ H_p คือความสูงที่ยื่นออกมา

ค่าความแตกต่างของพื้นที่โดยรวมตามวิธีข้างต้นจะแสดงในตาราง ก.1

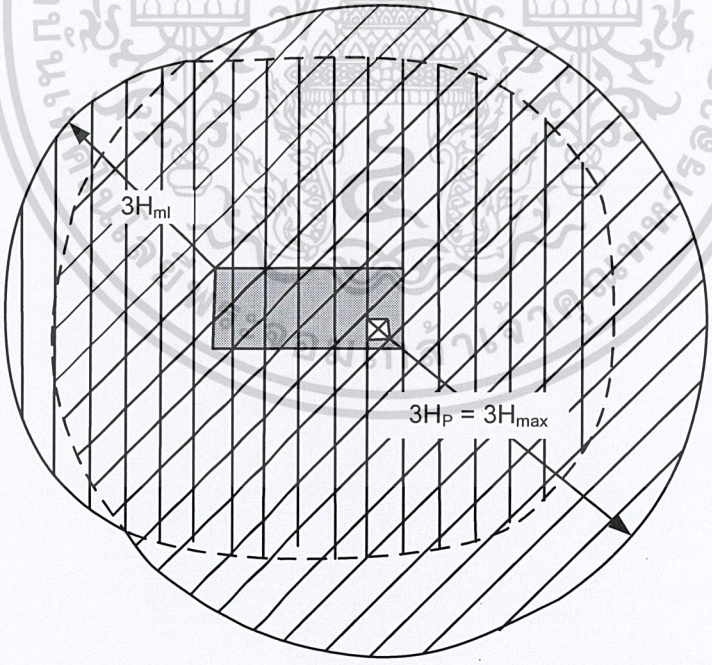
ตาราง ก.1 ค่าพื้นที่โดยรวมที่ขึ้นกับวิธีการประเมิน

	วิธีกราฟ	**สิ่งปลูกสร้าง (ขนาดสูงสุด)**	**สิ่งปลูกสร้าง (ขนาดน้อยสุด)**	**ส่วนที่ยื่นออกมา H_p**
ขนาดสิ่งปลูกสร้าง เมตร (L, W, H)	ดูรูป ก.2	70 x 30 x 40	70 x 30 x 25	40
m^2	A_d = 47,700	A_{dmax} = 71,318	A_{dmin} = 34,770 ดูรูป	A_d' = 45,240 ดูรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 สิ่งปลูกสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อน [2]



รูปที่ ก.5 วิธีการที่แตกต่างกันในการหาค่าพื้นที่โดยรวมของสิ่งปลูกสร้างในรูป ก.4 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.1.2 สิ่งปลูกสร้างที่ส่วนหนึ่งเป็นอาคาร

ในกรณีที่สิ่งปลูกสร้าง S ถูกที่พิจารณาว่าประกอบด้วยอาคาร B เท่านั้น ขนาดของสิ่งปลูกสร้าง S อาจจะใช้การประเมินของ A_d โดยมีเงื่อนไขเพิ่มเติมต่อไปนี้

- สิ่งปลูกสร้าง S ที่แยกตามแนวตั้งจากส่วนของอาคาร B
- อาคาร B ไม่มีความเสี่ยงจากการระเบิด
- การขยายตัวของไฟระหว่างสิ่งปลูกสร้าง S และส่วนอื่นๆ ของอาคาร B ที่ถูกหลีกเลี่ยงโดยกำแพงที่สามารถทนไฟได้ 120 นาที (REI 120) หรือโดยมาตรการการป้องกันอื่นๆ ที่เทียบเท่า
- การขยายตัวของแรงดันเกินไปตามสายส่ง โดยสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่จุดต่อเข้าของสิ่งปลูกสร้างหรือโดยมาตรการการป้องกันอื่นๆ ที่เทียบเท่า

หมายเหตุ สำหรับนิยามและข้อมูลของ REI จะดูได้จากวารสารการประชุมสหภาพยุโรป 1994/28/02, n. C 62/63.

ก.2.2 สถานที่ตั้งที่เกี่ยวข้องของสิ่งปลูกสร้าง

สถานที่ตั้งที่เกี่ยวข้องของสิ่งปลูกสร้างจะถูกพิจารณาโดยใช้ค่าปัจจัยพื้นที่ (C_d) โดยจะชดเชยสำหรับวัตถุที่อยู่โดยรอบๆ หรือพื้นที่ที่เปิดโล่ง

ตาราง ก.2 ค่าปัจจัยพื้นที่ C_d

ความสัมพันธ์ของที่ตั้ง	C_d
วัตถุที่ล้อมรอบด้วยวัตถุที่สูงกว่าหรือต้นไม้	0.25
วัตถุที่ล้อมรอบด้วยวัตถุที่หรือต้นไม้ที่ความสูงเท่ากันหรือเตี้ยกว่า	0.5
วัตถุที่อยู่โดดเดี่ยว (ไม่มีวัตถุอื่นในบริเวณใกล้เคียง)	1
วัตถุที่ที่อยู่บนยอดเขาหรือเนินเขา	2

ก.2.3 จำนวนเหตุการณ์อันตราย N_D สำหรับสิ่งปลูกสร้าง (จุดสิ้นสุด b ของสาธารณูปโภค)

N_D จะหาได้จากผลคูณของ

$$N_D = N_g \times A_{d/b} \times C_{d/b} \times 10^{-6} \qquad \text{(ก.4)}$$

เมื่อ N_g คือความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน (1/km^2/year)

$A_{d/b}$ คือพื้นที่โดยรวมของสิ่งปลูกสร้างที่อยู่โดดเดี่ยว (m^2) (ดูรูป ก.3)

$C_{d/b}$ คือค่าปัจจัยพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้าง (ดูตารางก.2)

ก.2.4 จำนวนเหตุการณ์อันตราย N_{Da} สำหรับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ติดกัน (จุดสิ้นสุด a ของสาธารณูปโภค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การอ้างอิงหรือสำเนาต้องห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเหตุการณ์อันตรายเฉลี่ยต่อปีเนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างที่จุดสิ้นสุด a ของสายส่ง N_{Da} (ดูหัวข้อ 3.3.5) จะคำนวณได้จากสมการ

$$N_{Da} = N_g \times A_{d/a} \times C_{d/a} \times C_t \times 10^{-6} \qquad \text{(ก.5)}$$

เมื่อ N_g คือความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน (1/km^2/year)

$A_{d/a}$ คือพื้นที่โดยรวมของสิ่งปลูกสร้างใกล้กันที่อยู่โดดเดี่ยว (m^2) (ดูรูป ก.3)

$C_{d/a}$ คือค่าปัจจัยพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใกล้กัน (ดูตาราง ก.2)

C_t คือค่าปัจจัยแก้ไขสำหรับการมีหม้อแปลง HV/LV บนสาธารณูปโภคซึ่งมีการเชื่อมต่อเข้ากับสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างจุดที่ถูกฟ้าผ่าและสิ่งปลูกสร้าง (ตาราง ก.4) ค่านี้จะใช้ในส่วนของสายที่อยู่เหนือหม้อแปลงที่ใช้กับสิ่งปลูกสร้าง

ก.3 การประเมินจำนวนเหตุการณ์อันตรายเฉลี่ยต่อปีเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง N_M

N_M จะหาได้จากผลคูณของ

$$N_M = N_g \times (A_m - A_{d/b} C_{d/b}) \times 10^{-6} \qquad \text{(ก.6)}$$

เมื่อ N_g คือความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน (1/km^2/year)

A_m คือพื้นที่โดยรวมของฟ้าผ่าใกล้กับสิ่งปลูกสร้าง (m^2)

พื้นที่โดยรวม A_m จะขยายไปถึงตำแหน่งของสายที่ระยะ 250 เมตร จากเส้นรอบนอกของสิ่งปลูกสร้าง ถ้า $N_M < 0$, จะใช้การประเมินว่า $N_M = 0$

ก.4 การประเมินจำนวนเหตุการณ์อันตรายเฉลี่ยต่อปีเนื่องจากการวาบไฟสู่สาธารณูปโภค N_L

สำหรับส่วนหนึ่งของระบบสาธารณูปโภค N_L สามารถคำนวณได้จาก

$$N_L = N_g \times A_l \times C_d \times C_t \times 10^{-6} \qquad \text{(ก.7)}$$

เมื่อ N_g คือความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน (1/km^2/year)

A_l คือพื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟสู่สาธารณูปโภค (ดูตาราง ก.3 และรูป ก.5)

C_d คือค่าปัจจัยพื้นที่ของสาธารณูปโภค (ดูตาราง ก.2)

C_t คือค่าปัจจัยแก้ไขสำหรับการมีหม้อแปลง HV/LV บนสาธารณูปโภคซึ่งมีการเชื่อมต่อเข้ากับสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างจุดที่ถูกฟ้าผ่าและสิ่งปลูกสร้าง (รูป ก.4) ค่านี้จะใช้ในส่วนของสายที่อยู่เหนือหม้อแปลงที่ใช้กับสิ่งปลูกสร้าง

ตาราง ก.3 พื้นที่โดยรวมA_l และ A_i ที่ขึ้นกับลักษณะของสาธารณูปโภค

	Aerial	**Buried**
A_l	$(L_c - 3(H_a + H_b))6H_c$	$(L_c - 3(H_a + H_b))\sqrt{\rho}$
A_i	$1000L_c$	$25L_c\sqrt{\rho}$

เมื่อ A_l คือพื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟสู่สาธารณูปโภค (m^2)

A_i คือพื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟลงสู่ดินใกล้กับสาธารณูปโภค (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H_c คือความสูงของตัวนำสาธารณูปโภคเหนือพื้นดิน (m)

L_c คือความยาวของส่วนสาธารณูปโภคจากสิ่งปลูกสร้างไปยังจุดต่อแรก (m) ซึ่งค่า L_c มากสุดและสามารถสมมติให้เท่ากับ 1000 m

H_a คือความสูงของสิ่งปลูกสร้างที่ต่อที่จุด a ของระบบสาธารณูปโภค (m)

H_b คือความสูงของสิ่งปลูกสร้างที่ต่อที่จุด b ของระบบสาธารณูปโภค (m)

ρ คือความต้านทานจำเพาะของดิน (Ωm) เมื่อสาธารณูปโภคถูกฝังดิน ซึ่งค่า ρ มากสุดและสามารถสมมติให้เท่ากับ 500 Ωm

สำหรับวัตถุประสงค์ในการคำนวณคือ

- เมื่อไม่ทราบค่า L_c จะสมมติ L_c เท่ากับ 1,000 m
- เมื่อไม่ทราบค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ จะสมมติ ρ เท่ากับ 500 Ωm
- สำหรับการเดินสายเคเบิลใต้ดินภายในตัวนำลงดินแบบตาข่าย ถ้า $A_i = A_l = 0$ จะสมมติได้เมื่อพื้นที่โดยรวมมีขนาดเท่ากัน
- สิ่งปลูกสร้างที่ป้องกันจะถือว่าต่อเข้าที่จุดสิ้นสุด b ของสาธารณูปโภค

หมายเหตุ ข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนของพื้นที่โดยรวม A_i และ A_l จะสามารถหาได้จากข้อเสนอแนะ ITU K.46 และ K.47

ตาราง ก.4 Transformer factor C_t

หม้อแปลง	**C_t**
สาธารณูปโภคต่อด้วยหม้อแปลง 2 ขดลวด	0.2
สาธารณูปโภคเท่านั้น	1

ก.5 การประเมินจำนวนเหตุการณ์อันตรายเฉลี่ยต่อปีเนื่องจากการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภค N_l

สำหรับส่วนหนึ่งของระบบสาธารณูปโภค (สายเหนือดิน สายใต้ดิน สายหุ้มฉนวน สายไม่หุ้มฉนวนและอื่นๆ) ค่า N_l จะสามารถคำนวณได้จาก

$$N_I = N_g \times A_i \times C_e \times C_t \times 10^{-6} \qquad \text{(ก.8)}$$

เมื่อ N_g คือความหนาแน่นของการเกิดวาบฟ้าผ่าลงสู่ดิน (1/km^2/year)

A_t คือพื้นที่โดยรวมที่เกิดการวาบไฟลงสู่ดินใกล้กับสาธารณูปโภค (m^2) (ดูตาราง ก.3 และรูป ก.5)

C_e คือค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อม (ดูตาราง ก.5)

C_t คือค่าปัจจัยแก้ไขสำหรับการมีหม้อแปลง HV/LV ตั้งอยู่ระหว่างจุดที่เกิดฟ้าผ่าและสิ่งปลูกสร้าง (ดูตาราง ก.4) ปัจจัยนี้ใช้กับส่วนที่อยู่เหนือจากหม้อแปลงที่เกี่ยวข้องกับสิ่งปลูกสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 ค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อม C_e

สิ่งแวดล้อม	C_e
อาคารสูงในเมือง[1)]	0
ในเมือง[2)]	0.1
ชานเมือง[3)]	0.5
ชนบท	1
[1)] ความสูงของอาคารสูงกว่า 20 เมตร [2)] ความสูงของอาคารอยู่ระหว่าง 10 และ 20 เมตร [3)] ความสูงของอาคารต่ำกว่า 10 เมตร	

หมายเหตุ พื้นที่โดยรวม A_i ของสาธารณูปโภคที่นิยามจากความยาว L_c และระยะด้านข้าง D_i (ดูรูป ก.5) ที่ซึ่งเมื่อเกิดการวาบไฟใกล้กับสาธารณูปโภคอาจทำให้เกินแรงดันเหนี่ยวนำเกินจะต้องไม่ต่ำกว่า 1.5 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การประเมินความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง P_x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การประเมินความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง P_X

ค่าความเป็นไปได้ที่ให้มาในภาคผนวกนี้จะถูกต้องถ้ามาตรการการป้องกันเป็นไปตาม
- IEC 62305-3 สำหรับมาตรการการป้องกันที่ลดการบาดเจ็บมนุษย์และความเสียหายทางกายภาพ
- IEC 62305-4 สำหรับมาตรการการป้องกันที่ลดความล้มเหลวของระบบภายใน

อาจจะเลือกค่าอื่นๆ ถ้าค่านั้นสมเหตุสมผล

ค่าความความเป็นไปได้ P_X อาจจะถูกเลือกเป็นน้อยกว่า 1 ได้ถ้ามาตรการหรือลักษณะของสิ่งปลูกสร้างทั้งหมดหรือพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้าง (Z_S) ที่จะป้องกันและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนั้นถูกต้อง

ข.1 ความเป็นไปได้ P_A เมื่อเกิดการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างแล้วจะก่อให้เกิดการบาดเจ็บของมนุษย์

ค่าของความเป็นไปได้ P_X ของการเกิดอันตรายต่อมนุษย์เนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวจากการเกิดวาบฟ้าผ่าสิ่งปลูกสร้าง โดยการใช้งานของมาตรการการป้องกันโดยทั่วไปจะแสดงในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 ค่าของความเป็นไปได้ P_X เนื่องจากการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างแล้วเกิดอันตรายต่อมนุษย์เนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

มาตรการการป้องกัน	P_A
ไม่มีมาตรการการป้องกัน	1
ฉนวนทางไฟฟ้าของตัวนำลงดิน (เช่น XLPE หนาอย่างน้อย 3 มม.)	10^{-2}
ผสานศักย์ไฟฟ้าของดินที่มีประสิทธิภาพ	10^{-2}
ป้ายเตือนภัย	10^{-1}

ถ้ามีการป้องกันมากกว่า 1 เงื่อนไข ค่า P_A จะได้จากผลคูณของค่า P_A ที่สอดคล้องกัน

หมายเหตุ 1 สำหรับข้อมูลต่างๆเพิ่มเติมสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 8.1 และ 8.2 ของ IEC 62305-3

หมายเหตุ 2 สำหรับสิ่งปลูกสร้างที่ใช้ส่วนรับแรง หรือโครงเป็นระบบตัวนำลงดิน หรือมีข้อจำกัดทางกายภาพ ค่าความเป็นไปได้ P_A ก็สามารถละเลยได้

ข.2 ความเป็นไปได้ P_B เมื่อเกิดการวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างแล้วจะก่อให้เกิดความเสียหายทางกายภาพ

ค่าความเป็นไปได้ P_B ของความเสียหายทางกายภาพจากการเกิดจากวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้าง โดยการใช้งานของระดับป้องกันฟ้าผ่า (LPL) จะแสดงในตาราง ข.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2 ค่า P_B ขึ้นอยู่กับมาตรการการป้องกันที่ช่วยลดความเสียหายทางกายภาพ

คุณลักษณะของสิ่งปลูกสร้าง	ระดับการป้องกัน	P_B
สิ่งปลูกสร้างที่ไม่มีการป้องกันโดยระบบการป้องกันฟ้าผ่า	-	1
สิ่งปลูกสร้างที่มีการป้องกันโดยระบบการป้องกันฟ้าผ่า	4	0.2
	3	0.1
	2	0.05
	1	0.02
สิ่งปลูกสร้างที่มีระบบตัวนำล่อฟ้าซึ่งสอดคล้องกับระบบการป้องกันฟ้าผ่าระดับที่ 1 และต่อเนื่องกับส่วนที่เป็นโลหะหรือส่วนโครงคอนกรีตเสริมแรงที่ทำหน้าที่เป็นระบบตัวนำลงดิน		0.01
สิ่งปลูกสร้างที่เป็นหลังคาโลหะหรือระบบตัวนำล่อฟ้า อาจจะรวมถึงองค์ประกอบทางธรรมชาติซึ่งมีการป้องกันหลังคาโดยสมบูรณ์แบบจากฟ้าผ่าโดยตรง และต่อเนื่องกับส่วนที่เป็นโลหะหรือส่วนโครงคอนกรีตเสริมแรงที่ทำหน้าที่เป็นระบบตัวนำลงดิน		0.001

หมายเหตุ ค่าของ P_B อาจมีอยู่นอกเหนือจากที่แสดงในตาราง ข.2 ถ้าหากรายละเอียดขึ้นอยู่กับการตรวจสอบโดยคำนึงถึงข้อกำหนดของขนาดและเกณฑ์การป้องกันที่นิยามใน IEC 62305-1

ข.3 ความเป็นไปได้ P_C เมื่อเกิดวาบฟ้าผ่าสู่สิ่งปลูกสร้างแล้วจะก่อให้เกิดความล้มเหลวของระบบภายใน

ความเป็นไปได้ P_C เมื่อเกิดวาบไฟสู่สิ่งปลูกสร้างแล้วเป็นสาเหตุของความล้มเหลวของระบบภายใน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

$$P_C = P_{SPD} \qquad (ข.1)$$

ค่าของ P_{SPD} ขึ้นกับระดับการป้องกันฟ้าผ่า (LPL) ตามที่อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จได้ถูกออกแบบไว้ ซึ่งแสดงในตาราง ข.3

ตาราง ข.3 ค่าความเป็นไปได้ P_{SPD} ที่การใช้งานของของระดับการป้องกันฟ้าผ่าตามที่อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จได้ถูกออกแบบไว้

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า (LPL)	P_{SPD}
ไม่มีการป้องกันด้วยอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ	1
3 – 4	0.03
2	0.02
1	0.01
หมายเหตุ 3	0.005 – 0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ 1 เฉพาะการป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่เหมาะสมเท่านั่นที่เป็นมาตรการป้องกันที่ลด P_C การป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จเป็นการป้องกันที่มีประสิทธิภาพที่จะลดค่า P_C เฉพาะในสิ่งปลูกสร้างที่มีการป้องกันโดยระบบป้องกันฟ้าผ่า หรือสิ่งปลูกสร้างที่มีส่วนต่อเนื่องกับส่วนที่เป็นโลหะหรือส่วนโครงคอนกรีตเสริมแรงที่ทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันฟ้าผ่า เมื่อการต่อประสานและข้อกำหนดการต่อลงดินเป็นไปตาม IEC 62305-3

หมายเหตุ 2 การป้องกันระบบภายในที่ต่อเชื่อมสายภายนอกจะประกอบด้วยสายป้องกันฟ้าผ่าระบบซึ่งเดินสายในท่อป้องกันฟ้าผ่า ท่อร้อยสายโลหะ ท่อโลหะ อาจไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

หมายเหตุ 3 ค่า P_{SPD} อาจมีค่าน้อยได้เนื่องจากในกรณีของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จมีคุณลักษณะของการป้องกันที่ดี (มีความสามารถในการคงทนกระแสได้สูง ต่ำกว่าระดับการป้องกัน และอื่นๆ) เปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่ต้องการสำหรับระดับ 1 ของการป้องกันฟ้าผ่าที่สถานที่ติดตั้งที่เกี่ยวข้อง

ข.4 ความเป็นไปได้ P_C เมื่อเกิดวาบไฟใกล้สิ่งปลูกสร้างแล้วจะก่อให้เกิดความล้มเหลวของระบบภายใน

ความเป็นไปได้ P_M เมื่อเกิดวาบไฟใกล้กับสิ่งปลูกสร้างซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายแก่ระบบภายในโดยขึ้นอยู่กับการใช้มาตรการการป้องกันฟ้าผ่า (LPM) และค่าปัจจัย K_{MS}

การป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ตอบสนองต่อความต้องการของ IEC 62305-4 ไม่ได้ระบุไว้ค่าของ P_M จะเท่ากับค่าของ P_{MS} โดยค่าของ P_{MS} จะเป็นฟังก์ชันของ K_{MS} ดังที่ให้มาในตาราง ข.4 ซึ่งค่า K_{MS} เป็นปัจจัยที่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพของการใช้งานมาตรการการป้องกัน เมื่อการป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จตามมาตรฐาน IEC 62305-4 ได้มีการระบุค่าไว้ค่า P_M จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อยู่ระหว่าง P_{SPD} และ P_{MS}

ตาราง ข.4 ค่าความเป็นไปได้ P_{MS} จะเป็นฟังก์ชันของ K_{MS}

K_{MS}	P_{MS}
$\geq$ 0.4	1
0.15	0.9
0.07	0.5
0.035	0.1
0.021	0.01
0.016	0.005
0.015	0.003
0.014	0.001
$\leq$ 0.013	0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบภายในที่อุปกรณ์ไม่มีความสามารในการต่อต้านหรือคงทนกับระดับแรงดันตามที่ถูกกำหนดในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง ควรสมมติให้ค่า $P_{MS} = 1$

ค่า K_{MS} สามารถหาได้จากผลคูณของ

$$K_{MS} = K_{S1} \times K_{S2} \times K_{S3} \times K_{S4} \quad \text{(ข.2)}$$

เมื่อ K_{S1} คือค่าที่คำนึงถึงประสิทธิภาพของการป้องกันของสิ่งปลูกสร้าง ระบบป้องกันฟ้าผ่าหรือการป้องกันอื่นที่อยู่ในขอบเขตของพื้นที่การป้องกันฟ้าผ่า 0/1

K_{S2} คือค่าที่คำนึงถึงประสิทธิภาพของการป้องกันภายในแก่สิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในขอบเขตของพื้นที่การป้องกันฟ้าผ่า X/Y (X>0, Y>1)

K_{S3} คือค่าที่คำนึงถึงคุณลักษณะของการวางสายภายใน (ดูตาราง ข.5)

K_{S4} คือค่าที่คำนึงถึงระดับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบที่ป้องกัน

ในพื้นที่ของการป้องกันที่ระยะปลอดภัยจากขอบเขตของฉนวนอย่างน้อยที่สุดจะเท่ากับความกว้างของตาข่าย w ค่าปัจจัย K_{S1} และ K_{S2} ของระบบป้องกันฟ้าผ่าหรือพื้นที่การป้องกันที่เป็นตารางจะประเมินค่าได้จาก

$$K_{S1} = K_{S2} = 0.12 \times w \quad \text{(ข.3)}$$

เมื่อ w (m) คือความกว้างตาข่ายของพื้นที่การป้องกันที่เป็นตาราง หรือของประเภทของตาข่ายตัวนำลงดิน ของระบบป้องกันฟ้าผ่า หรือระยะระหว่างแถวส่วนที่เป็นโลหะของสิ่งปลูกสร้าง หรือระยะระหว่างโครงคอนกรีตเสริมแรงซึ่งโดยปกติทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันฟ้าผ่า สำหรับส่วนป้องกันที่เป็นโลหะต่อเนื่องกันซึ่งมีความหนา 0.1 มม. ถึง 0.5 มม. ค่า $K_{S1} = K_{S2} = 10^{-4}$ ถึง 10^{-5}

เมื่อลูปการเหนี่ยวนำอยู่ใกล้กับฉนวนของตัวนำที่ระยะจากการป้องกันที่สั้นกว่าระยะปลอดภัย ค่าของ K_{S1} และ K_{S2} จะมีค่าสูงขึ้น เช่นค่าของ K_{S1} และ K_{S2} ควรมีค่าเป็น 2 เท่าเมื่อระยะทางถึงระยะการป้องกันอยู่ในช่วง 0.1w ถึง 0.2w สำหรับแบ่งแยกพื้นที่การป้องกันค่าของ K_{S2} จะเป็นผลคูณที่เกี่ยวข้องกับค่า K_{S2} ของแต่ละพื้นที่การป้องกัน

หมายเหตุ 1 เมื่อโครงข่ายของการต่อประสานตาข่ายเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 62305-4 ค่า K_{S1} และ K_{S2} อาจต้องลดลงครึ่งหนึ่ง

หมายเหตุ 2 ค่าสูงสุดของ K_{S1} จะมีค่าไม่เกิน 1

สำหรับการวางสายในท่อโลหะต่อเนื่องที่มีการต่อประสานกับแท่งตัวนำประสานที่มีการผสานศักย์ที่จุดปลายทั้งสองด้าน ค่า K_{S3} ควรคูณด้วย 0.1 ค่า K_{S4} สามารถหาได้จาก

$$K_{S4} = 1.5 / U_W \quad \text{(ข.4)}$$

เมื่อ U_w คืออัตราความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบที่ป้องกันในหน่วย kV

ถ้ามีอุปกรณ์ที่มีระดับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ต่างกันในระบบภายใน ค่าปัจจัย K_{S4} ที่เกี่ยวข้องกับระดับความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ต่ำที่สุดจะถูกเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 ค่า K_{S3} ที่ขึ้นกับการวางสายภายใน

ประเภทการวางสายภายใน	K_{S3}
สายเคเบิลที่ไม่มีการป้องกัน - ไม่มีการกำหนดเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงลูป [1)]	1
สายเคเบิลที่ไม่มีการป้องกัน - มีการกำหนดเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงลูปขนาดใหญ่ [2)]	0.2
สายเคเบิลที่ไม่มีการป้องกัน - มีการกำหนดเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงลูป [3)]	0.02
สายเคเบิลที่มีการป้องกันด้วยความต้านทานตัวป้องกัน [4)] $5 \le R_S \le 20\Omega / km$	0.001
สายเคเบิลที่มีการป้องกันด้วยความต้านทานตัวป้องกัน [4)] $1 \le R_S \le 5\Omega / km$	0.0002
สายเคเบิลที่มีการป้องกันด้วยความต้านทานตัวป้องกัน [4)] $R_S \le 1\Omega / km$	0.0001

[1)] ลูปตัวนำซึ่งมีเส้นทางที่ต่างกันในสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ (พื้นที่ของลูปขนาด 50 m^2)

[2)] เส้นทางของลูปตัวนำซึ่งมีเส้นทางเดียวอยู่ในท่อเดียวกันหรือลูปตัวนำซึ่งมีเส้นทางที่ต่างกันในสิ่งปลูกสร้างขนาดเล็ก (พื้นที่ของลูปขนาดขนาด 10 m^2)

[3)] เส้นทางของลูปตัวนำที่มีเส้นทางเดียวกับสายเคเบิล (พื้นที่ของลูปขนาดขนาด 0.5 m^2)

[4)] ความต้านทานของสายเคเบิลที่มีการป้องกัน R_S (Ω/km) ที่การต่อประสานเข้าสู่แท่งตัวนำต่อประสานที่ปลายทั้งสองข้างและอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับท่าตัวนำประสานเดียวกัน

ข.5 ความเป็นไปได้ P_U เมื่อเกิดวาบไฟสู่สาธารณูปโภคแล้วจะก่อให้เกิดการบาดเจ็บของมนุษย์

ค่าความเป็นไปได้ P_U ของการบาดเจ็บของมนุษย์เนื่องจากแรงดันสัมผัส โดยการวาบไฟสู่สาธารณูปโภคและถูกส่งผ่านเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของการป้องกันระบบสาธารณูปโภค ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบภายในที่เชื่อมต่ออยู่กับสาธารณูปโภค มาตรการในการป้องกันโดยทั่วไปและอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จจะถูกติดตั้งที่จุดต่อเข้าของสาธารณูปโภค (การยับยั้งทางกายภาพ, ป้ายเตือนภัยและอื่นๆ) (ดูตารางข.1)

เมื่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จไม่มีการจัดเตรียมสำหรับการประสานศักย์ให้เท่ากันตาม IEC 62305-3 ค่าของ P_U จะเท่ากับค่าของ P_{LD} เมื่อ P_{LD} คือค่าความเป็นไปได้ของความล้มเหลวของระบบภายในเนื่องจากการเกิดวาบไฟสู่สาธารณูปโภค โดยค่า P_{LD} สามารถดูได้จากตาราง ข.6 เมื่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จมีการจัดเตรียมสำหรับการประสานศักย์ให้เท่ากันตาม IEC 62305-3 ค่าของ P_U จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อยู่ระหว่าง P_{SPD} (ตาราง ข.3) กับ P_{LD}

หมายเหตุ การป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จตาม IEC 62305-4 นั้นไม่จำเป็นต้องลดค่า P_U ในกรณีนี้ลง เมื่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จตาม IEC 62305-3 ก็เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.6 ค่าความเป็นไปได้ P_{LD} ที่ขึ้นกับความต้านทานของฉนวนสายเคเบิลที่ R_S และความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของอุปกรณ์ U_w

U_w (kV)	$5 \le R_S \le 20\Omega / km$	$1 \le R_S \le 5\Omega / km$	$R_S \le 1\Omega / km$
1.5	1	0.8	0.4
2.5	0.95	0.6	0.2
4	0.9	0.3	0.04
6	0.8	0.1	0.02
R_S (Ω/km) คือความต้านทานของสายเคเบิลที่ป้องกัน			

สำหรับระบบสาธารณูปโภคที่ไม่มีการป้องกันค่า P_{LD} เท่ากับ 1

เมื่อมาตรการการป้องกัน อย่างเช่นการยับยั้งทางกายภาพ, ป้ายเตือนภัยและอื่นๆ ซึ่งได้ถูกจัดเตรียม ค่าความเป็นไปได้ P_U จะมีตัวคูณลดโดยจะคูณด้วยค่าความเป็นไปได้ P_A ที่ให้มาในตาราง ข.1

ข.6 ความเป็นไปได้ P_V เมื่อเกิดวาบไฟสู่สาธารณูปโภคแล้วจะก่อให้เกิดความเสียหายทางกายภาพ

ค่าความเป็นไปได้ P_V ของความเสียหายทางกายภาพจากการเกิดวาบไฟสู่สาธารณูปโภคที่ต่อเข้าสิ่งปลูกสร้างโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของการป้องกันสาธารณูปโภค ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบภายในที่ต่ออยู่กับสาธารณูปโภคและการจัดเตรียมอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

เมื่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จไม่มีการต่อประสานศักย์ให้เท่ากันตาม IEC 62305-3 ค่าของ P_V จะเท่ากับค่าของ P_{LD} เมื่อ P_{LD} คือ ค่าความเป็นไปได้ของความเสียหายของระบบภายในเนื่องจากการเกิดวาบไฟเข้าสู่ระบบที่ต่อกับสาธารณูปโภค โดยค่า P_{LD} สามารถดูได้จากตาราง ข.6 เมื่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จมีการต่อประสานศักย์ให้เท่ากันตาม IEC 62305-3 ค่าของ P_V จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อยู่ระหว่าง P_{SPD} (ตาราง ข.3) กับ P_{LD}

หมายเหตุ การป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จตาม IEC 62305-4 นั้นไม่จำเป็นต้องลดค่า P_U ในกรณีนี้ลง เมื่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จตาม IEC 62305-3 ก็เพียงพอ

ข.7 ความเป็นไปได้ P_W เมื่อเกิดวาบไฟสู่สาธารณูปโภคแล้วจะก่อให้เกิดความล้มเหลวของระบบภายใน

ค่าความเป็นไปได้ P_W จากการเกิดวาบไฟสู่สาธารณูปโภคและเข้าสู่สิ่งปลูกสร้างจะเป็นสาเหตุของความล้มเหลวของระบบภายในจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการป้องกันสาธารณูปโภค ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบภายในที่เชื่อมต่ออยู่กับสาธารณูปโภคและอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่ติดตั้ง

เมื่อการป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่สอดคล้องต่อความต้องการของ IEC 62305-4 ไม่ได้ระบุไว้ ค่าของ P_W จะเท่ากับค่าของ P_{LD} เมื่อ P_{LD} คือค่าความเป็นไปได้ของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้มเหลวของระบบภายในเนื่องฟ้าการเกิดวาบไฟเข้าสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่ออยู่ โดยค่า P_{LD} สามารถดูได้จากตาราง ข.6

การป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่สอดคล้องต่อความต้องการของ IEC 62305-4 ไม่ได้ระบุไว้ ค่าของ P_W จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อยู่ระหว่าง P_{SPD} (ตาราง ข.3) กับ P_{LD}

ข.8 ความเป็นไปได้ P_Z เมื่อเกิดวาบไฟใกล้กับจุดต่อเข้าระบบสาธารณูปโภคจะก่อให้เกิดความความล้มเหลวของระบบภายใน

ค่าความเป็นไปได้ P_Z เมื่อเกิดวาบฟ้าผ่าใกล้กับระบบสาธารณูปโภคซึ่งต่อเข้ากับสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความล้มเหลวของระบบภายในโดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการป้องกันระบบสาธารณูปโภค ความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของระบบภายในที่ต่ออยู่กับสาธารณูปโภคและมาตรการการป้องกันที่ใช้

เมื่อการป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่สอดคล้องต่อความต้องการของ IEC 62305-4 ไม่ได้ระบุไว้ ค่าของ P_Z จะเท่ากับค่าของ P_{LI} เมื่อ P_{LI} คือค่าความเป็นไปได้ของความล้มเหลวของระบบภายในเนื่องจากการเกิดวาบไฟเข้าสู่สาธารณูปโภคที่เชื่อมต่ออยู่ โดยค่า P_{LI} สามารถดูได้จากตาราง ข.7 เมื่อการป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่สอดคล้องต่อความต้องการของ IEC 62305-4 ได้ระบุไว้ ค่าของ P_Z จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อยู่ระหว่าง P_{SPD} (ตาราง ข.3) กับ P_{LI}

ตาราง ข.7 ค่าความเป็นไปได้ P_{LI} ที่ขึ้นกับความต้านทาน (R_S) ฉนวนของสายเคเบิลและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (U_w) ของอุปกรณ์

U_W kV	**ไม่มีการป้องกัน**	**การป้องกันที่ไม่ประสานกับแท่งตัวนำต่อประสานซึ่งอุปกรณ์เชื่อมต่ออยู่**	**การป้องกันประสานกับแท่งตัวนำต่อประสานและอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับตัวนำเดียวกัน**		
			$5 \le R_S \le 20\Omega / km$	$1 \le R_S \le 5\Omega / km$	$R_S \le 1\Omega / km$
1.5	1	0.5	0.15	0.04	0.02
2.5	0.4	0.2	0.06	0.02	0.008
4	0.2	0.1	0.03	0.008	0.004
6	0.1	0.05	0.02	0.004	0.002

R_S คือความต้านทานของสายเคเบิลที่ป้องกัน

หมายเหตุ สำหรับการประมาณค่าที่แม่นยำของ K_S สำหรับส่วนที่มีและไม่มีการป้องกันสามารถหาได้จากส่วนแนะนำของ ITU K.46.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
การประเมินค่าความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้าง L_x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การประเมินค่าความสูญเสียในสิ่งปลูกสร้าง L_X

ค่าความสูญเสีย L_X ควรถูกประเมินและกำหนดโดยผู้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า (หรือเจ้าของสิ่งปลูกสร้าง) ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของที่กำหนดให้มาในภาคผนวกนี้เป็นเพียงค่าที่เสนอโดย IEC ค่าที่ใช้นั้นอาจแตกต่างกันตามแต่ละมาตรฐานแต่ละประเทศ

หมายเหตุ แนะนำให้ใช้สมการที่ให้มาในภาคผนวกนี้ใช้เป็นค่าหลักสำหรับค่า L_X

ค.1 ค่าเฉลี่ยของความสูญเสียต่อปี [2]

ความสูญเสีย L_X หมายถึงค่าเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นผลรวมของแต่ละประเภทของความเสียหาย ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากวาบฟ้าผ่า โดยจะพิจารณาทั้งขอบเขตและผลกระทบซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆดังนี้

- จำนวนคนและเวลาที่อยู่ในสถานที่อันตราย
- ประเภทและความสำคัญของการให้บริการสาธารณูปโภคต่อสาธารณะ
- มูลค่าของสินค้าที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหาย

ค่าสูญเสีย L_X สามารถเปลี่ยนได้ตามประเภทของความสูญเสีย (L1, L2, L3 และ L4) ที่พิจารณา สำหรับแต่ละประเภทความสูญเสียซึ่งประเภทของความเสียหาย (D1, D2 และ D3) จะเป็นสาเหตุของความสูญเสีย ตามสัญลักษณ์ที่ใช้ดังนี้

L_t คือความสูญเสียเนื่องจากอันตรายจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

L_f คือความสูญเสียเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพ

L_O คือ ความสูญเสียเนื่องจากความล้มเหลวของระบบภายใน

ค.2 ความสูญเสียต่อชีวิตมนุษย์

ค่าของ L_t, L_f และ L_O จะหาได้จากในพจน์ของจำนวนผู้ประสบภัยที่เกี่ยวข้องกับความสูญเสียตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_X = (n_p / n_t) \times (t_p / 8760) \qquad \text{(ค.1)}$$

เมื่อ n_p คือจำนวนคนที่ได้รับอันตรายที่เป็นไปได้ (ผู้ประสบภัย)

n_t คือจำนวนคนที่คาดไว้ทั้งหมด (ในสิ่งปลูกสร้าง)

t_p คือเวลาในหน่วยชั่วโมงต่อปี ซึ่งคนอยู่ในสถานที่ที่อันตรายหรือนอกสิ่งปลูกสร้าง (L_t เท่านั้น) หรือในสิ่งปลูกสร้าง (L_t ,L_f และ L_O)

ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของ L_t, L_f และ L_O จะใช้เมื่อหาค่า n_p, n_t และ t_p ได้ไม่แน่นอนหรือยาก โดยจะให้มาในตาราง ค.1

ตาราง ค.1 ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของ L_t, L_f และ L_O

ประเภทของสิ่งปลูกสร้าง	L_t
ทุกประเภท (คนอยู่ในสิ่งปลูกสร้าง)	10^{-4}
ทุกประเภท (คนอยู่นอกสิ่งปลูกสร้าง)	10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของสิ่งปลูกสร้าง	L_f
โรงพยาบาล, โรงแรม, อาคารต่างๆ	10^{-1}
อุตสาหกรรม, ร้านค้า, โรงเรียน	5×10^{-2}
ศูนย์การค้า, โบสถ์, พิพิธภัณฑ์	2×10^{-2}
อื่นๆ	10^{-2}

ประเภทสิ่งปลูกสร้าง	L_o
สิ่งปลูกสร้างที่เสี่ยงต่อการเกิดระเบิด	10^{-1}
โรงพยาบาล	10^{-3}

ความสูญเสียของชีวิตมนุษย์จะได้รับผลมาจากลักษณะของสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งจะนำมาพิจารณาเพิ่มค่า (h_Z) และลดค่า (r_f, r_p, r_a, r_u) ได้ดังนี้

$$L_A = r_a \times L_t \quad \text{(ค.2)}$$

$$L_U = r_u \times L_t \quad \text{(ค.3)}$$

$$L_B = L_V = r_p \times h_Z \times r_f \times L_t \quad \text{(ค.4)}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \quad \text{(ค.5)}$$

เมื่อ r_a คือตัวคูณลดความสูญเสียของชีวิตมนุษย์ที่ขึ้นกับประเภทของดิน (ตาราง ค.2)

r_u คือตัวคูณลดความสูญเสียของชีวิตมนุษย์ที่ขึ้นกับประเภทของพื้น (ตาราง ค.2)

r_p คือตัวคูณลดความสูญเสียเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพที่ขึ้นกับข้อกำหนดเพื่อที่จะลดผลของไฟไหม้ (ตาราง ค.3)

r_f คือตัวคูณลดความสูญเสียเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพที่ขึ้นกับความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้ต่อสิ่งปลูกสร้าง (ตาราง ค.4)

h_Z คือตัวคูณเพิ่มความสูญเสียเนื่องจากความเสียหายทางกายภาพเมื่อมีอันตรายพิเศษเกิดขึ้น (ตาราง ค.5)

ตาราง ค.2 ค่าตัวคูณลด r_a และ r_u ตามการใช้งานของประเภทของพื้นผิวของดินและพื้น

ประเภทพื้นผิว	ความต้านทานหน้าสัมผัส $k\Omega$[1)]	r_a และ r_u
เกษตรกรรม คอนกรีต	≤ 1	10^{-2}
หินอ่อน เซรามิก	1 – 10	10^{-3}
กรวด พรม	10 – 100	10^{-4}
ยางมะตอย เสื่อน้ำมัน ไม้	≥ 100	10^{-5}

[1)] ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 400 cm^2 ขั้วไฟฟ้ากดด้วยแรง 400 N ที่จุดอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.3 ค่าตัวคูณลด r_p ซึ่งจะใช้ในเงื่อนไขเพื่อลดผลกระทบของการเกิดไฟไหม้

เงื่อนไข	r_p
ไม่มีเงื่อนไข	1
หนึ่งในเงื่อนไขต่อไปนี้ : ถังดับเพลิง ติดตั้งระบบดับเพลิงทำงานด้วยมือ จุดส่งสัญญาณเตือนชนิดสั่งการด้วยมือ หัวต่อสายส่งน้ำดับเพลิง ช่องทนไฟ เส้นทางหลบหนีที่มีการป้องกัน	0.5
หนึ่งในเงื่อนไขต่อไปนี้ : ติดตั้งระบบดับเพลิงทำงานอัตโนมัติ จุดส่งสัญญาณเตือนอัตโนมัติ[1)]	0.2
[1)] เฉพาะถ้าจะป้องกันจากแรงกันเกินละความเสียหายอื่นและถ้าหน่วยดับเพลิงมาถึงได้ภายใน 10 นาที	

ถ้าเงื่อนไขที่เป็นไปได้มีมากกว่าหนึ่งเงื่อนไข ค่า r_p จะใช้เป็นค่าที่ต่ำที่สุด และสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่เสี่ยงต่อการระเบิด ค่า r_p ที่ใช้จะเท่ากับ 1 ในทุกกรณี

ตาราง ค.4 ค่าตัวคูณลด r_f ซึ่งจะใช้ในความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้ของสิ่งปลูกสร้าง

ความเสี่ยงของการเกิดไฟไหม้	r_f
ระเบิด	1
สูง	10^{-1}
ปกติ	10^{-2}
ต่ำ	10^{-3}
ไม่เกิด	0

หมายเหตุ 1 ในกรณีของสิ่งปลูกสร้างซึ่งเสี่ยงต่อการระเบิดและมีสิ่งที่เกิดการระเบิดได้ รายละเอียดที่ใช้ในการประเมินค่า r_f จะมีความจำเป็น

หมายเหตุ 2 พิจารณาสิ่งปลูกสร้างที่ทำจากวัสดุที่ติดไฟได้ สิ่งปลูกสร้างที่หลังคาที่ทำจากวัสดุที่ที่ติดไฟได้ หรือสิ่งปลูกสร้างที่มีเชื้อเพลิงที่มีค่า Fire load มากกว่า 800 MJ/m^2 เป็นสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดไฟไหม้

หมายเหตุ 3 สิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงปกติในการเกิดไฟไหม้จะถือว่าเป็นสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีค่า Fire load ระหว่าง 800 MJ/m^2 ถึง 400 MJ/m^2

หมายเหตุ 4 สิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงต่ำในการเกิดไฟไหม้จะถือได้ว่าเป็นสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีค่า Fire load น้อยกว่า 400 MJ/m^2 หรือสิ่งปลูกสร้างที่มีเชื้อเพลิงน้อย

หมายเหตุ 5 ค่า Fire load เป็นอัตราส่วนของพลังงานทั้งหมดของวัสดุซึ่งติดไฟได้ในสิ่งปลูกสร้างกับพื้นผิวโดยรวมทั้งหมดของสิ่งปลูกสร้าง

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.5 ค่าตัวคูณเพิ่ม h_Z ของค่าความสูญเสียในที่ที่มีอันตรายแบบพิเศษ

ชนิดของอันตรายแบบพิเศษ	h_z
ไม่มีอันตรายแบบพิเศษ	1
ความหวาดกลัวระดับต่ำ (เช่น สิ่งปลูกสร้างมีเพียง 2 ชั้นและมีจำนวนคนไม่เกิน 100 คน)	2
ความหวาดกลัวระดับปานกลาง (เช่น สิ่งปลูกสร้างที่ออกแบบมาใช้กับกิจกรรมทางวัฒนธรรมหรือกีฬาที่มีจำนวนอยู่ภายในได้ระหว่าง 100 ถึง 1000 คน)	5
มีลักษณะที่ยากต่อการอพยพ (เช่น สิ่งปลูกสร้างซึ่งมีผู้ถูกจองจำ โรงพยาบาล)	5
ความหวาดกลัวระดับสูง (เช่น สิ่งปลูกสร้างที่ออกแบบมาใช้กับกิจกรรมทางวัฒนธรรมหรือกีฬาที่ที่มีจำนวนอยู่ภายในได้มากกว่า 1000 คน)	10
สภาพแวดล้อมหรือสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตราย	20
การปนเปื้อนของสภาพแวดล้อมหรือสิ่งแวดล้อม	50

ค.3 ความสูญเสียที่ยอมรับไม่ได้ของการบริการต่อสาธารณะ

ค่า L_f และ L_O จะถูกนำมาหาค่าในรูปของจำนวนที่เกี่ยวข้องกับของความสูญเสียที่เป็นไปได้ โดยประมาณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_X = n_p / n_t \times t / 8760 \qquad \text{(ค.6)}$$

เมื่อ n_p คือค่าเฉลี่ยขอจำนวนคนที่อาจเกิดอันตราย

n_t คือจำนวนคนทั้งหมด

t คือระยะเวลาต่อปีของการสูญเสียต่อการบริการสาธารณูปโภค (ชั่วโมง)

ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของของ L_f และ L_O เพื่อใช้ในการหาค่า n_p , n_t และ t เมื่อหาค่าไม่ได้หรือหายากจึงจะใช้ค่าที่มาในตาราง ค.6

ตาราง ค.6 ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของของ L_f และ L_O

ประเภทของสาธารณูปโภค	L_f	L_O
แก๊ส น้ำ	10^{-1}	10^{-2}
ทีวี ทีแอลซี แหล่งจ่ายไฟฟ้า	10^{-2}	10^{-3}

การสูญเสียต่อการบริการสาธารณูปโภคจะมีผลมาจากลักษณะของสิ่งปลูกสร้างและตัวคูณลด (r_p) ดังต่อไปนี้ ซึ่งค่าของ r_p และ r_f ได้ให้มาในตาราง ค.3 และ ค.4 ตามลำดับ

$$L_B = L_V = r_p \times r_f \times L_f \qquad \text{(ค.7)}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \qquad \text{(ค.8)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 การสูญเสียที่ทดแทนไม่ได้ของทางมรดกวัฒนธรรม

ค่า L_f จะถูกนำมาหาค่าในรูปของจำนวนที่เกี่ยวข้องกับของความสูญเสียที่เป็นไปได้โดยประมาณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_X = c / c_t \qquad \text{(ค.9)}$$

เมื่อ c คือค่าเฉลี่ยที่เป็นไปได้ของความสูญเสียของสิ่งปลูกสร้างในรูปจำนวนเงิน (เช่น มูลค่าประกันภัยของความเสียหายที่เป็นไปได้ของสินค้า)

c_t คือมูลค่ารวมของสิ่งปลูกสร้าง (เช่น มูลค่าค่าประกันภัยของสินค้าทั้งหมดที่มีอยู่ในสิ่งปลูกสร้าง)

ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของของ L_f เมื่อการหาค่าของ c และ c_t หาค่าไม่ได้หรือหายากได้ดังนี้

$$L_f = 10^{-1}$$

การสูญเสียที่ทดแทนไม่ได้ของมรดกทางวัฒนธรรมที่ได้รับผลกระทบจากลักษณะของสิ่งปลูกสร้างโดยตัวคูณลด r_p ต่อไปนี้

$$L_B = L_V = r_p \times r_f \times L_f \qquad \text{(ค.10)}$$

ซึ่งค่าของ r_p และ r_f ได้แสดงในตาราง ค.3 และ ค.4 ตามลำดับ

ค.5 การสูญเสียทางเศรษฐกิจ

ค่า L_t L_f และ L_O จะถูกนำมาหาค่าในรูปของจำนวนที่เกี่ยวข้องกับของความสูญเสียที่เป็นไปได้โดยประมาณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_X = c / c_t \qquad \text{(ค.11)}$$

เมื่อ c คือค่าเฉลี่ยที่เป็นไปได้ของความสูญเสียของสิ่งปลูกสร้าง (รวมถึงสิ่งที่อยู่ภายใน กิจกรรมที่เกี่ยวข้องและผลของเหตุการณ์)

c_t คือมูลค่ารวมของสิ่งปลูกสร้าง (รวมถึงสิ่งที่อยู่ภายในและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง)

ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของ L_t L_f และ L_O สำหรับทุกประเภทของสิ่งปลูกสร้างจะใช้เมื่อหาค่า c และ c_t ได้ไม่แน่นอนหรือหายาก โดยให้ค่ามาในตาราง ค.7

ตาราง ค.7 ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของ L_t , L_f และ L_O

ประเภทสิ่งปลูกสร้าง	**L_t**
ทุกประเภท (ในสิ่งปลูกสร้าง)	10^{-4}
ทุกประเภท (นอกสิ่งปลูกสร้าง)	10^{-2}
ประเภทสิ่งปลูกสร้าง	**L_f**
โรงพยาบาล อุตสาหกรรม พิพิธภัณฑ์ พื้นที่เกษตรกรรม	0.5
โรงแรม โรงเรียน สำนักงาน โบสถ์ ศูนย์การค้า	0.2
อื่นๆ	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.7 ค่าเฉลี่ยทั่วไปของของ L_t , L_f และ L_O(ต่อ)

ประเภทสิ่งปลูกสร้าง	L_o
เสี่ยงต่อการเกิดระเบิด	10^{-1}
โรงพยาบาล อุตสาหกรรม โรงแรม สำนักงาน	10^{-2}
พิพิธภัณฑ์ พื้นที่เกษตรกรรม โรงเรียน โบสถ์ ศูนย์การค้า	10^{-3}
อื่นๆ	10^{-4}

ความสูญเสียทางเศรษฐกิจที่ได้รับผลกระทบจากลักษณะของสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งได้รับจากตัวคูณเพิ่ม h_Z และตัวคูณลด r_p , r_a , r_f , r_u ต่อไปนี้

$$L_A = r_a \times L_t \quad \text{(ค.12)}$$

$$L_U = r_u \times L_t \quad \text{(ค.13)}$$

$$L_B = L_V = r_p \times h_z \times r_f \times L_t \quad \text{(ค.14)}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_O \quad \text{(ค.15)}$$

ซึ่งค่าของ r_a และ r_u จะแสดงในตาราง ค.2 ค่า r_p แสดงในตาราง ค.3 ค่า r_f แสดงในตาราง ค.4 และค่า h_Z แสดงในตาราง ค.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
แรงดันเกินสวิชชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
แรงดันเกินสวิชชิ่ง

แรงดันเกินภายในสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายเหตุผลที่แตกต่างกัน สาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้คือไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากสปาร์คข้ามของฟ้าผ่า ซึ่งมักจะนำไปสู่การเกิดแรงดันเกินชั่วครู่และแรงดันเกินสวิชชิ่ง ด้วยเหตุผลนี้การพิจารณาการป้องกันแรงดันเกินภายในจึงสิ่งที่ควรทำ

ในกรณีส่วนใหญ่แรงดันเกินสวิชชิ่งจะทำความเสียหายน้อยกว่าการเกิดฟ้าผ่า นั่นหมายความว่าการป้องกัน (อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ) ที่ได้ผลกับการป้องกันเสิร์จฟ้าผ่าก็จะสามารถป้องกันสวิชชิ่งเสิร์จได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันสวิชชิ่งเสิร์จ ด้วยเหตุนี้การตัดสินใจป้องกันอุปกรณ์จากเสิร์จฟ้าผ่าจึงครอบคลุมปัญหาของการเกิดการป้องกันสวิชชิ่งเสิร์จแล้ว

เมื่อศึกษาถึงสวิชชิ่งเสิร์จที่เกี่ยวข้องแล้ว ขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยงแทบจะมีวิธีการใกล้เคียงกับในกรณีของเสิร์จเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่าในสายส่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อแตกต่างในเรื่องของจำนวนการเกิดแรงดันเกินต่อปี N_S โดยสวิชชิ่งเสิร์จสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- การเกิดเสิร์จซ้ำ (การทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ การสวิชชิ่งของตัวเก็บประจุแก้ตัวประกอบกำลัง และอื่นๆ) เหตุการณ์เหล่านี้จะเกิดขึ้นค่อนข้างบ่อยเนื่องจากการตัดสินใจของคนหรือเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ ความถี่ในการเกิดอยู่ในช่วง 1-2 ครั้งต่อวัน หรือหลายๆครั้งต่อวันในกรณีใช้งานเครื่องเชื่อมไฟฟ้าเป็นต้น ความถี่ของการเกิดเสิร์จและขนาดของเสิร์จเหล่านี้เป็นผลจากอุปกรณ์ไฟฟ้า การวิเคราะห์ความเสี่ยงมักไม่มีประโยชน์ในการตัดสินใจในการป้องกันอุปกรณ์ในกรณีดังกล่าว
- การเกิดเสิร์จแบบสุ่ม (การทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์เพื่อแก้ไขความผิดพร่อง) ในกรณีนี้จะไม่สามารถทราบความถี่ ขนาดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า การประเมินความเสี่ยงอาจจะช่วยในการตัดสินใจว่าการป้องกันเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้านที่มาของความเสียหายนั้นๆ

ขนาดของแรงดันเกินสวิชชิ่งจะสามารถประเมินได้โดยละเอียดจากการวัดจากการติดตั้งงานไฟฟ้าและการประมวลผลข้อมูลทางสถิติ โดยทั่วไปแล้วความถี่ในของการเกิดแรงดันเกินสวิชชิ่งจะลดลงเนื่องจากขนาด (ความเป็นไปได้จะแปรผกผันกับขนาดยกกำลัง 3)

ในระบบแรงดันต่ำแรงดันเกินสวิชชิ่งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่า 4 kV และมีเพียง 2 ใน 1000 ที่มีขนาดเกิน 2.5 kV จากการประมาณหรือการวัดทั้งหมดแรงดันเกินสวิชชิ่งที่เกิดขึ้นต่อปี (n_S) เราสามารถหาจำนวนรวมทั้งหมดต่อปี (N_S) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิน 2.5 kV แต่ต่ำกว่า 4 kV โดยสมการต่อไปนี้

$$N_s = 0.002 \times n_s \qquad \text{(ง.1)}$$

ความเป็นไปได้ของความเสียหาย P และการสูญเสียที่เกิดขึ้น L เหมือนกันกับการเกิดเสิร์จเหนี่ยวนำฟ้าผ่า (ดูภาคผนวก ข และ ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
การประเมินค่าใช้จ่ายของความสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การประเมินค่าใช้จ่ายของความสูญเสีย

ค่าใช้จ่ายของความสูญเสียทั้งหมด C_L จะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_L = (R_A + R_u) \times C_A + (R_B + R_V) \times (C_A + C_B + C_S + C_C) + (R_C + R_M + R_W + R_Z) \times C_S \quad \text{(จ.1)}$$

เมื่อ R_A และ R_u คือองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียของสัตว์โดยไม่มีมาตรการการป้องกัน

R_B และ R_V คือองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียทางกายภาพโดยไม่มีมาตรการการป้องกัน

R_C , R_M , R_W , R_Z คือองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์โดยไม่มีมาตรการการป้องกัน

C_A คือค่าใช้จ่ายของสัตว์

C_S คือค่าใช้จ่ายของระบบภายในสิ่งปลูกสร้าง

C_B คือค่าใช้จ่ายของอาคาร

C_C คือค่าใช้จ่ายของสิ่งที่อยู่ภายใน

ค่าใช้จ่ายทั้งหมด C_{RL} ของการสูญเสียที่เหลือเมื่อมีมาตรการการป้องกันจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$C_{RL} = (R'_A + R'_u) \times C_A + (R'_B + R'_V) \times (C_A + C_B + C_S + C_C) + (R'_C + R'_M + R'_W + R'_Z) \times C_S \quad \text{(จ.2)}$$

เมื่อ R'_A และ R'_U คือองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียของสัตว์โดยมีมาตรการการป้องกัน

R'_B และ R'_V คือองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียทางกายภาพโดยมีมาตรการการป้องกัน

R'_C R'_M R'_W R'_Z คือองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์โดยมีมาตรการการป้องกัน

ค่าใช้จ่ายต่อปี C_{PM} ของมาตรการการป้องกันจะคำนวณได้จากสมการ

$$C_{PM} = C_P \times (i + a + m) \quad \text{(จ.3)}$$

เมื่อ C_P คือค่าใช้จ่ายของมาตรการการป้องกัน

i คืออัตราดอกเบี้ย

a คืออัตราค่าตัดจำหน่าย

m คืออัตราค่าซ่อมบำรุง

จำนวนเงินที่ประหยัดต่อปี S จะเท่ากับ

$$s = C_L - (C_{PM} + C_{RL}) \quad \text{(จ.4)}$$

การป้องกันจะเหมาสมถ้าหากจำนวนเงินที่ประหยัดต่อปี S > 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ฉ
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเปรียบเทียบเพื่อยกระดับมาตรฐานองค์ความรู้ด้านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าของประเทศไทย ในด้านทฤษฎีการเกิดระบบป้องกันและการจัดการด้านความเสี่ยง จากมาตรฐาน IEC และ IEEE

The Tentative Comparison Study of IEC and IEEE Lightning Phenomena Standard in Theory, System Protection and Risk Management for Refining Thailand Standard

ธนิสร แสงชลินทร์ ธเนศ สุขสถาน ธิษณะ อุดมฤกษ์ชัยและ นัธที วงศ์พยัคฆ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ : 0-2329-8550

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและรวบรวมทฤษฎีพื้นฐานในแง่ของสาเหตุ ผลกระทบและวิธีการป้องกันฟ้าผ่าจากมาตรฐานที่มีอยู่ทั้งในและต่างประเทศเพื่อสร้างเป็นองค์ความรู้ในเรื่องของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในประเทศไทย รวมถึงการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าเมื่อมีวัสดุและรูปร่างที่แตกต่างกันเพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพในการล่อฟ้าที่ดีที่สุด และออกแบบโปรแกรมประเมินการจัดการความเสี่ยงของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานของ IEC 62305-2 ซึ่งโดยโปรแกรมได้ออกแบบมาให้ใช้งานง่ายและเหมาะแก่ผู้ที่ต้องการประเมินความเสี่ยงแบบรวดเร็วเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการป้องกันฟ้าผ่าเพื่อลดความเสียหายแก่อุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์สื่อสารบนพื้นที่ปฏิบัติงาน

คำสำคัญ: แท่งตัวนำล่อฟ้า, ฟ้าผ่า, การจัดการความเสี่ยง

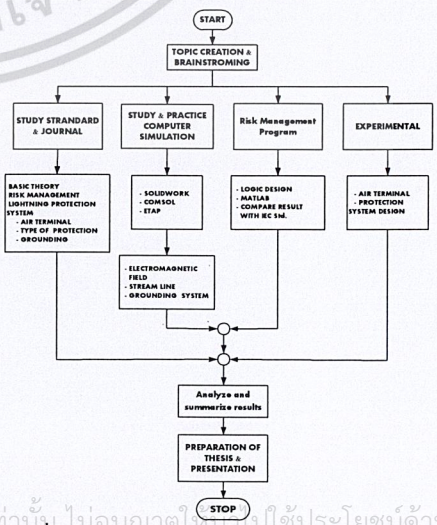
Abstract

The main objective of this study is to gather the knowledge base of the lightning phenomena in many significant aspects which are the principles, the causes, the impact on human and buildings and the lightning protection based on related Thailand and international standard. This project includes the extensive experimental results in testing both physical and electrical characteristics of the lightning air terminals in order that the best practice for this device in Thailand can be determined. The computer aid program called "Basic Risk Management Analysis" is also developed via MATLAB GUI according to IEC 62305-2 standard. The complete report will be hugely beneficial to many Thailand researchers, scientists and engineers in establishing the background and advance knowledge in this area.

Keywords: air terminal, lightning, risk management

1. บทนำ

เนื่องจากโครงงานนี้ได้ทำการศึกษาและรวบรวมทฤษฎีพื้นฐาน ผลกระทบ และวิธีการป้องกันฟ้าผ่าโดยอ้างอิงจากมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าทั้งในและต่างประเทศที่มีอยู่ในปัจจุบันจึงทำให้โครงงานนี้ประกอบด้วยเนื้อหาส่วนหลัก 3 ส่วนคือในส่วนแรกเป็นส่วนของการรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่า การออกแบบการป้องกันและระบบต่อลงดิน ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ศึกษาถึงการจัดการความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่า โดยจะลงถึงรายละเอียดของการคำนวณค่าความเสี่ยงที่เกิดจากการเกิดฟ้าผ่า รวมถึงทำการออกแบบโปรแกรมประเมินความเสี่ยงตามมาตรฐาน IEC 62305 – 2 เพื่อลดความยุ่งยากและช่วยในการคำนวณหาค่าความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าและนำไปใช้พิจารณาระดับของการป้องกัน และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของการทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยมีการทดสอบ 2 ลักษณะคือการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์และจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ของตัวนำล่อฟ้าที่ทำจากวัสดุและมีรูปทรงที่ต่างชนิดกัน เนื่องจากมีการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL ในการวิเคราะห์แผ่นอิเล็กโตรดพบว่าแผ่นอิเล็กโตรดขนาด Ø 1.2 m. นั้นมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งได้ทำการ ดังนั้นเราจึงได้ทำการทดสอบว่าเมื่อแผ่นอลูมิเนียมมีขนาดเพิ่มขึ้น แล้วผลของค่าแรงดันและจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้ามีผลอย่างไร เพื่อจะนำมาจัดทำเป็นเป็นองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าที่เป็นภาษาไทยเพื่อเผยแพร่ให้กับบุคคลที่สนในในเรื่องนี้ได้ทำการศึกษาต่อไป



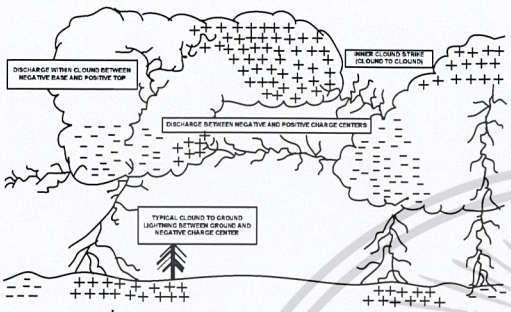
รูปที่ 1 แผนภาพการดำเนินงานตลอดปีการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า [9]

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากการเก็บสะสมประจุของก้อนเมฆ เมื่อก้อนเมฆมีประจุมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤติ จะทำให้อากาศสูญเสียสภาพการเป็นฉนวน และประจุจะถูกถ่ายเทจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน การถ่ายเทประจุนี้เองที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าดังรูปที่ 2

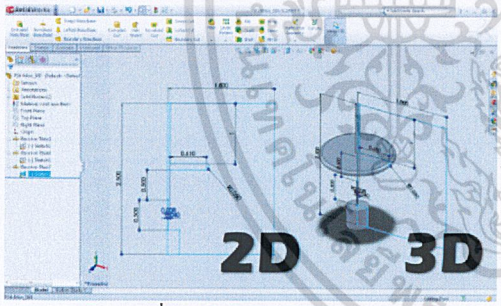


รูปที่ 2 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

2.2 การศึกษาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 SolidWorks

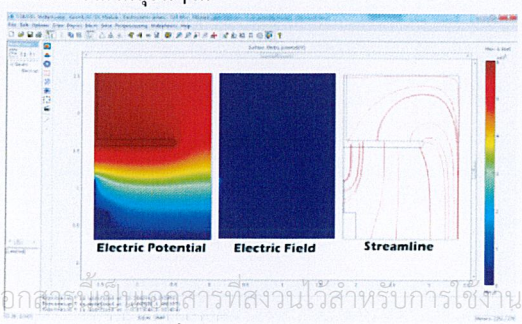
เป็นโปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างวัตถุจำลอง โดยสามารถใช้งานได้ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ ซึ่งวัตถุที่สร้างจากโปรแกรม SolidWorks นั้นสามารถนำไปใช้งานในโปรแกรมอื่นๆได้



รูปที่ 3 โปรแกรม SolidWorks

2.3.2 COMSOL

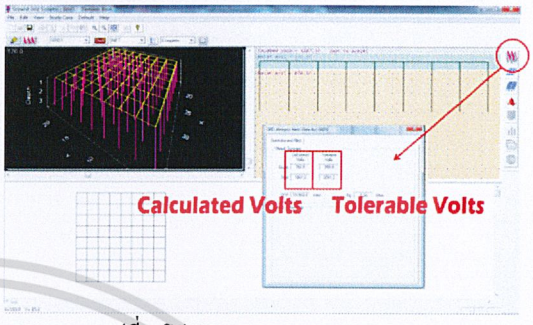
เป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองสภาพทั้งทางกล ทางความร้อน และทางไฟฟ้า โดยสามารถจำลองทั้งค่าแรงดัน สภาพสนามไฟฟ้า เส้นทางเดินไฟฟ้า ฯลฯ โดยตัวโปรแกรมสามารถวาดหรือนำเข้าไฟล์ที่รองรับจากโปรแกรมวาดวัตถุอื่นๆได้



รูปที่ 4 โปรแกรม COMSOL

2.3.3 ETAP Power Station

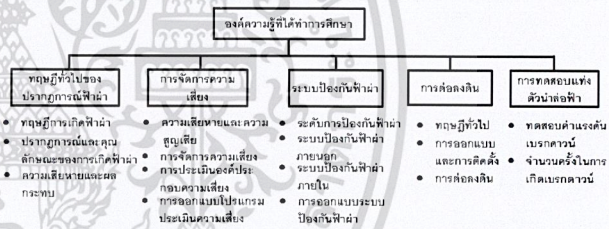
เป็นโปรแกรมจำลองระบบวงจรไฟฟ้า โดยสามารถวางระบบและ Single-line Diagram ของระบบไฟฟ้าพร้อมทั้งคำนวณหาความผิดปกติในระบบไฟฟ้าจากสถานการณ์ต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ เพื่อวิเคราะห์ว่าระบบดังกล่าวเหมาะสมแก่การใช้งานหรือไม่



รูปที่ 5 โปรแกรม ETAP Power Station

3. องค์ความรู้ที่ได้ทำการศึกษา [1-8]

จากการศึกษาองค์ความรู้ที่ได้จากมาตรฐานทั้งในและต่างประเทศสามารถสรุปเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6



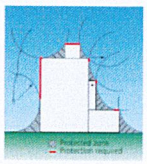
รูปที่ 6 ไดอะแกรมองค์ความรู้ที่ได้ทำการศึกษา

จากรูปที่ 6 ได้ทำการศึกษาทฤษฎีที่สำคัญเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตั้งแต่ลักษณะของการเกิด ความเสียหายและผลกระทบจากความเสียหายจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า นำไปสู่การค้นคว้าเกี่ยวกับการบริหารและจัดการความเสี่ยงที่เป็นผลจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

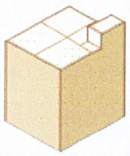
จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่ได้ศึกษาตามหัวข้อแรกนำไปสู่การศึกษาวิธีการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงต่อปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ได้ทำการออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเทียบกับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป เป็นการศึกษาการวิธีการและขั้นตอนการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าตั้งแต่การเลือกระดับการป้องกันไปจนถึงรายละเอียดการติดตั้งสำหรับระบบป้องกัน รวมถึงได้ศึกษาวิธีการต่างๆที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 7

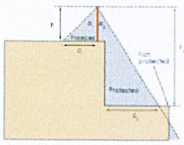
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



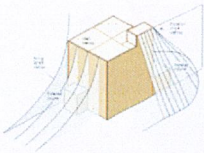
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7 ประเภทของการป้องกันฟ้าผ่า

การต่อลงดินเป็นส่วนสำคัญหลักในระบบป้องกันฟ้าผ่าหากการออกแบบระบบต่อลงดินไม่ดี มีการเลือกใช้วิธีที่ไม่เหมาะสมทำให้ค่าความต้านทานดินมีค่าสูงส่งผลต่อการนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินจึงต้องทำการศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดิน จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเรื่องการต่อลงดินได้จำลองสภาพการต่อลงดินโดยใช้โปรแกรม ETAP ทำการจำลองโดยใส่แฟกเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องลงไปและทำการวิเคราะห์จนได้วิธีการต่อลงดินที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแท่งตัวนำล่อฟ้าโดยการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์และจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ในเรื่องของชนิดและรูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า โดยนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m

4. การประเมินความเสี่ยง [2]

การประเมินความเสี่ยงเป็นขั้นตอนเริ่มแรกในการที่จะป้องกันสิ่งปลูกสร้างจากความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ในการจัดการความเสี่ยงลักษณะของสิ่งปลูกสร้าง ปัจจัยแวดล้อมของสิ่งปลูกสร้าง และปัจจัยอื่นๆจะมีผลต่อค่าความเสี่ยงที่คำนวณได้ทั้งสิ้น

4.1 เหตุผลที่ต้องมีการจัดการความเสี่ยง

ในการประเมินความเสี่ยงนั้นจุดประสงค์หลักๆของการประเมินคือความปลอดภัยและความคุ้มทุน โดยในด้านความปลอดภัยการประเมินความเสี่ยงจะทำให้ทราบว่าสิ่งปลูกสร้างที่เราพิจารณานั้นควรที่จะมีการป้องกันหรือไม่ ถ้าควรจะต้องมีการป้องกันที่ระดับการป้องกันเท่าใด ส่วนด้านความคุ้มทุนจะประเมินโดยเปรียบเทียบการใช้เงินลงทุนในการป้องกันกับไม่มีการป้องกันแล้วเกิดความเสียหายสิ่งไหนที่มีมูลค่ามากกว่ากัน แล้วนำมาพิจารณาความจำเป็นในการป้องกัน

4.2 ขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยง

เนื่องจากจุดประสงค์หลักของการประเมินความเสี่ยงมี 2 วิธี ดังนั้นขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยงจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยคือ

4.2.1 ด้านความปลอดภัย

1) ระบุลักษณะของสิ่งปลูกสร้าง

2) ระบุประเภทของความสูญเสีย

3) คำนวณค่าองค์ประกอบความเสี่ยงและค่าความเสี่ยง

4) เปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้

4.2.2 ความคุ้มทุน

1) ระบุค่าใช้จ่ายทั้งหมดของสิ่งปลูกสร้าง

2) คำนวณค่าองค์ประกอบความเสี่ยงที่เกี่ยวข้อง

3) คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีหากเกิดความสูญเสียทั้งหม

4) คำนวณค่าใช้จ่ายต่อปีในการป้องกัน

5) เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย

4.3 การนำค่าความเสี่ยงที่ได้ไปใช้งาน

เมื่อคำนวณค่าความเสี่ยงจากขั้นตอนข้างต้นได้แล้วนั้น การนำไปใช้ในการป้องกันด้านความปลอดภัยจะทำได้โดยนำค่าที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่สามารถยอมรับได้ ถ้ามีค่าต่ำกว่าระดับการป้องกันที่ใช้ในการคำนวณความเสี่ยงนั้นจะสามารถนำไปใช้ในการป้องกันสิ่งปลูกสร้างได้ ส่วนด้านความคุ้มทุนถ้าค่าใช้จ่ายต่อปีในการป้องกันมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายต่อปีหากเกิดความสูญเสีย การติดตั้งการป้องกันในสิ่งปลูกสร้างนั้นๆจะคุ้มค่า

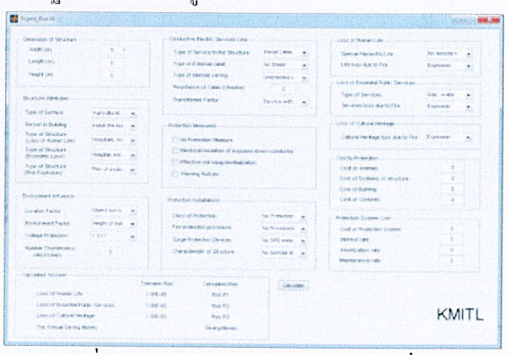
4.4 โปรแกรมวิเคราะห์ความเสี่ยง

4.4.1 การออกแบบและเขียนโปรแกรม

ในการออกแบบโปรแกรมประเมินความเสี่ยงนั้นได้ทำตามมาตรฐาน IEC 62305-2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียน ซึ่งโปรแกรมนี้ได้ทำขึ้นมาเพื่อใช้ช่วยในการคำนวณค่าความเสี่ยง เพื่อลดความยุ่งยากในการประเมินความเสี่ยง โดยที่จะรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และข้อมูลอื่นๆ จากผู้ใช้นำมาคำนวณออกมาเป็นค่าความเสี่ยงซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้

4.4.2 ผลที่ได้จากการใช้งาน

ค่าความเสี่ยงที่คำนวณได้จากโปรแกรมประเมินความเสี่ยงเป็นเพียงค่าเบื้องต้นสำหรับนำมาพิจารณาการเลือกระดับการป้องกันเท่านั้นอาจมีความคาดเคลื่อนจากค่าจริง เนื่องจากมีการละเลยปัจจัยบางค่าเพื่อที่ง่ายต่อการป้อนข้อมูล โดยค่าที่ได้จะนำมาเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานของ IEC ดังรูปที่ 8

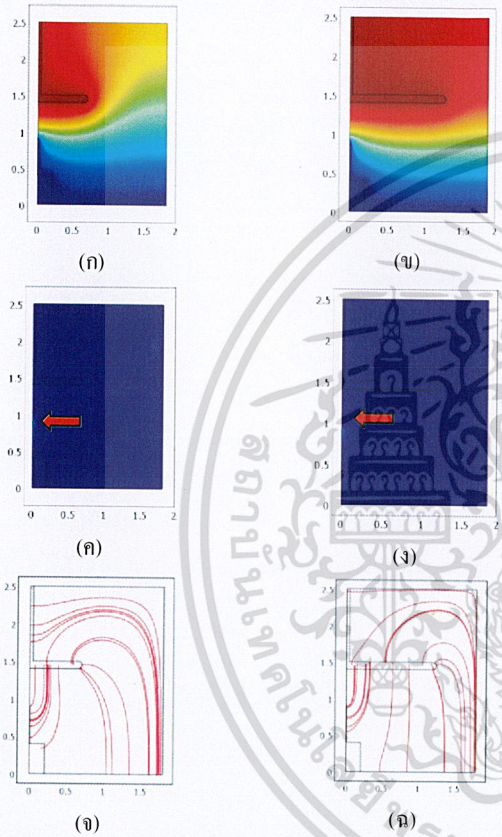


รูปที่ 8 หน้าต่างโปรแกรมประเมินความเสี่ยง

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้า [9,10]

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เรื่องคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาล่อฟ้าชนิดต่างๆ นั้นได้ทำการทดสอบกับแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.2 m. เมื่อนำไปจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์แล้วพบว่าแผ่นอิเล็กโตรดไม่มีความสม่ำเสมอทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบแผ่นอิเล็กโตรดให้มีขนาด 2.4 m. เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ามากขึ้น แล้วทำการทดสอบเพื่อดูค่าแรงดันเบรกดาวน์และจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำ

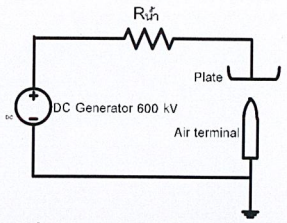


รูปที่ 9 การจำลองสภาพทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม COMSOL

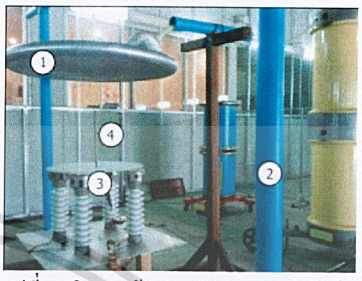
5.1 การทดสอบและอุปกรณ์ในการทดสอบ

การทดสอบจะทำโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแผ่นอิเล็กโตรดและเพิ่มแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆจนเกิดการเบรกดาวน์ และบันทึกค่าแรงดันที่เกิดการเบรกดาวน์นั้น ซึ่งมีวงจรในการทดสอบและการจัดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 โดยอุปกรณ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมลักษณะวงกลมขอบโค้งแบบโรกอฟสกีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m.
2. เสาโครงสร้างและคานทำจากวัสดุ Polyvinyl chloride (PVC) โดยมีส่วนฐานเป็นเหล็ก
3. ฐานรองรับแท่งตัวนำล่อฟ้า
4. แท่งตัวนำสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 10 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 11 โครงสร้างชุดทดสอบตัวนำล่อฟ้า

5.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกัน

การทดสอบแท่งตัวนำล่อฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ความยาว 500 mm ที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน วัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำล่อฟ้าคือ 1) ทองแดง 2) อลูมิเนียม และ 3) ดีบุก ดังรูปที่ 12 โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ



รูปที่ 12 แท่งตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน

5.2.1 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าปลายมนที่มีวัสดุต่างชนิดกันที่ระยะต่างๆ แต่ละระยะเป็นจำนวน 5 ครั้งด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเพื่อดูค่าแรงดันเบรกดาวน์ ซึ่งได้แสดงเป็นค่าเฉลี่ยดังในตารางที่ 1-2 และนำมาเปรียบเทียบกันได้ดังรูปที่ 13

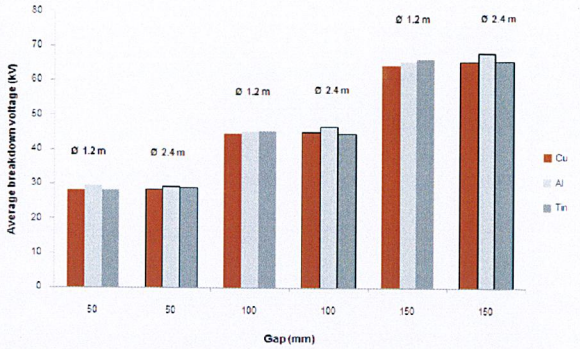
ตารางที่ 1 *กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียม 1.2 m*

วัสดุตัวนำล่อฟ้า	ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยที่ระยะแกปต่างๆ (kV)					
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
ทองแดง	28.32	44.68	64.59	88.33	112.30	135.02
อลูมิเนียม	29.65	45.32	65.56	88.31	110.93	133.83
ดีบุก	28.18	45.52	66.29	89.92	112.58	133.81

ตารางที่ 2 *กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียม 2.4 m*

วัสดุตัวนำล่อฟ้า	ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยที่ระยะแกปต่างๆ (kV)					
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
ทองแดง	28.29	45.01	65.41	87.92	110.98	132.80
อลูมิเนียม	29.25	46.62	67.93	91.58	112.66	134.21
ดีบุก	28.33	44.63	65.73	91.78	109.76	135.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



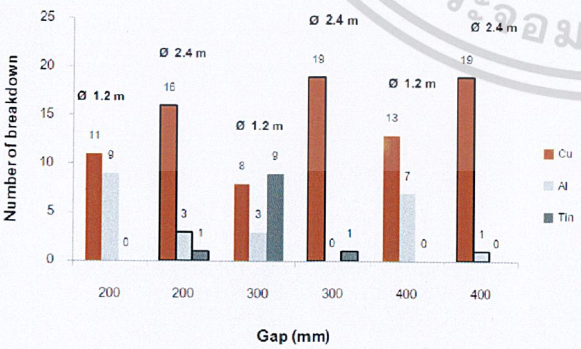
รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาด 1.2 และ 2.4 m.

จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์จากแผ่นอิเล็กโตรดทั้ง 2 ขนาดในวัสดุแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้จากตำแหน่งของตัวนำที่วาง ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นอิเล็กโตรดผลที่ได้คือค่าแรงดันเบรกดาวน์ใกล้เคียงกันบ่งบอกว่ากึ่งกลางของแผ่นทั้งสองขนาดตัวนำมีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ

5.2.2. ทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์โดยป้อนแรงดันทดสอบที่ระยะต่างๆ 20 ครั้ง ซึ่งการทดลองทั้ง 2 ลักษณะจะทำการทดลองในแผ่นอลูมิเนียมทั้ง 2 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 14

ตารางที่ 3 *การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้ากรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาด 1.2 และ 2.4 m.*

วัสดุแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์					
	200 mm		300 mm		400 mm	
	Ø 1.2 m	Ø 2.4 m	Ø 1.2 m	Ø 2.4 m	Ø 1.2 m	Ø 2.4 m
ทองแดง	11	16	8	19	13	19
อลูมิเนียม	9	3	3	0	7	1
ดีบุก	0	1	9	1	0	0



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาด 1.2 และ 2.4 m.

จากผลการทดสอบจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ของวัสดุแต่ละชนิดพบว่าเมื่อทำการทดสอบโดยใช้แผ่นอิเล็กโตรด ø 1.2 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันขณะที่อิเล็กโตรดø 2.4 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์จะเป็นไปในทิศทางเดียว จึงสรุปได้ว่าการทดลองในลักษณะนี้ขนาดที่แตกต่างกันของแผ่นอิเล็กโตรดมีผลต่อจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ และทำให้สรุปได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำจากทองแดงสามารถล่อฟ้าได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น

5.3 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าที่มีรูปร่างต่างกัน

การทดสอบใช้แท่งตัวนำล่อฟ้าวัสดุทองแดงขนาด 500 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ทั้งหมด 3 รูปแบบคือ 1) ปลายมน 2) ปลายแหลม และ 3) ปลายแฉก ดังรูปที่ 15 โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ



รูปที่ 15 แท่งตัวนำล่อฟ้าที่ทำจากทองแดงโดยมีรูปร่างที่ต่างกัน

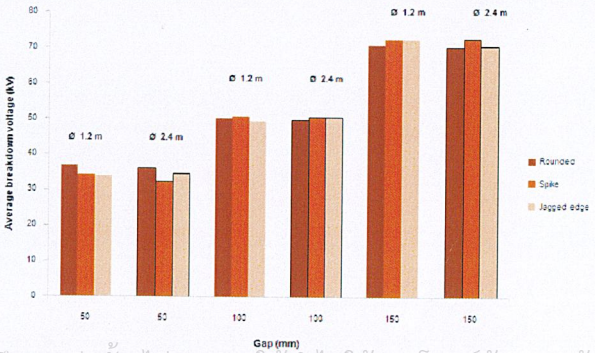
5.3.1 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าทั้ง 3 รูปแบบที่ระยะต่างๆ แต่ละระยะเป็นจำนวน 5 ครั้งด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเพื่อดูค่าแรงดันเบรกดาวน์ ซึ่งได้แสดงเป็นค่าเฉลี่ยดังในตารางที่ 4-5 และนำมาเปรียบเทียบกันได้ดังรูปที่ 16

ตารางที่ 4 *กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียม 1.2 m*

รูปแบบตัวนำล่อฟ้า	ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยที่ระยะแกปต่างๆ (kV)					
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
ปลายมน	36.94	50.03	70.87	92.50	115.49	135.90
ปลายแหลม	34.36	50.78	72.47	94.17	117.25	137.44
ปลายแฉก	33.95	49.43	72.79	92.45	115.63	137.37

ตารางที่ 5 *กรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียม 2.4 m*

รูปแบบตัวนำล่อฟ้า	ค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยที่ระยะแกปต่างๆ (kV)					
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
ปลายมน	36.18	49.81	70.18	92.38	113.84	135.33
ปลายแหลม	32.25	50.38	72.63	91.60	114.82	136.31
ปลายแฉก	34.50	50.55	70.40	92.85	115.27	136.09



รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาด 1.2 และ 2.4 m.

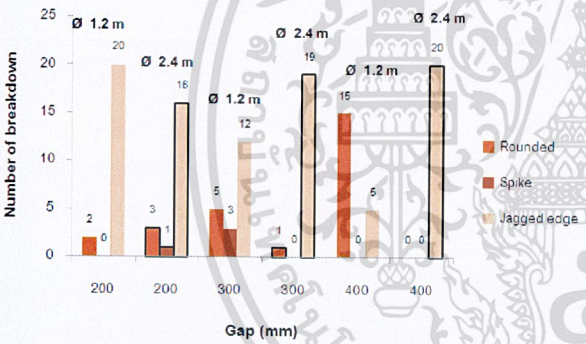
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์จากแผ่นอิเล็กโตรดทั้ง 2 ขนาดในรูปแบบที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้จากตำแหน่งของตัวนำที่วาง ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นอิเล็กโตรดผลที่ได้คือค่าแรงดันเบรกดาวน์ใกล้เคียงกันบ่งบอกว่ากึ่งกลางของแผ่นทั้งสองขนาดตัวนำมีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ

5.3.2. ทดสอบเปรียบเทียบจำนวนครั้งของการเกิดเบรกดาวน์โดยป้อนแรงดันทดสอบที่ระยะต่างๆ 20 ครั้ง ซึ่งการทดลองทั้ง 2 ลักษณะจะทำการทดลองในแผ่นอลูมิเนียมทั้ง 2 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 และ 2.4 m ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 17

ตารางที่ 6 *การเปรียบเทียบจำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์ของแท่งตัวนำล่อฟ้ากรณีแผ่นอิเล็กโตรดอลูมิเนียมขนาด 1.2 และ 2.4 m.*

รูปแบบแท่งตัวนำล่อฟ้า	จำนวนครั้งในการเกิดเบรกดาวน์					
	200 mm		300 mm		400 mm	
	Ø 1.2 m	Ø 2.4 m	Ø 1.2 m	Ø 2.4 m	Ø 1.2 m	Ø 2.4 m
ปลายมน	2	3	5	1	15	0
ปลายแหลม	0	1	3	0	0	0
ปลายแฉก	20	16	12	19	5	20



รูปที่ 17 กราฟเปรียบเทียบจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมขนาด 1.2 และ 2.4 m.

จากผลการทดสอบจำนวนครั้งที่เบรกดาวน์ของรูปแบบต่างๆ ชนิดพบว่าเมื่อทำกาทดสอบโดยใช้แผ่นอิเล็กโตรด ø 1.2 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันขณะที่อิเล็กโตรดø 2.4 m. จำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์จะเป็นไปในทิศทางเดียว จึงสรุปได้ว่าการทดลองในลักษณะนี้ขนาดที่แตกต่างกันของแผ่นอิเล็กโตรดมีผลต่อจำนวนครั้งการเกิดเบรกดาวน์ และทำให้สรุปได้ว่าแท่งตัวนำล่อฟ้าที่ลักษณะหัวแฉกสามารถล่อฟ้าได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น

6. สรุป

จากการศึกษามาตรฐานทั้งในและต่างประเทศทได้องค์ความรู้ทั้งหมดเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในส่วนแรกกล่าวถึงทฤษฎีที่สำคัญเกี่ยวกับฟ้าผ่าโดยเน้นหัวข้อความเสียหายและผลกระทบจากฟ้าผ่าจึงนำไปสู่การค้นคว้าเกี่ยวกับการบริหารและจัดการความเสี่ยงเพื่อหาวิธีการป้องกัน เมื่อทราบถึงวิธีการประเมินและวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจึงได้ออกแบบโปรแกรมสำหรับประเมินความเสี่ยงขึ้นผลที่ได้จากการประมวลผลจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ซึ่งโปรแกรมประเมินความเสี่ยงได้ออกแบบตามมาตรฐาน IEC 62305-2 วัตถุประสงค์ของโปรแกรมออกแบบมาเพื่อง่ายต่อการใช้งาน และเหมาะแก่ผู้ที่ต้องการประเมินความเสี่ยงอย่างรวดเร็ว

ส่วนการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ทั้งชนิดของวัสดุและรูปแบบที่ต่างกันของแท่งตัวนำล่อฟ้าจะได้ผลการทดสอบออกมาในลักษณะเดียวกัน คือค่าแรงดันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการทดลองในลักษณะนี้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าสม่ำเสมอทำให้แรงดันเบรกดาวน์ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนในการทดลองหาจำนวนครั้งเบรกดาวน์จะพบว่าที่แผ่นอิเล็กโตรดขนาด ø 1.2 เมตร จะมีจำนวนครั้งการเบรกดาวน์ที่ไม่สามารถคาดเดาได้เนื่องจากมีผลกระทบของความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าจากด้านข้างและจากการทดลองด้วยแผ่นอิเล็กโตรดขนาด ø 2.4 เมตรจะสามารถสรุปได้ว่างตัวนำที่ทำจากทองแดงและมีรูปทรงแบบปลายแฉกจะล่อฟ้าได้ดีสุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง (HVES) และศูนย์วิจัยทางพลังงานและวิศวกรรมการส่องสว่าง (ESIRC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและKML TECHNOLOGY CO., LTD ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ สุดท้ายขอขอบคุณ ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่คอยให้คำแนะนำในการทำโครงงานชิ้นนี้ตลอดมาจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] IEC 62305-1, "Protection against lightning – General principles" ,First edition 2006-1

[2] IEC 62305-2, "Protection against lightning – Risk management" ,First edition 2006-1

[3] IEC 62305-3, "Protection against lightning – Physical damage to structure and life hazard" ,First edition 2006-1

[4] IEC 62305-4, "Protection against lightning – Genaral principles" ,First edition 2006-1

[5] IEEE Std.142-1991, "IEEE Recommended Practice for Grounding of industrial and commercial Power system" ,June 27,1991, page 110 - 112

[6] EN 50164, "Lightning protection components (LPC)- Part 1: Requirements for connection components",2006

[7] BS 6651, "Code of practice for protection of structures againstlightning"

[8] NFPA, "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems",2008 edition.

[9] สำรวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" ,มีนาคม ,2549

[10] ศรัณย์ ชิวหวิทรัพย์,"คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสาล่อฟ้าชนิดต่างๆ", วิทยานิพนธ์ ,2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายธริสร แสงชลินทร์
เกิดวันที่ 30 สิงหาคม 2531
ที่อยู่ 57/36 ซอยประชาชื่น 14 หมู่บ้านชื่นกมลนิเวศน์ 1
ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กทม. 10210
E-mail cheer.for.gears@gmail.com
Tel. 087-911-8648



นายธเนศ สุขสถาน
เกิดวันที่ 25 พฤศจิกายน 2531
ที่อยู่ 159/64 หมู่ 11 ตำบลหนองละลอก อำเภอบ้านค่าย
จังหวัดระยอง 21120
E-mail yakusa_b@hotmail.com
Tel. 089-773-7064



นายธิษณะ อุดมฤกษ์ชัย
เกิดวันที่ 1 เมษายน 2531
ที่อยู่ 248 ถนนวิฑูรย์ดำริ ตำบลบ้านบึง อำเภอบ้านบึง
จังหวัดชลบุรี 20170
E-mail spider_b01@hotmail.com
Tel. 089-253-7075



นายนัธที วงศ์พยัคฆ์
เกิดวันที่ 20 กันยายน 2531
ที่อยู่ 138 หมู่ 6 ตำบลพลงตาเอี่ยม อำเภอวังจันทร์
จังหวัดระยอง 21210
E-mail appointment_@live.com
Tel. 081-915-9997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้