

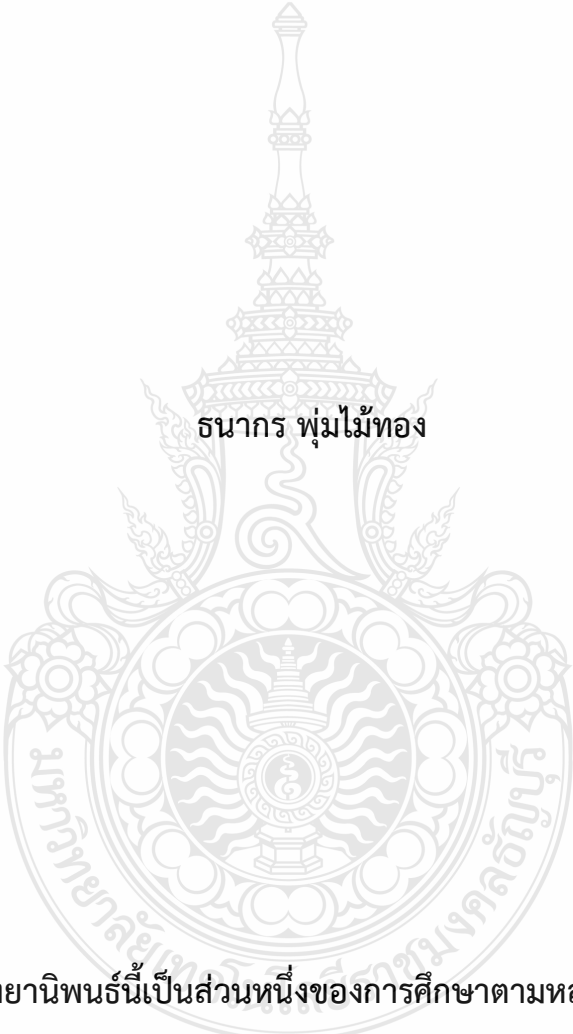
การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอีและชนิด
แท่งแฟรงกลิน ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน

COMPARATIVE ANALYSIS OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS
BETWEEN THE ESE ROD TYPE AND THE FRANKLIN ROD TYPE
OF ON-GROUND PV POWER PLANT

ธนากร พุ่มไม้ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอีและชนิด
แท่งแฟรงกลิน ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน



ธนากร พุ่มไม้ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอีและชนิด
แท่งแฟรงกลิน ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน

Comparative Analysis of Lightning Protection Systems between the ESE
Rod Type and the Franklin Rod Type of On-Ground PV Power Plant

ชื่อ - นามสกุล

นายชนากร พุ่มไม้ทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

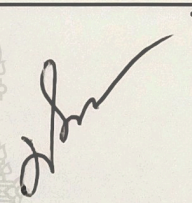
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.

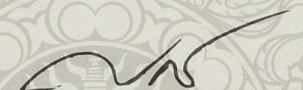
ปีการศึกษา


2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

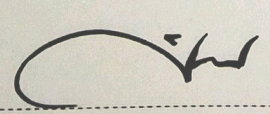

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 26 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอีและชนิดแท่งแฟรงกลิน ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน
ชื่อ – นามสกุล	นายธนากร พุ่มไม้ทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์บุญยั้ง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอีและชนิดแท่งแฟรงกลิน ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่าและเปรียบเทียบเศรษฐศาสตร์เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการพิจารณาด้านการลงทุนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในการเลือกใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่า

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดแท่งอีเอสอีและชนิดแท่งแฟรงกลิน ของโรงไฟฟ้าหนองหญ้าปล้อง ขนาด 8 เมกะวัตต์ ซึ่งพื้นที่ติดตั้ง 95 ไร่ ของจังหวัดเพชรบุรี ด้วยวิธีการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอี จำนวน 11 จุด มีรัศมีป้องกัน 107 เมตรต่อจุด ขณะที่ระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งแฟรงกลิน ต้องใช้จำนวน 122 จุด รัศมีป้องกัน 21.4 เมตรต่อจุด พร้อมเก็บสถิติฟ้าผ่าจริง ปี 2559-2563 ของระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอี และพร้อมทั้งวิเคราะห์เปรียบเทียบด้านเศรษฐศาสตร์

ผลการวิจัยพบว่าระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอี มีต้นทุนในการติดตั้ง 1,573,336 บาท ขณะที่ระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งแฟรงกลิน ต้นทุนในการติดตั้ง 6,798,023 บาท และผลกระทบที่เกิดจากการบังเงาของระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งอีเอสอี มีผลกระทบน้อยกว่าระบบป้องกันฟ้าผ่า ชนิดแท่งแฟรงกลิน ร้อยละ 0.09 ทั้งพบวาสสถิติฟ้าผ่าในโรงไฟฟ้าหนองหญ้าปล้อง จำนวน 3 ครั้ง ในรอบ 5 ปี ซึ่งสามารถป้องกันวัสดุอุปกรณ์และสิ่งปลูกสร้างภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ

คำสำคัญ : ระบบป้องกันฟ้าผ่า แท่งอีเอสอี แท่งแฟรงกลิน โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Thesis Title	Comparative Analysis of Lightning Protection Systems between the ESE Rod Type and the Franklin Rod Type of On-Ground PV Power Plant
Name - Surname	Mr. Thanakorn Pummaitong
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Boonyang Plangklang, Dr.-Ing.
Academic Year	2020

ABSTRACT

This thesis presents a comparative analysis of lightning protection systems between the Early Streamer Emission (ESE) rod type and the Franklin rod type of on-ground PV power plant. It aimed to compare lightning protection systems and study economic comparison for the consideration on investment of the on-ground PV power plant in terms of selecting a lightning protection system.

The study was the comparative analysis of lightning protection systems of on-ground PV power plants between the ESE rod type and the Franklin rod type of a selected 8 MW Nong Ya Plong power plant situated in the area of 152,000 sq. m. in Phetchaburi province. The study used the lightning protection system's design method which consisted of 11 ESE rods, with a protection radius of 107 meters per rod, whereas the Franklin rod type required 122 rods, with a protection radius of 21.4 meters per rod. The real monitored data of lightning on the ESE rod type from 2016 to 2020 was collected and the economic comparative analysis was carried out.

The research results showed that the ESE rod type had the installation cost of 1,573,336 Baht while the Franklin rod type had the installation cost of 6,798,023 Baht. The ESE rod type produced 0.09% less shading effect than the Franklin rod type. It also revealed the record of lightning in the Nong Ya Plong PV power plant 3 times in 5 years. It was suggested that the ESE rod type could protect materials, equipment, and buildings of the on-ground PV power plant, without causing any damage to the equipment.

Keywords: lightning protection system, ESE rod, Franklin rod, PV power plant

กิตติกรรมประกาศ

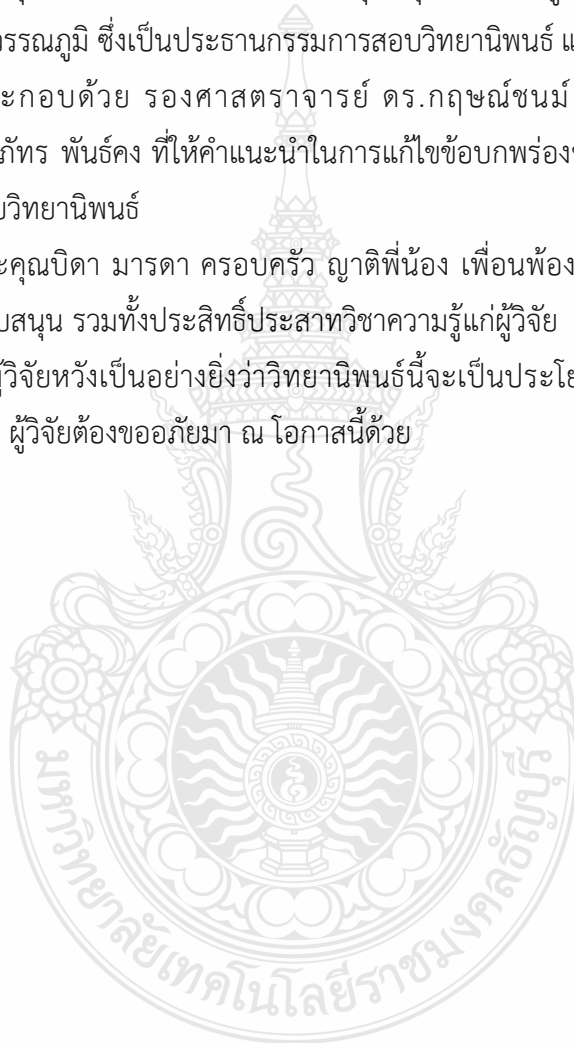
วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์และเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนพ้องและคณะครู-อาจารย์ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน รวมทั้งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ธนากร พุ่มไม้ทอง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	12
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	12
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	13
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	13
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 บทนำ.....	14
2.2 ทฤษฎีฟ้าผ่า.....	14
2.3 ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่า.....	17
2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	19
2.5 ความต้านทานทรานสเวอเรียล.....	24
2.6 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์.....	27
2.7 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.2 ข้อมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่างานวิจัย.....	41
3.3 การออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 หัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT).....	43
3.5 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า(ESE) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	44
3.6 หัวล่อฟ้าแห่งตัวนำ (Lightning Franklin Rods).....	52
3.7 การจำลองผลกระทบจากเงาของเสาหล่อฟ้าด้วยโปรแกรม PVSYST.....	59
3.8 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	60
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	61
4.1 บทนำ.....	61
4.2 ผลการจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PVSYST.....	61
4.3 การคำนวณต้นทุนระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวล่อฟ้าชนิด ESE.....	68
4.4 การคำนวณต้นทุนระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal	69
4.5 การเปรียบเทียบด้านเศรษฐศาสตร์ของต้นทุนในการออกแบบระบบล่อฟ้าของหัวล่อฟ้าชนิด ESE กับระบบป้องกันฟ้าผ่าชนิดมุมป้องกัน ของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal	71
4.6 ผลจากการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของหัวล่อฟ้าชนิด ESE.....	74
4.7 บทสรุป.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 บทนำ.....	78
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	78
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก รายละเอียดอุปกรณ์.....	74
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	104

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 รัศมีการป้องกันของหัวล่อฟ้า.....	43
ตารางที่ 4.1 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาล่อฟ้าของหัวล่อฟ้าชนิด ESE.....	61
ตารางที่ 4.2 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงระบบกราวด์ของหัวล่อฟ้าชนิด ESE.....	61
ตารางที่ 4.3 ต้นทุนรวมวัสดุเสาล่อฟ้าและระบบกราวด์ของล่อฟ้า ESE.....	61
ตารางที่ 4.4 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาป้องกันฟ้าผ่าของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal.....	62
ตารางที่ 4.5 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาป้องกันฟ้าผ่าของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal.....	62
ตารางที่ 4.6 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาป้องกันฟ้าผ่าของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal.....	63
ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายวัสดุเสาป้องกันฟ้าผ่า.....	63
ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายวัสดุระบบกราวด์.....	64
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบต้นทุนรวมของระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	66
ตารางที่ 4.10 การเกิดฟ้าผ่าบนพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	68

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้น..... 14
รูปที่ 2.2	ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าลง..... 15
รูปที่ 2.3	คลื่นกระแสฟ้าผ่าแบบชั่ววอกหรือลบผ่าครั้งเดียว (ก) คลื่นกระแสฟ้าผ่าแบบชั่ว ลบผ่าหลายครั้ง..... 15
รูปที่ 2.4	คลื่นกระแสฟ้าผ่า..... 16
รูปที่ 2.5	ลักษณะการออกแบบและตารางขนาดระดับการป้องกันของทรงกลมกึ่งและตาข่าย 19
รูปที่ 2.6	กราฟระดับการป้องกันแบบมุ่มป้องกัน..... 20
รูปที่ 2.7	ลักษณะการออกแบบระบบป้องกันแบบมุ่มป้องกัน..... 20
รูปที่ 2.8	ความสูงของแท่งตัวนำกับระยะการป้องกันของระบบมุ่มป้องกัน..... 21
รูปที่ 2.9	วิธีการของทรงกลมกึ่ง..... 22
รูปที่ 2.10	ระบบป้องกันแบบตาข่าย..... 23
รูปที่ 2.11	ลักษณะการออกแบบระบบป้องกันของ ESE..... 24
รูปที่ 2.12	รากสายดินลักษณะแนวตั้ง..... 27
รูปที่ 2.13	รากสายดินลักษณะแนวนอน..... 27
รูปที่ 2.14	หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์..... 28
รูปที่ 2.15	การเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยการเพิ่มเซลล์..... 29
รูปที่ 2.16	โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์..... 29
รูปที่ 2.17	เซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (ข) ชนิดผลึกรวมซิลิคอน 30
รูปที่ 2.18	การตอบสนองของสเปกตรัมแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด..... 31
รูปที่ 2.19	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์..... 31
รูปที่ 2.20	ค่ากระแสไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์..... 32
รูปที่ 2.21	ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร..... 32
รูปที่ 2.22	ค่าของความต้านทานอนุกรมที่มีผลต่อลักษณะกระแสและแรงดัน..... 33
รูปที่ 2.23	ค่าของความต้านทานขนานที่มีผลต่อลักษณะกระแสและแรงดัน..... 33

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.24	กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิและความเข้มแสงค่าต่าง ๆ..... 33
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 40
รูปที่ 3.2	โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน ขนาดพื้นที่ 95 ไร่..... 41
รูปที่ 3.3	Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 1..... 42
รูปที่ 3.4	Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 2..... 42
รูปที่ 3.5	Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 3..... 43
รูปที่ 3.6	หัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT)..... 44
รูปที่ 3.7	แบบการคำนวณระยะป้องกันของหัวล่อฟ้า (ESE)..... 45
รูปที่ 3.8	การติดตั้งเสาล่อฟ้าแบบ (ESE)..... 46
รูปที่ 3.9	การออกแบบเสาหัวล่อฟ้าที่ความสูง 9 เมตร และ 12 เมตร..... 47
รูปที่ 3.10	รายละเอียดของฐานเสาและตำแหน่งระบบกราวด์..... 48
รูปที่ 3.11	(ก) การระบบกราวด์ , (ข) จุดเชื่อมต่อแบบ 2 ทาง , (ค) จุดเชื่อมต่อแบบ 3 ทาง..... 49
รูปที่ 3.12	การเชื่อมต่อสายดินกับ LPS..... 50
รูปที่ 3.13	การวางท่อสายดินและแบบฐานเสา..... 50
รูปที่ 3.14	ระบบกราวด์โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์..... 51
รูปที่ 3.15	แท่งตัวนำล่อฟ้า (Lightning Franklin Rods)..... 52
รูปที่ 3.16	การป้องกันฟ้าผ่าแบบมุ่มป้องกัน 53
รูปที่ 3.17	การเลือกมุมป้องกันและการจัดวางตำแหน่งเสาล่อฟ้า..... 54
รูปที่ 3.18	การออกแบบเสาล่อฟ้า..... 55
รูปที่ 3.19	การออกแบบติดตั้งแท่งล่อฟ้า..... 56
รูปที่ 3.20	การออกแบบติดตั้งตัวนับจำนวนฟ้าผ่า..... 56
รูปที่ 3.21	การติดตั้งรากฐานเสาล่อฟ้า..... 57
รูปที่ 3.22	รายละเอียดการวางระบบกราวด์ของเสาล่อฟ้า..... 58
รูปที่ 3.23	การเชื่อมต่อสายระบบกราวด์..... 58
รูปที่ 3.24	การจำลองผลโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การติดตั้งหัวล่อฟ้า ESE ผลด้วยโปรแกรม PVSYST..... 59

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.24 การจำลองผลโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การติดตั้งหัวล่อฟ้า Lightning..... Franklin Rods ผล ด้วยโปรแกรม PVSYST	60
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยวัสดุของระบบเสาล่อฟ้า.....	64
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยวัสดุของระบบกราวด์ล่อฟ้า.....	65
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบต้นทุนของระบบป้องกันฟ้าผ่า.....	66
รูปที่ 4.4 การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	67
รูปที่ 4.5 ลักษณะการติดตั้งเสาล่อฟ้า.....	67
รูปที่ 4.6 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบล่อฟ้า.....	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์ประเทศไทยในปัจจุบันมีการลงทุนและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการสนับสนุนและผลักดันจากภาครัฐในการใช้พลังงานหมุนเวียนจึงทำให้นักลงทุนหันมาลงทุนการก่อสร้างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของสำนักงานกิจการพลังงานมีการรับซื้อพลังงานหมุนเวียนทั้งหมดภายในสิ้นปี 2561 เป็นจำนวน 9,886 เมกกะวัตต์ ซึ่งเป็นพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 3,250 เมกกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 32.8 [1] ซึ่งถือได้ว่ามีปริมาณมาก ดังนั้นทำให้ต้องพิจารณาการออกแบบและก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีความถูกต้องและปลอดภัย ประกอบกับพื้นที่ประเทศไทยมีสภาพอากาศลักษณะพื้นที่ร้อนชื้นและมีรสุมบ่อยทำให้การออกแบบติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จึงต้องคำนึงถึงระบบป้องกันฟ้าผ่า

การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีด้วยกันหลายรูปแบบตามหลักการทำงานของระบบป้องกันแต่ละชนิดแต่ละทฤษฎีของผู้คิดค้น แต่สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยนิยมใช้การออกแบบติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าอยู่ 2 แบบ คือ แบบแท่งฟาราเดย์ และแบบแท่งอีเอสอี ซึ่งจากการออกแบบเลือกใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอี เนื่องจากเป็นการลงทุนที่ต่ำกว่าระบบแท่งฟาราเดย์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบ ติดตั้ง ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอี
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอี
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับด้านเศรษฐศาสตร์ของการทำงานระบบป้องกันฟ้าผ่าแท่งอีเอสอี

1.3 สมมติฐานการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE) หลักการติดตั้งที่ถูกวิธีตามมาตรฐานของฝรั่งเศส NFC 17-102 ระยะที่สามารถป้องกัน

การเกิดฟ้าผ่า รวมถึงการประเมินความสามารถในการทำงานของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบ ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอี ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน ขนาดกำลังผลิต 8,000 kW
- 1.4.2 วิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอี
- 1.4.3 วิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอีในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้งสี่แบบ
- 1.5.3 ออกแบบระบบการป้องกันระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE)
- 1.5.4 รวบรวมและจัดเก็บข้อมูลจากสถานที่จริงของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน ที่ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้งสองแบบ
- 1.5.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ การใช้งานของระบบป้องกันระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE)
- 1.5.6 สรุปและอภิปรายผล
- 1.5.7 จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทำให้ทราบข้อมูลในการออกแบบและการเลือกใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่า ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 1.6.2 ทำให้ทราบสมรรถนะการใช้งานของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอี
- 1.6.3 เป็นข้อมูลอ้างอิงในการพิจารณาเลือกชนิดระบบป้องกันฟ้าผ่า สำหรับโครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

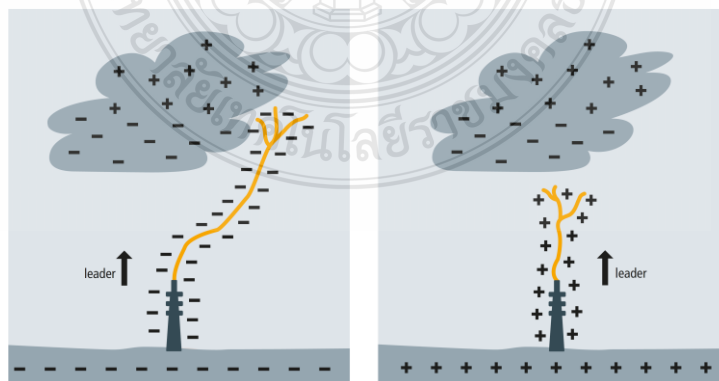
จากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยธรรมชาติของฟ้าผ่านั้นเกิดจากการรวมตัวของประจุบวกและประจุลบภายในอากาศหรือภายในก้อนเมฆ เมื่อการรวมตัวของประจุเกิดการสะสมเป็นจำนวนมากจึงเกิดความเค้นขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทประจุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หรือเรียกว่าปรากฏการณ์ฟ้าร้องฟ้าผ่าเกิดขึ้น ดังนั้นการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จึงต้องมีตัวล่อฟ้าผ่าให้มาลงที่ตัวของล่อฟ้าก่อนที่จะไปทำลายสิ่งก่อสร้าง หรือเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีทฤษฎีและวรรณกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้

2.2 ทฤษฎีฟ้าผ่า

2.2.1 การเกิดขึ้นของฟ้าผ่า

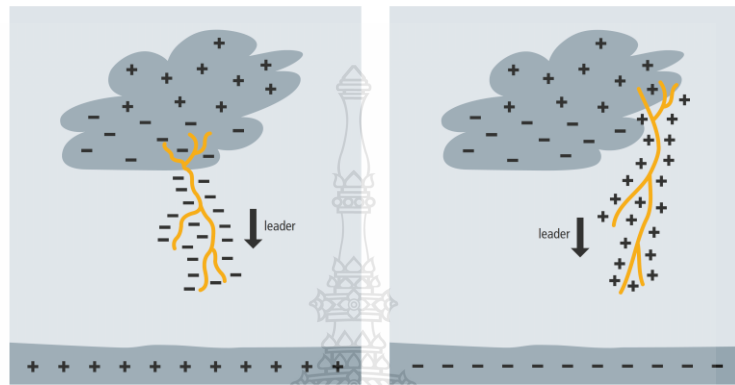
ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ โดยทั่วไปการเกิดขึ้นฟ้าผ่าจะมีประจุสะสมอยู่ในที่สูงตั้งแต่ 1.5 km ถึง 10 km เหนือพื้นดิน การรวมตัวของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆสามารถเกิดได้ทั้งประจุลบและประจุบวก เมื่อเกิดการร่วมตัวขึ้นจำนวนมากทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าขึ้นภายในก้อนเมฆ จะมีค่าประมาณ 10kV/cm การเกิดฟ้าผ่าแบ่งออกได้หลากหลาย

ฟ้าผ่าขึ้นเป็นการเกิดมีจุดเริ่มต้นที่พื้นโลก โดยจะมีประจุบวกหรือลบก่อตัวขึ้นที่หัวล่อฟ้าจากที่สูงเป็นจำนวนมาก จากนั้นได้ถ่ายเทประจุจากหัวล่อฟ้าขึ้นด้านบนก้อนเมฆดังรูปที่ 2.1 โดยปรากฏการณ์เหล่านี้ไม่ค่อยพบเจอบ่อยนัก [1]



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้น [2]

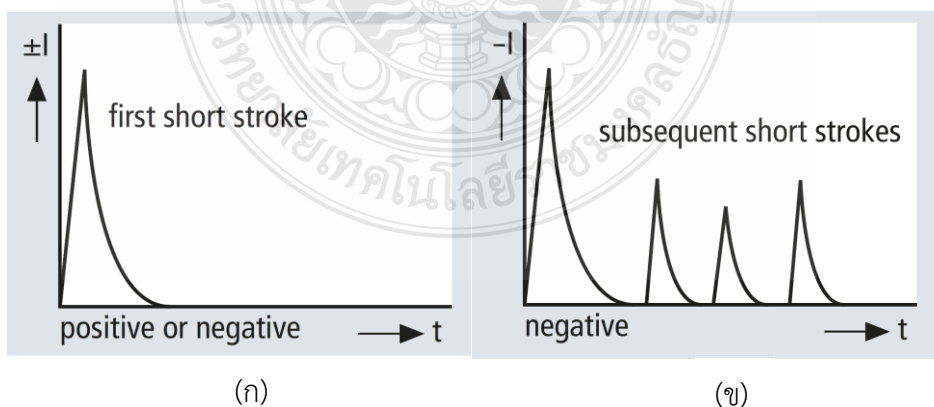
ฟ้าผ่าลงคือการรวมตัวของประจุบวกและลบที่เกิดขึ้นบนก้อนเมฆ จากนั้นได้ถ่ายเทประจุลงสู่หัวล่อฟ้า การที่ลำแสงของฟ้าผ่าได้แตกแขนงออกเนื่องจากประจุไฟฟ้านั้นจะเดินทางไปในอากาศที่มีความต้านทานต่ำ จึงทำให้เกิดทิศทางการของฟ้าผ่านั้นกำหนดไม่ได้ จึงจำเป็นต้องตั้งเสาล่อฟ้าเพื่อให้ฟ้าผ่าเดินทางมาลงที่หัวล่อฟ้าดังรูปที่ 2.2



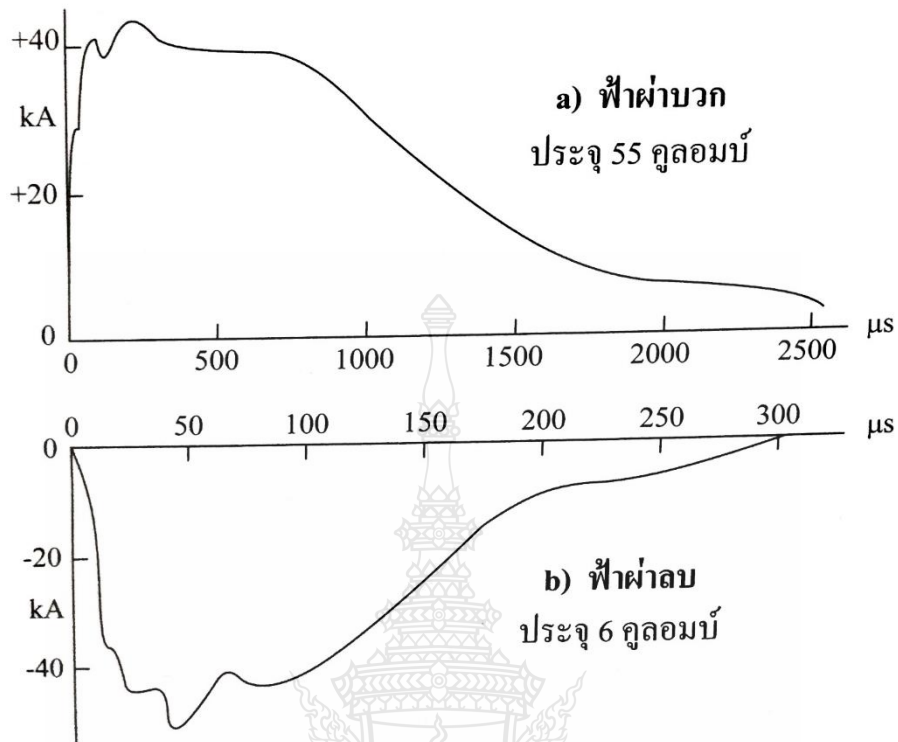
รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าลง [2]

2.2.2 ลักษณะชั่วและรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ลักษณะของฟ้าผ่าจะถูกแบ่งออกเป็นสองแบบตามประจุของไฟฟ้า โดยทั่วไปของฟ้าผ่าจะเป็นลักษณะของชั่วลบ ซึ่งมีประมาณ 80-85% จากการเก็บบันทึกรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าพบว่าลักษณะการผ่าของชั่วบวกหรือลบจะเป็นฟ้าผ่าแบบลำเดี่ยวโดยลักษณะรูปคลื่นจะเป็นดังรูปที่ 2.3 (ก) แต่เมื่อเป็นลักษณะฟ้าผ่าแบบชั่วลบจะเป็นการผ่าแบบซ้ำๆ ดังรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.3 คลื่นกระแสฟ้าผ่าแบบชั่วบวกหรือลบผ่าครั้งเดียว (ก) คลื่นกระแสฟ้าผ่าแบบชั่วลบผ่าหลายครั้ง [2]



รูปที่ 2.4 คลื่นกระแสฟ้าผ่า [3]

เนื่องด้วยการรวมตัวกันของประจุบวกที่ส่วนใหญ่แล้วจะมีการรวมตัวกันอยู่ที่ด้านบนของก้อนเมฆจึงทำให้เกิดฟ้าผ่าของรูปคลื่นประจุบวกนั้นจำเป็นจะต้องรวบรวมประจุให้มีจำนวนมากๆ ก่อนจึงจะสามารถผ่าได้ด้วยระยะทางที่ทำการถ่ายเทประจุนั้นมีระยะทางที่ไกลกว่าประจุลบดังนั้นเรามักจะเห็นการฟ้าผ่าของประจุบวกจะเป็นลำเดียวแรงมีความรุนแรงสูง เนื่องจากมีค่าของประจุมากกว่าประจุลบถึง 9 เท่าและมีระยะเวลาในการถ่ายเทประจุที่นานกว่า ถึง 9 เท่าด้วยเช่นกัน

กำหนดโดยช่วงเวลา เวลาช่วงหน้าคลื่นคือช่วงเวลาที่กระแสฟ้าผ่าเริ่มต้นจนถึงช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์สูงสุด เวลาช่วงหลังคลื่นจะเริ่มตั้งแต่กระแสเริ่มจากศูนย์จนถึงช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์เหลือครึ่งหนึ่งของค่ากระแสสูงสุด โดยอัตราการเพิ่มของกระแส จะเรียกว่าความชัน (di/dt) มีหน่วยเป็น $kA/\mu A$ ซึ่งค่าความชันของกระแสเป็นสิ่งสำคัญในการคำนึงถึงการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า[1]

2.2.3 กระแสฟ้าผ่า

ขนาดของกระแสฟ้าพ้านั้นคือ ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่า ขนาดของกระแสส่วนมากจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าที่รวมตัวกันแล้วก็การถ่ายเทประจุ ยิ่งประจุเยอะการถ่ายเทของประจุจะยิ่งสูงทำให้เกิดขนาดของกระแสสูงการหาค่ายอดของกระแสฟ้าผ่า จากสถิติของการเกิดฟ้าผ่า กระแสของฟ้าผ่าลบนั้นมีค่าสูงถึง 90 kA และกระแสขั้วบวกมีค่าสูงถึง 240 kA จากการบันทึกผลของกระแสฟ้าผ่า เพื่อ

นำมาหาค่ายอดคลื่นนั้น โดยทั่วไปจะนำค่ากระแสฟ้าผ่าของลำแรกมาคิด ซึ่งมีค่าฟังก์ชันของเวลาเท่ากับ $10/350 \mu\text{s}$ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{(t/t_1)^{10}}{1+(t/t_1)^{10}} \cdot e^{-t/\tau_2} \quad (2.1)$$

โดยที่

- I = กระแสค่ายอด
- k = สัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสค่ายอด
- t = เวลา
- τ_1 = ค่าคงที่ทางเวลาช่วงหน้าคลื่น
- τ_2 = ค่าคงที่ทางเวลาช่วงหางคลื่น

2.3 ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่า

2.3.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางด้านไฟฟ้า

ผลกระทบทางไฟฟ้าเกิดได้หลากหลายด้าน ทางด้านกายภาพ ได้แก่การเกิดเพลิงไหม้ของวัสดุ หรืออาจเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง และผลกระทบทางด้านอื่นๆ เกิดการถ่ายเทประจุจำนวนมากลงมา ทำให้เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และกระแสฟ้าผ่าผ่านระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง จึงเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแรงดันสูงขึ้นชั่วขณะ [3]

2.3.1.1 แรงดันเกินในระบบสายส่ง

การเกิดฟ้าผ่าลงบนระบบสายส่งโดยตรง สามารถทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบซึ่งฟ้าผ่าเปรียบได้ดั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เป็นเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านสายส่ง ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ Z จะเกิดแรงดันสูงคลื่นจร วิ่งไปในระบบสายส่งทั้งสองข้างของจุดที่ฟ้าผ่า เมื่อแรงดันสูงเกินกว่าที่หม้อแปลงหรืออุปกรณ์อื่นๆ จะสามารถรองรับได้จึงทำให้เกิดความเสียหาย

2.3.1.2 แรงดันเกินในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

ระบบไฟฟ้าแรงต่ำที่ใช้ในประเทศไทยมีค่าระดับแรงดันอยู่ที่ $220/380 \text{ V}$ เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายไฟฟ้าแรงต่ำจึงสามารถทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคารและบ้านเรือนเสียหายได้ เนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าสามารถทำให้เกิดแรงดันขึ้นสูงขึ้นเป็นระดับกิโลโวลต์ ซึ่งสายไฟฟ้าและอุปกรณ์เหล่านี้ไม่สามารถทนต่อแรงดันระดับนั้นได้

2.3.1.3 การรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อมีการเกิดฟ้าผ่าลงมาจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ทำให้เกิดความเสียหายทางด้านระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีความไวต่อสนามแม่เหล็กมาก

2.3.1.4 การเกิดแรงดันสปาร์ค

เมื่อกระแสฟ้าผ่า i ไหลผ่านตัวนำที่มีความยาว L และมีค่าความต้านทานของดิน R_e จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.2

$$\Delta U = R_e i + L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

โดยที่ di/dt คือความชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

2.3.2 ผลกระทบทางด้านความร้อน

การเกิดฟ้าผ่านั้นสามารถทำให้เกิดความร้อนได้เนื่องจากฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าซึ่งตัวลำแสงนั้นมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K

$$W = U \int_0^{\infty} i dt = U_{A-K} Q \quad (2.3)$$

โดยที่

W	= พลังงานฟ้าผ่า
U_{A-K}	= แรงดันตกคร่อมแอนโตนด-แคโอดตรงจุดฟ้าผ่า
Q	= ประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ (หรือแอมป์-วินาที)

ดังนั้นในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานของระบบเป็นอย่างมาก เพื่อให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินได้ในเวลาอันสั้น

2.3.3 ผลทางกลที่เกิดจากรฟ้าผ่า

ผลของฟ้าผ่าทางกลนั้นจะสร้างแรงระเบิดออกเป็น 2 แบบ แบบที่หนึ่งคือการเกิดแรงบิดบนตัวนำ ทำให้เกิดเป็นแรงดึงตูดและแรงผลัก ซึ่งเกิดเป็นสัดส่วนของกระแสฟ้าผ่ากำลังสอง I^2 เป็นสัดส่วนกลับ กับตัวนำทั้งสอง นั่นคือแรงที่เกิดต่อหน่วยความยาว ดังสมการ (2.4) และถ้าเกิดว่าฟ้าผ่าตั้งฉากกับเส้นลวดตัวนำจะสามารถสร้างแรงอิมพัลส์ที่กระทำต่อตัวนำ เป็นแนวเส้นตรงออกไป ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

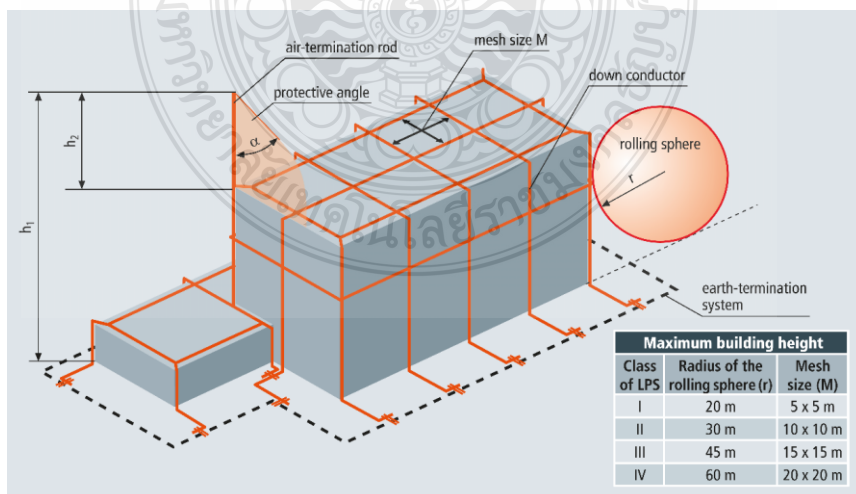
$$(Fdt)' = \frac{10^{-7}}{d} \int i^2 dt \frac{N \text{ sec}}{m} \quad (2.4)$$

$$\int Fdt' = 10^{-7} \int i^2 dt N \text{ sec} \quad (2.5)$$

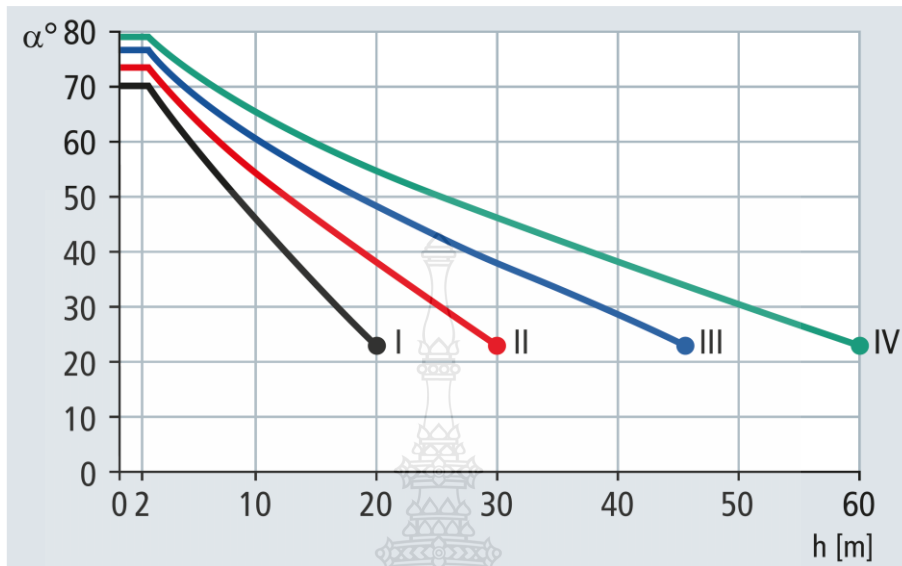
แรงแบบที่สองคือแรงระเบิด ซึ่งเกิดจากความร้อนของลำแสงที่มีอุณหภูมิสูงมาก จนทำให้อากาศโดยรอบขยายตัวออก จนทำให้เกิดคลื่นความดันที่เร็วเหนือเสียง แผ่กระจายออกไป

2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่า

ปัจจุบันระบบป้องกันฟ้าผ่าได้มีการวางมาตรฐานในการป้องกันโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย คือ วสท 2003-43 โดยการวางมาตรฐานฉบับนี้ได้ร่างตามมาตรฐานของ IEC 61024-1-2 ซึ่งได้แนะนำการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าออกเป็น 3 วิธี คือ วิธีมุ่มป้องกัน วิธีทรงกลมกลิ้ง และวิธีตาข่าย ซึ่ง 3 วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการติดตั้งแบบดั้งเดิม โดยที่ทั้ง 3 วิธีนั้นจะถูกแบ่งระดับการป้องกันอยู่ทั้งหมด 4 ระดับ โดยมีการออกแบบลักษณะขนาดตาข่ายและรัศมีทรงกลมกลิ้งดังรูปที่ 2.5 วิธีมุ่มป้องกันสามารถดูมุมมองที่จะป้องกันได้จากรูปที่ 2.6 [4] แต่ในปัจจุบันได้มีระบบป้องกันฟ้าผ่าอีกชนิดหนึ่ง Early streamer emission lightning protection system ซึ่งระบบป้องกันฟ้าผ่านี้ได้มีมาตรฐาน ของฝรั่งเศสรองรับในเอกสารฉบับที่ NFC 17-102 ดังนั้นจึงมีระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้งหมด 4 ระบบดังนี้ [5]



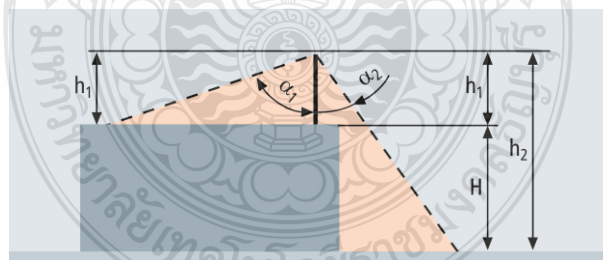
รูปที่ 2.5 ลักษณะการออกแบบและตารางขนาดระดับการป้องกันของทรงกลมกลิ้งและตาข่าย[2]



รูปที่ 2.6 กราฟระดับการป้องกันแบบมุมป้องกัน[2]

2.4.1 วิธีมุมป้องกัน (Protective Angle)

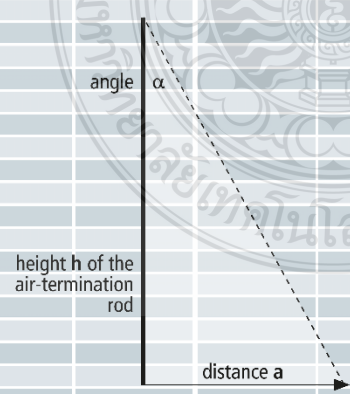
วิธีการป้องกันแบบมุมป้องกันนั้น จะสามารถออกแบบได้โดยมีลักษณะการป้องกันเป็นรูปทรงกรวยคว่ำ ซึ่งพื้นที่ที่อยู่ในรูปทรงกรวยคือพื้นที่ปลอดภัย การป้องกันลักษณะนี้เหมาะกับอาคารบ้านเรือนที่มีรูปทรงเรียบง่ายดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 ลักษณะการออกแบบระบบป้องกันแบบมุมป้องกัน[2]

การออกแบบระบบมุมป้องกันสามารถออกแบบได้โดยง่ายและมีประสิทธิภาพสูง โดยการออกแบบมุมป้องกันจะมีรัศมีการป้องกันที่ค่อนข้างแคบพอสมควร ดังนั้น การออกแบบจึงควรระวังพื้นที่มุมตึกหรือส่วนที่ยื่นออกจากตัวอาคาร จากการแบ่งระดับการป้องกันของระบบมุมป้องกันจึงสามารถกำหนดระยะที่ติดตั้งได้ดังรูปที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8

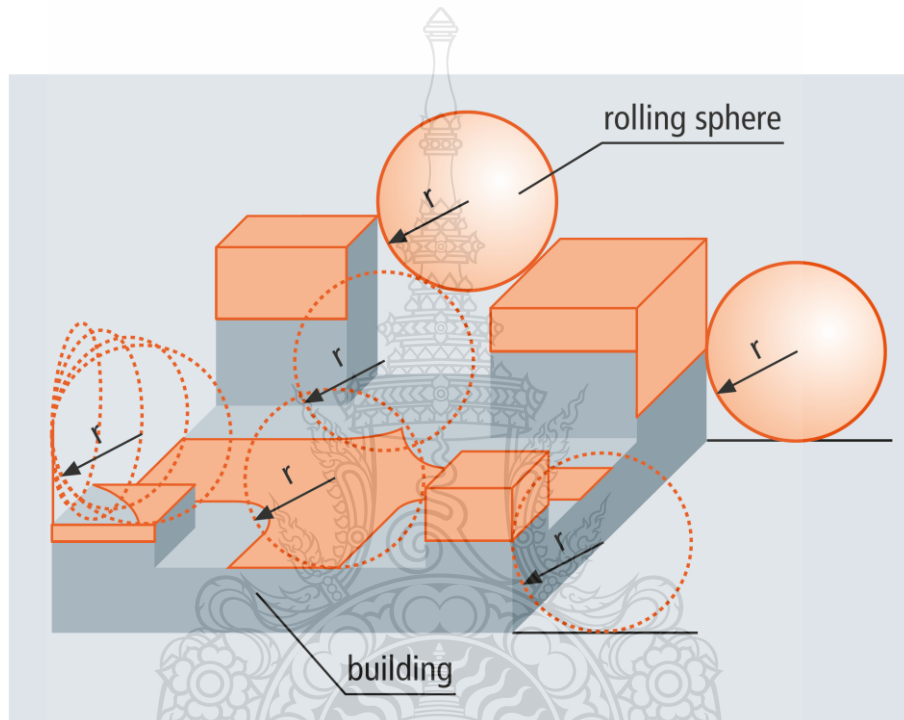
Height of the air-termination rod h in m	Class of LPS I		Class of LPS II		Class of LPS III		Class of LPS IV	
	Angle α	Distance a in m	Angle α	Distance a in m	Angle α	Distance a in m	Angle α	Distance a in m
1	71	2.90	74	3.49	77	4.33	79	5.14
2	71	5.81	74	6.97	77	8.66	79	10.29
3	66	6.74	71	8.71	74	10.46	76	12.03
4	62	7.52	68	9.90	72	12.31	74	13.95
5	59	8.32	65	10.72	70	13.74	72	15.39
6	56	8.90	62	11.28	68	14.85	71	17.43
7	53	9.29	60	12.12	66	15.72	69	18.24
8	50	9.53	58	12.80	64	16.40	68	19.80
9	48	10.00	56	13.34	62	16.93	66	20.21
10	45	10.00	54	13.76	61	18.04	65	21.45
11	43	10.26	52	14.08	59	18.31	64	22.55
12	40	10.07	50	14.30	58	19.20	62	22.57
13	38	10.16	49	14.95	57	20.02	61	23.45
14	36	10.17	47	15.01	55	19.99	60	24.25
15	34	10.12	45	15.00	54	20.65	59	24.96
16	32	10.00	44	15.45	53	21.23	58	25.61
17	30	9.81	42	15.31	51	20.99	57	26.18
18	27	9.17	40	15.10	50	21.45	56	26.69
19	25	8.86	39	15.39	49	21.86	55	27.13
20	23	8.49	37	15.07	48	22.21	54	27.53
21			36	15.26	47	22.52	53	27.87
22			35	15.40	46	22.78	52	28.16
23			36	16.71	47	24.66	53	30.52
24			32	15.00	44	23.18	50	28.60
25			30	14.43	43	23.31	49	28.76
26			29	14.41	41	22.60	49	29.91
27			27	13.76	40	22.66	48	29.99
28			26	13.66	39	22.67	47	30.03
29			25	13.52	38	22.66	46	30.03
30			23	12.73	37	22.61	45	30.00
31					36	22.52	44	29.94
32					35	22.41	44	30.90
33					35	23.11	43	30.77
34					34	22.93	42	30.61
35					33	22.73	41	30.43
36					32	22.50	40	30.21
37					31	22.23	40	31.50
38					30	21.94	39	30.77
39					29	21.62	38	30.47
40					28	21.27	37	30.14
41					27	20.89	37	30.90
42					26	20.48	36	30.51
43					25	20.05	35	30.11
44					24	19.59	35	30.81
45					23	19.10	34	30.35
46							33	29.87
47							32	29.37
48							32	29.99
49							31	29.44
50							30	28.87
51							30	29.44
52							29	28.82
53							28	28.18
54							27	27.51
55							27	28.02
56							26	27.31
57							25	26.58
58							25	27.05
59							24	26.27
60							23	25.47



รูปที่ 2.8 ความสูงของแท่งตัวนำกับระยะการป้องกันของระบบมุดป้องกัน[2]

2.4.2 วิธีทรงกลมกลิ้ง (Rolling Sphere)

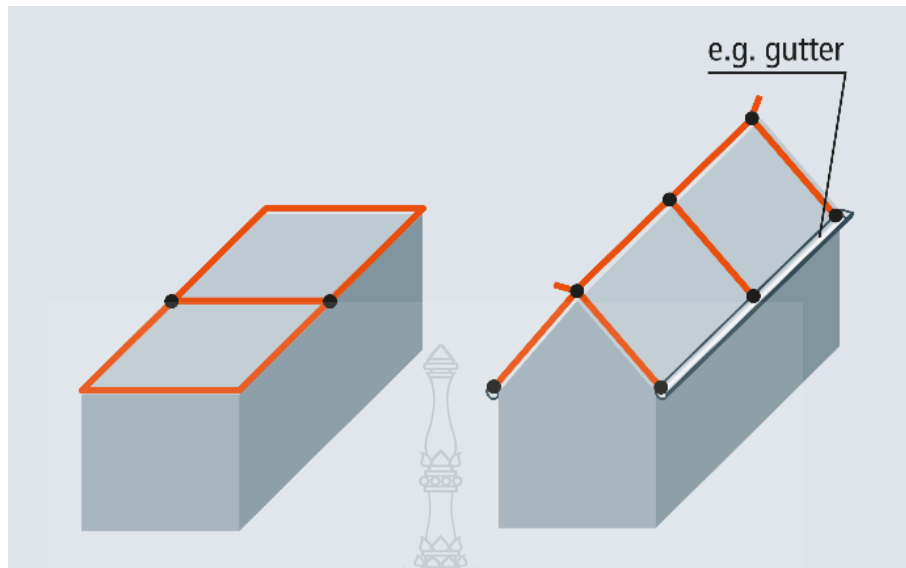
ทรงกลมกลิ้งเป็นการใช้ลูกบอลในการกำหนดขอบเขตการป้องกันฟ้าผ่า โดยการหาสี่เหลี่ยมที่ลูกบอลจากนั้นกลิ้งตามสิ่งปลูกสร้างเพื่อดูพื้นที่ที่ป้องกัน การออกแบบลักษณะนี้เหมาะกับการออกแบบกับสิ่งปลูกสร้างที่มีความซับซ้อน จากการกลิ้งพื้นที่ที่เป็อนสีของลูกบอลจะถือว่าไม่ได้รับการป้องกันดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วิธีการของทรงกลมกลิ้ง[2]

2.4.3 วิธีตาข่าย (Mesh Size)

วิธีการติดตั้งตาข่ายจะทำการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าซึ่งกับระนาบของอาคารดังรูปที่ 2.10 โดยใช้ระยะห่างของตาข่ายในรูปที่ 2.4 เพื่อใช้ในการกำหนดระดับการป้องกันฟ้าผ่าแต่เนื่องจากการใช้วัสดุตัวนำในการป้องกันเป็นจำนวนมาก จึงสามารถออกแบบหลายวิธีเพื่อช่วยประหยัดวัสดุ และได้ระยะการป้องกันที่ดี



รูปที่ 2.10 ระบบป้องกันแบบตาข่าย[2]

2.4.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE)

ระบบป้องกันแบบ ESE นั้นจะเป็นระบบที่ใช้หัวล่อฟ้าแบบใหม่คือ Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT) ซึ่งเป็นหัวล่อฟ้าที่สามารถปล่อยประจุไฟฟ้าเพื่อสร้างลำแสงขึ้นไปรับกับลำแสงฟ้าผ่า หรือเรียกอีกอย่างว่าการล่อฟ้า โดยคุณสมบัติของหัวจะมีสารบางชนิดบรรจุอยู่ สารชนิดนี้สามารถที่จะล่อฟ้าได้ โดยระยะการป้องกันจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 สมการที่ 2.6 นั้นสำหรับการคำนวณกับสิ่งปลูกสร้างที่สูงมากกว่าหรือเท่ากับ 5 เมตรและสมการที่ 2.7 สามารถระยะป้องกันของสิ่งปลูกสร้างที่สูงตั้งแต่ 2 เมตรจนถึง 5 เมตร โดยการออกแบบจะสมมติว่าระยะการป้องกันเป็นแบบทรงกลมครอบคลุมสิ่งก่อสร้างดังรูปที่ 2.11 [5]

$$R_p(h) = \sqrt{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)} \quad (2.6)$$

$$R_p = h \times R_p(5) / 5 \quad (2.7)$$

โดย

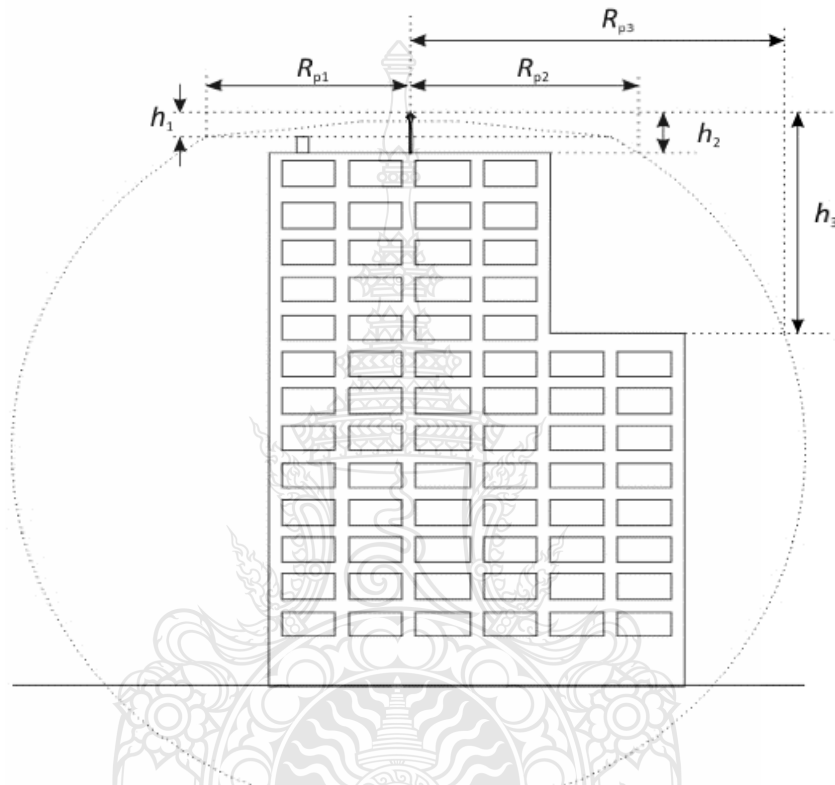
$R_p(h)$ = คือรัศมีการป้องกันที่ความสูงที่กำหนด h หน่วย m

h = คือความสูงของปลาย ESEAT เหนือระนาบแนวนอนผ่านจุดที่อยู่ไกลที่สุดของวัตถุที่จะป้องกัน หน่วย m

r = ระยะการป้องกัน $20 m$ สำหรับการป้องกันระดับที่ 1 หน่วย m

ระยะการป้องกัน 30 m สำหรับการป้องกันระดับที่ 2 หน่วย m
 ระยะการป้องกัน 45 m สำหรับการป้องกันระดับที่ 3 หน่วย m
 ระยะการป้องกัน 60 m สำหรับการป้องกันระดับที่ 4 หน่วย m

Δ = ค่า จะเท่ากับค่าประสิทธิภาพของหัว ESEAT จาก



รูปที่ 2.11 ลักษณะการออกแบบระบบป้องกันของ ESE[5]

2.5 ความต้านทานรากสายดิน

จากการไหลของกระแสฟ้าผ่า จะทำให้เกิดแรงดันช่วงก้ำว ซึ่งแรงดันช่วงก้ำวนั้นสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของดินในบริเวณนั้นๆ ถ้าหากว่าค่าความต้านทานของรากสายดินนั้นมีค่าสูง จะทำให้เกิดแรงดันช่วงก้ำวหรือแรงดันสัมผัสที่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ได้ ดังนั้นการฝังตัวนำดิน เช่น เหล็กอาบสังกะสี หรือทองแดง เมื่อฝังแล้วจะต้องมีค่าความต้านทานดินที่ต่ำ $\leq 2\Omega$ เนื่องจากความต้านทานของรากสายดินนั้น จะมีค่าความต้านทานมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของรากสายดินและความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณนั้น[3]

2.5.1 รากสายดินลักษณะทรงกลม

การฝังรากสายดินอิเล็กทรอนิกส์โทรตรงกลม เพื่อให้เป็นตัวนำในการกระจายกระแสออกไปทุกทิศทุกทาง เมื่ออิเล็กทรอนิกส์โทรมีสภาพที่นำไฟฟ้าเนื่องจากมีพื้นผิวในการกระจายกระแสที่เพิ่มมากขึ้น แตกต่างกับสายดินที่มีพื้นที่กระจายตัวของกระแสน้อยกว่า ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของการกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสในพื้นที่ทรงกลมได้ดังสมการที่ (2.8) จากกฎของโอห์มจึงจะสามารถเขียนสมการที่ (2.9) และเมื่อสนามไฟฟ้าของตัวกลางที่มีรัศมีคือ r จะเขียนสมการของ $E(r)$ ได้ดังสมการที่ (2.10) และเมื่ออิเล็กทรอนิกส์โทรมีศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกระแส สามารถเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่มีค่าเป็น อนันต์แล้วจึงสามารถเขียนสมการที่ (2.11) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่(2.11)จึงได้สมการของศักย์ไฟฟ้า $V(r)$ (2.12)และเมื่ออิเล็กทรอนิกส์โทรมีรัศมีทรงกลม r_0 มีกระแสไหลออกไปเท่ากับ I จะมีศักย์ไฟฟ้า V_e ดังสมการที่ (2.13)[3]

$$I = 4\pi r^2 J \quad (2.8)$$

$$I = 4\pi r^2 \sigma E \quad (2.9)$$

$$E(r) = \frac{1}{4\pi r^2 \sigma} \quad (2.10)$$

$$V(r) = \int_r^\infty E(r) dr \quad (2.11)$$

$$V(r) = \frac{I}{4\pi\sigma} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} \quad (2.12)$$

$$V_e = \frac{I}{4\pi r_0 \sigma} \quad (2.13)$$

ค่าความต้านทานของตัวกลางหรือดิน ที่สามารถนำกระแสที่กระจายออกจากอิเล็กทรอนิกส์โทร ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.14)

$$R_e = \frac{V_e}{I} \quad (2.14)$$

2.5.2 รากสายดินลักษณะครึ่งทรงกลม

ลักษณะของอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลมจึงทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถกระจายตัวออกไปได้ครึ่งหนึ่งของอิเล็กโทรดทรงกลม ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่าความหนาแน่นของกระแสที่ไหลออกจากอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าดังสมการที่ (2.15) นั้นค่าความต้านทานจึงเขียนสมการเป็น (2.16)

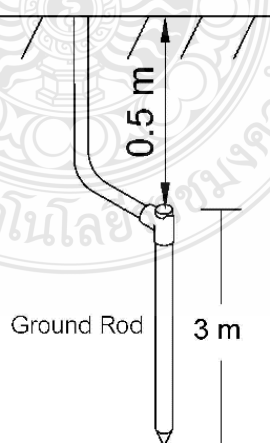
$$V_e = \frac{I\rho}{2\pi r_0} \quad (2.15)$$

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (2.16)$$

2.5.3 รากสายดินลักษณะแนวตั้ง

รากสายดินแบบแนวตั้งนั้นจะเป็นแท่งทรงกลมฝังดินดังรูปที่ 2.12 โดยคำนวณจากสมการที่ (2.17) ในกรณีที่ฝังรากสายดินแล้วค่าความต้านทานยังมีค่าสูง สามารถลดค่าความต้านทานโดยการเพิ่มความยาวของรากสายดิน หรือเพิ่มจำนวนแท่งของรากสายดินให้มากขึ้น

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (2.17)$$

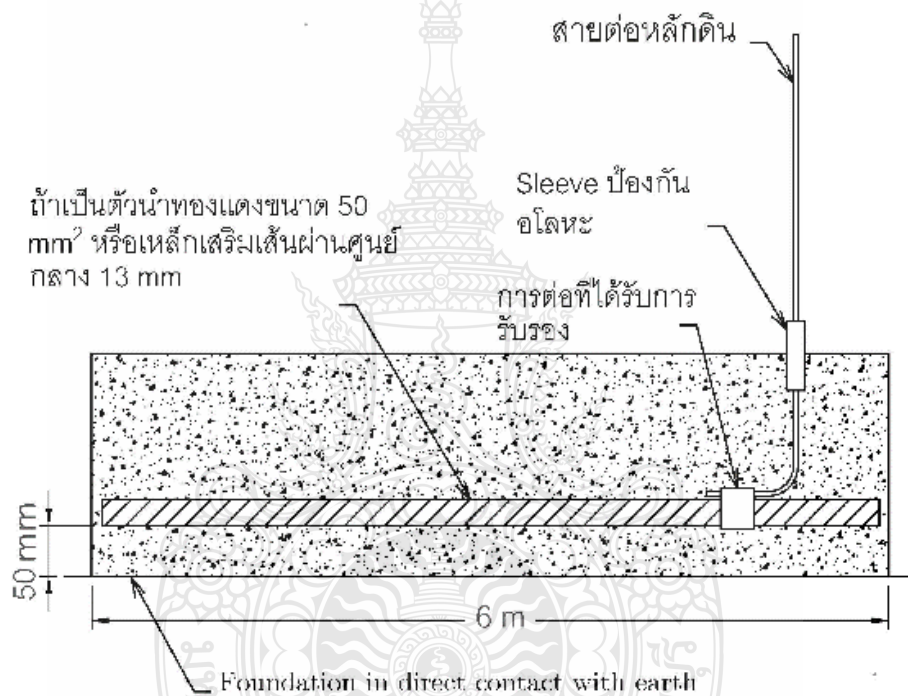


รูปที่ 2.12 รากสายดินลักษณะแนวตั้ง[4]

2.5.4 รากสายดินลักษณะแนวนอน

การฝังรากสายดินแบบแนวนอน เป็นการออกแบบซึ่งเหมาะกับการใช้ในกรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงดังรูปที่ 2.13 โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ผสมการฝังรากสายดินแบบแนวตั้ง ค่าความต้านทานรากสายดินแบบแนวนอนนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.18)

$$R_e = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{2l}{d} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.13 รากสายดินลักษณะแนวนอน[4]

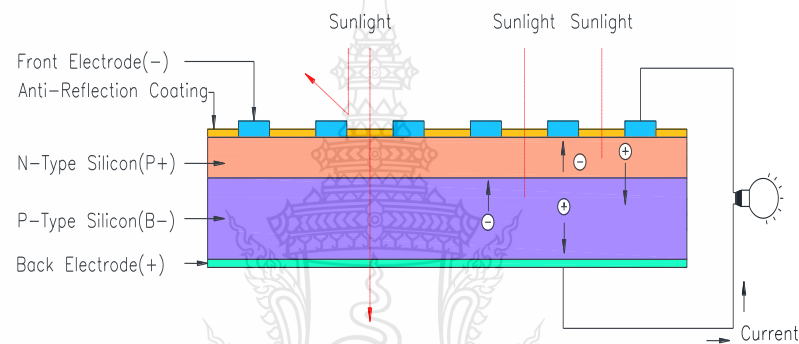
2.6 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ปัจจุบันการหาพลังงานที่ไม่สร้างมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม เป็นประเด็นสำคัญสำหรับโลก ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานที่ลดมลพิษเหล่านั้น จากการศึกษาของนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์จึงสามารถผลิตนวัตกรรมด้านการผลิตไฟฟ้าขึ้นมา คือ Photovoltaic (PV) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยพลังงานจากดวงอาทิตย์นั้นมีมากถึง 3.8×10^{23} kW แต่เนื่องจากระยะห่างของโลกกับดวงอาทิตย์ อยู่ไกลกันถึง 93 ล้านไมล์ จึงทำให้

ค่าพลังงานมาถึงพื้นโลกเหลือเพียง 1×10^{10} kW แต่พลังงานจากดวงอาทิตย์ก็ยิ่งสูงมากเพียงพอกับการผลิตไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานได้[6]

2.6.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

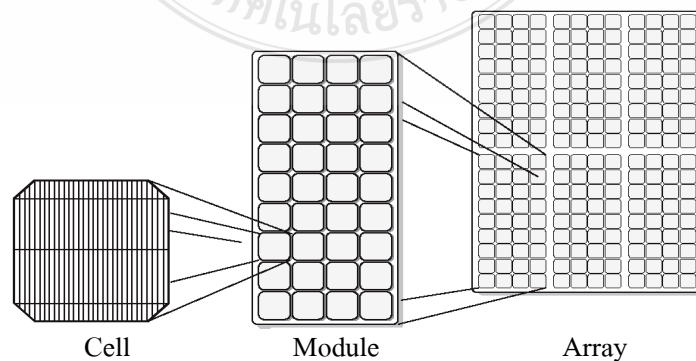
การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์ จะทำให้สารกึ่งตัวนำซึมซับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยอนุภาคโปรตอนในแสงอาทิตย์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นที่ชั้น N-Type Silicon และการไหลของโฮลขึ้นที่ชั้น P-Type Silicon เมื่อมีพลังที่พอเพียงแก่การจับคู่กัน อิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหากัน แต่ไม่สามารถผ่านชั้น ของซิลิกอนได้ ดังนั้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จึงทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์[6]

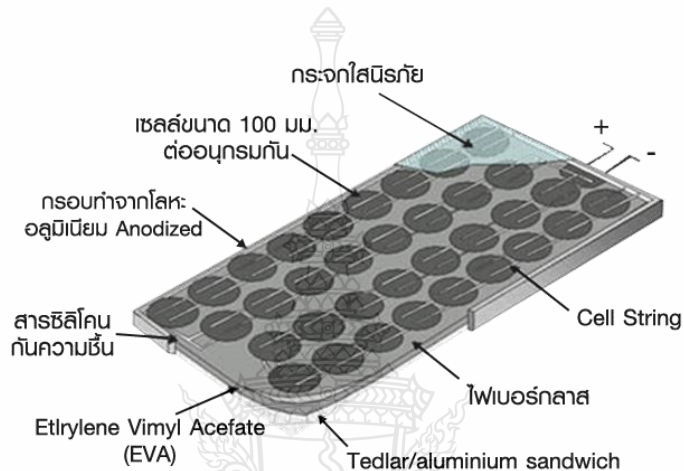
2.6.2 โครงสร้างของโซลาร์เซลล์

จากการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งเซลล์นั้นมีค่าไฟฟ้าที่ต่ำมาก การที่จะนำพลังงานดังกล่าวมาใช้จึงจำเป็นต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมกันหลายๆ เซลล์เพื่อที่จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยการเพิ่มเซลล์[6]

การนำเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากมาประกอบกันนั้น โดยหลักแล้วคือเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า แต่ยังมีวัตถุประสงค์อื่นๆ อีกเช่น เพื่อการติดตั้งที่ง่ายขึ้น เพื่อการออกแบบการป้องกันความเสียหายของเซลล์ ป้องกันความชื้น และเสริมความคงทนให้กับแผงดังรูปที่ 2.16

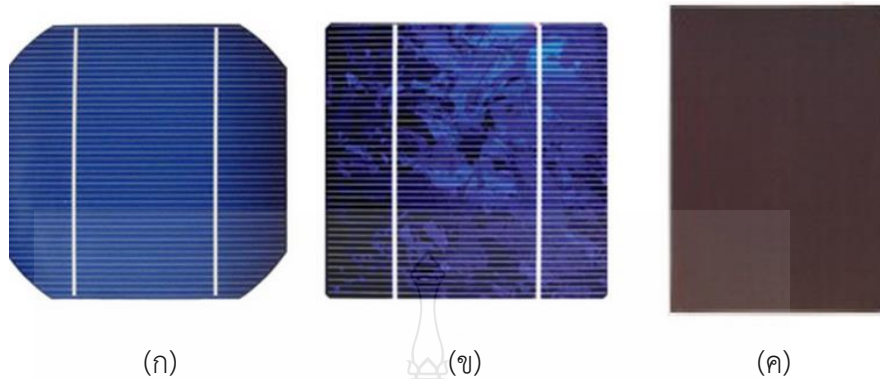


รูปที่ 2.16 โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์[6]

2.6.3. ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเนื่องจากการแข่งขันทางด้านธุรกิจ ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพและราคาที่ถูกลงอย่างมาก โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีสารกึ่งตัวนำตั้งต้นได้แก่ ซิลิคอน (Si) แกเลียม (GaAs) เป็นต้น โดยวิธีการผลิตจะมีหลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น แบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon cells) แบบแผ่นฟิล์มบาง (Silicon ribbon cells) แบบหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) แบบแผ่นบางหลายผลึก (Polycrystalline thin film silicon cells) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข)

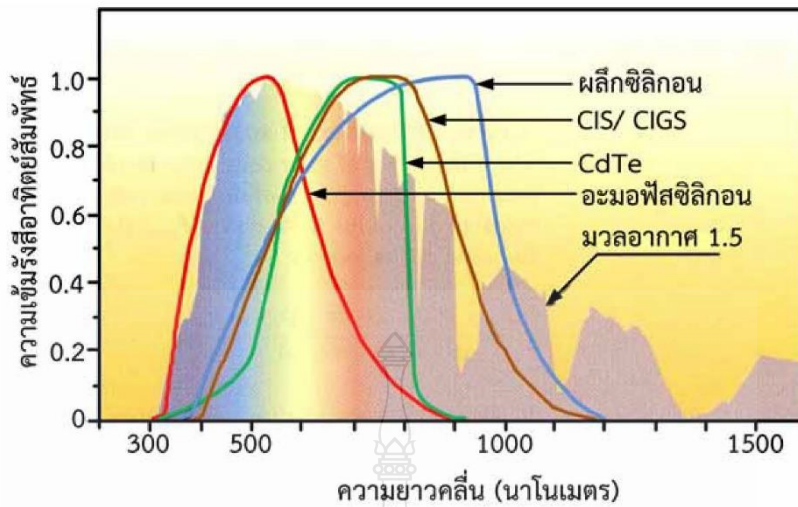


รูปที่ 2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (ข) ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (ค) ชนิดฟิล์มบาง[6]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film Solar cells) เซลล์ชนิดนี้จะผลิตจากสารอะมอर्फัส ซิลิคอน ส่วนตัวเซลล์จะถูกผลิตจากแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) มีการใช้งานค่อนข้างน้อยและยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าชนิดผลึกดังรูปที่ 2.17 (ค)

2.6.4 ผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์

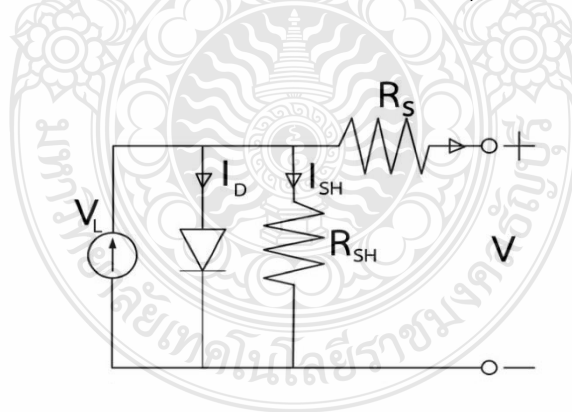
รังสีที่เกิดจากดวงอาทิตย์ จะประกอบด้วย แสงอินฟราเรด และแสงไวโอเล็ต เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพได้นั้นจะต้องคำนึงถึงสเปกตรัมของแสง จากสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์นั้นมีขอบเขตที่ค่อนข้างกว้างคือตั้งแต่ 380 – 1100 นาโนเมตร ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะตอบสนองต่อสเปกตรัมและแสงไวโอเรดที่ตาเปล่าสามารถมองเห็นได้เท่านั้น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ เมื่อเทียบกับความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์เฉพาะประเภทเดียวกันดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 การตอบสนองของสเปกตรัมแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด[6]

2.6.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

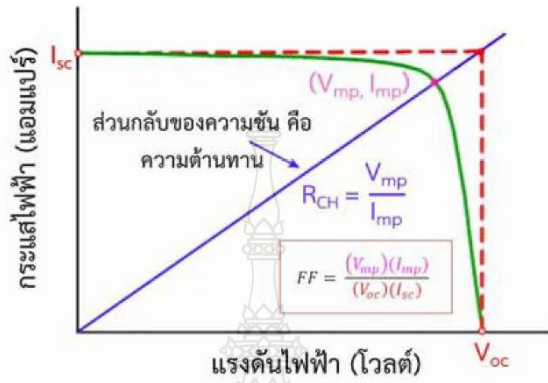
วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการต่อในรูปของวงจรมุม โดยมีส่วนกำเนิดแสงไดโอดต่อขนาดอยู่กับค่าความต้านทาน R_{SH} และมีค่าความต้านทาน R_S ต่ออนุกรมกับวงจรตามรูปที่ 2.18 จากวงจรสมมูลเมื่อมีกระแสที่เกิดจากแหล่งพลังงานไหลผ่านค่าความต้านทาน แบบขนานจึงทำให้มีแรงดันตกค่อมอยู่ค่าความต้านทาน R_{SH} ทำให้เกิดแรงดันขึ้น ณ จุดนั้น



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์[6]

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูได้จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{OC}) กระแสลัดวงจร (I_{SC}) และฟิลด์แฟกเตอร์ (FF) ดังรูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์กันระหว่างกระแสกับแรงดันที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้คือ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในช่วงของเปิด

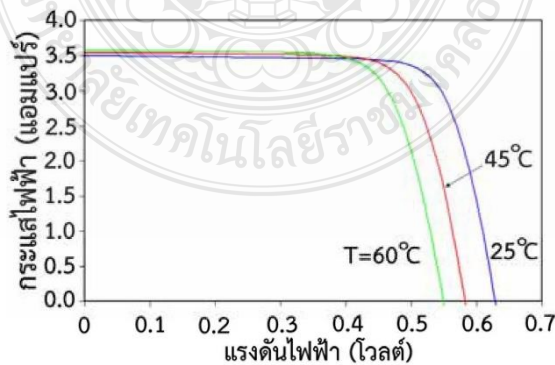
วงจรไฟฟ้าจะมีค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด และเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกระแสไฟฟ้าค่าของแรงดันจะลดลง แต่มีการลัดวงจรไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงที่สุดและแรงดันจะมีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 2.20 [6]



รูปที่ 2.20 ค่ากระแสไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์[6]

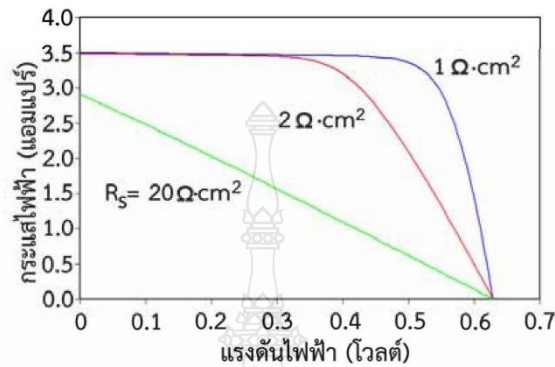
2.6.6 ปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากความเข้มของแสง แต่ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้านั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงเพียงอย่างเดียว เช่น อุณหภูมิ ความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างเช่น อุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการผลิตแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังรูปที่ 2.21[6]

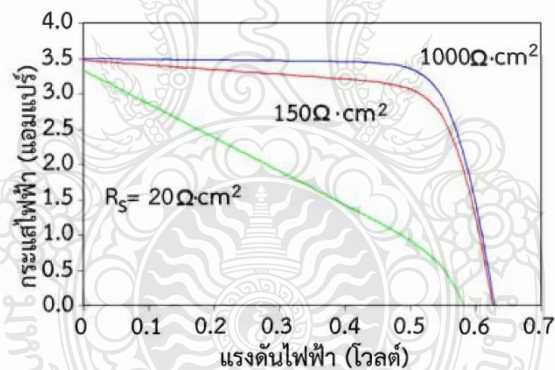


รูปที่ 2.21 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร[6]

ค่าความต้านทานส่งผลโดยตรงกับกระแสเมื่อมีค่าความต้านทานโดยรวมสูง ค่ากระแสตกค่อมก็จะสูงตามไปด้วย จึงทำให้การผลิตพลังงานที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพต่ำลง เมื่อมีค่าความต้านทานที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.23



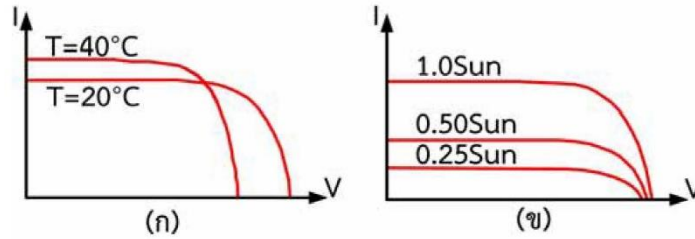
รูปที่ 2.22 ค่าของความต้านทานอนุกรมที่มีผลต่อลักษณะกระแสและแรงดัน[6]



รูปที่ 2.23 ค่าของความต้านทานขนานที่มีผลต่อลักษณะกระแสและแรงดัน[6]

2.6.7 ผลกระทบที่เกิดจากความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ

เซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในหลายระดับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความเข้มของแสงมีค่ามากหรือน้อยเซลล์แสงอาทิตย์ก็สามารถผลิตไฟฟ้าได้ แต่การที่ผลิตพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงได้นั้นย่อมมีค่าสูงสุดและต่ำสุด สภาวะแวดล้อมของอุณหภูมิและความเข้มของแสงเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตไฟฟ้าดังรูปที่ 2.24 [6]



รูปที่ 2.24 กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิและความเข้มแสงค่าต่าง ๆ [6]

2.7 ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะต้องมีเครื่องชี้วัดประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ โดยการอ้างอิงมาตรฐาน IEC 61724 การวิเคราะห์สมรรถนะทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ในการวิเคราะห์ทางด้านเทคนิคจึงอ้างอิงจาก IEA PVPS Task2 (International Energy Agency Photovoltaic Power System TASK 2 – Performance, Reliability and Analysis of Photovoltaic Systems) โดยมีการกำหนดหลักการวิเคราะห์ที่อยู่ด้วยกัน 10 ข้อดังนี้ [6]

2.7.1 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array Yield) สามารถหาได้จากสมการ (2.19)

$$Y_A = \frac{E_a}{P_o} \quad (2.19)$$

โดย

Y_A = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kWp)

P_o = กำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Wp)

E_a = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)

2.7.2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางทฤษฎี (Reference Yield) สามารถหาได้จากสมการ (2.20)

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad (2.20)$$

โดย

Y_r = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kWp)

H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)

G_{STC} = ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC=1 kW/m²

2.7.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield) สามารถหาได้จากสมการ (2.21)

$$Y_f = \frac{E_{tot}}{P_o} \quad (2.21)$$

โดย

Y_f = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์(kWh/kWp)

E_{tot} = พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้โดยภาระทางไฟฟ้า (kWh)

P_o = กำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Wp)

2.7.4 พลังงานสูญเสียบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Capture Losses) สามารถหาได้จากสมการ (2.22)

$$L_C = Y_r - Y_A \quad (2.22)$$

โดย

L_C = พลังงานที่สูญเสียบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)

Y_r = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kWp)

$$Y_A = \text{พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kWp)}$$

2.7.5 พลังงานสูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (System Losses) สามารถหาได้จากสมการ (2.23)

$$L_s = Y_A - Y_f \quad (2.23)$$

โดย

$$L_s = \text{พลังงานที่สูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)}$$

$$Y_A = \text{พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ต่อกำลังติดตั้ง (kWh/kWp)}$$

$$Y_f = \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)}$$

2.7.6 สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio, PR) สามารถหาได้จากสมการ (2.24)

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.24)$$

โดย

$$PR = \text{ค่าสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ : Performance Ratio (\%)}$$

$$Y_f = \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)}$$

$$Y_r = \text{พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทางทฤษฎี (kWh/kWp)}$$

2.7.7 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Array Efficiency) สามารถหาได้จากสมการ (2.25)

$$\eta_a = \frac{E_a}{H_i A_A} \quad (2.25)$$

โดย

- η_a = ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
 E_a = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)
 H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 A_A = พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

2.7.8 ประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Total Efficiency) สามารถหาได้จากสมการ (2.26)

$$\eta_{tot} = \frac{E_{tot}}{H_i A_A} \quad (2.26)$$

โดย

- η_{tot} = ประสิทธิภาพรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
 E_{tot} = พลังงานไฟฟ้ารวมที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)
 H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 A_A = พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

2.7.9 พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ สามารถหาได้จากสมการ (2.27)

$$E_a = V_{dc} \times I_{dc} \times Time \quad (2.27)$$

โดย

- E_a = พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (kWh)
 V_{dc} = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ PV array
 I_{dc} = กระแสไฟฟ้าที่ของ PV array
 $Time$ = ระยะเวลาที่ PV array ผลิต V_{dc} และ I_{dc}

2.7.10 พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่(2.28)

$$H_i = G_i \times Time \quad (2.28)$$

โดย

H_i = พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)

G_i = ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ PV array ได้รับจริง (kW/m²)

$Time$ = ระยะเวลาที่ PV array ผลิต V_{dc} และ I_{dc}

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

N.L.Allen และ J.C.Evans [7] เทอร์มินัล "Early streamer emission" (ESE) สำหรับการป้องกันฟ้าผ่าจะกระตุ้นการระเบิดของสตรีมเมอร์จากปลายก่อน ที่จะผลิตสตรีมเมอร์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าใกล้จากพายุฝนฟ้าคะนอง มีการอ้างว่าเพื่อเพิ่มความน่าจะเป็นของช่องทางฟ้าผ่าไปยังระบบป้องกัน มีการอธิบายการทดสอบซึ่งประสิทธิภาพของหัวล่อฟ้ามีลักษณะเป็นเทอร์มินัลจำลอง "การปล่อยสตรีมเมอร์" แรงกระตุ้นด้านหน้าที่เป็นขั้วลบที่แขวนอยู่เหนือแกนแนวตั้งเพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่ปลายก้านซึ่งอาจเกิดจากการปล่อยประจุออกมาจากก้อนเมฆ แรงกระตุ้นแรงดันไฟฟ้าเสริมที่เป็นบวก 1 / 30p ที่มีแอมพลิจูดเพียงพอที่จะสร้างโคโรนาได้ถูกนำไปใช้อย่างอิสระที่ก้านควบคุมเวลาแปรผันระหว่างการเพิ่มขึ้นของหน้าสโตร์ฟิลด์ ผลกระทบของพัลส์นี้ต่อโคโรนาที่เกิดขึ้นที่แกนโดยแรงกระตุ้นเชิงลบที่ระนาบเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าของการสลายช่องว่างและเวลาในการสลายได้รับการบันทึกไว้ ข้อสรุปทั่วไปคือโคโรนาเสริมมีผลกระทบเล็กน้อยต่อการสลายเมื่อมันถูกนำไปใช้ในช่องสตรีมเมอร์ของโคโรนา

Vernon Cooray [8] ทั้งทฤษฎีและหลักฐานการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นหลักการของ Streamer Emission (ESE) ไม่ทำงานภายใต้สภาพสนามไฟฟ้าธรรมชาติและไม่มีเหตุผลที่น่าเสนอเพื่อสมมติว่าแท่ง ESE ทำงานได้ดีกว่าแท่งแฟรงคลิน จุดเด่นของเทคโนโลยี ESE คือการประยุกต์ใช้พัลส์แรงดันไฟฟ้ากับปลายแท่งฟ้าผ่าสมมติว่าเอฟเฟกต์ของมันจะเพิ่มรัศมีที่น่าดึงดูดของตัวนำฟ้าผ่า การวิเคราะห์ที่น่าเสนอนี้แสดงให้เห็นว่าสายล่อฟ้าใด ๆ เมื่อสัมผัสกับสนามไฟฟ้าจะทำหน้าที่เหมือนกับ ESE การจำลองการทำงานของพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่ใช้แท่ง ESE ประมาณว่าผลของขั้นตอนเช่นการ

เปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการล่อฟ้าเทียบเท่ากับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายพัลส์ แรงดันไฟฟ้าหลายสิบกิโลโวลต์ขึ้นไปในช่วงเวลา 10 ถึง 50 วินาทีถึงสายล่อฟ้า มันแสดงให้เห็นว่าฟิสิกส์ของกระบวนการแนบสายฟ้าของก้านแฟรงคลินเหมือนกับก้าน ESE และด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพการยึดติดของก้านแฟรงคลินนั้นเหมือนกับของแท่ง ESE ที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกัน ผลลัพธ์นำเสนอในบทความยังแสดงให้เห็นว่าการกระจายอาร์เรย์ไม่สามารถกระจายแสงฟ้าแลบที่ใกล้เข้ามาได้เช่นกัน โครงสร้างที่ได้รับการป้องกันหรือไปยังเทอร์มินัลเอง

Vladimir A. Rakov [9] การทบทวนแนวคิดการป้องกันฟ้าผ่าที่แนะนำโดย Benjamin Franklin (ศตวรรษที่ 18) และ James Clerk Maxwell (ศตวรรษที่ 19) ได้รับ แนวทางที่ทันสมัยในการป้องกันฟ้าผ่าของโครงสร้างและระบบต่างๆคือ กล่าวถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบจำลองทางไฟฟ้าที่ใช้กัน อย่างแพร่หลาย (วิธีโรลลิงสเฟียร์) และมีการนำเสนอการป้องกันโทโพโลยี ข้อกำหนดในการยึดติดที่ จำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงการกะพริบด้านข้าง (ในอากาศหรือในดิน) คือ กล่าวถึง ตรวจสอบพารามิเตอร์ ฟ้าผ่าที่สำคัญสำหรับการป้องกันฟ้าผ่า

L. Pecastaing และ คณะ [10] บทความนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอโดยละเอียดในทุกแง่มุมที่ เกี่ยวข้องกับ ทดลองการทดลองเพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพของหัวล่อฟ้าที่ปล่อยลำแสงแรก ชั่ว (ESEAT) เทียบกับก้านแฟรงคลินแบบดั้งเดิมในห้องปฏิบัติการ ประการแรก มีการนำเสนอพื้นฐานทางทฤษฎี สำหรับการวิเคราะห์วงจรสมมูลของ ESEAT แสดงว่าความเข้มสนามไฟฟ้าไดนามิกบนแกน ESE ที่ใช้ งานอยู่สูงกว่า (ในทางทฤษฎีสูงกว่าสองเท่า) มากกว่าความเข้มสนามคงที่ของแบบเดิม สายล่อฟ้าแฟรงคลิน จากนั้นการทดสอบทดลองโดยใช้วิธีการและเชื่อมโยงกับ การจำลองไฟฟ้าสถิตแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพของ ESEAT (Pix3-60 จาก Piorteh Company) เทียบกับก้านแฟรงคลินแบบเดิมใน ห้องปฏิบัติการ SIAME ของ มหาวิทยาลัยโปในฝรั่งเศส. วิธีนี้ประกอบด้วยการค้นหาทั้งเทอร์มินัล ESE และก้านแฟรงคลินเข้าด้วยกันในรูปแบบเดียวกันตามภาษาฝรั่งเศส มาตรฐาน NFC 17-102 (09/2011) ในระหว่างการทดสอบการปล่อยกระแสฟ้าผ่าทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ใน ESEAT ผลิตโดย Piorteh Company เมื่อกำหนดงาน การทดลองนี้ สามารถใช้การทดสอบกับอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าทุกชนิด ข้อกำหนดของดัชนี - การป้องกันฟ้าผ่าการปล่อยลำแสงก่อนกำหนดการปล่อยกระแสไฟฟ้า การ ประเมินประสิทธิภาพแห่งที่ใช้งานอยู่

Reynaldo Zoro และคณะ [11] งานวิจัยนี้อธิบายถึงการติดตั้งภายนอกระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้เสาเดี่ยวและขาตั้งอิสระ Mast (FSM) เพื่อป้องกันการติดตั้งที่ Pulp and Paper อุตสาหกรรมเช่น Truck Scale, Evaporator, Water Treatment โรงงานและถังน้ำมัน Extended Mast Terminal (EMT) และมีการติดตั้งเทอร์มินัลอากาศของก้านสูบแบบธรรมดาที่ Recovery สถานที่หม้อไอน้ำ สารเคมีและเตาเผาเพื่อป้องกันโดยรอบโครงสร้างจากฟ้าผ่าที่ฟ้าผ่ามีความสามารถเพื่อสร้างความ

เสียหายและทำลายสิ่งของ บนพื้นทางตรงของวัตถุจากข้อมูลก่อนการติดตั้ง LPS ภายนอก(ระบบป้องกันฟ้าผ่า) พบว่าบ่อยครั้งการรบกวนพื้นที่ของถังเคมีและถังน้ำมันนี้คือโดดเด่นด้วยการหยุดชะงักของการผลิตและมอเตอร์เนื่องจากฟ้าผ่าโดยตรงบนโครงสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เชื่อถือได้ใน Pulp and Paper อุตสาหกรรมได้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าประกอบด้วยหัวอากาศ Early Streamer Emission (ESE), Double Shielded Down Conductor (DSDC) สายเคเบิลที่มีความเหนียวน้ำหนักที่ตัวนำและฐานรากสายดินเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ระบบจะต่ำมาก เมื่อมีฟ้าผ่านี้ระบบป้องกัน หากต้องการทราบจำนวนฟ้าผ่าระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกนี้และค่าสูงสุด ปัจจุบันใช้แผงที่ติดตั้งโดย Lightning Event Counter(LEC) และแทปแม่เหล็ก (APM) ข้อมูลนี้ยังใช้สำหรับการวิเคราะห์การหยุดชะงักและการบำรุงรักษาฟ้าผ่าภายนอกระบบป้องกันที่ได้รับการติดตั้ง การติดตั้งระบบสายดินสำหรับโครงสร้างของเครื่องระเหย, หม้อไอน้ำสำหรับการกักเก็บ, เครื่องจักรรถบรรทุก, ถังน้ำมัน, โรงบำบัดน้ำในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยใช้ฐานรากสายดินที่จะระบายกระแสฟ้าผ่าไปยังส่วนล่างของความต้านทานเมื่อมีฟ้าผ่าที่ระบบป้องกันภายนอก ข้อมูลที่ได้รับหลังจากการติดตั้ง LPS ภายนอกที่ไม่มีการเกิดขึ้นการรบกวนตั้งแต่ปี 2017-2018 และมีการบันทึกจากเคาน์เตอร์ที่เพิ่มขึ้นและการวัดค่ากระแสฟ้าผ่าสูงสุดของแม่เหล็ก

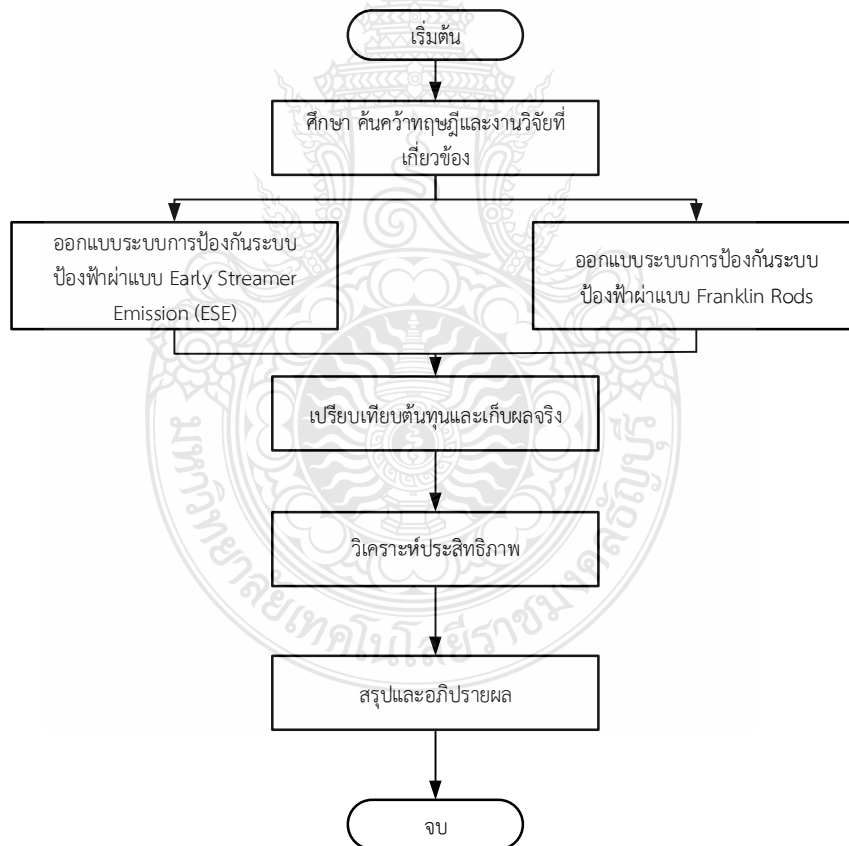


บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE) ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน ด้วยมาตรฐานของฝรั่งเศส NFC 17-102 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการออกแบบการติดตั้งหัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT) และผลการติดตั้งจริง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ตาม Flow Chart ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 ข้อมูลของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่างานวิจัย

3.2.1 สถานที่ตั้ง

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดผลึกรวมซิลิคอน สถานที่ ตำบลหนองหญ้าปล้อง จังหวัดเพชรบุรี ขนาดพื้นที่ 95 ไร่ พิกัดที่ตั้ง ละติจูด 13.108456 องศาเหนือ ลองจิจูด 99.700241

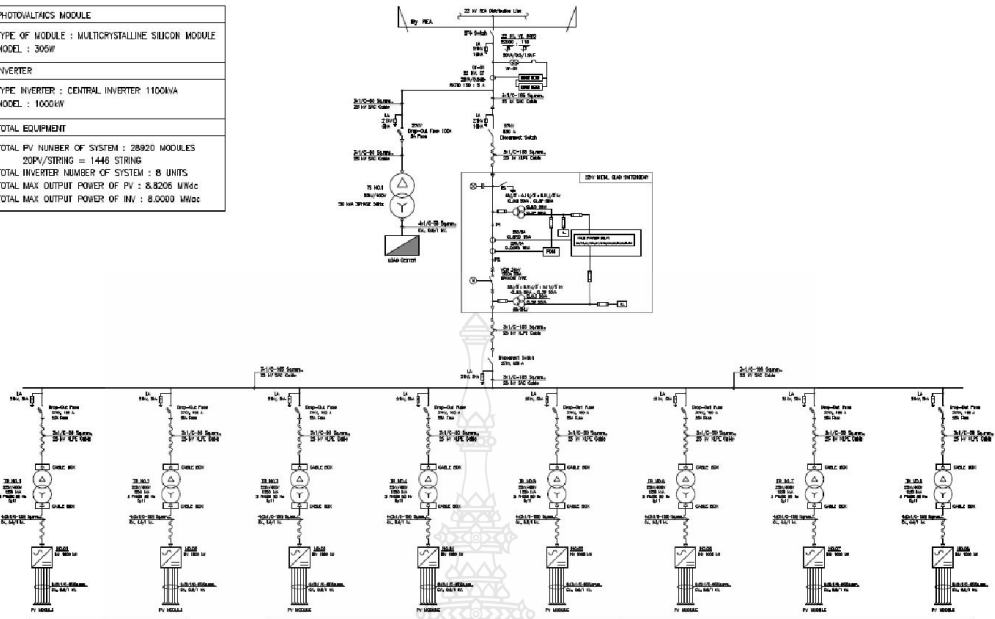


รูปที่ 3.2 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน ขนาดพื้นที่ 95 ไร่

3.3 การออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

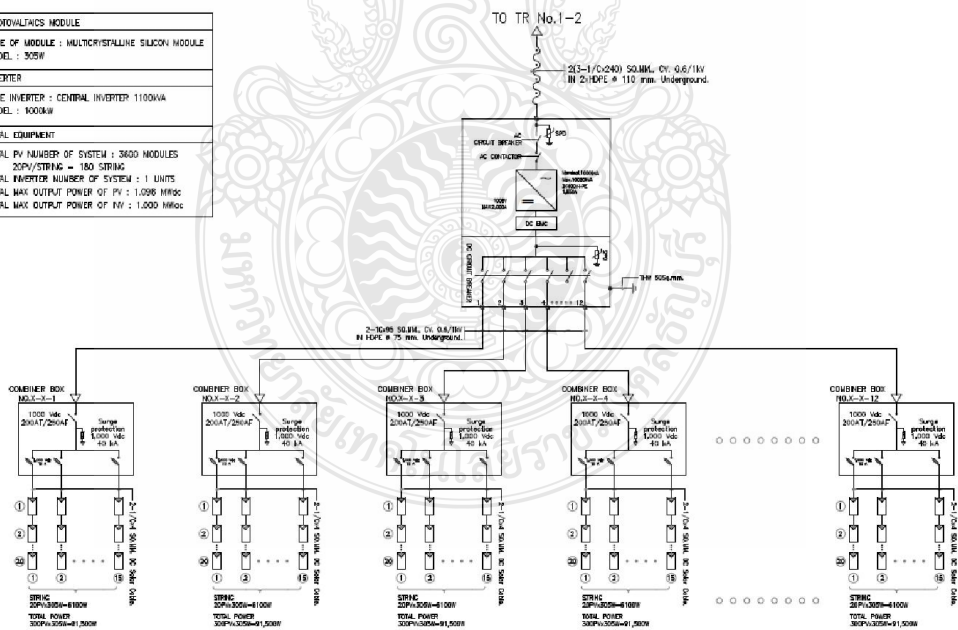
การออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แยกย่อยออกได้หลากหลายงาน โดยการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นด้านการออกแบบทางด้านไฟฟ้า เป็นหลักโดยการออกแบบ Single Line Diagram ของระบบโซล่าเซลล์ ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 8 MW ดังรูปที่ 3.2 – 3.4

PHOTOVOLTAICS MODULE
TYPE OF MODULE : MULTICRYSTALLINE SILICON MODULE
MODEL : 305W
INVERTER
TYPE INVERTER : CENTRAL INVERTER 11000VA
MODEL : 1000kW
TOTAL EQUIPMENT
TOTAL PV NUMBER OF SYSTEM : 28920 MODULES
20PV/STRING = 1440 STRINGS
TOTAL INVERTER NUMBER OF SYSTEM : 8 UNITS
TOTAL MAX OUTPUT POWER OF PV : 8,8205 MWdc
TOTAL MAX OUTPUT POWER OF INV : 8,0000 MWdc



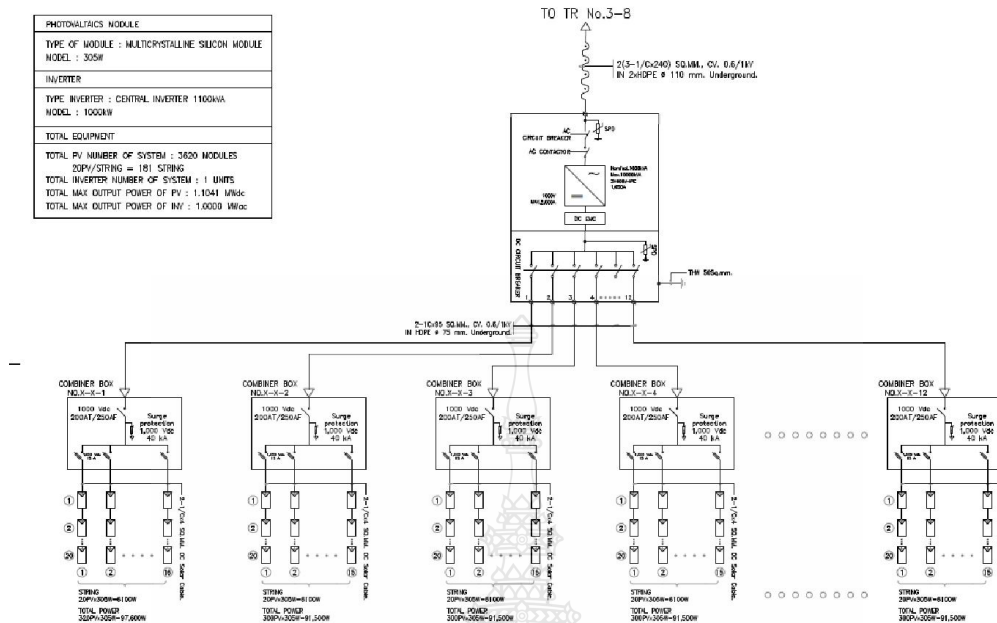
รูปที่ 3.3 Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 1

PHOTOVOLTAICS MODULE
TYPE OF MODULE : MULTICRYSTALLINE SILICON MODULE
MODEL : 305W
INVERTER
TYPE INVERTER : CENTRAL INVERTER 11000VA
MODEL : 1000kW
TOTAL EQUIPMENT
TOTAL PV NUMBER OF SYSTEM : 3600 MODULES
20PV/STRING = 180 STRINGS
TOTAL INVERTER NUMBER OF SYSTEM : 1 UNITS
TOTAL MAX OUTPUT POWER OF PV : 1,098 MWdc
TOTAL MAX OUTPUT POWER OF INV : 1,000 MWdc



รูปที่ 3.4 Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 2

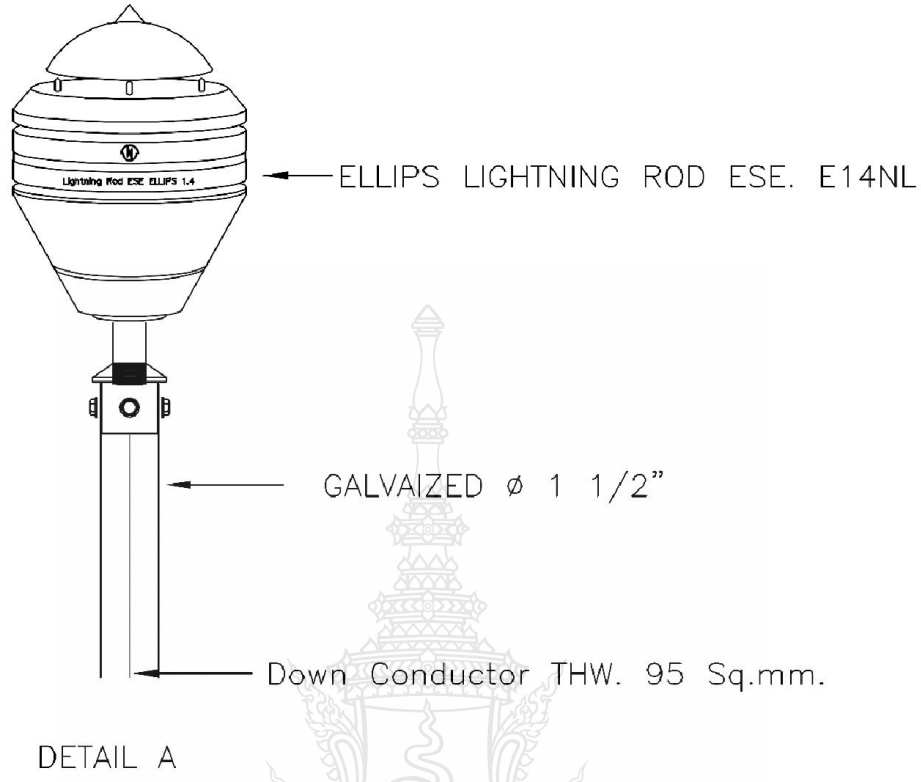
PHOTOVOLTAICS MODULE
TYPE OF MODULE : MULTICRYSTALLINE SILICON MODULE
MODEL : 305W
INVERTER
TYPE INVERTER : CENTRAL INVERTER 1100kVA
MODEL : 1000kW
TOTAL EQUIPMENT
TOTAL PV NUMBER OF SYSTEM : 3620 MODULES
20PV/STRING = 181 STRING
TOTAL INVERTER NUMBER OF SYSTEM : 1 UNITS
TOTAL MAX OUTPUT POWER OF PV : 1,104,1 MWdc
TOTAL MAX OUTPUT POWER OF INV : 1,000.0 MWac



รูปที่ 3.5 Single Line Diagram ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 3

3.4 หัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT)

ลักษณะของหัวล่อฟ้า (Lightning Rod ESE) นั้นจะต้องเป็นหัวล่อฟ้าที่ทำจากวัสดุ Stainless Steel โดยส่วนของหัวล่อฟ้ามีลักษณะเป็นปลายแหลมยาวไม่น้อยกว่า 760 mm ซึ่งต้องมี Capturing Head เป็น Stainless Steel ปิดผนึกมิดชิด โดยภายในจะมีชุด Early Steamer Emission device High Voltage Impulse Amplifier Load Control และ High Voltage Energy Storage เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการใช้งาน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.6 หัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT)

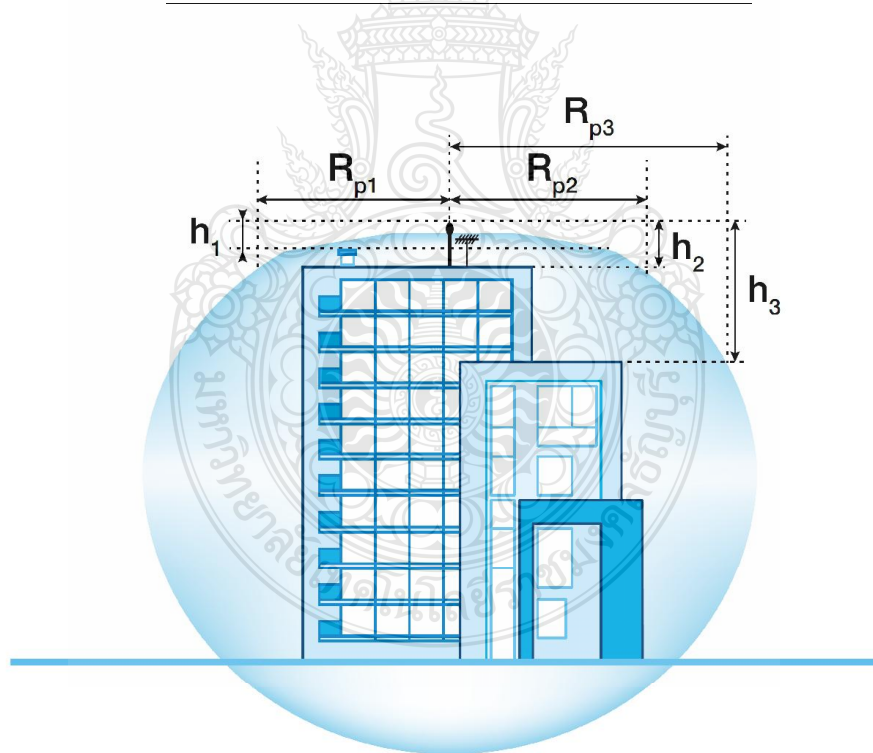
3.5 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า(ESE) โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE) ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน ด้วยมาตรฐานของฝรั่งเศส NFC 17-102 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการออกแบบการติดตั้งหัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT) โดยการจัดวางตำแหน่งของหัวล่อฟ้า ด้วยการกระจายเสาตามรัศมีของพื้นที่ป้องกันโดยอ้างอิงจากรางที่ 3.1 และ การคำนวณโดยสมการที่ 2.7 โดยแสดงดังรูปที่ 3.4 จากระยะการป้องกันของหัวล่อฟ้าซึ่งถูกออกแบบให้อยู่ในระการป้องกันระดับ 3 ความสูงที่ 5 เมตร จะได้รับรัศมีการป้องกันอยู่ที่ 107 เมตรดังรูปที่ 3.5 โดยการออกแบบระบบป้องกันต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระบบสายดิน จุดเชื่อมต่อของสายดิน ความมั่นคงของเสา ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เพื่อที่จะทำให้การถ่ายเทประจุจากฟ้าผ่าได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากที่สุดค่าความต้านทานของระบบมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นการ

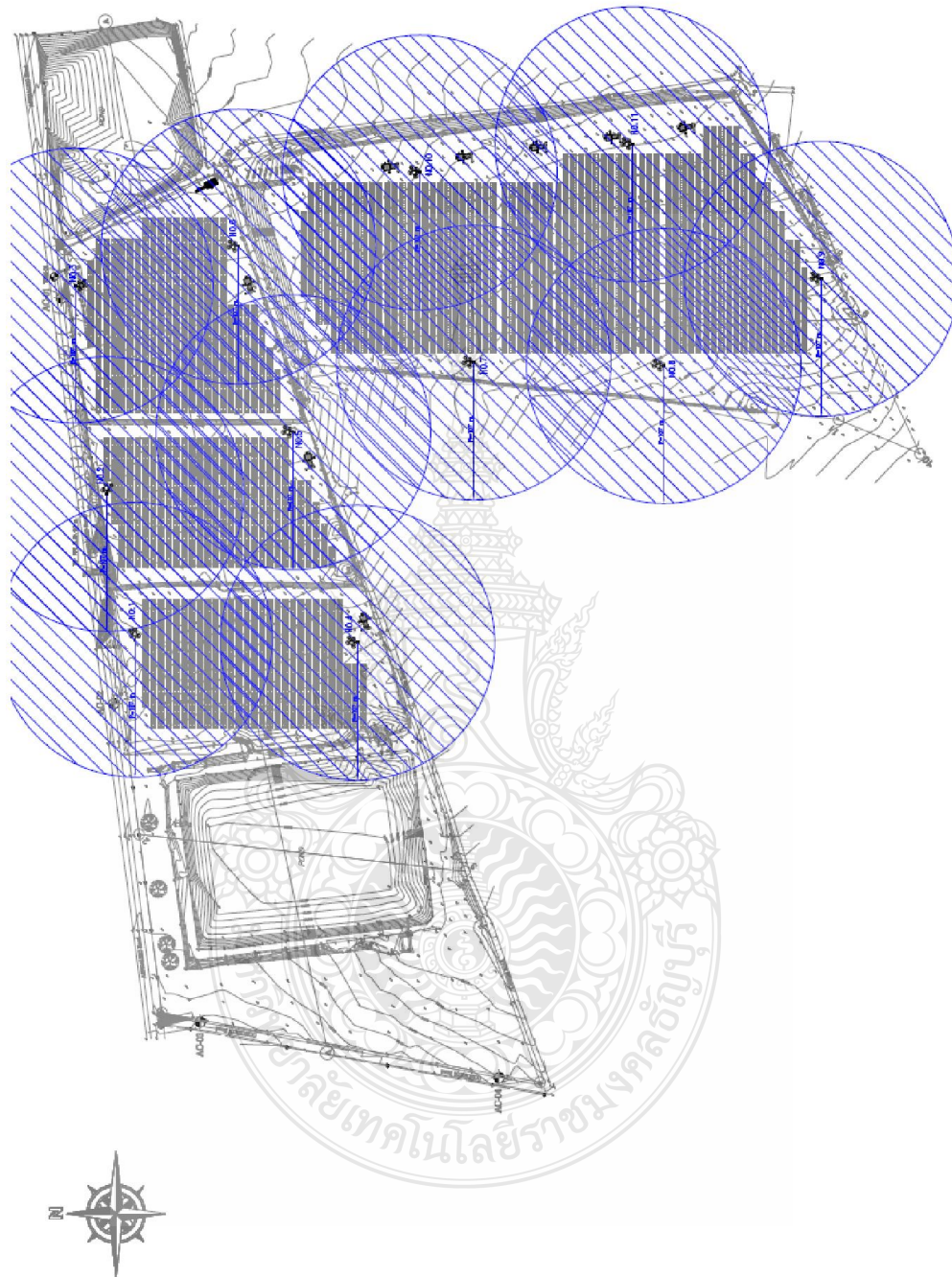
ออกแบบจึงจำเป็นต้องมีความละเอียดเรื่องค่าความต้านทานเป็นอย่างยิ่ง โดยมีการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE) ดังรูปที่ 3.5 ถึง รูปที่ 3.11

ตารางที่ 1 รัศมีการป้องกันของหัวล่อฟ้า

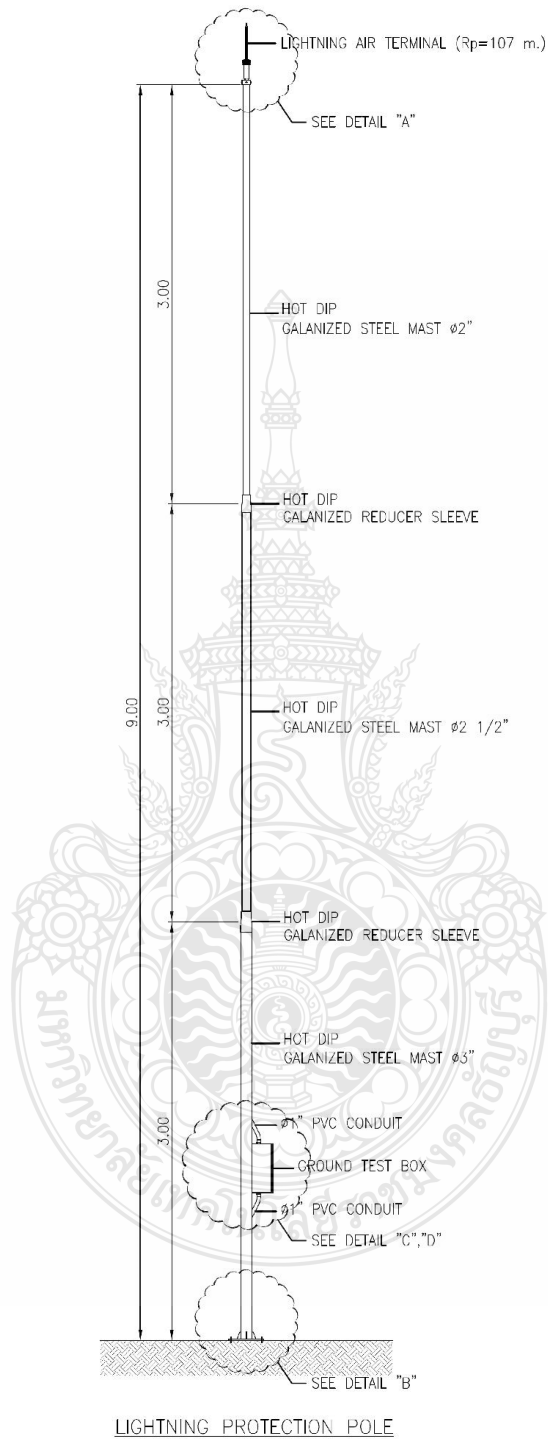
ระดับการป้องกัน	OPR radius of protection		
	I	II (D=45m)	III
	(D=20m)		(D=60m)
2	32	39	43
3	48	59	65
4	64	78	86
5	79	97	107
h(m)	10	99	109
	15	101	111
	20	102	113
	45	105	119
	60	105	120



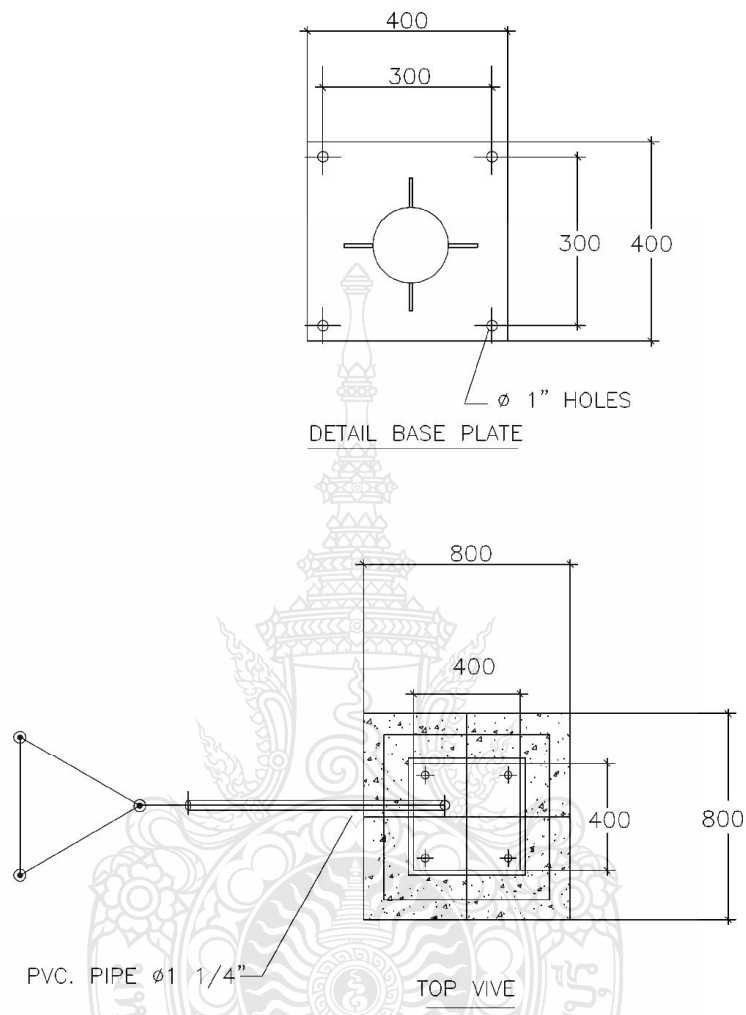
รูปที่ 3.7 แบบการคำนวณระยะป้องกันของหัวล่อฟ้า (ESE) [12]



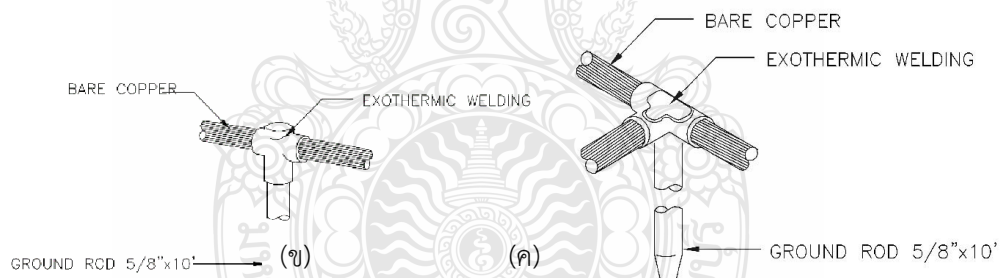
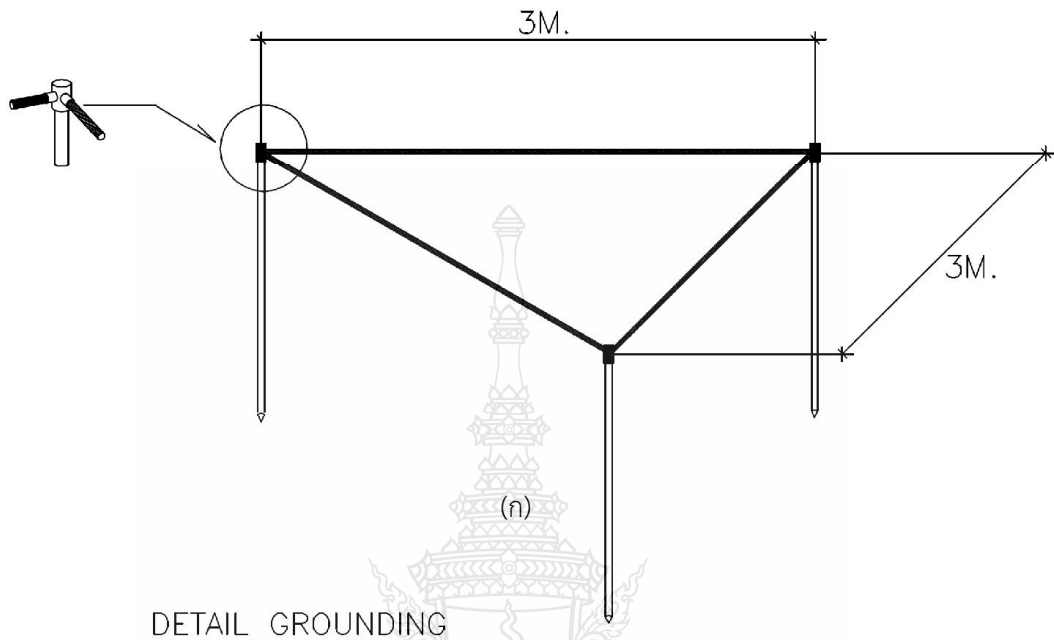
รูปที่ 3.8 การติดตั้งเสาต่อฟ้าแบบ (ESE)



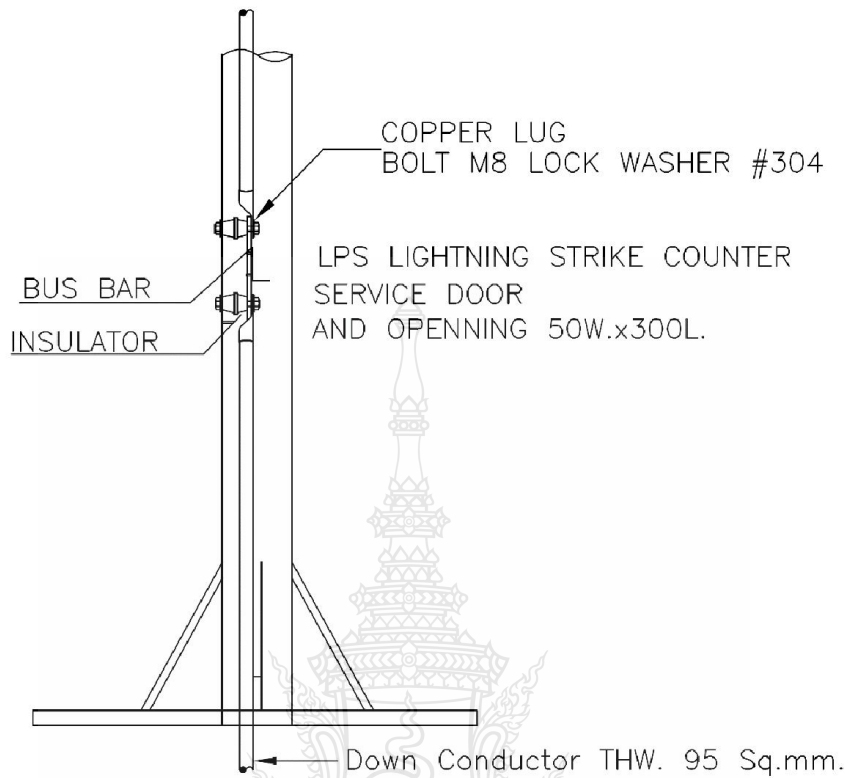
รูปที่ 3.9 การออกแบบเสาหัวล่อฟ้าที่ความสูง 9 เมตร



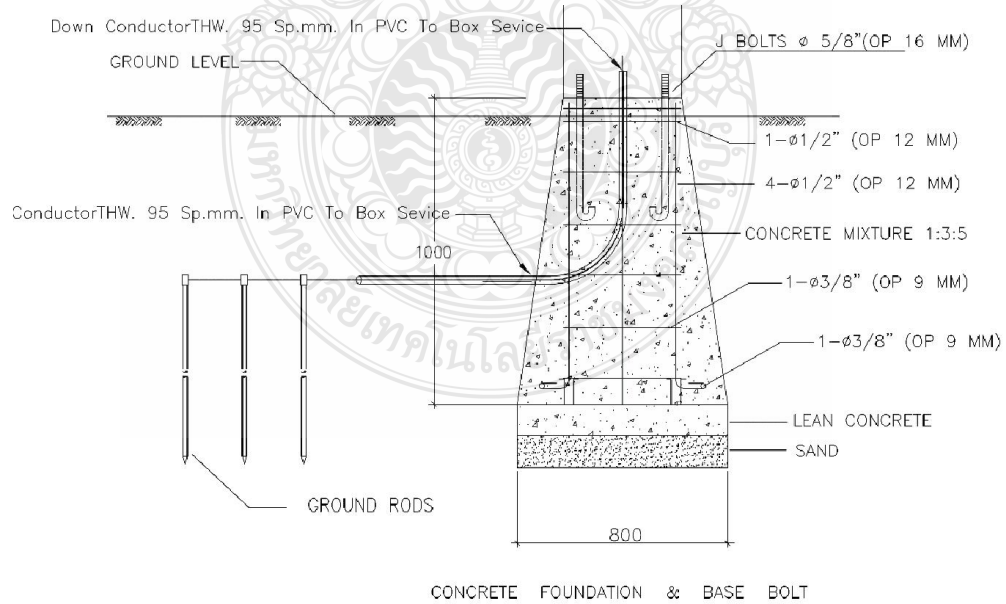
รูปที่ 3.10 รายละเอียดของฐานเสาและตำแหน่งระบบกราวด์



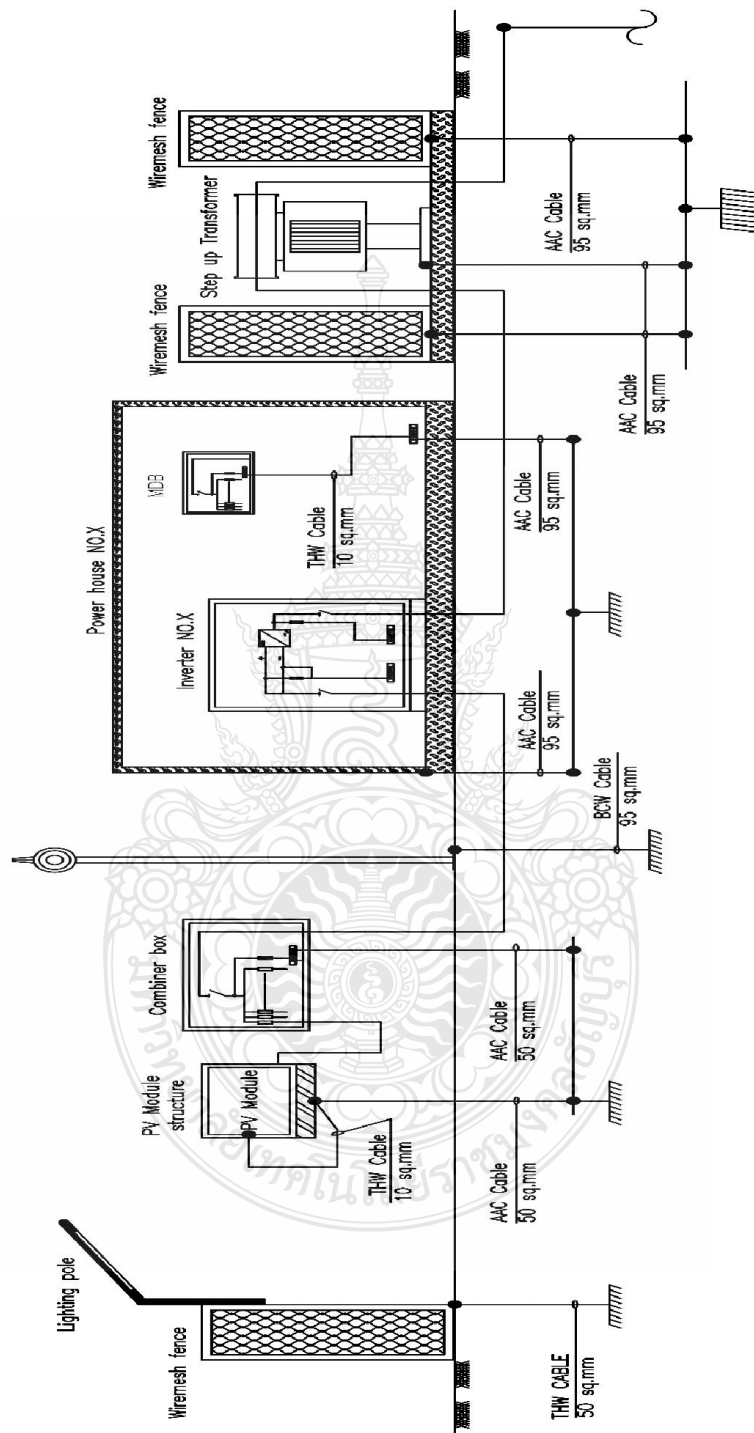
รูปที่ 3.11 (ก) การระบบกราวด์ , (ข) จุดเชื่อมต่อแบบ 2 ทาง , (ค) จุดเชื่อมต่อแบบ 3 ทาง



รูปที่ 3.12 การเชื่อมต่อสายดินกับ LPS



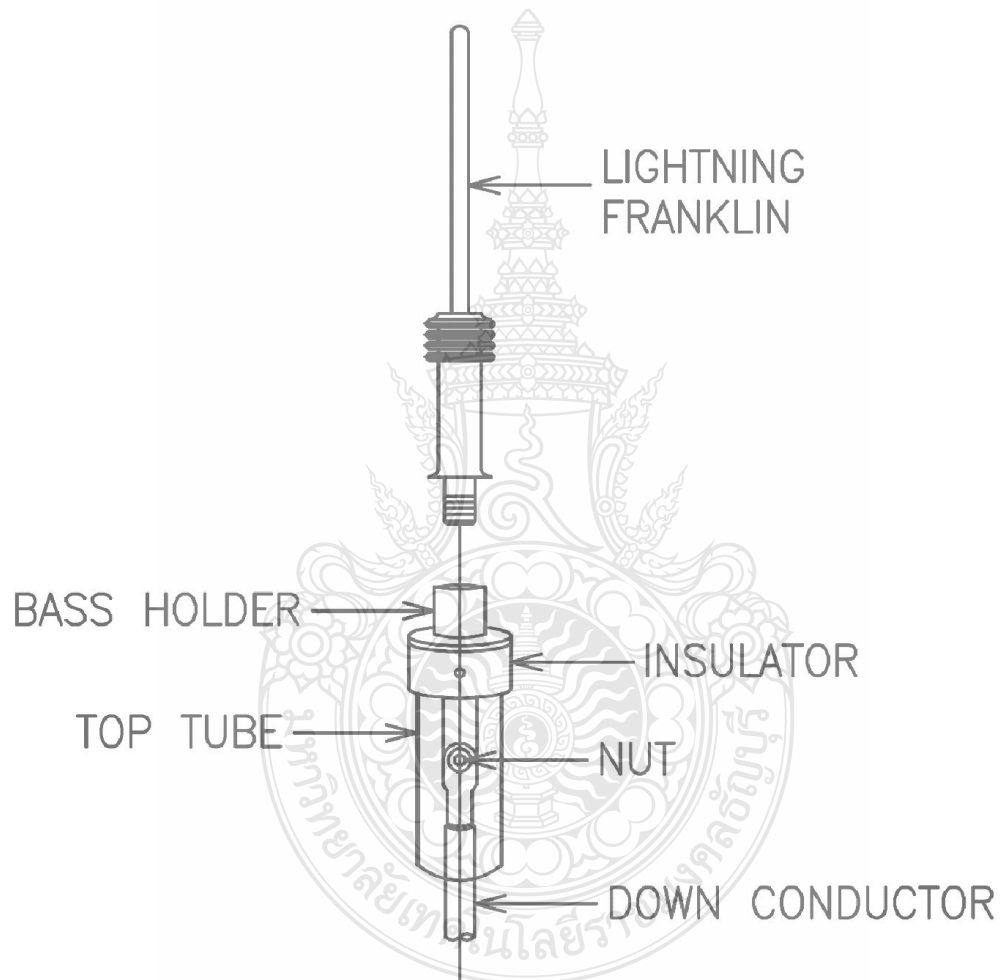
รูปที่ 3.13 การวางท่อสายดินและแบบฐานเสา



รูปที่ 3.14 ระบบกราวด์โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

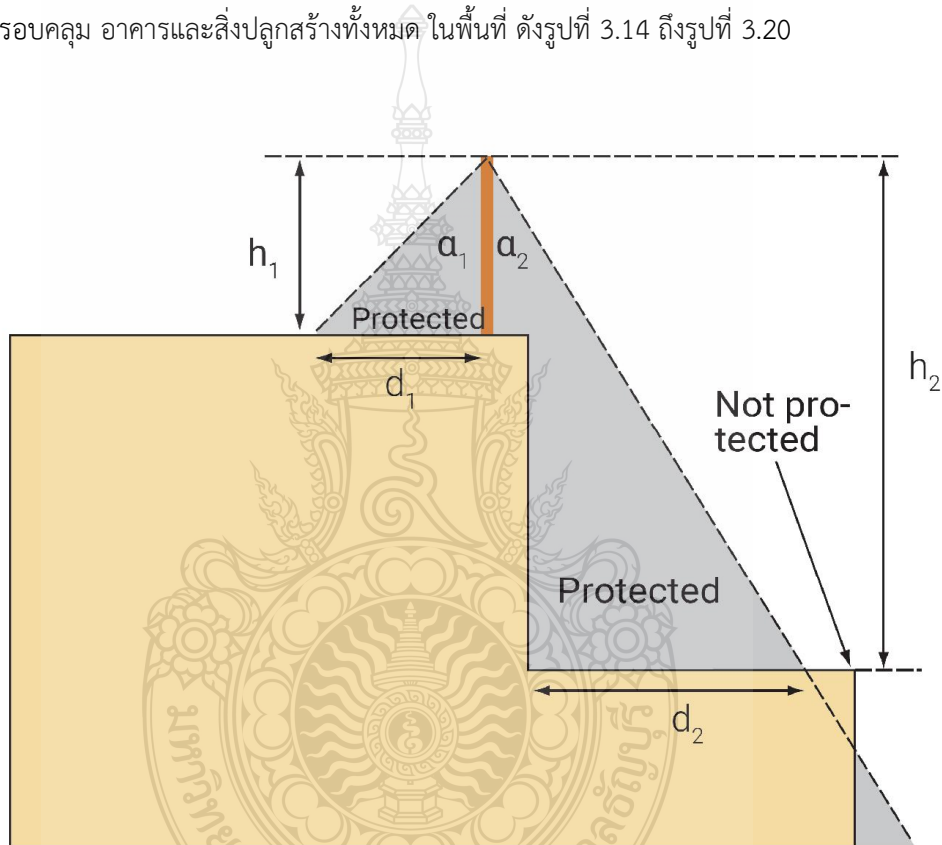
3.6 หัวล่อฟ้าแทงตัวนำ (Lightning Franklin Rods)

แทงตัวนำหรือเสาล่อฟ้า มีลักษณะที่เป็นเสาโลหะติดตั้งในลักษณะเป็นเสาสูงอยู่เหนือสิ่งปลูกสร้าง เพื่อป้องกันการเกิดฟ้าผ่าลงบนตัวสิ่งปลูกสร้างนั้นๆ การป้องกันของแทงตัวนำคือ ทำการป้องกันบริเวณสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ภายใต้พื้นที่ทรงกรวยคว่ำ เหมาะสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน

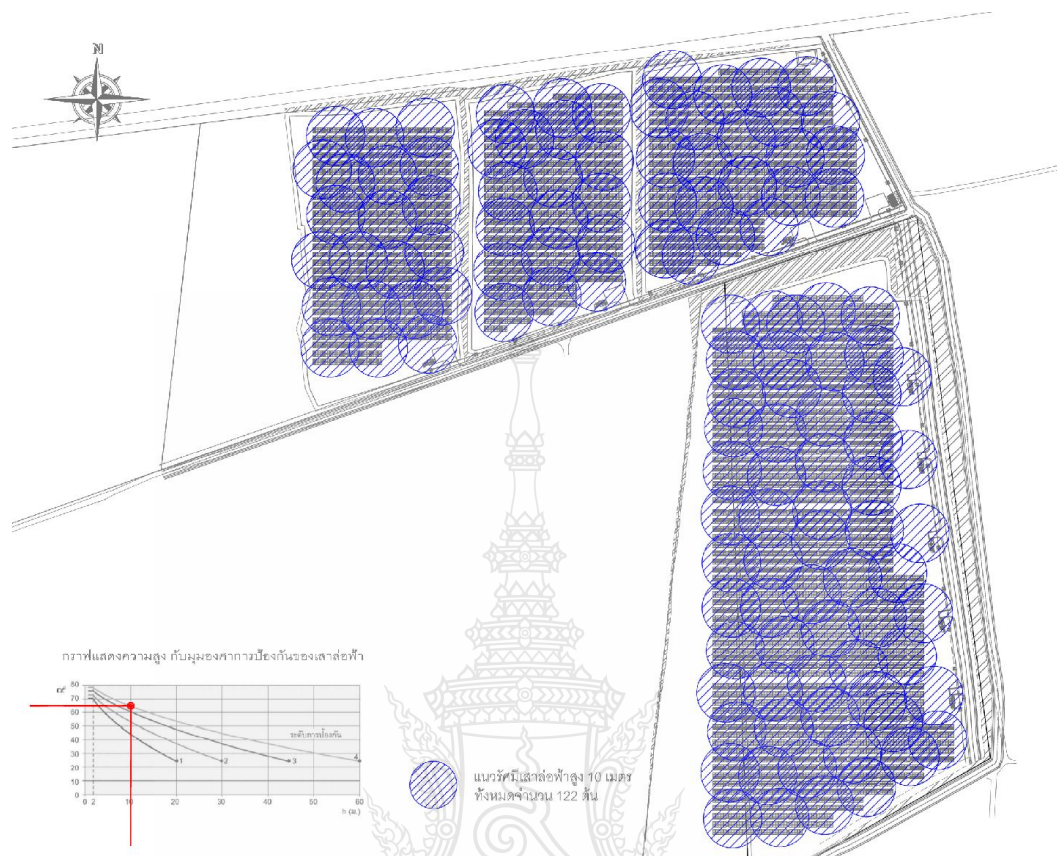


รูปที่ 3.15 แทงตัวนำล่อฟ้า (Lightning Franklin Rods)

ระบบตัวนำล่อฟ้าชนิดมุมป้องกันถือได้ว่าสามารถป้องกันการเกิดฟ้าผ่าลงบนตัวอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่มีลักษณะที่ไม่ซับซ้อน โดยการป้องกันนั้นจะต้องทำการจัดวางตัวนำล่อฟ้าเพื่อให้ครอบคลุมทั้งทั้งพื้นที่ในแนวตั้ง ซึ่งสมมุติให้เป็นลักษณะรูปทรงกรวยกลมตรง โดยมีจุดสูงสุดเป็นแกน และมีมุมยอดเท่ากับ α ซึ่งมีค่ามุมขึ้นอยู่กับระดับชั้นของการป้องกันฟ้าผ่าของ LPS และความสูงของตัวนำล่อฟ้าดังรูปที่ 3.14 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สถานที่ติดตั้งขนาด 95 ไร่ ในระดับความสูงที่ 10 เมตร มุมป้องกัน 65 องศา โดยมีจำนวนของเสาล่อฟ้าทั้งหมด 122 ต้นครอบคลุม อาคารและสิ่งปลูกสร้างทั้งหมด ในพื้นที่ ดังรูปที่ 3.14 ถึงรูปที่ 3.20

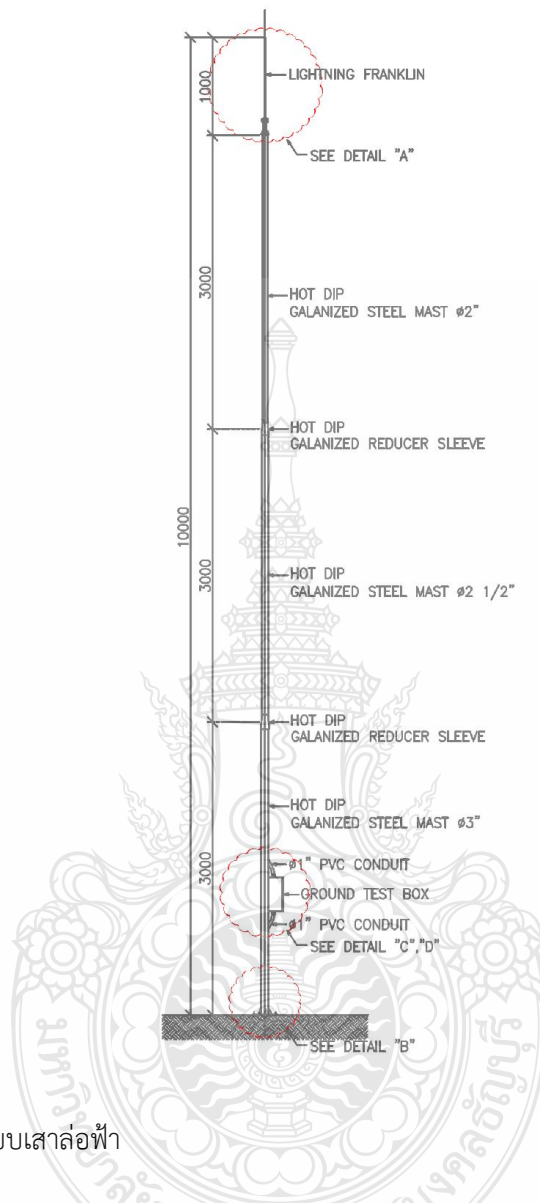


รูปที่ 3.16 การป้องกันฟ้าผ่าแบบมุมป้องกัน [13]



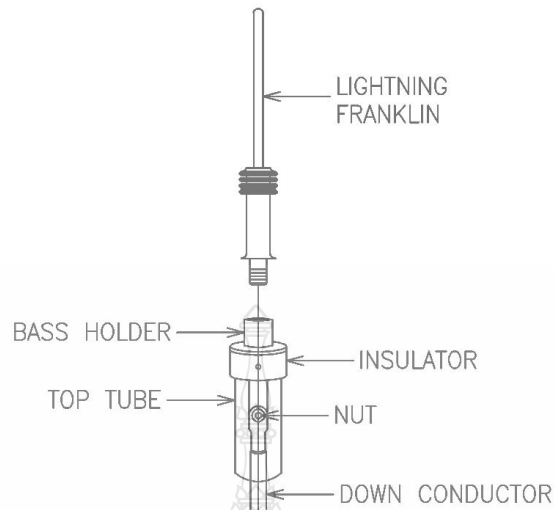
รูปที่ 3.17 การเลือกมุมป้องกันและการจัดวางตำแหน่งเสาหล่อฟ้า

จากรูปที่ 3.15 การออกแบบเลือกระดับการป้องกันฟ้าผ่าในระดับ 4 โดย มีความสูงของหัวหล่อฟ้าอยู่ที่ระดับ 10 เมตร มุม 65 องศา รัศมีการป้องกัน 21.4 เมตร โดยวางกระจายทั่วพื้นที่ ได้จำนวนของหัวหล่อฟ้าทั้งสิ้น 122 หัว ครอบคลุมสิ่งก่อสร้างทั้งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

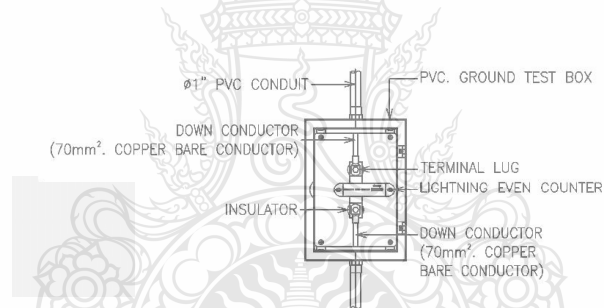


รูปที่ 3.18 การออกแบบเสาหล่อฟ้า

การออกแบบการติดตั้งใช้เสาเหล็ก Galnized เป็นโครงในการติดตั้งหัวหล่อฟ้าโดยแบ่งเป็น 3 ท่อน ท่อนที่ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ท่อนที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 1/2 นิ้ว และ ท่อนที่ 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ดังรูปที่ 3.16

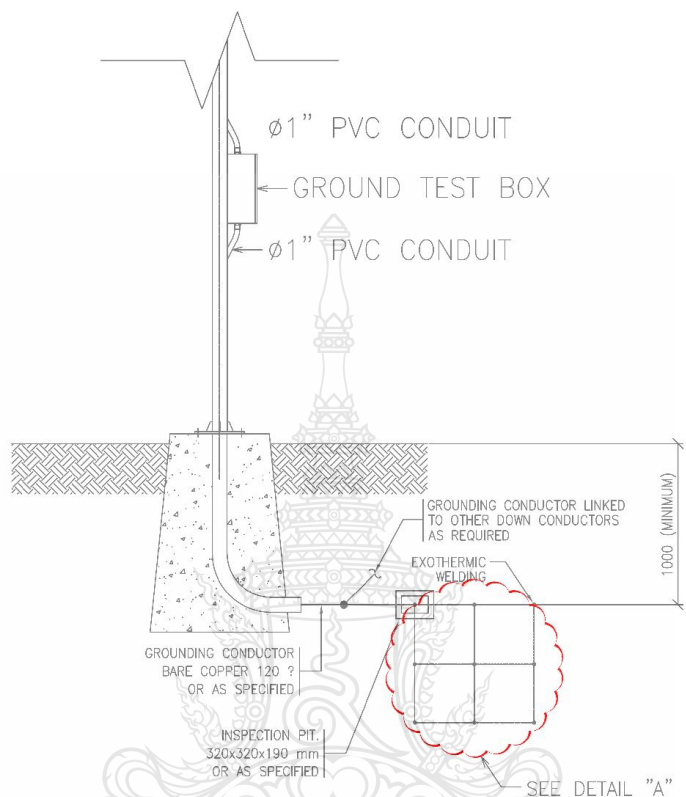


รูปที่ 3.19 การออกแบบติดตั้งแท่งล่อฟ้า



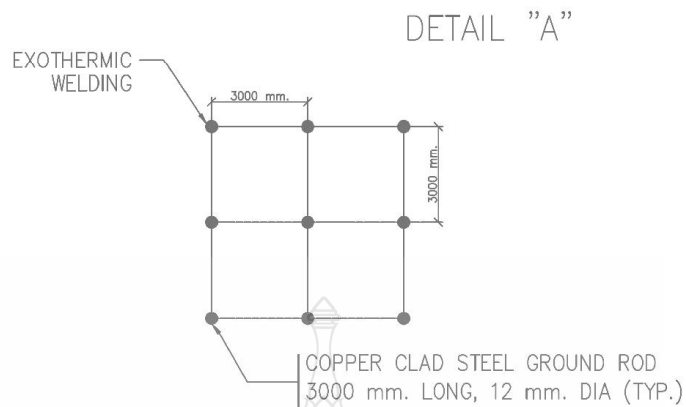
รูปที่ 3.20 การออกแบบติดตั้งตัวนับจำนวนฟ้าผ่า

การออกแบบติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Lightning Franklin Rods แบ่งออกเป็นหัวล่อฟ้ากับฐานปลายเสา โดยจะมีจุดยึดติดกับสายทองแดง ขนาด 70 ตร.มม. เพื่อต่อกับระบบกราวด์ด้านล่างของฐานเสาดังรูปที่ 3.17 การติดตั้งอุปกรณ์นับจำนวนครั้งฟ้าผ่า จะติดตั้งอยู่ในกล่องกันน้ำโดยมีสายทองแดงต่อจากหัวล่อฟ้าลงมาตรงจุดต่อ Terminal lug ดังรูปที่ 3.18



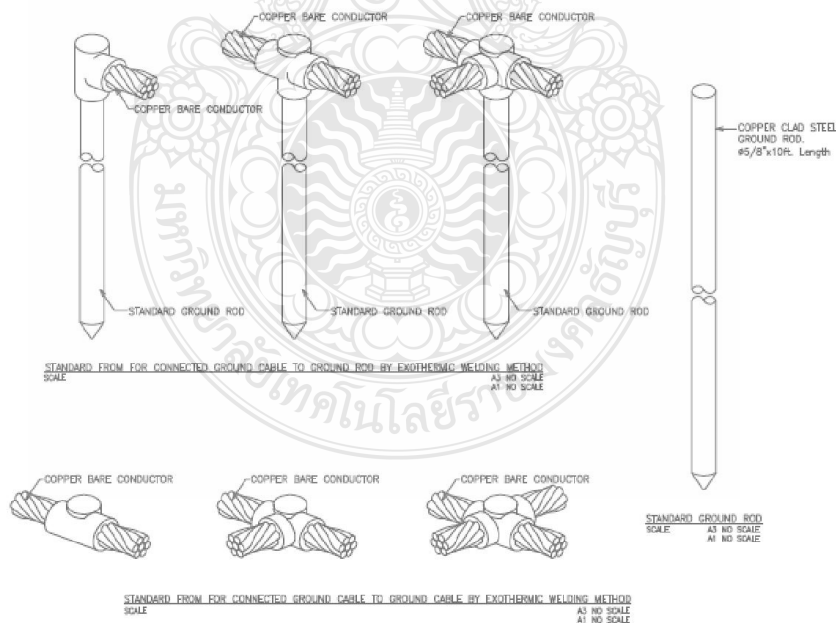
รูปที่ 3.21 การติดตั้งรากฐานเสาหล่อฟ้า

การออกแบบฐานเสาโดยการหล่อปูนเพื่อเป็นฐานเสาภายในฐาน มีท่อร้อยสายตัวนำซึ่งมีความลึกไม่น้อยกว่า 1 เมตร เพื่อร้อยสายตัวนำมาต่อกับระบบกราวด์ของเสาหล่อฟ้า ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.22 รายละเอียดการวางระบบกราวด์ของเสาหล่อฟ้า

การต่อระบบกราวด์ของเสาหล่อฟ้าโดยการกระจายแท่งตัวนำให้ห่างกัน 3 เมตร จำนวน 9 แท่งเป็นตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งแท่งตัวนำนั้นมีความยาวไม่น้อยกว่า 3 เมตร ขนาด 12 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.20 ลักษณะการต่อของสายทองแดงระบบกราวด์ จะใช้วิธีการเชื่อมต่อสายเพื่อให้ค่าความต้านทานลดลงดังรูปที่ 3.21



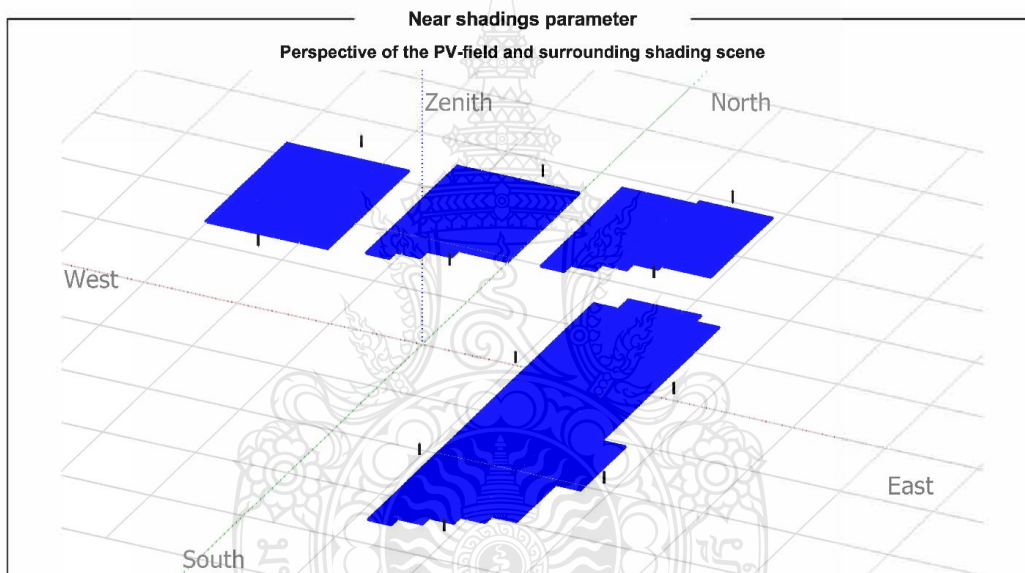
รูปที่ 3.23 การเชื่อมต่อสายระบบกราวด์

3.7 การจำลองผลกระทบจากเงาของเสาหล่อฟ้าด้วยโปรแกรม PVSYST

การจำลองโดยการออกแบบระบบโซล่าเซลล์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 8 MW เพื่อศึกษา ปัจจัยของความคุ้มค่าและปัจจัยเสี่ยงในหลายๆ ด้าน เช่น มุมรับแสง การพาดผ่านของเงา ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า โดยการจำลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 การจำลองดังนี้

3.6.1 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 8 MW ด้วยการติดตั้งหัวหล่อฟ้าชนิด ESE

การจำลองด้วยการติดตั้งหัวหล่อฟ้าชนิด ESE นั้นมีจำนวนหัว ESE ทั้งหมด 11 หัว ที่ ความสูง 9 เมตร ระดับการป้องกันระดับ 4 ตามมาตรฐาน NFC 17-102 มีการวางกระจายห่างกัน ประมาณ 107 เมตร ทิวทัศน์ที่ดังรูปที่ 3.21

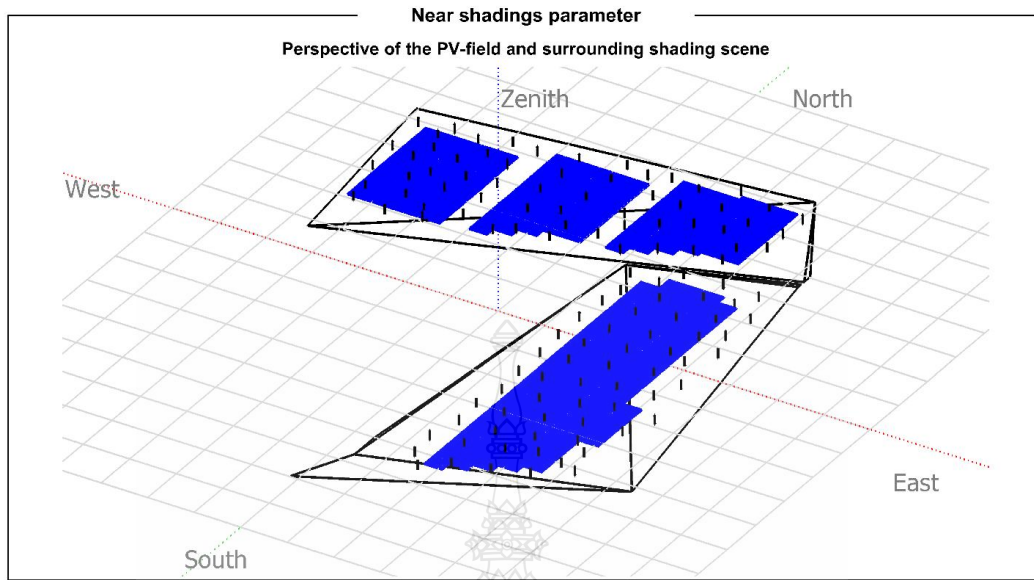


รูปที่ 3.24 การจำลองผลโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การติดตั้งหัวหล่อฟ้า ESE ผลด้วยโปรแกรม PVSYST

3.6.2 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 8 MW ด้วยการติดตั้งหัวหล่อฟ้าชนิด

Lightning Franklin Rods

การจำลองด้วยการติดตั้งหัวหล่อฟ้าชนิด Lightning Franklin Rods นั้นมีจำนวนหัว Lightning Franklin Rods ทั้งหมด 122 หัว ที่ความสูง 10 เมตร ระดับการป้องกันระดับ 4 ตามมาตรฐาน วสท.มีการวางกระจายห่างกันประมาณ 21.4 เมตร ทิวทัศน์ที่ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.25 การจำลองผลโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การติดตั้งหัวล่อฟ้า Lightning Franklin Rods ผลด้วยโปรแกรม PVSYS

3.6 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบ Early Streamer Emission (ESE) ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบติดตั้งบนพื้นดิน ด้วยมาตรฐานของฝรั่งเศส NFC 17-102 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการออกแบบการติดตั้งหัวล่อฟ้า Early Streamer Emission Air Terminal (ESEAT) ในพื้นที่ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังการผลิต 8,000 kW โดยมีขนาดพื้นที่โดยรวม 152,000 ตารางเมตร สามารถออกแบบโดยใช้เสาในการติดตั้งทั้งหมด 11 ต้น โดยกระจายทั่วพื้นที่ ซึ่งมีระยะห่างโดยเฉลี่ย 107 เมตร ซึ่งอยู่ในระดับการป้องกัน ระดับ 3 ของมาตรฐานฝรั่งเศส NFC 17-102 และการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบมุมป้องกัน ระดับ 4 โดยมีหัวล่อฟ้าชนิด Lightning Franklin Rods โดยรัศมีการป้องกันอยู่ที่ 21.4 เมตร จึงจำเป็นต้องใช้หัวล่อฟ้าทั้งหมด 122 ต้นเพื่อให้มีรัศมีการป้องกันทั่วบริเวณโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

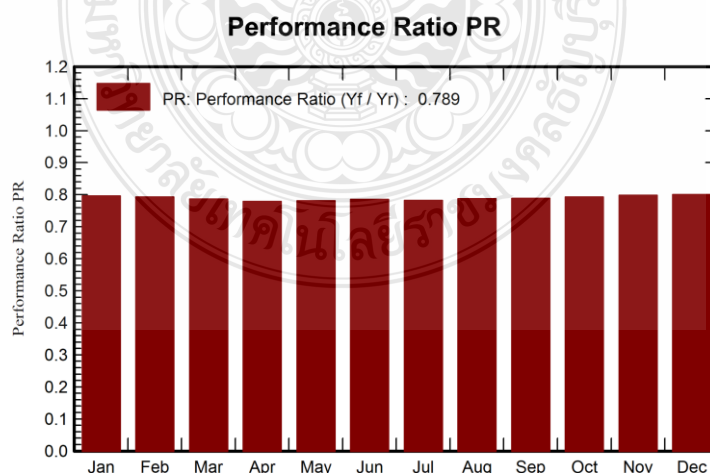
การวิเคราะห์การออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีขนาดพื้นที่รวม 95 ไร่ การออกแบบแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ 1.การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยการใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE ซึ่งเป็นหัวล่อฟ้าแบบใหม่ 2.การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้หัวล่อฟ้าแบบดั้งเดิมคือ หัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal เพื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนในการติดตั้ง และการป้องกันฟ้าผ่าภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

4.2 ผลการจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PVSYST

การศึกษาการจำลองของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 8 MW ด้วยโปรแกรม PVSYST โดยการกำหนด ขนาดแผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ ทิศทางการรับแสง เงาที่กระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ ด้วยการแบ่งการจำลองออกเป็น 2 แบบ คือการจำลองติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE และ Franklin Rod ได้ดังนี้

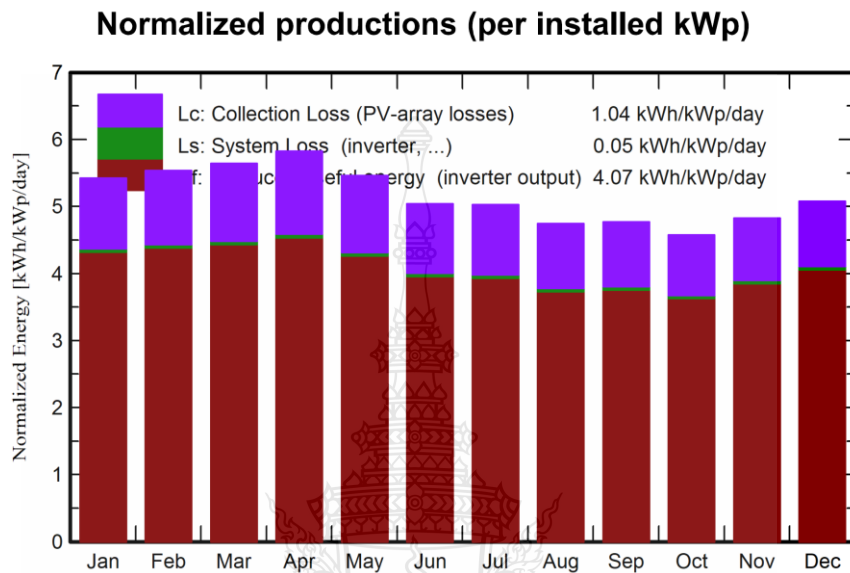
4.2.1 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE

โดยการจำลองด้วยการติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE ที่ออกแบบไว้จำนวน 11 หัว ซึ่งได้ผลการจำลอง การสูญเสียการผลิตไฟฟ้าจากการบดบังของเงาที่เกิดจากเสาหัวล่อฟ้า อยู่ที่ 0.72 % ของระบบผลิตไฟฟ้าทั้งหมด การผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ 13,107,000 kWh โดยประมาณ และแสดงผลการจำลองทางด้านประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 4.1 ค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE

Performance Ratio (PR) คือ ค่า ค่าสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE นั้น มีค่า PR อยู่ที่ 78.9 ดังรูปที่ 4.1

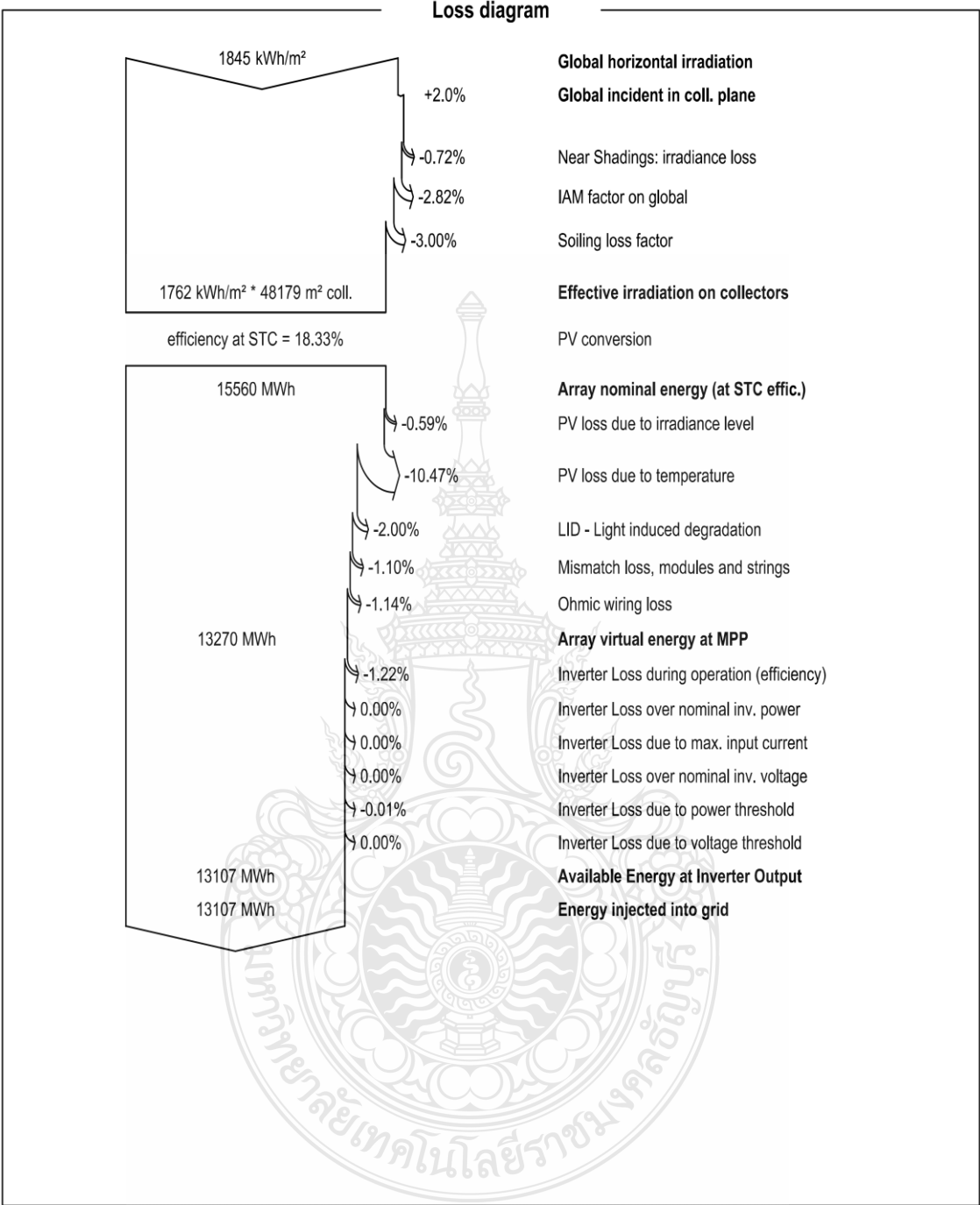


รูปที่ 4.2 ค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE

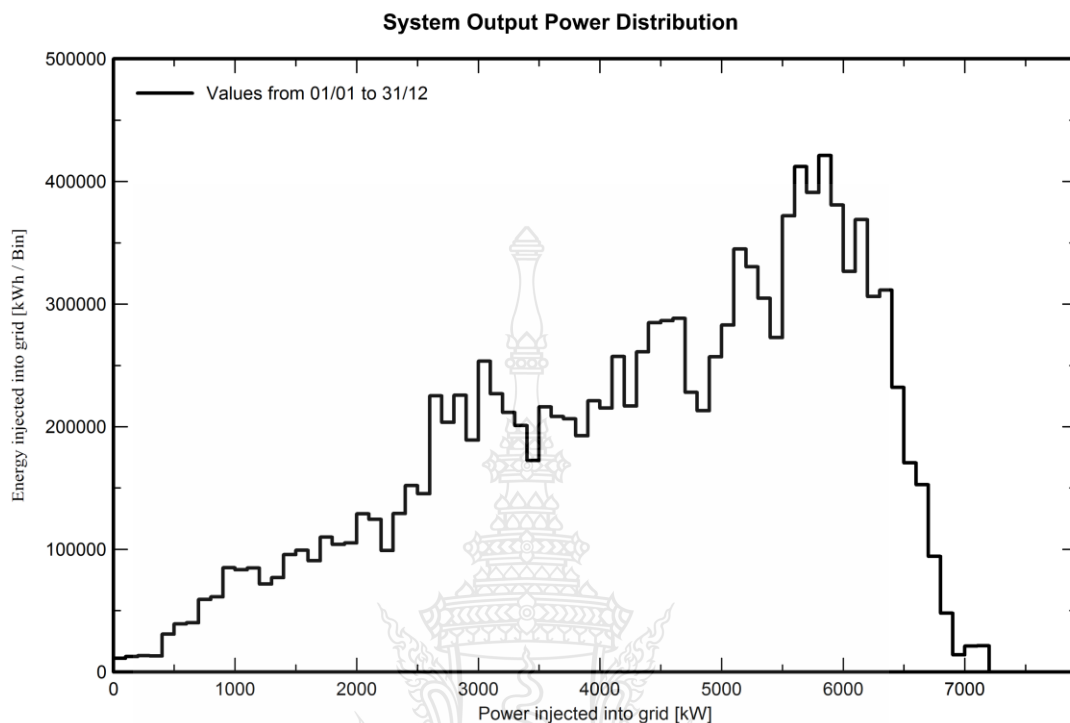
Normalized production คือ ค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมของโรงไฟฟ้าต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียทั้งหมดของโรงไฟฟ้า การสูญเสียจากแผงโซลาร์เซลล์คิดเป็น 1.04 kWh/kWp/day การสูญเสียในระบบไฟฟ้าคิดเป็น 0.05 kWh/kWp/day ดังรูปที่ 4.2

Loss Diagram คือ การบอกการสูญเสียโดยรวมของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.3 การสูญเสียจากอุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์อยู่ที่ร้อยละ 10.47 ซึ่งเป็นการสูญเสียที่สูงที่สุดของระบบและการสูญเสียจากเงาของเสาต่อฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 0.72

Daily System Output Energy คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลา 1 ปี โดยการผลิตนั้นมีกำลังการผลิตที่ไม่คงที่ เกิดจากหลายสาเหตุ ปริมาณเมฆ สภาพอากาศ ฝน เป็นต้น ดังรูปที่ 4.4



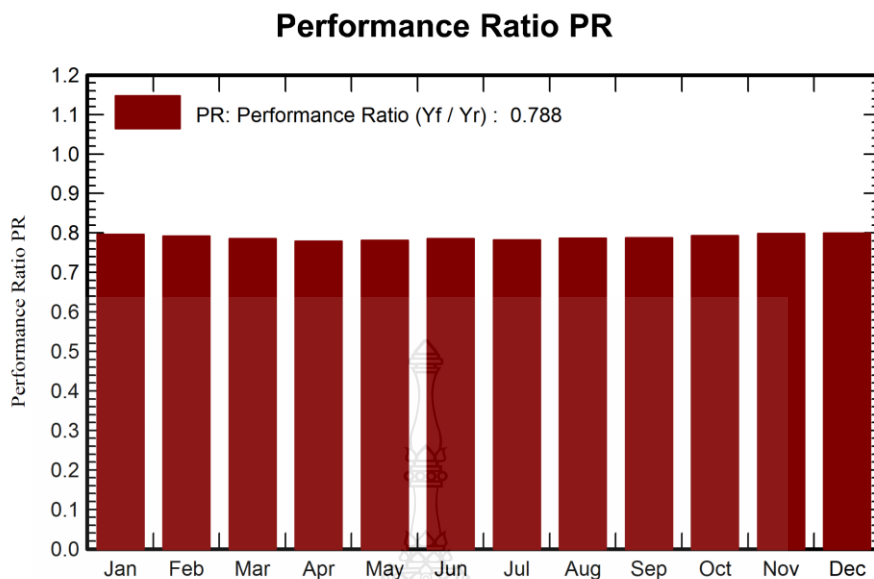
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE



รูปที่ 4.4 ค่าการผลิตพลังงานรายวันของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด ESE

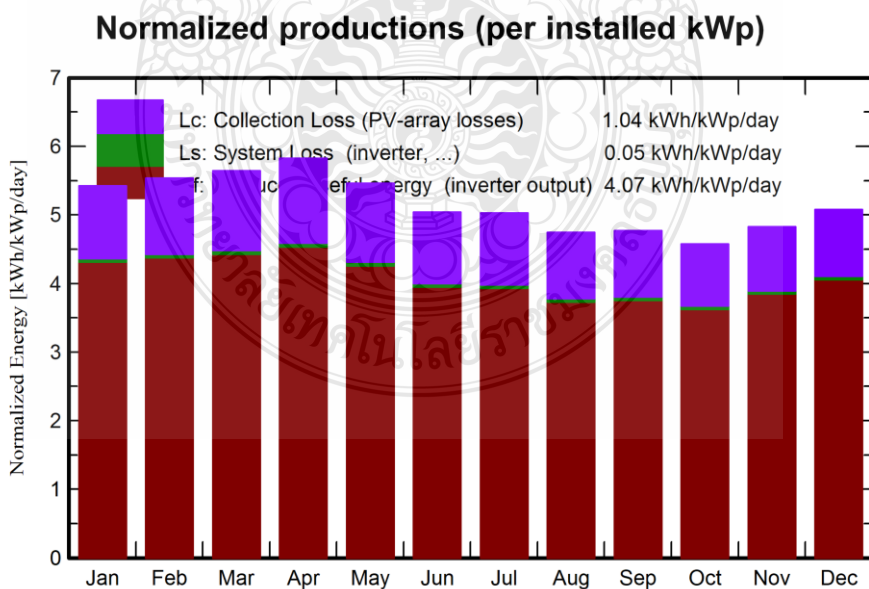
4.2.2 การจำลองโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod

โดยการจำลองด้วยการติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod ที่ออกแบบไว้จำนวน 122 หัว ซึ่งได้ผลการจำลอง การสูญเสียการผลิตไฟฟ้าจากการบดบังของเงาที่เกิดจากเสาหล่อฟ้า อยู่ที่ 0.81% ของระบบผลิตไฟฟ้าทั้งหมด การผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ 13,096,000 kWh โดยประมาณ และแสดงผลการจำลองทางด้านประสิทธิภาพของระบบ



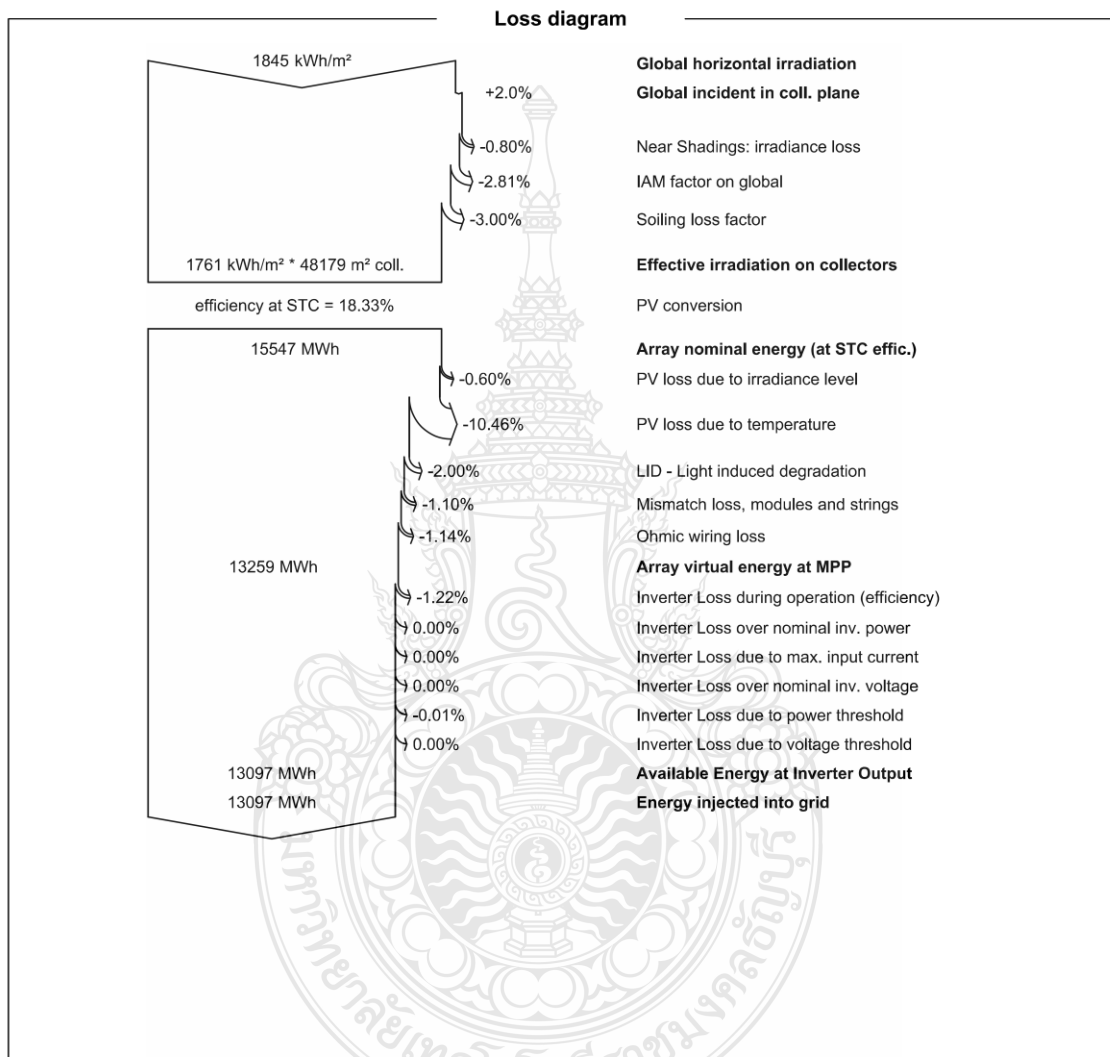
รูปที่ 4.5 ค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod

Performance Ratio (PR) คือ ค่า ค่าสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod นั้น มีค่า PR อยู่ที่ 78.8 ดังรูปที่ 4.5



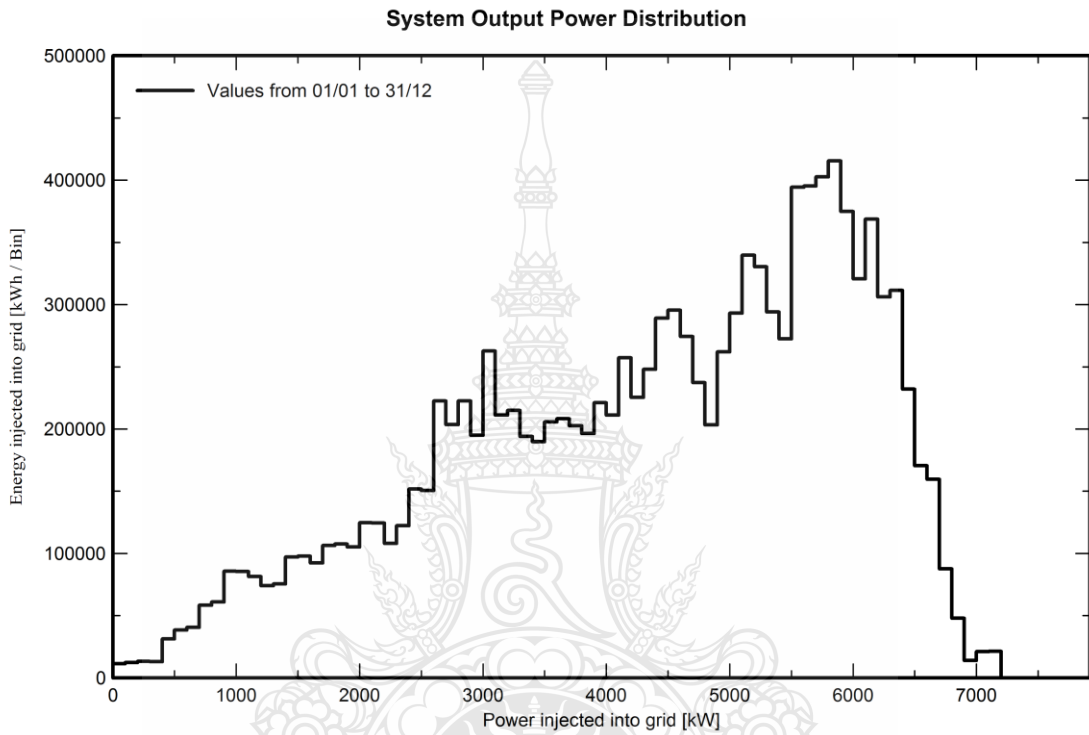
รูปที่ 4.6 ค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod

Normalized production คือ ค่าการผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมของโรงไฟฟ้าต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียทั้งหมดของโรงไฟฟ้า การสูญเสียจากแผงโซลาร์เซลล์คิดเป็น 1.04 kWh/kWp/day การสูญเสียในระบบไฟฟ้าคิดเป็น 0.05 kWh/kWp/day ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 ไดอะแกรมกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod

Loss Diagram คือ การบอกการสูญเสียโดยรวมของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.7 การสูญเสียจากอุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์อยู่ที่ร้อยละ 10.46 ซึ่งเป็นการสูญเสียที่สูงที่สุดของระบบและการสูญเสียจากเงาของเสาหล่อฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 0.81



รูปที่ 4.8 ค่าการผลิตพลังงานรายวันของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งหัวหล่อฟ้าชนิด Franklin Rod

Daily System Output Energy คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลา 1 ปี โดยการผลิตนั้นมีกำลังการผลิตที่ไม่คงที่ เกิดจากหลายสาเหตุ ปริมาณเมฆ สภาพอากาศ ฝน เป็นต้นดังรูปที่ 4.8

4.3 การคำนวณต้นทุนระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวล่อฟ้าชนิด ESE

จากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวล่อฟ้าชนิด ESE ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีขนาดพื้นที่ทั้งหมด 95 ไร่ โดยการออกแบบต้องครอบคลุม สิ่งปลูกสร้าง อาคาร และระบบโซลาร์เซลล์ จากการออกแบบการติดตั้งจำนวนเสาล่อฟ้าทั้งหมด 11 ต้น รัศมีการล่อฟ้าของเสามีขนาด 107 เมตร ดังรูปที่ 3.6 และการออกแบบเสาล่อฟ้าดังรูปที่ 3.8 จึงสามารถนำมาหาราคาต้นทุนของวัสดุอุปกรณ์ โดยการคำนวณค่าวัสดุ

$$\text{ค่าวัสดุ} = \text{จำนวนวัสดุ} \times \text{ราคาต่อหน่วยของวัสดุ}$$

$$\begin{aligned}\text{ตัวอย่างการคำนวณหัวล่อฟ้าชนิด ESE} &= 11 \times 110,000.00 \\ &= 1,210,000.00 \text{ บาท}\end{aligned}$$

การติดตั้งเสาล่อฟ้าโดยทั่วไปการคิดค่าแรงการติดตั้งจะคิดตามจำนวนจุดของการติดตั้ง

$$\text{ค่าแรงการติดตั้งเสาล่อฟ้า} = \text{จำนวนจุดการติดตั้ง} \times \text{ค่าแรงการติดตั้งต่อจุด}$$

$$\begin{aligned}\text{ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงการติดตั้ง} &= 11 \times 5,000.00 \\ &= 55,000.00 \text{ บาท}\end{aligned}$$

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาล่อฟ้าของหัวล่อฟ้าชนิด ESE

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
หัวล่อฟ้าชนิด ESE	11	ชุด	110,000.00	1,210,000.00
สายทองแดงขนาด 95 ตร.มม.	11	ชุด	10,000.00	110,000.00
อุปกรณ์นับจำนวนฟ้าผ่าพร้อมกล่องติดตั้ง	11	ชุด	2,500.00	27,500.00
เสาเหล็ก Galvanized สูง 9 ม.	11	ชุด	7,000.00	77,000.00
ค่าแรงติดตั้ง	11	งาน	5,000.00	55,000.00
รวมต้นทุน				1,479,500.00

ตารางที่ 4.2 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงระบบกราวด์ของหัวล่อฟ้าชนิด ESE

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
สายทองแดงขนาด 95 ตร.มม.	110	เมตร	300.00	33,000.00
แท่งทองแดงขนาด 5/8"x10 ft	33	แท่ง	1,350.00	44,550.00
อุปกรณ์อื่นๆในการติดตั้ง	1	ชุด	7,755.00	7,755.00
ค่าแรงติดตั้ง	1	งาน	8,531.00	8,531.00
รวมต้นทุน				93,836.00

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนรวมวัสดุเสาล่อฟ้าและระบบกราวด์ของล่อฟ้า ESE

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
ต้นทุนวัสดุเสาไฟฟ้าพร้อมค่าแรง	1	งาน	1,479,500.00	1,479,500.00
ต้นทุนวัสดุระบบกราวด์พร้อมค่าแรง	1	งาน	93,836.00	93,836.00
ต้นทุนรวม				1,573,336.00

จากการออกแบบระบบล่อฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดพื้นที่ 95 ไร่ โดยมีอาคาร กระจกปลุกสร้าง ด้วยการคำนวณวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการติดตั้งระบบล่อฟ้าชนิดหัวล่อฟ้าแบบ ESE นั้นสามารถเรียบเรียงรายการวัสดุอุปกรณ์ และการคำนวณต้นทุน ได้ดังตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.3

4.4 การคำนวณต้นทุนระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal

จากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีขนาดพื้นที่ทั้งหมด 95 ไร่ โดยการออกแบบต้องครอบคลุม สิ่งปลุกสร้าง อาคาร และระบบโซล่าเซลล์ จากการออกแบบการติดตั้งจำนวนเสาล่อฟ้าทั้งหมด 122 ต้น โดยแต่ละต้นมีแนวรัศมีการป้องกันอยู่ที่ 10 เมตร ดังรูปที่ 3.15 และการออกแบบเสาล่อฟ้าดังรูปที่ 3.16 จึงสามารถนำมาราคาต้นทุนของวัสดุอุปกรณ์ โดยการคำนวณค่าวัสดุต้นทุดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาป้องกันฟ้าผ่าของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin

Rod Air Terminal

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
หัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod	122	ชุด	2,500.00	244,000.00
สายทองแดงขนาด 95 ตร.มม.	122	ชุด	10,000.00	1,220,000.00
อุปกรณ์นับจำนวนฟ้าผ่าพร้อมกล่องติดตั้ง	122	ชุด	2,500.00	305,000.00
เสาปูนสูง 9 เมตร	122	ชุด	7,000.00	854,000.00
ค่าแรงติดตั้ง	122	งาน	5,000.00	610,000.00
รวมต้นทุน				3,233,000.00

ตารางที่ 4.5 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาป้องกันฟ้าผ่าของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin

Rod Air Terminal

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
สายทองแดงขนาด 95 ตร.มม.	4,880.00	เมตร	300.00	1,464,000.00
แท่งทองแดงขนาด 5/8"x10 ft	1,098.00	แท่ง	1,350.00	1,482,300.00
อุปกรณ์อื่นๆในการติดตั้ง	1	ชุด	294,630.00	294,630.00
ค่าแรงติดตั้ง	1	งาน	342,093.00	342,093.00
รวมต้นทุน				3,565,023.00

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งของเสาป้องกันฟ้าผ่าของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin

Rod Air Terminal

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม
ต้นทุนวัสดุเสาไฟฟ้าพร้อมค่าแรง	1	งาน	3,233,000.00	3,233,000.00
ต้นทุนวัสดุระบบกราวด์พร้อมค่าแรง	1	งาน	3,565,023.00	3,565,023.00
ต้นทุนรวม				6,798,023.00

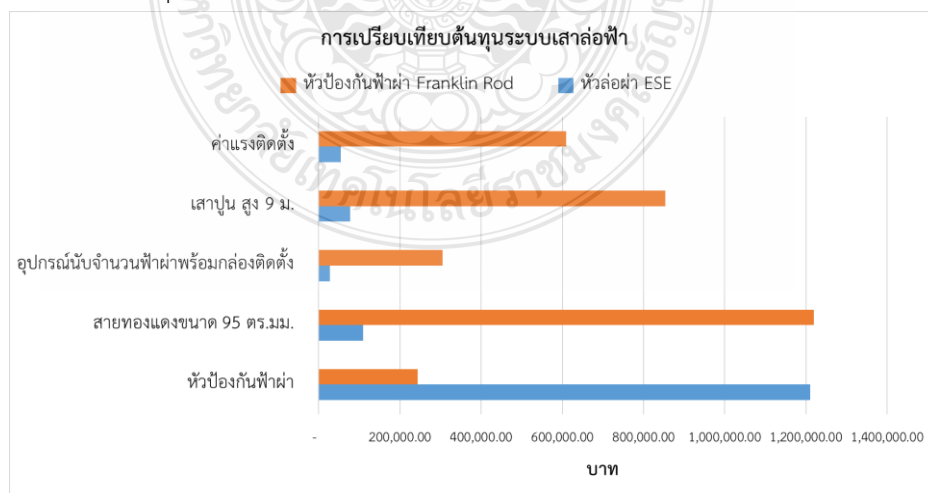
4.5 การเปรียบเทียบด้านเศรษฐศาสตร์ของต้นทุนในการออกแบบระบบล่อฟ้าของหัวล่อฟ้าชนิด ESE กับระบบป้องกันฟ้าผ่าชนิดมุมป้องกัน ของหัวป้องกันฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal

การเปรียบเทียบด้านเศรษฐศาสตร์ การลงทุนของระบบล่อฟ้าผ่าของหัวล่อฟ้าชนิด ESE กับระบบป้องกันฟ้าผ่าของหัวชนิด Franklin Rod Air Terminal สามารถนำเสนอได้ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายวัสดุเสาป้องกันฟ้าผ่า

ลำดับ	รายการ	หัวล่อฟ้า ESE (บาท)	หัวป้องกันฟ้าผ่า Franklin Rod (บาท)
1	หัวป้องกันฟ้าผ่า	1,210,000.00	244,000.00
2	สายทองแดงขนาด 95 ตร.มม.	110,000.00	1,220,000.00
3	อุปกรณ์นับจำนวนฟ้าผ่าพร้อมกล่องติดตั้ง	27,500.00	305,000.00
4	เสาปูน สูง 9 เมตร	77,000.00	854,000.00
5	ค่าแรงติดตั้ง	55,000.00	610,000.00
	รวมค่าลงทุน	1,479,500.00	3,233,000.00

จากตารางที่ 4.5 แสดงการลงทุนในการติดตั้งเสาล่อฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบ ราคาต่อหน่วยของวัสดุ ต่างๆ ที่ใช้ในการติดตั้งโดยผลต่างของราคาทั้งระบบของแบบหัวล่อฟ้าชนิด ESE และ แบบหัวชนิด Franklin Rod Air Terminal อยู่ในค่าที่มีนัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการลงทุน



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยวัสดุของระบบเสาล่อฟ้า

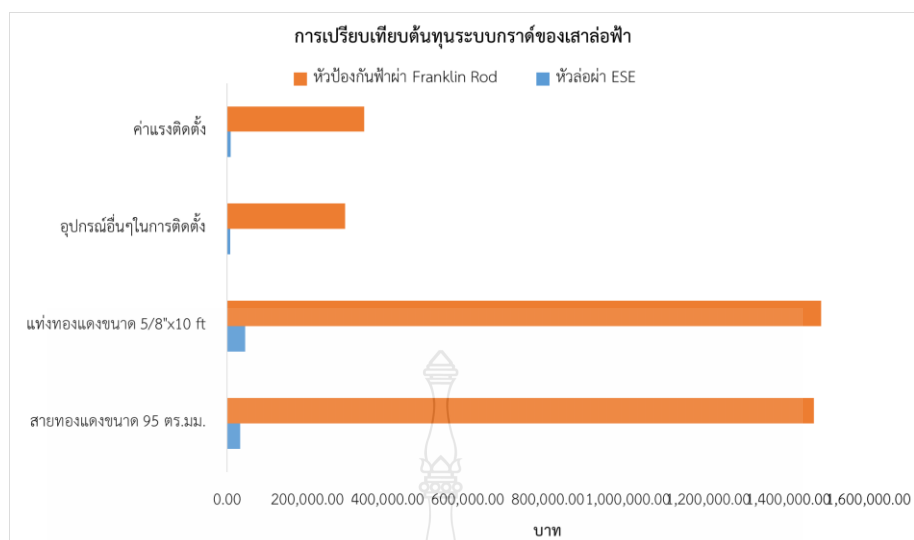
จากรูปที่ 4.1 การเทียบต้นทุนของระบบเสาหล่อฟ้าด้วยปัจจัยในด้านเศรษฐศาสตร์ จึงเห็นว่าในระบบเสาหล่อฟ้าชนิดหัวESE นั้นมีราคาต้นทุนของหัวหล่อฟ้าที่สูงกว่าระบบ หัวชนิด Franklin Rod Air Terminal อยู่พอสมควร แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งมีราคา ที่น้อยกว่ามาก เนื่องด้วยจำนวนของเสาหล่อฟ้าที่แตกต่างกันพอสมควร

การเปรียบเทียบด้านเศรษฐศาสตร์ การลงทุนระบบกราวด์ของระบบหล่อฟ้าผ่าของหัวหล่อฟ้าชนิด ESE กับ ระบบป้องกันฟ้าผ่าของหัวชนิด Franklin Rod Air Terminal ซึ่งเป็นผลเปรียบเทียบสามารถนำเสนอได้ตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายวัสดุระบบกราวด์

ลำดับ	รายการ	หัวหล่อฟ้า ESE (บาท)	หัวป้องกันฟ้าผ่า Franklin Rod (บาท)
1	สายทองแดงขนาด 95 ตร.มม.	33,000.00	1,464,000.00
2	แท่งทองแดงขนาด 5/8"x10 ft	44,550.00	1,482,300.00
3	อุปกรณ์อื่นๆในการติดตั้ง	7,755.00	294,630.00
4	ค่าแรงติดตั้ง	8,531.00	342,093.00
	รวมค่าลงทุน	93,836.00	3,565,023.00

จากตารางที่ 4.8 แสดงต้นทุนในการติดตั้งระบบกราวด์ของเสาหล่อฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบ ราคาต่อหน่วยของวัสดุ ต่างๆ ที่ใช้ในการติดตั้งโดยผลต่างของราคาทั้งระบบของแบบหัวหล่อฟ้าชนิด ESE และ แบบหัวชนิด Franklin Rod Air Terminal อยู่ในค่าที่มีนัยสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการลงทุน



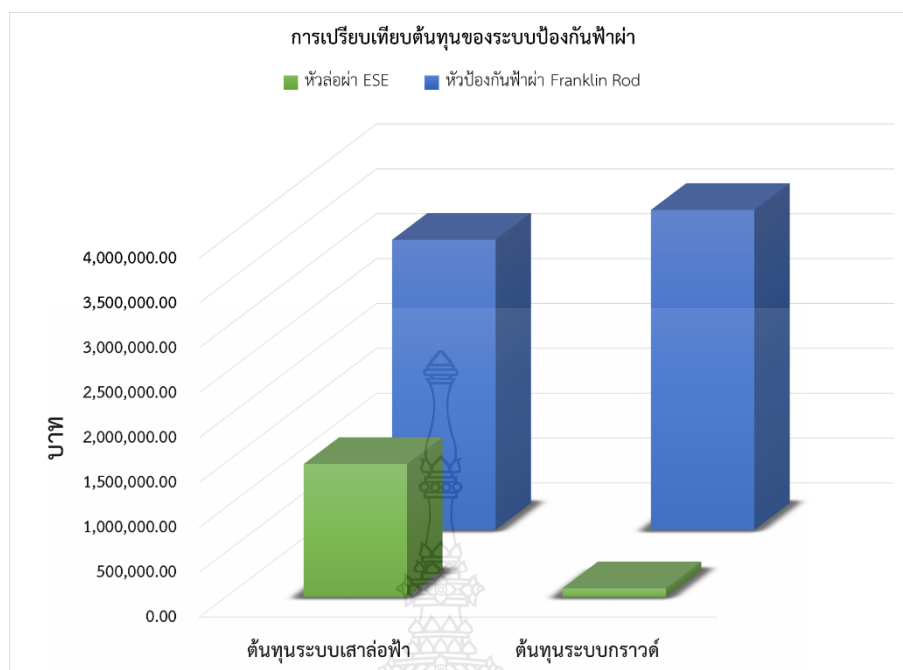
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยวัสดุของระบบกรวดล่อฟ้า

จากรูปที่ 4.2 การเทียบต้นทุนระบบกรวดของเสาหล่อฟ้าด้วยปัจจัยในด้านเศรษฐศาสตร์ จึงเห็นว่าในระบบกรวดของเสาหล่อฟ้าชนิดหัวESE นั้นมีราคาต้นทุนที่ต่ำกว่ามากเนื่องด้วยจำนวนของระบบที่มีจำนวนน้อยกว่าและค่าแรงในการติดตั้งของจำนวนเสาที่น้อยกว่า ของระบบกรวดหัวชนิด Franklin Rod Air Terminal อยู่มาก จึงมีส่วนในการเลือกระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากการรวบรวมต้นทุนของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีขนาดพื้นที่ 95 ไร่ โดยมีสิ่งปลูกสร้างและอาคารจำนวนหนึ่ง ซึ่งได้ทำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า อยู่ 2 แบบคือ 1) ระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE 2) คือระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้หัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal ซึ่งเป็นหัวล่อฟ้าแบบเก่า เพื่อนำมาพิจารณาต้นทุนในการติดตั้ง สามารถนำมาแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบต้นทุนรวมของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ลำดับ	รายการ	หัวล่อฟ้า ESE (บาท)	หัวป้องกันฟ้าผ่า Franklin Rod (บาท)
1	ต้นทุนระบบเสาหล่อฟ้า	1,479,500.00	3,233,000.00
2	ต้นทุนระบบกรวด	93,836.00	3,565,023.00
	รวมค่าลงทุน	1,573,336.00	6,798,023.00



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบต้นทุนของระบบป้องกันฟ้าผ่า

จากรูปที่ 4.9 คือการแสดงผลต้นทุนรวมของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ได้ออกแบบในการติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งจริงของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ เลือกการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า ของหัวต่อฟ้าชนิด ESE ที่มีรัศมีการล่อฟ้า อยู่ที่ 107 เมตร ซึ่งได้พิจารณาจากราคาต้นทุนของระบบป้องกันฟ้าผ่า

4.6 ผลจากการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของหัวต่อฟ้าชนิด ESE

จากการเลือกระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวต่อฟ้าชนิด ESE ซึ่งมีรัศมีการล่อฟ้า อยู่ที่ 107 เมตร โดยใช้จำนวนการติดตั้งทั้งหมด 11 จุดกระจายทั่วพื้นที่ขนาด 95 ไร่ ครอบคลุม สิ่งปลูกสร้างและอาคาร ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด โดยลักษณะการติดตั้งจริง ดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.5 ลักษณะการติดตั้งเสาหล่อฟ้า



รูปที่ 4.6 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบล่อฟ้า

ตารางที่ 4.10 การเกิดฟ้าผ่าบนพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ลำดับ ปี	จำนวนการเกิดฟ้าผ่า(ครั้ง)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2559	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2560	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2561	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2562	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2563	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 4.10 การเกิดฟ้าผ่าในบริเวณของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ขนาด 95 ไร่ ผ่านในระยะเวลา 4 ปี ได้มีการเกิดฟ้าผ่าเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยเกิดในปี พ.ศ. 2560 จำนวน 2 ครั้ง บริเวณเสาต้นที่ 4 และ เสาต้นที่ 5 และในปี พ.ศ. 2561 อีกจำนวน 1 ครั้ง ในบริเวณเสาต้นที่ 5 โดยการเกิดฟ้าผ่าบริเวณโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง

4.7 บทสรุป

การวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งออกแบบด้วยกัน 2 ระบบโดยแบ่งออกเป็น ระบบที่ใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE กับระบบหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal จึงทำการวิเคราะห์ ต้นทุนในการติดตั้งของระบบทั้ง 2 เป็นแนวทางติดตั้งจริงของโรงไฟฟ้า โดยคำนึงถึงต้นทุนของระบบป้องกันฟ้าผ่า จากการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยเลือกใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE ในการป้องกันฟ้าผ่า ผลของการป้องกันฟ้าผ่าในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เกิดขึ้น 3 ครั้ง ภายใน 2 ปี จึงสามารถดำเนินการสรุปในบทต่อไป



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

จากการศึกษา ออกแบบ และวิเคราะห์ของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 9 MW โดยมีพื้นที่ ขนาด 95 ไร่ ซึ่งแบ่งการออกแบบเพื่อการเปรียบเทียบต้นทุน ที่ใช้ในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าออกเป็น 2 ระบบคือ 1.การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE 2.การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้หัวล่อฟ้าแบบดั้งเดิมคือ หัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้านั้นเลือกจากการคุ้มทุนและสามารถป้องกัน สิ่งปลูกสร้างของโรงไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ และวิเคราะห์ข้อมูลหลังการติดตั้ง 4 ปี

5.2 สรุปผลการวิจัย

5.2.1 จากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการแบ่งการออกแบบเป็นสองระบบ ระบบที่ 1 คือ การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยการใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE จากการออกแบบและเลือกวัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าพ้านั้น ระบบเสาหัวล่อฟ้ามีต้นทุนในการติดตั้ง อยู่ที่ 1,479,500.00 บาท และระบบกราวด์ของหัวล่อฟ้ามีต้นทุนอยู่ที่ 93,836.00 บาท ซึ่งโดยรวมของต้นทุนที่ใช้ในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า อยู่ที่ 1,573,336.00 บาท ซึ่งต้นทุนทั้งหมดรวมค่าติดตั้งทั้งหมดแล้ว และระบบที่ 2 คือ การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบหัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal ซึ่งเป็นระบบล่อฟ้าแบบเก่า ซึ่งการเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์ ในการติดตั้ง เสาหัวล่อพ้านั้น เป็นการเลือกใช้ตามมาตรฐานของ วสท. โดยมีต้นทุนในการติดตั้งระบบเสาหัวล่อฟ้าอยู่ที่ 3,233,000.00 บาท และระบบกราวด์มีต้นทุนอยู่ที่ 3,565,023.00 บาท รวมต้นทุนทั้งระบบอยู่ที่ 6,798,023.00 บาท ซึ่งสรุปผลทางด้านเศรษฐศาสตร์นั้นการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบดั้งเดิมหรือแบบหัวล่อชนิด Franklin Rod Air Terminal มีต้นทุนที่สูงกว่า แบบที่ใช้หัวล่อฟ้าชนิด ESE ซึ่งคิดเป็นจำนวนต้นทุนที่ต่างกันอยู่ที่ 5,224,687.00 บาท ต้นทุนมีความต่างโดยมีนัยสำคัญในการพิจารณาการติดตั้งของระบบ ความแตกต่างของต้นทุนนี้เกิดจาก รัศมีของการป้องกันของหัวล่อฟ้า 2 ชนิด ซึ่งหัวล่อฟ้าแบบ ESE นั้นมีรัศมีการล่อฟ้าอยู่ที่ 107 เมตรต่อหัว แต่หัวล่อฟ้าชนิด Franklin Rod Air Terminal มีรัศมีการป้องกัน อยู่ที่ 10 เมตรต่อหัว จึงทำให้ต้องใช้จำนวนการติดตั้งอยู่ที่ 122 ต้น แต่ หัวล่อฟ้าชนิด ESE นั้นใช้เพียง 11 หัว เท่านั้น

5.2.2 ผลจากการติดตั้งเสาหล่อฟ้าในสถานที่จริงโดยการเลือกใช้หัวหล่อฟ้าชนิด ESE ในการติดตั้ง ติดตั้งทั้งหมด 11 จุด ทั่วบริเวณของพื้นที่ขนาด 95 ไร่ ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผลที่เกิดขึ้นคือ มีจำนวนการเกิดฟ้าผ่าที่ อุปกรณ์นับจำนวนบันทึกไว้ได้ ทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งเกิดในปีพ.ศ. 2560 จำนวน 2 ครั้ง และในปี พ.ศ. 2561 จำนวน 1 ครั้ง โดยการเกิดฟ้าผ่าบริเวณโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถทำให้ แผงโซลาร์เซลล์ สิ่งปลูกสร้าง หรืออาคาร ภายในโรงไฟฟ้า เสียหายได้เลย และการติดตั้งจำนวนของเสาที่น้อยลง ทำให้ผลกระทบจากการเกิดเงาที่บดบังแผงมีน้อยลงด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้น การเลือกใช้งานระบบหัวหล่อฟ้า ชนิด ESE ยังไม่ได้รับรองจากมาตรฐานของ วสท. แต่มีหลายๆปัจจัยในการพิจารณา การเลือกติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า จึงต้องวิเคราะห์การคุ้มทุน ทางด้านความปลอดภัยในการป้องกันฟ้าผ่า และทางด้านกฎหมาย ด้านการรับประกันของอุปกรณ์ และการรับประกันความเสียหายของระบบหากเกิดจากการเกิดฟ้าผ่า การรับประกันของประกันภัยทรัพย์สิน

บรรณานุกรม

- [1] วิศรุต อัครฉัตรสกุล, **แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน**,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,2561
- [2] DEHN และ Sohne , **Lightning Protection Guide** 3rd updated edition, 2014
- [3] ผศ.สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2549
- [4] กระทรวงอุตสาหกรรม, **กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การป้องกันฟ้าผ่า เล่ม 3 ความเสียหายทางกายภาพต่อสิ่งปลูกสร้าง และอันตรายต่อชีวิต** ,2559
- [5] French standard, **Protection against lightning Early streamer emission lightning protection systems**, NFC 17-102 , 2011
- [6] N.L.Allen and J.C.Evans, **New investigation of the early streamer emission principle**, IEE Proc.-Sci.Meas.Technol, Vol.147, No.5, September 2000
- [7] Vernon Cooray, **NON CONVENTIONAL LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS**, 30th International Conference on Lightning Protection, September 13th -17th, 2010
- [8] Vladimir A. Rakov, **Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection**, Journal of Lightning Research, 2012
- [9] L. Pecastaing, T. Reess, A. De Ferron, S. Souakri, **Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22 , April 2015,789-798
- [10] Reynaldo Zoro and Krismanto Eka Widodo, Hira Laksmiwati **“External Lightning Protection System at Pulp and Paper Industry in Areas with High Lightning Density”** The 4th IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2018
- [11] Koko Agustinus CH, Isdaryanto Iskandar **“LIGHTNING PROTECTION ACCORDING NFC 17-102”** International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 10 , January-2019
- [12] ABB. (2014). **“Lightning protection system Early streamer emission air terminal”**
ABB France

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Bettermann. (2016). “**Lightning protection guide**”.OBO Bettermann GmbH & Co.kg
- [14] John W.Jewett. (2004). “**Physics for Scientists and Engineers**”.(6th ed).Thomson
Brooks
- [15] INTERNATIONAL STANDARD. (1998). “**IEC 61024-4\1-2**”.First Edition.
- [16] nVent. (2018). “**Technical Handbook nVent ERICO Lightning Protection Handbook**”
nVent Services GmbH



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
รายละเอียดอุปกรณ์



www.widesk.com

SK-3

Complies with NF C 17-102



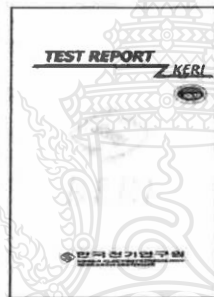
SUNKWANG
LIGHTNING PROTECTION TECHNICAL INSTITUTE BLD.

Complies with the NF C 17-102 standard.

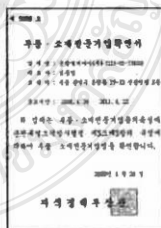
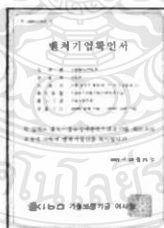
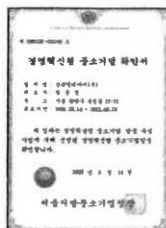
Stainless steel design suitable for most environments

Larger radius of protection.



Innovative design using the latest architectural trends.



 Certified by the KERI
(Korea Electromechanical Research Institute).



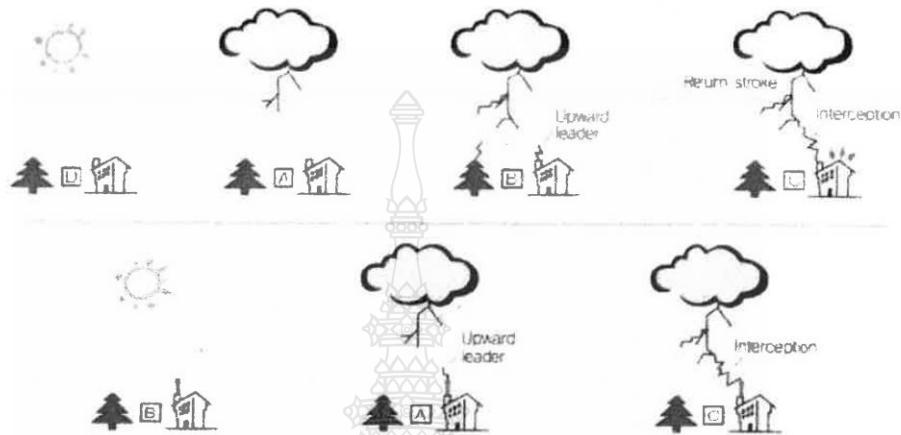
■ Management Innovation Company ■ INNO-BIZ Company ■ Venture Company ■ PARTS and MATERIAL Company ■ ISO 9001

 A2 Technologies A Member of Asia Precision Group		APPROVED	
Submitted by		Date	
Approved by 		Date	

 **SUNKWANG**

รายละเอียดสินค้า และผลการรับรอง (LIGHTNING PROTECTION “ SK-3 ”)

 THE ADVANTAGE OF INITIATION ADVANCE



The unique efficiency of the E.S.E lightning conductor is based on a specific initiation advance: well before the natural formation of an upward leader, the Griffin generates a leader that rapidly propagates to capture the lightning and direct it to earth. Validated in the laboratory, this gain in time relative to the simple rod provides additional essential protection.

APPROVED

Submitted by	Date
Approved by <i>Bahar</i>	Date

 RADIUS OF PROTECTION


		Protection Radius		
Level of protection		I (D=20m)	II (D=45m)	III (D=60m)
h(m)	2	32	39	43
	3	48	59	65
	4	64	78	86
	5	79	97	107
	10	79	99	109
	15	80	101	111
	20	80	102	113
	45	80	105	119
	60	80	105	120

Lightning counters *ALP-LC 1500*

This Lightning Counter keeps record data for the number of lightning strikes after lightning system hit by lightning discharge.

It provides data for analyze the performance of lightning system.

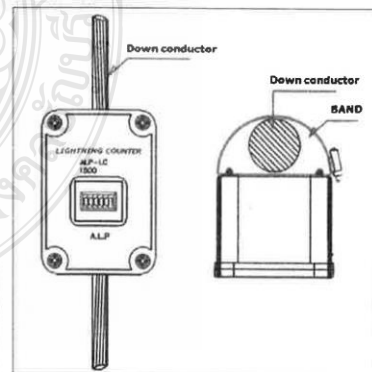
- Counts up to 999,999 events before automatically resetting
- The lightning counter is always attached on down conductor.
- Quick and easy installation and no any external power required.
- The counter triggers pulse from 0.5 - 100KA.
- The digit reading of counter is triggered by every lightning stroke that coursed by electromagnetic field of passing lightning energy.

	Model	ALP-LC 1500
	Min. current for detection	0.5kA
	Max. current for detection	100kA
	Wave form	8/20 μ s
	Maximum numbers of events	999999
	Material	Stainless steel
	Dimensions(cm)	7.5(L) x 10.5(W) x 6.5(H)
	Weight	0.15kg
	Color	Silver


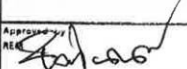
Installation

The number of pulses displayed by the counter during the delivery corresponds to the routing test of the product.

- It must be placed on the down-conductor above the control joint and, in all cases, 2m above the ground.
- Fit to tape 30mm and round 6~8mm, without drilling or cutting conductors



BZST
BANGKOK ZEAL SYSTEM
TECHNOLOGY CO.,LTD.
บริษัท กรุงเทพ ซิลิคอน เทคโนโลยี จำกัด

		APPROVED	
Submitted by		Date	
Approved by		Date	

Blunt End Air Terminal



Copper

Code No.	Rod Length (L) (mm)	Rod Diameter (Ø) (mm)	Thread (in)	Weight (kg)
LTAT 58-30	300	15	5/8	0.50
LTAT 58-50	500	15	5/8	0.80
LTAT 58-60	600	15	5/8	0.96
LTAT 58-100	1000	15	5/8	1.60
LTAT 34-30	300	19	3/4	0.75
LTAT 34-50	500	19	3/4	1.20
LTAT 34-60	600	19	3/4	1.51
LTAT 34-100	1000	19	3/4	2.50



Test Certificate
IEC 62561 Part 2



Material
Copper - BS EN 13601



Application
Suitable for typical installation

Tin Plated Copper



Code No.	Rod Length (L) (mm)	Rod Diameter (Ø) (mm)	Thread (in)	Weight (kg)
LTAT 58-30T	300	15	5/8	0.50
LTAT 58-50T	500	15	5/8	0.80
LTAT 58-60T	600	15	5/8	0.96
LTAT 58-100T	1000	15	5/8	1.60
LTAT 34-30T	300	19	3/4	0.75
LTAT 34-50T	500	19	3/4	1.20
LTAT 34-60T	600	19	3/4	1.51
LTAT 34-100T	1000	19	3/4	2.50



Test Certificate
IEC 62561 Part 2



Material
Tin plated copper - BS EN 13601



Application
Suitable for extra high corrosive area

Aluminium



Code No.	Rod Length (L) (mm)	Rod Diameter (Ø) (mm)	Thread (in)	Weight (kg)
LTAT 58-30A	300	16	5/8	0.16
LTAT 58-50A	500	16	5/8	0.27
LTAT 58-60A	600	16	5/8	0.33
LTAT 58-100A	1000	16	5/8	0.55



Test Certificate
IEC 62561 Part 2



Material
Aluminium - BS 2898



Application
Suitable for installation on metal roof

SC LIGHTNING PROTECTION & GROUNDING CONNECTION

ล่อฟ้าสามแฉก AIR TERMINAL



รหัสสินค้า	ขนาด	ราคา/หน่วย
AT-01	1/2"	260.-
AT-02	5/8"	260.-
AT-03	3/4"	260.-

กราวด์ทดสอบกัซ GROUND TEST BOX



รหัสสินค้า	ราคา/หน่วย
GTB-01	2,400.-

กราวด์หรอดทองแดง (ชุบ,หุ้ม) COPPER COATED AND CLAD GROUND ROD



กราวด์หรอดชุบทองแดง 5/8"			กราวด์หรอดหุ้มทองแดง 5/8"		
รหัสสินค้า	ขนาด x ความยาว	ราคา/หน่วย	รหัสสินค้า	ขนาด x ความยาว	ราคา/หน่วย
GO58-01	5/8" x 6 ฟุต	160.-	GL58-01	5/8" x 6 ฟุต	740.-
GO58-02	5/8" x 8 ฟุต	300.-	GL58-02	5/8" x 8 ฟุต	980.-
GO58-03	5/8" x 10 ฟุต	360.-	GL58-03	5/8" x 10 ฟุต	1,220.-
กราวด์หรอดชุบทองแดง 3/4"			กราวด์หรอดหุ้มทองแดง 3/4"		
รหัสสินค้า	ขนาด x ความยาว	ราคา/หน่วย	รหัสสินค้า	ขนาด x ความยาว	ราคา/หน่วย
GO34-01	3/4" x 6 ฟุต	390.-	GL34-01	3/4" x 6 ฟุต	1,050.-
GO34-02	3/4" x 8 ฟุต	580.-	GL34-02	3/4" x 8 ฟุต	1,390.-
GO34-03	3/4" x 10 ฟุต	700.-	GL34-03	3/4" x 10 ฟุต	1,770.-

แคล้มกราวด์หรอด OVAL GROUND CLAMP

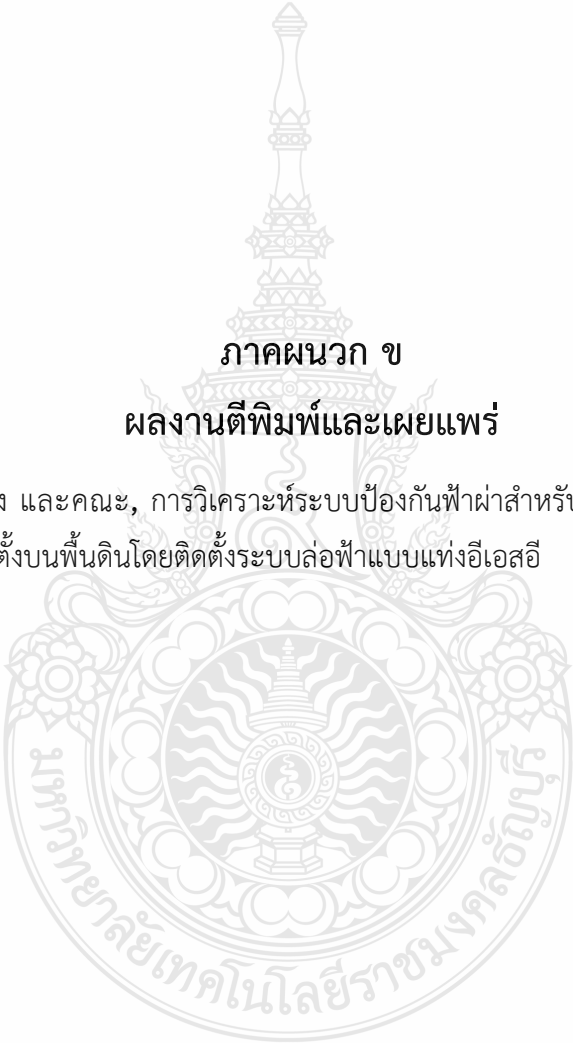


รหัสสินค้า	ขนาด	ราคา/หน่วย
GC-01	5/8"	30.-
GC-02	3/4"	40.-

แคล้มจับบาร์ทองแดง BUS BAR CLAMP



รหัสสินค้า	ชนิด/ขนาด	ราคา/หน่วย
BB-01	1ทาง/25 x 3 mm.	100.-
BB-02	1ทาง/40 x 6 mm.	160.-
BB-03	4ทาง/25 x 3 mm.	320.-



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่

1. ธนากร พุ่มไม้ทอง และคณะ, การวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินโดยติดตั้งระบบล่อฟ้าแบบแท่งอีเอสอี



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12
The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020
26 - 28 สิงหาคม 2563 ณ โรงแรมรอยัล ฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

หนังสือรวมบทความวิจัย

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (EC)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า (SS)



คณะกรรมการวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

1	รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	ที่ปรึกษา
2	รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	ที่ปรึกษา
3	รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	ประธานกรรมการ
4	รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	รองประธานกรรมการ
5	รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพนพานไค สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	กรรมการ
6	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
7	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	กรรมการ
8	รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
10	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
11	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุติเจริญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
12	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วุฒิชัย สว่างาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
13	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สิทธิชัย บุญปัทม์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	กรรมการ
14	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประหยัด ทองสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตฉะเชิงเทรา	กรรมการ
15	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอกวิทย์ นาคักวัญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	กรรมการ
16	รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	ที่ปรึกษา
2	อาจารย์อากม ม่วงเขาแดง หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	ประธานกรรมการ
3	อาจารย์ธานินทร์ ดวงจันทร์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	รองประธานกรรมการ
4	รองศาสตราจารย์ ดร.เวกิน ปิยรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	รองประธานกรรมการ
5	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	กรรมการ
6	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	กรรมการ
7	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกัศกรกรณ์ อารีย์กุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
8	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค ให้อทองคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ นางทิน สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	กรรมการ
10	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
11	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี ศรีสงคราม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
12	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิ ไกร จันทร์ขามเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	กรรมการ
13	ดร.วีระ ชันยภักดิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	กรรมการ
14	ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	กรรมการ
15	ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	กรรมการ
16	ดร.ไพวรรณ เกิดดวง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น	กรรมการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

- | | | |
|----|--|---------------------|
| 17 | ดร.กัญจนา ชัยอมฤต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น | กรรมการ |
| 18 | นายปวิติ บุญมา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ | กรรมการ |
| 19 | นางสาววารกรณ์ ลือใจ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ | กรรมการ |
| 20 | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี | กรรมการและเลขานุการ |





คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายวิชาการ

1	รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ประธานกรรมการ
2	อาจารย์อาคม ม่วงเขาแดง	รองประธานกรรมการ
3	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรชัย วิริยะสุทธีวงศ์	กรรมการ
4	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยณรงค์ คล้ายมณี	กรรมการ
5	อาจารย์ ดร.ศรีศุภางค์ ทิวสุวรรณ	กรรมการ
6	อาจารย์สุทธิพันธ์ อักษรเนียม	กรรมการ
7	อาจารย์ธิติพร ประมวน	กรรมการ
8	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร มาตรา	กรรมการ
9	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์	กรรมการ
10	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรภัทร หล่มบุญเรือง	กรรมการ
11	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรณี ศรีมรินทร์	กรรมการ
12	อาจารย์ธำนิทร์ ดวงจันทร์	กรรมการ
13	อาจารย์นาวี รุจตามพ์	กรรมการ
14	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายสถานที่และประชาสัมพันธ์

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุดนิรันดร์ เพชรรัตน์	ประธานกรรมการ
2	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรภัทร หล่มบุญเรือง	รองประธานกรรมการ
3	อาจารย์ ดร.ศรีศุภางค์ ทิวสุวรรณ	กรรมการ
4	นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบูรณ์	กรรมการ
5	นางธิดา ศรีกงพาน	กรรมการ
6	นายสุภกิจ ขาวเนตร	กรรมการ
7	นายขจรศักดิ์ ศรีกงพาน	กรรมการ
8	นายกนก สุขพูน	กรรมการ
9	นางสาวญาณิกา ฤกษ์มหาลิขิต	กรรมการ
10	นายรุ่งโรจน์ ฤกษ์ห่วย	กรรมการ
11	นางชนิษฐา แก้วล้วน	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายจัดหารายได้

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธ์	ประธานกรรมการ
2	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	รองประธานกรรมการ
3	นางสาวมาลี สอนดา	กรรมการ
4	นางสาววันวิสาข์ โกลินทร์	กรรมการ
5	นางสาวอัญชลี เดชอุดม	กรรมการ
6	นางสาววิไล ปรีชา	กรรมการ
7	นางสาวลินดา นิลพัท	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายลงทะเบียน

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธ์	ประธานกรรมการ
2	นางสาวมาลี สอนดา	รองประธานกรรมการ
3	นางสาวยอดแก้ว ผู้ภักดิ์	กรรมการ
4	นางธิดา ศรีกงพาน	กรรมการ
5	นางสาวนิตา วรพรตกุล	กรรมการ
6	นางสาวณิชพัชร พุทธเมธา	กรรมการ
7	นางสาวอัญชลี เดชอุดม	กรรมการ
8	นางสาวนิตา ชีรัตน์	กรรมการ
9	อาจารย์ธิติพร ประมวน	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายยานพาหนะ

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์ ฉายสินธ์	ประธานกรรมการ
2	นางสาวมาลี สอนดา	รองประธานกรรมการ
3	นางสาววิไล ปรีชา	กรรมการ
4	นายจำเนียร มั่นทวี่	กรรมการ
5	นางชนิษฐา แก้วล้วน	กรรมการและเลขานุการ



คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายพิธีการ

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ ศรีรัมย์	ประธานกรรมการ
2	รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล	รองประธานกรรมการ
3	รองศาสตราจารย์ วาทีพันตรี ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์	กรรมการ
4	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี	กรรมการ
5	อาจารย์ ดร.รักไทย บุรพภาค	กรรมการ
6	อาจารย์ ดร.ปรารถนา ประชานุรักษ์	กรรมการ
7	นางสาวมาลี สอนดา	กรรมการ
8	นางสาวธนิดา ชีร์ตัน	กรรมการ
9	นางสาวจันทราภรณ์ พุนดี	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2020 ฝ่ายประเมินผล

1	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	ประธานกรรมการ
2	นางสาวมาลี สอนดา	รองประธานกรรมการ
3	อาจารย์สุทธิพันธ์ อักษรเนียม	กรรมการ
4	อาจารย์นาวิ รุจดามพ์	กรรมการ
5	นางชนิษฐา แก้วล้วน	กรรมการและเลขานุการ

สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณา

ไฟฟ้ากำลัง (PW)	24 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (EC)	7 บทความ
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)	12 บทความ
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)	9 บทความ
ระบบควบคุมและการวัด (CT)	6 บทความ
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)	7 บทความ
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)	29 บทความ
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)	15 บทความ
หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า (SS)	5 บทความ
รวมทั้งสิ้น	114 บทความ





สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณาแยกตามหน่วยงาน

โรงเรียนนายเรือ	1	บทความ
วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยชนบุรี	1	บทความ
มหาวิทยาลัยนเรศวร	1	บทความ
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	1	บทความ
มหาวิทยาลัยนครพนม	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย	1	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม	2	บทความ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2	บทความ
มหาวิทยาลัยศิลปากร	2	บทความ
มหาวิทยาลัยสยาม	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	3	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	6	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	5	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	7	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	3	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	11	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	8	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	6	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	2	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	30	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	3	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	4	บทความ
รวมจำนวนสถาบันที่ร่วมนำเสนอบทความ	27	สถาบัน

การวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน โดยติดตั้งระบบล่อฟ้าแบบแท่งอีเอสอี

Analysis of Lightning Protection System for On-Ground PV Power Plant using Early Streamer Emission (ESE)

ชนากร พุ่มไม้ทอง และ บุญยัง ปลั่งกลาง^๑

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อีเมล: thanakom_p@mail.mutt.ac.th, boonyang.p@en.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้เสาตั้งอิสระ Free Standing Mast (FSM) เพื่อป้องกันโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนดิน เนื่องจากฟ้าผ่าสามารถทำความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าและทำให้โรงไฟฟ้าหยุดจ่ายพลังงานให้กับระบบของการไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการเสียหายทางรายได้ ดังนั้นการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ บทความนี้ได้เลือกรูปแบบการป้องกันที่ไม่ใช่แบบดั้งเดิม (unconventional system) ชนิด Early Streamer Emission (ESE) โดยพิจารณาถึงปลูกสร้างที่สูงที่สุดของโรงงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่นอกท่าอากาศยานของตัวนำล่อฟ้าที่จะติดตั้ง จากการคิดคำนวณจำนวน 11 จุด โดยกระจายครอบคลุมทั่วบริเวณ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และเก็บข้อมูลเป็นเวลา 4 ปี พบว่าเกิดฟ้าผ่าลงที่ตัวนำล่อฟ้าจำนวน 3 ครั้ง แต่ไม่เกิดความเสียหายต่อแผงโซลาร์เซลล์หรืออุปกรณ์ทางไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสามารถป้องกันโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตามที่ออกแบบไว้

คำสำคัญ: การป้องกันฟ้าผ่า โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบล่อฟ้าแบบแท่งอีเอสอี

Abstract

This paper presents an analysis of lightning protection systems using Free Standing Mast (FSM) to protect on-ground PV power plants. As the lightning can damage electrical equipment and cause the PV power plant to stop supplying the electricity to the grid system, therefore this can cause a shortage of power purchase agreement. In this matter, the designing lightning protection system is an important issue for the PV power plant. This paper selected the unconventional system lightning protection called Early Streamer Emission (ESE) for the PV power plant. By considering the highest structure of the PV power plant, the height of the lightning rod can be calculated for installation. The implementation was selected of 10 lightning rods covering the PV power plant and then collecting the lightning data of the PV power plant for 4 years. The investigation found

that lightning has been striking at the PV power plant for 3 times and the lightning cannot damage the PV power plant. This can prove that the lightning protection system was correctly designed.

Keywords: Lightning Protection, PV Power Plant, Early Streamer Emission (ESE)

1. บทนำ

สถานการณ์ประเทศไทยในปัจจุบันมีการลงทุนและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการสนับสนุนและผลักดันจากภาครัฐในการใช้พลังงานหมุนเวียนจึงทำให้มีนักลงทุนหันมาลงทุนการก่อสร้างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของสำนักงานกิจการพลังงานมีการรับซื้อพลังงานหมุนเวียนทั้งหมดภายในสิ้นปี 2561 เป็นจำนวน 9,886 เมกะวัตต์ ซึ่งเป็นพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 3,250 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 32.8 [1] ซึ่งถือได้ว่ามีปริมาณมาก ดังนั้นทำให้อาจพิจารณาการออกแบบและก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความถูกต้องและปลอดภัย ประกอบกับพื้นที่ประเทศไทยมีสภาพอากาศลักษณะที่ร้อนชื้นและมีมรสุมบ่อยทำให้การออกแบบติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงต้องคำนึงถึงระบบป้องกันฟ้าผ่า บทความนี้ใช้ข้อมูลการศึกษาการเกิดฟ้าผ่าจากโครงการแห่งหนึ่งในจังหวัดเพชรบุรี เพื่อวิเคราะห์การดำเนินงานของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งอีเอสอีพร้อมทั้งติดตามผลกระทบจากระบบหลังจากการเกิดฟ้าผ่า เพื่อนำมาเป็นข้อสรุปการออกแบบและการเลือกใช้ระบบฟ้าผ่าได้อย่างถูกต้อง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเกิดจากในเวลาที่มีพายุคะนอง ฝนตกและลมแรง ฟ้าผ่าก่อให้เกิดเสียงดังกึกก้องและบางครั้งจะเห็นเป็นฟ้าแลบเกิดขึ้นก่อนฟ้าผ่า เนื่องจากฟ้าผ่านั้นเกิดจากความต่างศักย์ระหว่างก้อนเมฆและพื้นดินที่มีมากพอจนทำให้เกิดการเบรคความได้นินที่สุกลักษณะการเกิดฟ้าผ่าที่พบ

บทความวิจัย

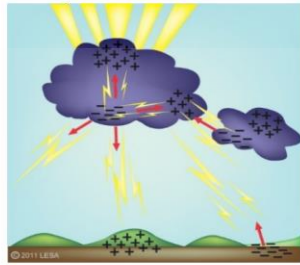
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12

The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET 2020)

ES-05



บ่อขุดที่ลึกคือการจากลึบประจุลบที่ก้อนเมฆเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดินซึ่งมีประจุเป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเกิดฟ้าผ่า [2]

2.2 หลักการทำงานของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินแล้วเราต้องคำนึงถึงการออกแบบติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งจากการเกิดฟ้าผ่ามักเกิดในเวลาที่มีพายุคะนอง ฝนตกและลมแรง ฟ้าผ่าก่อให้เกิดเสียงดังกึกก้อง และบางครั้งจะเห็นเป็นพื้นแลบเกิดขึ้นก่อนฟ้าผ่า เนื่องจากฟ้าผ่านั้นเกิดจากความต่างศักย์ระหว่างก้อนเมฆและพื้นดินที่มีมากพอทำให้เกิดเบรควอลต์ได้มากที่สุด หลักการทำงานของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ [3]

2.2.1 แบบดั้งเดิม (conventional system)

ระบบที่ใช้แท่งแฟรงกริน และกรงฟาราเดย์แท่งแฟรงกรินเป็นแท่งตัวนำที่ทำหน้าที่สกัดจับฟ้าที่ฟ้าลงมา จากนั้นประจุไฟฟ้าจะถูกผ่านส่งไปที่ดินโดยตรง ซึ่งลักษณะการติดตั้งจะติดตั้งอยู่ส่วนบนสุดของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่ต้องการป้องกัน โดยแท่งตัวนำมีลักษณะปลายแหลม แต่ภายหลังพบว่าแท่งตัวนำปลายทู่ มีความสามารถในการสกัดจับฟ้าได้ดีกว่าแท่งปลายแหลม [4]

2.2.2 ไม่ใช่แบบดั้งเดิม (unconventional system)

หมายถึง ระบบที่ไม่ใช่แท่งแฟรงกริน และกรงฟาราเดย์ เช่น ระบบที่ใช้แท่งไอเอสดี ดังแสดงในรูปที่ 2 แท่งเซมิคอนดักเตอร์ และแท่งดีเอส หลักการทำงานสำหรับแท่งไอเอสดีคือแท่งไอเอสดีจะสร้างลำแสงขึ้นโดยมีความเร็วของลำแสงอยู่ที่ 10^6 m/s เพื่อล่อฟ้าผ่าลงมาหาแท่งไอเอสดีและไหลผ่านตัวนำลงดิน [5]

2.3 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกสิ่งปลูกสร้างที่นิยมใช้สามารถออกแบบได้ 3 วิธีดังนี้

แบบที่ 1 พื้นที่ป้องกันรูปกรวย ในช่วงก่อนปลายคริสต์ทศวรรษที่ 1970 เชื่อว่าพื้นที่ป้องกันหลังการติดตั้ง มีลักษณะเป็นรูปทรง

กรวยคว่ำทำมุม 45 องศาจากของของแท่งแฟรงกรินลงมาถึงพื้นดิน โดยเรียกว่าพื้นที่ป้องกัน zone หรือ cone of protection



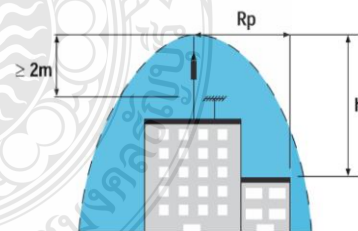
รูปที่ 2 แท่งไอเอสดี [9]

แบบที่ 2 ลูกบอลกลิ้ง (rolling ball) หรือทรงกลมกลิ้ง (rolling sphere) เป็นลักษณะลูกบอลขนาดใหญ่พียงอยู่กับสิ่งปลูกสร้างพื้นที่ป้องกันอยู่ใต้ลูกบอลนั้น

แบบที่ 3 Polling sphere เป็นรูปแบบการสมมุติวิธีของการเกิดฟ้าผ่าโดยการกำหนดระยะการป้องกันออกเป็น 3 ระดับด้วยกันคือ ระดับที่ 1 การป้องกันอย่างสูง ใช้สำหรับอาคารที่มีความเสี่ยงสูงระดับที่ 2 การป้องกันระดับกลาง ใช้สำหรับอาคารสำนักงานระดับที่ 3 การป้องกันขั้นพื้นฐาน ใช้สำหรับอาคารที่ไม่สำคัญ การหารัศมีการป้องกันมี 2 รูปแบบ คือ 1 การคำนวณจากสมการที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 และการรัศมีการป้องกันจากตารางที่ 1 ซึ่งการหารัศมีการป้องกันนั้นจะใช้ได้เมื่อความสูงของสิ่งปลูกสร้างนั้นห่างจากหัวล่อฟ้าไม่เกิน 5 เมตร [5]

$$R_p = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L(2D + \Delta L)} \quad (1)$$

R_p คือ รัศมีการป้องกันในระนาบแนวนอนที่ระยะทางแนวตั้ง h จากสิ่งปลูกสร้างถึงปลายหัวล่อฟ้า D คือระยะของระดับการป้องกัน คือสามารถหาได้จากมาตรฐาน NFC17102 [6]



รูปที่ 3 การหารัศมีการป้องกัน [7]

ส่วนประกอบสำคัญของระบบป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่า

- 1) หัวล่อฟ้า (Air Terminal)
- 2) เสา (Mast) ทำมาจาก Galvanized หรือ Stainless Steel

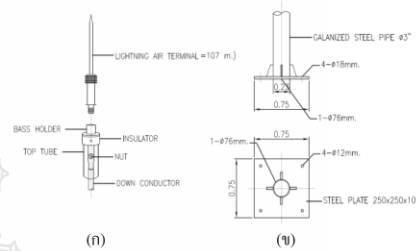
3) สายนำลงดิน (Down Conductor) ต้องเป็นสายทองแดงเปลือย

4) อุปกรณ์นับฟ้าผ่า (lightning flash counter) ติดตั้งเพื่อตรวจสอบเชิงกลทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5 จำนวนครั้งการเกิดฟ้าผ่า

5) ระบบดิน (Grounding system) ต้องมีค่าความต้านทานของดินต่ำกว่า 5 โอห์มโดยใช้ Copper Clad Steel Rod บักลงไปในดิน ตรงที่ 1 รัศมีการป้องกันของหัวล่อฟ้า

อาจเกิดกับอุปกรณ์โดยหลักการการทำงานของตัวนับนั้นจะงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ จะเกิดการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กทำให้คุณสมบัติ

OPR radius of protection				
ระดับการป้องกัน	I (D=20m)	II (D=45m)	III (D=60m)	
h(m)	2	32	39	43
	3	48	59	65
	4	64	78	86
	5	79	97	107
	10	79	99	109
	15	80	101	111
	20	80	102	113
	45	80	105	119
60	80	105	120	

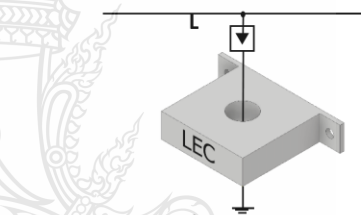


รูปที่ 4 (ก)รายละเอียดของตัวนำล่อฟ้า (ข)การติดตั้งฐานของตัวนำล่อฟ้า

3. วิธีการวิจัย

สิ่งที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นว่า ตัวนำล่อฟ้ามีหลายชนิดบางชนิดได้รับการรับรองจากมาตรฐานสากล แต่ไม่ได้รับการรับรองมาตรฐานในประเทศไทย ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยการออกแบบและการติดตั้งขึ้นอยู่กับมาตรฐานการออกแบบของผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นๆ เช่น โครงการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เอฟไอชน ลาดก้างการผลผลิตไฟฟ้า 8.0 เมกะวัตต์ จ.เพชรบุรี ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ได้ติดตั้งระบบล่อฟ้าแบบแท่งเอสซี โดยทำการออกแบบติดตั้งระบบล่อฟ้าตามผู้ผลิตแนะนำโดยอ้างอิงมาตรฐาน NFC17102 ซึ่งเป็นมาตรฐานของฝรั่งเศส โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เอฟไอได้ทำการออกแบบติดตั้ง ตัวนำล่อฟ้าชนิดเอสซีตามรูปแบบ Polling sphere สมมติระยะรัศมีการเกิดฟ้าผ่า ได้คำนวณถึงสิ่งปลูกสร้างที่สูงที่สุดของโรงไฟฟ้า ซึ่งมีความสูง 4 เมตร ดังนั้นจึงได้ออกแบบระบบการป้องกันอยู่ที่ระดับที่ 3 โดยใช้ความสูงของตัวนำล่อฟ้าที่ 9 เมตร อ้างอิงจากมาตรฐานที่ความสูงของตัวนำล่อฟ้าสูงจากสิ่งปลูกสร้างไม่เกิน 5 เมตร ใช้รัศมีการป้องกันจากตารางที่ 1 ซึ่งมีรัศมีการป้องกันอยู่ที่ 107 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 รายละเอียดตัวนำล่อฟ้ามาตรฐานที่ผ่านกาทดสอบและลักษณะการติดตั้งฐานรากของตัวนำล่อฟ้าชนิดเอสซี เพื่อให้ทำการติดตั้งเป็นไปตามมาตรฐาน หากการเกิดฟ้าลงบนตัวนำล่อฟ้าจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการนับจำนวนครั้งที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสียหายที่



รูปที่ 5 ระบบนับฟ้าผ่า

จากการหารัศมีการป้องกันของตัวนำล่อฟ้าชนิดเอสซี ได้รัศมีการป้องกันที่ 107 เมตรต่อ 1 หัวโรงไฟฟ้าจึงได้ทำการจัดวางตัวนำล่อฟ้าออกเป็น 11 จุด กระจายทั่วพื้นที่ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยการตั้งเสาสูงขึ้น 9 เมตรจากพื้นดิน โดยมีลักษณะการติดตั้งเสาของตัวนำล่อฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6



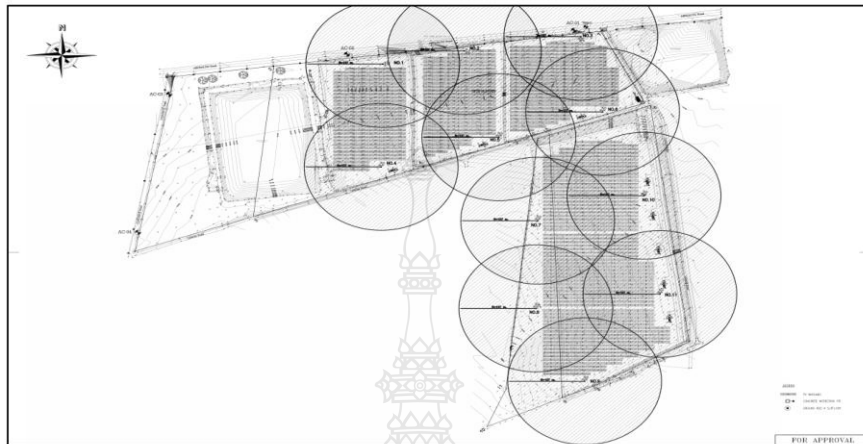
รูปที่ 6 เสาการติดตั้งหัวล่อฟ้า ESE

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12

The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET 2020)

ES-05



รูปที่ 7 การออกแบบและแผนผังการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการจำลอง

จากข้อมูลการเกิดฟ้าผ่าในรอบ 4 ปี จากตารางที่ 2 ที่ผ่านมามีการเกิดฟ้าผ่าในพื้นที่ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 3 ครั้ง แล้วนำมาหาผลกระทบและความเสียหายจากการเกิดฟ้าผ่าในพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าไม่มีความเสียหาย ที่เกิดขึ้นจากการเกิดฟ้าผ่าในโครงการดังกล่าว

ตารางที่ 2 การเกิดฟ้าผ่าบนพื้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เลขที่	การเกิดฟ้าผ่า(ครั้ง)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2559	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2560	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2561	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2562	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.สรุป

ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งไอเอสอี ชนิดปล่อยประจุเพื่อล่อฟ้าผ่านลงที่หัวล่อฟ้า โดยทำการออกแบบและติดตั้งตามผู้ผลิตแนะนำ สามารถป้องกันฟ้าผ่าภายใต้พื้นที่ป้องกันได้ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย แม้กระทั่งมีการเกิดฟ้าผ่าในหัวเคเบิล ซึ่งจากผลการจำลองผู้ทดสอบยังมองเห็นถึงข้อดีของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งไอเอสอีที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน เช่น จากการติดตั้งเสาต่อฟ้าในพื้นที่ที่มีจำนวนน้อย ทำให้ลดผลกระทบจากเงาของเสาต่อฟ้าภาคลงบนพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมถึงเป็นลงทุนที่น้อยกว่าติดตั้งระบบ

อื่นและยังได้รับการยอมรับจาก Allianz Insurance ในการออกกรมธรรม์ประกันภัยคุ้มครองให้มูลค่า 10 ล้านบาทเป็นต้น ดังนั้นจึงเห็นควรแนะนำใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแท่งไอเอสอี ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานประจำปีงบประมาณ 2561 คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน และสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน
 - [2] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์, ข้อมูลจาก www.lesa.biz/earth/atmosphere/phenomenon/thunder (วันที่สืบค้นข้อมูล 27 กุมภาพันธ์ 2563)
 - [3] V. A. Rakov, "Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection," Journal of Lightning Research, 4, pp. 3-11, 2012.
 - [4] L. Pecastaing, T. Reess, A. De Ferron, S. Souakri, "Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 2; April 2015.
 - [5] K. A. CH, I. Iskandar, "LIGHTNING PROTECTION ACCORDING NEC 17-102," International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 10, Issue 1, January-2019.
 - [6] บุญยงค์ ปลั่งกลาง, เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2560
- OPR Range, "Lightning Protection," ABB France Automation Products Division Lightning Protection Group Export Department.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธนากร พุ่มไม้ทอง
วัน เดือน ปีเกิด	21 พฤศจิกายน 2522
ที่อยู่	364 หมู่ 4 ต.เทพารักษ์ อ.เมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270
การศึกษา	ปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ประสบการณ์การทำงาน	รองกรรมการผู้จัดการ บริษัท เอทู เทคโนโลยี จำกัด พ.ศ.2560 ถึง ปัจจุบัน
วิชาชีพ	-
เบอร์โทรศัพท์	08-4925-3666
อีเมล	thanakorn@a2-tech.com

