



การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า
สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงาน
Evaluation of the Lightning Protection System
for Solar Rooftop on the Factory

นาวิน รอดเรือง
Nawin Rodrueang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2567



การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า
สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงาน
Evaluation of the Lightning Protection System
for Solar Rooftop on the Factory

นาวิน รอดเรือง
Nawin Rodrueang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธนะ)

วันที่ 15 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ บนหลังคาโรงงาน
ชื่อ นามสกุล	นาวิน รอดเรือง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของโรงงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าดังกล่าวใช้เทคนิค Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) ควบคู่กับแนวทางการออกแบบและติดตั้งที่เป็นไปตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษาเป็นระบบแบบผสมผสาน ซึ่งมีกำลังการผลิตแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนอาคารสำนักงาน ขนาด 25.68 kWp และส่วนอาคารโรงงาน ขนาด 149.80 kWp การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าพิจารณาจาก 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ประสิทธิภาพ, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ, และด้านการเงิน โดยมีการเก็บรวบรวมข้อมูลตามเกณฑ์ดังกล่าวและบันทึกลงในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMECA ผลการวิเคราะห์พบว่า เทคนิค FMECA สามารถช่วยระบุจุดที่มีความเสี่ยงสูงสุดในระบบป้องกันฟ้าผ่าผ่าน 3 ปัจจัยแรก ขณะที่ปัจจัยด้านการเงินสามารถประเมินได้จากสี่ที่ปรากฏในเมทริกซ์ของเทคนิคดังกล่าว ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าเทคนิค FMECA เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยครอบคลุมทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ : ระบบป้องกันฟ้าผ่า, ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์, เทคนิค FMECA

Thesis Title	Evaluation of the Lightning Protection System for Solar Rooftop on the Factory
Author	Nawin Rodrueang
Degree	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Major Program	Electrical Engineering Faculty of Engineering
Advisor	Assoc.Prof. Dr.Sakhon Woothipatanapan
Co-Advisor	Assoc.Prof. Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Academic Year	2024

ABSTRACT

This study presents an evaluation of the lightning protection system for solar rooftop on the factory, with the objective of analyzing and optimizing its performance to enhance overall efficiency. The assessment employs the Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) methodology, in conjunction with design and installation guidelines that adhere to the standards established by the Engineering Institute of Thailand. The solar power generation system under investigation is a hybrid configuration, with a total installed capacity distributed across two sections: 25.68 kWp for an office building and 149.80 kWp for a factory building. The evaluation framework encompasses four principal factors: system performance, environmental impact, safety and reliability, and financial considerations. Relevant data were systematically collected and recorded using Microsoft Excel, followed by a detailed analysis utilizing the FMECA methodology. The analysis results demonstrate that the FMECA approach effectively identifies high-risk failure points within the lightning protection system based on the first three evaluation criteria. In contrast, the financial factor is assessed through a matrix representation, where color coding indicates the acceptability of maintenance expenditures. The findings of this research confirm that the FMECA methodology serves as a robust and comprehensive tool for evaluating lightning protection systems, facilitating a structured assessment of all critical factors relevant to system performance and reliability.

Keywords : Lightning Protection System, Solar Power Generation System, FMECA Technique

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดี ความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านในการให้ความรู้และความช่วยเหลือระหว่างการศึกษาทำวิทยานิพนธ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ผู้มีความปรารถนาดีในการให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการด้านการวิเคราะห์ระบบหล่อฟ้ารวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์ FMECA และยังส่งเสริมสนับสนุนทางด้านวิชาชีพ ระหว่างทำวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมถึงคณาจารย์ผู้ร่วมเป็นประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ ผู้ให้ความรู้และคำแนะนำ รวมทั้งความช่วยเหลือและเทคนิคต่างๆ ในด้านการศึกษาที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่ร่วมทุกข์ร่วมสุขกันและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมาตลอดเวลาการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงสมาชิกในครอบครัว รอดเรือง ทั้งญาติพี่น้องในวงศ์ตระกูลทุกท่านที่สนับสนุนและส่งเสริมในด้านกำลังใจ ความรัก ความห่วงใยที่ตีจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท

นาวัน รอดเรือง

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 กรอบแนวคิด	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
1.6 นิยามศัพท์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ทฤษฎีระบบป้องกันฟ้าผ่า	8
2.2.1 กลไกการเกิดฟ้าผ่า	8
2.2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่า	11
2.2.3 ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	15
2.2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก	15
2.2.5 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้า	16
2.2.6 การติดตั้งรากสายดิน	22
2.3 รูปคลื่นอิมพัลส์	23
2.3.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน	23
2.4 การบำรุงรักษา และตรวจสอบพินิจระบบป้องกันฟ้าผ่า	25
2.4.1 แผนงานการบำรุงรักษา	26
2.5 โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และความรุนแรง (FMECA)	26
2.5.1 ความหมายFMECA	26
2.5.2 ความหมายของ FMEA	27

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.3 เปรียบเทียบ FMECA และ FMEA	27
2.5.4 เมทริกซ์การบำรุงรักษาความเสี่ยง	29
2.6 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	30
2.6.1 ความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	30
2.6.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	30
2.6.3 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์	31
2.6.4 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	32
2.6.5 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	33
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	35
3.1 บทนำ	35
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	36
3.2.1 ขั้นตอนการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารสำนักงาน	36
3.2.2 ขั้นตอนการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารโรงงาน	37
3.3 กรณศึกษาการประเมินด้านประสิทธิภาพ	38
3.4 กรณศึกษาการประเมินความรุนแรงด้านสิ่งแวดล้อม	39
3.5 กรณศึกษาการประเมินความรุนแรงด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ	40
3.6 กรณศึกษาการประเมินความรุนแรงด้านการเงิน	41
3.7 กรณศึกษาการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า	43
3.8 กรณศึกษาการรื้อถอนระบบป้องกันฟ้าผ่า	43
3.9 กรณศึกษาการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า	45
บทที่ 4 ผลวิจัย	46
4.1 ผลลัพธ์การประเมิน	46
4.1.1 ผลลัพธ์การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp	46
4.1.2 ผลลัพธ์การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp	50

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2 ผลลัพธ์การออกแบบ	54
4.2.1 ผลลัพธ์การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp	54
4.2.2 ผลลัพธ์การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp	55
4.3 ผลลัพธ์การรื้อถอน	57
4.3.1 ผลลัพธ์การรื้อถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp	57
4.4 ผลลัพธ์การติดตั้ง	58
4.4.1 ผลลัพธ์การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp	58
4.4.2 ผลลัพธ์การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp	60
4.5 ผลลัพธ์การวัดค่าความต้านทานหลักดิน	62
4.5.1 ผลลัพธ์การวัดค่าความต้านทานหลักดินระบบป้องกันฟ้าผ่าระบบป้องกันฟ้าผ่า สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp	62
4.5.2 ผลลัพธ์การวัดค่าความต้านทานหลักดินระบบป้องกันฟ้าผ่าระบบป้องกันฟ้าผ่า สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp	63
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	70
ประวัติผู้วิจัย	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 จำนวนวันซึ่งมีพายุฝนฟ้าคะนองต่อปีของกรมอุตุนิยมวิทยาของจังหวัดปทุมธานี (2549 – 2564)	2
2.1 ระดับชั้นป้องกันฟ้าผ่า	15
2.2 ระบายอ้างอิงด้วยมุม	17
2.3 ค่าสูงสุดของรัศมีทรงกลมกลิ้ง ตามชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	20
2.4 ค่าสูงสุดของตาข่ายตามชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	22
2.5 คาบเวลาสูงสุดระหว่างการตรวจพินิจระบบป้องกันฟ้าผ่าแต่ละครั้ง	25
3.1 การวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษา	36
3.2 การประเมินสภาพของส่วนประกอบระบบป้องกันฟ้าผ่า	39
3.3 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความรุนแรงในเรื่องสิ่งแวดล้อม	39
3.4 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ	40
3.5 เกณฑ์คะแนนการประเมินความรุนแรงด้านการเงิน	41
3.6 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	41
3.7 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	42
4.1 วิธีการทดสอบเพื่อการประเมินสภาพบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	46
4.2 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	47
4.3 วิธีการทดสอบเพื่อการประเมินสภาพบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	50
4.4 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	51
4.5 ตารางการออกแบบล่อฟ้า	54
4.6 ตารางการออกแบบตัวนำ	59
4.7 ผลการวัดค่าความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	62
4.8 ผลการวัดค่าความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	63

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองปรากฏการณ์ฟ้าผ่าโดยใช้ว่าว	8
2.2 เมฆคิวมูโลนิมบัส	9
2.3 ประจุในก้อนเมฆคิวมูโลนิมบัส	9
2.4 การเกิดฟ้าผ่าจากก้อนเมฆมายังอาคาร	10
2.5 แรงดันช่วงก้าว Us (Stepped Voltages)	15
2.6 มุมป้องกันที่สมนัยกับชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	19
2.7 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง	20
2.8 การจัดวางรากสายดินแบบ ก	22
2.9 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	23
2.10 ตัวอย่างเมทริกซ์ความเสี่ยง	29
2.11 ส่วนประกอบโซล่าเซลล์	31
2.12 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	33
2.13 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	34
2.14 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	34
3.1 เมทริกซ์วิกฤต	35
3.2 ขั้นตอนการวิจัยกรณีประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารสำนักงาน	37
3.3 ขั้นตอนการวิจัยกรณีประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารโรงงาน	38
3.4 ฐานตัวจับยึดแท่งตัวนำ	44
3.5 ตัวจับยึดสายตัวนำ	44
3.6 สายตัวนำหย่อนติดหลังคา	44
3.7 วางแผนติดตั้งใน Google Earth	45
3.8 ทำการวางผัง 3D อาคารที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp	45
4.1 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านประสิทธิภาพบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	49
4.2 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านสิ่งแวดล้อมบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	49
4.3 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านความปลอดภัยบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	49
4.4 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านการเงินบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	50
4.5 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านประสิทธิภาพบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	53

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านสิ่งแวดล้อมบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	53
4.7 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านความปลอดภัยบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	53
4.8 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านการเงินบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	54
4.9 แบบในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	55
4.10 แบบในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	55
4.11 รายละเอียดโดยทั่วไปของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า	56
4.12 แบบติดตั้ง Down Conductor	56
4.13 ถอดเสาและรื้อถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าเก่า	57
4.14 นำส่งระบบป้องกันฟ้าผ่าเก่าให้กับโรงงาน	57
4.15 การติดตั้งแท่งตัวนำ	58
4.16 การติดตั้งสายตัวนำ	58
4.17 งานติดตั้ง Ground Test Box	59
4.18 งานติดตั้งบ่อกราวด์คอนกรีต	60
4.19 งานติดตั้งแท่นยึดตัวนำ	60
4.20 งานติดตั้ง Ground Test Box อาคารขนาด 149.80 kWp	61
4.21 งานติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน	61
4.22 งานติดตั้งสายตัวนำตามมาตรฐาน	61
4.23 งานติดตั้ง Exothermic Weld	62
4.24 เครื่องทดสอบความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 25.68 kWp	63
4.25 ผลลัพธ์การวัดเครื่องทดสอบความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 149.80 kWp	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการลดภาระค่าใช้จ่ายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและบ้านเรือน การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความนิยมเป็นอย่างมากทั้งแบบติดตั้งบนพื้นดินและแบบติดตั้งบนหลังคา และเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ก็ต้องติดตั้งในพื้นที่โล่งเพื่อให้แสงส่องถึงได้ เนื่องจากเป็นพื้นที่เปิดโล่งจึงเสี่ยงต่อการเกิดเหตุการณ์มากมายที่จะสร้างความเสียหายให้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และสาเหตุที่ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เสียหายได้เป็นอย่างมากคือการเกิดฝนฟ้าคะนองหรือปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างและสิ่งมีชีวิต

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของโรงงานไทยคาร์บอน (รังสิต) เซอร์วิส จำกัด จังหวัดปทุมธานี เนื่องจากทางโรงงานมีปัญหาไฟฟ้าดับบ่อยครั้ง ทางโรงงานจึงได้หาวิธีเพื่อลดปัญหาไฟฟ้าดับจึงทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อมาจ่ายพลังงานทดแทนในช่วงที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับและมีความต้องการลดภาระค่าใช้จ่ายและใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงกลางคืน ดังนั้นจึงทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน และเมื่อทำการติดตั้งเสร็จจึงได้ทำการเสนอเพื่อติดตั้งระบบล่อฟ้าหรือระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อป้องกันความเสียหายต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของทางโรงงานไทยคาร์บอน (รังสิต) เซอร์วิส จำกัด จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาได้กล่าวถึงพื้นที่จังหวัดปทุมธานี ตั้งแต่ปี 2549 – 2564 มีการเกิดฝนฟ้าคะนองดังตารางที่ 1.1 ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดฝนฟ้าคะนองอย่างรุนแรงและส่งผลกระทบต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของทางโรงงาน

ตารางที่ 1.1 จำนวนวันซึ่งมีพายุฝนฟ้าคะนองต่อปีของกรมอุตุนิยมวิทยาของจังหวัดปทุมธานี
(2549 – 2564)

ปีที่	จังหวัด ปทุมธานี
2549	54
2550	53
2551	66
2552	57
2553	56
2554	34
2555	26
2556	25
2557	0
2558	3
2559	2
2560	2
2561	4
2562	49
2563	55
2564	67

ดังนั้นวิจัยนี้จึงมีวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FMECA ประเมินเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยพิจารณาเกณฑ์ความรุนแรง 4 ประการ ดังนี้ ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ และการเงิน เก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และแสดงการวิพากษ์วิจารณ์ระบบป้องกันฟ้าผ่า ทั้งกรณีที่ 1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

ขนาด 25.68 kWp และ กรณีที่ 2 ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp และทำการสำรวจผลลัพธ์ในการประเมินเพื่อทำการรื้อถอน ออกแบบ และติดตั้งตามมาตรฐานระบบป้องกันฟ้าผ่า

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่อาจเกิดขึ้นบนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อระบบป้องกันฟ้าผ่า และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของระบบป้องกันฟ้าผ่า

1.3.2 ประเมินและออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

1.3.3 ทำการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า

1.4 กรอบแนวคิด

เป็นการศึกษาระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ทำการติดตั้งด้วยอายุการใช้งานยาวนาน และที่ติดตั้งใหม่ โดยสามารถนำมาพิจารณาออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า เพื่อติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ปลอดภัยต่อระบบและผู้คน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.5.1 ได้ทราบถึงผลกระทบจากการเกิดฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

1.5.2 ได้ทราบการวางแผนจัดการความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าที่อาจเกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

1.5.3 สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประเมิน ,ป้องกัน ,ออกแบบ และติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

1.6 นิยามศัพท์

1.6.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และพื้นที่ที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่าโฟตอน (Proton) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (Atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน

1.6.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

เป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ

1.6.3 ระบบป้องกันฟ้าผ่า

ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1. Early Streamer Emission (ESE) หลักการทำงานของระบบล่อฟ้าแบบ ESE หรือ หัวล่อฟ้าแบบ ESE เมื่อมีลำประจุเริ่มจากก้อนเมฆลงมา ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นทำให้หัวล่อฟ้าแบบ ESE นั้นปล่อยประจุออกมา และสร้างลำประจุอย่างรวดเร็วทำให้ฟ้าผ่าลงมาที่หัวล่อฟ้าแบบ ESE โดยหัวล่อฟ้าแบบ ESE นั้นถูกสร้าง ออกแบบ และออกมาตราฐาน โดยประเทศฝรั่งเศส 2. Faraday Cage หลักการทำงานของระบบสายล่อฟ้าแบบ Faraday Cage มีแท่งแฟรงกลิน เป็นตัวล่อ โดยมีการต่อเชื่อมกันของแท่งแฟรงกลิน ด้วยสายทองแดงเป็นตาราง แท่งแฟรงกลิน แต่ละแท่งนั้นจะห่างกันไม่เกิน 25-30 m ทำให้การติดตั้งระบบสายล่อฟ้าแบบฟาราเดย์ นั้นใช้สายทองแดง แท่งแฟรงกลิน และแท่งกราวด์เป็นจำนวนมาก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ทางผู้วิจัยได้นำมาอ้างอิงขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ เพื่อหาแนวทางในการทำการทดลองฟาลกกระทบเพื่อเปรียบเทียบและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาบทความและงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ทั้งในและต่างประเทศ สำหรับวิจัยภายในประเทศยังไม่พบบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งได้ทำการศึกษาและสืบค้นเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สรุปพอสังเขปดังนี้

2.1.1 N. H. Zaini, M. Z. A. Ab-Kadir, M. A. M. Radzi, N. Azis, N. I. Ahmad, M. S. M. Nasir, M M. Izadi, N. F. Ab Aziz and Z. Ali[1], 2019 บทความนี้นำเสนอการศึกษานี้จึงดำเนินการเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่จุดที่แตกต่างกันทั้งสองนี้ที่ฟาร์มโซลาร์เซลล์โดยไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า (LPS) ในประเทศมาเลเซียมีระดับฟ้าร้องเฉลี่ย 180-260 วันต่อปี ฟ้าผ่าอาจทำให้เกิดการหยุดชะงักและความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์สตริง หม้อแปลง และสายเคเบิล การหยุดชะงักหรือความเสียหายนี้อาจนำไปสู่การสูญเสียและส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.1.2 Boris Dumnić, Elizaveta Liivik, Bane Popadić, Frede Blaabjerg, Dragan Milićević and Vladimir Katić[2], 2020 บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ (PV) แนวคิดสตริงและอินเวอร์เตอร์กลางโดยใช้โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และการวิเคราะห์วิกฤต (FMECA) เมื่อพิจารณาจากประสบการณ์ก่อนหน้านี้ในกิจกรรมการดำเนินงานและการบำรุงรักษาระยะยาวในโรงไฟฟ้าฟิยสองแห่ง (536 kWp และ 2 MW) จึงมีการแนะนำสั้น ๆ เกี่ยวกับการจำแนกความผิดพลาดและการวิเคราะห์สาเหตุที่มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงความน่าเชื่อถือ FMECA ถูกนำไปใช้กับความผิดพลาดที่พบบ่อยที่สุดภายในโรงงานทั้งสองแห่ง และนำเสนอการวิเคราะห์เปรียบเทียบอิทธิพลของแนวคิดของระบบที่มีต่อความน่าเชื่อถือของระบบ

2.1.3 Loredana Cristaldi, Elena Molena and Emil Petkovski[3], 2022 โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และการวิเคราะห์วิกฤต (FMECA) มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการออกแบบเพื่อความน่าเชื่อถือและการวิเคราะห์วงจรชีวิตความน่าเชื่อถือ (RLC) FMECA เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบอย่างเป็นระบบสำหรับการระบุโหมดความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นสาเหตุและผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ เอกสารนำเสนอและอภิปรายเกี่ยวกับ FMECA ที่อุทิศให้กับโหมดความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นที่เกี่ยวข้องกับระบบแบตเตอรี่ มีการกล่าวถึงสาเหตุที่เป็นไปได้และข้อบ่งชี้เกี่ยวกับกิจกรรมการตรวจสอบที่อุทิศให้การจับโหมดความล้มเหลวที่มีความเสี่ยงสูงและเกิดขึ้นสูง

2.1.4 H. Zhang, H. Sun, J. Zou and Z. Guo[4], 2023 บทความนี้จะเสนอวิธีการประเมินระดับอันตรายตามทฤษฎีกลุ่มเครือ ผลการประเมินได้มาจากการสร้างเมทริกซ์การประเมินแบบกลุ่มเครือและเวกเตอร์น้ำหนักเพื่อให้ได้การจัดอันดับอันตรายของโหมดความล้มเหลว ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี FMECA แบบเดิมจะถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี FMECA แบบกลุ่มเครือ เพื่อค้นหาส่วนประกอบที่มีระดับอันตรายสูงสุด ด้วยวิธีนี้สามารถปรับปรุงความน่าเชื่อถือในการทำงานของระบบได้

2.1.5 H. Chen, C. Guo, H. Li, C. Li and S. Xie[5], 2023 บทความนี้วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของหุ่นยนต์ทำความสะอาดอัจฉริยะผ่าน FMECA และ FTA หุ่นยนต์ทำความสะอาดแบ่งออกเป็นระบบย่อยและโหมดความล้มเหลว มีการวิเคราะห์ความรุนแรงและมาตรการปรับปรุงความสำคัญของหุ่นยนต์ทำความสะอาดตัดสินใจการจัดอันดับระดับอันตรายของระบบย่อย ชุดการตัดสินใจของความผิดพลาดของระบบกำหนดโดยการสร้างแผนผังความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทำความสะอาดสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของระบบย่อยจะถูกคำนวณโดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณซึ่งสามารถปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบหุ่นยนต์ได้

2.1.6 วิสสุต อัครฉัตรสกุล[6], 2561 บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน อัตราการกำลัการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW โดยการใช้โปรแกรม PSCAD Version 4.6 ในการสร้างแบบจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าและวิเคราะห์ผลฟ้าผ่า 3 กรณี คือ ฟ้าผ่าทางตรงลำแรกรูปคลื่น 10/350 μ s ฟ้าผ่าทางตรงลำต่อมารูปคลื่น 0.25/100 μ s และฟ้าผ่าทางอ้อมรูปคลื่น 8/20 μ s โดยเลือกใช้ค่ากระแสฟ้าผ่า 3 ระดับ คือ 20 kA 40 kA และ 60 kA และกำหนดจุดที่ฟ้าผ่าลง 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณสายไฟฟ้าด้านไฟฟ้ากระแสตรง และบริเวณสายไฟฟ้าเฟส B ด้านไฟฟ้ากระแสสลับจากการออกแบบและวิเคราะห์ผลสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินได้

2.1.7 วิศรุต อัครฉัตรสกุล และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์[7], 2562 บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินที่กระแสฟ้าผ่าทางตรงขนาด 5 kA 10 kA และ 20 KA บทความนี้เป็นการหาผลกระทบในกรณีการเกิดฟ้าผ่า โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า 1 เฟส และ 3 เฟส ในตำแหน่งต่างๆ และจำลองการเกิดฟ้าผ่าทางตรงขนาด 10/350 μ s ที่พิสัยกระแส 5 kA 10 kA และ 20 KA และด้าน AC บริเวณสายไฟ เฟส B ก่อนเข้าหม้อแปลง และทำการเปรียบเทียบ ในกรณีฟ้าผ่าด้าน DC มีค่าแรงดันไฟฟ้าลดลง 0.77 kV 0.55 kV และ 0.12 kV ตามลำดับ และด้าน AC มีค่าลดลง -2.40 kV -4.50 kV -8.66 kV ตามลำดับ จากการออกแบบและวิเคราะห์ผลสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินได้

2.1.8 สำเร้ง อินทาม ,นิมิต บุญภิรมย์ ,ภรชัย จุณวัฒน์กุล และวันชัย จันไกรผล[8], 2563 บทความนี้นำเสนอการทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบรากสายดินด้วยการพิจารณาชนิดของดิน โดยทำการตรวจวัดค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังด้วยเครื่องวัดความต้านทานดิน โดยวิธีการวัดแบบ 3 จุดและทำการทดสอบการตรวจวัดค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ด้วยเครื่องจำลองกระแสฟ้าผ่าจากผลการทดสอบพบว่ากรณีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, ρ น้อยกว่า 100 โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของดิน, α จะมีค่ามากกว่า 1 และเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ มีค่ามากกว่า 100 โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลังจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ และสัมประสิทธิ์ อิมพัลส์ของดิน, α จะมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นในการออกแบบระบบรากสายดินเมื่อทราบค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, ρ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ อิมพัลส์ของดิน, α หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง และค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ หากค่าความต้านทานใดมีค่ามากกว่าก็นำค่าความต้านทานดินนั้นไปทำการออกแบบระบบรากสายดินต่อไป

2.1.9 นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ ,สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ,ปพน งามประเสริฐ และจิรวรรณ ไม้แก่น [9], 2564 บทความนี้นำเสนอการศึกษาปัจจัยการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากผลกระทบจากฟ้าผ่าและความเหนี่ยวนำเนื่องจากผลกระทบจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นกับตัวโครงสร้างและสายตัวนำภายในระบบนี้ จากนั้นได้สร้างแบบจำลองผลกระทบจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมแมตแลบ แบบจำลองที่สร้างขึ้นมาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยการจัดเรียงของตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบทั่วไปโดยกำหนดให้ค่าสูงระหว่างแผงกับโครงสร้างอลูมิเนียมโปรไฟล์คือ 0.09 เมตร ผลการจำลองคือเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายตัวซึ่งมีอยู่หนึ่งจุดที่มีปริมาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด ส่วน

ผลกระทบจากปริมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์เกิดความเสียหายนั้นจะทดสอบโดยใช้แรงดันเหนี่ยวนำอิมพัลส์ขนาด $10/350 \mu\text{s}$ และ $0.25/100 \mu\text{s}$ ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าขนาดของโครงสร้างที่รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์และจุดที่เกิดกระแสฟ้าผ่ามีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่อของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยปริมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสามารถนำมาใช้เพื่อพิจารณาเลือกพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินได้อย่างถูกต้อง

2.2 ทฤษฎีระบบป้องกันฟ้าผ่า

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ โดยในปี ค.ศ. 1752 ได้มีการพิสูจน์ให้เห็นอย่างชัดเจนจาก Benjamin Franklin และ Thomas Folger ที่เมืองฟิลาเดลเฟีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเกิดจากการสปาร์คไฟฟ้าซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ จากการค้นพบในครั้งนี้ จึงทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาหลักของการป้องกันฟ้าผ่าด้วยเสาหล่อฟ้า เรียกว่า Franklin rod มาจนถึงปัจจุบันนี้



รูปที่ 2.1 การทดลองปรากฏการณ์ฟ้าผ่าโดยใช้วาว

2.2.1 กลไกการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นการปลดปล่อยประจุที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆที่เรียกว่า เมฆฝนฟ้าคะนอง (Thundercloud) หรือที่นักอุตุนิยมวิทยาเรียกว่า เมฆคิวมูโลนิมบัส (cumulonimbus) [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



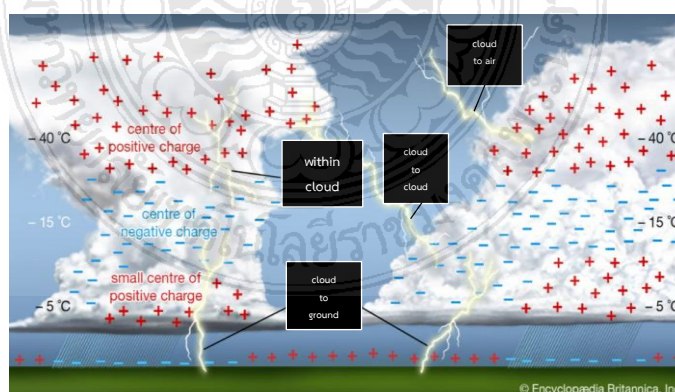
รูปที่ 2.2 เมฆคิวโมโลนิมบัส

รูปภาพจาก : <https://paipibat.com/?tag=cumulonimbus>

ลมและอากาศแปรปรวนที่ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าในกลุ่มเมฆแบ่งเป็นสองประเภท คือ

ลมพายุฤดูร้อน (Heat storm) เป็นลมที่เกิดในวันที่มีอากาศร้อนอบอ้าว อากาศร้อนจากบริเวณใกล้พื้นดินลอยตัวขึ้นและเย็นตัวลงในที่สูง ทำให้เกิดเมฆและเกล็ดน้ำแข็งลอยตามลมไปยังที่อื่น

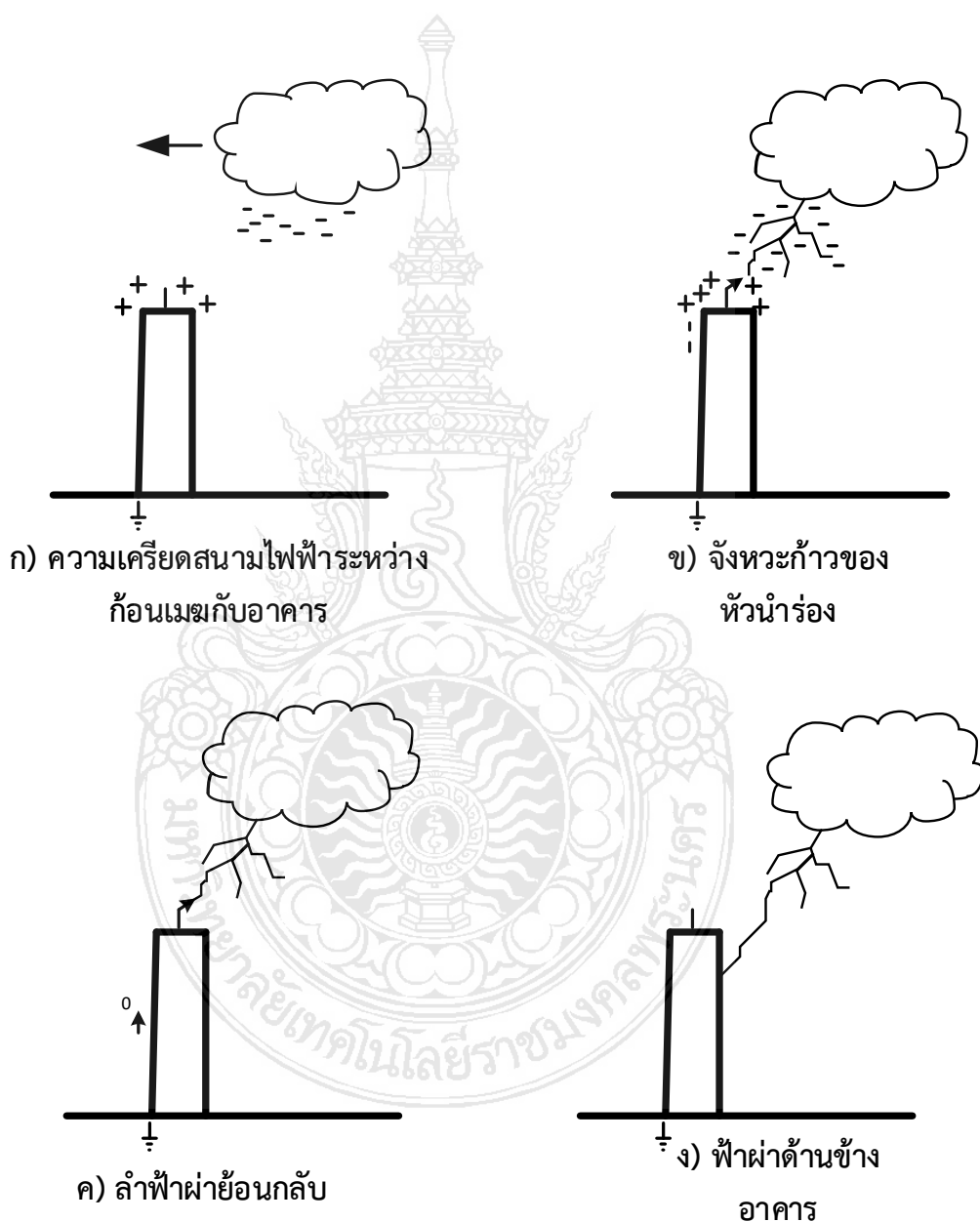
ลมพายุแนวปะทะอากาศ (Frontal storm) เกิดจากกลุ่มเมฆในอากาศที่เย็นกว่าเคลื่อนตัวไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นลมพายุฤดูร้อนสลับกันไป



รูปที่ 2.3 ประจุในก้อนเมฆคิวโมโลนิมบัส

รูปภาพจาก : <https://www.petenpaul.com/lightning-safety-in-trekking/>

ในก้อนเมฆจะมีประจุไฟฟ้าอยู่โดยเฉพาะบริเวณฐานมีละอองน้ำที่จับประจุลบได้มาก และส่วนบนของก้อนเมฆมีละอองเกลือ น้ำแข็งที่รับประจุบวกได้มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในขณะที่เกิดพายุฟ้าคะนอง อากาศมีความแปรปรวน ประจุในก้อนเมฆเกิดการถ่ายเทเพื่อลดความเครียด สนามไฟฟ้า มีการเสียสภาพของอากาศ เกิดเป็นช่องฟ้าผ่าที่มีสภาพเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดฟ้าผ่า



รูปที่ 2.4 การเกิดฟ้าผ่าจากก้อนเมฆมายังอาคาร

ฟ้าผ่าเริ่มเกิดจากการไอออไนเซชันของอากาศเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ก้อนเมฆมีค่าอยู่ในช่วง 10 kV/cm ถึง 30 kV/cm อากาศเกิดการแตกตัวให้ประจุไฟฟ้า และในขณะเดียวกันประจุลบที่อยู่บริเวณฐานก้อนเมฆจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกบนพื้นดินหรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใต้ก้อนเมฆ เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กลไกการเกิดฟ้าผ่าเริ่มโดยหัวนำร่อง (Leader) จากก้อนเมฆที่มีความยาวประมาณ 50 m^{civ} รอบ ๆ หัวนำร่องมีการแตกตัวของอากาศในเซกต์รีคมีประมาณ 30 cm ชักนำให้เกิดหัวนำร่องใหม่ในทิศทางที่อากาศแตกตัวได้ง่ายที่สุดในลักษณะจิ้งหะกั้ว (Step leader) แต่ละกั้วจิ้งหะใช้เวลาในระดับไมโครวินาที เมื่อหัวนำร่องขยายตัวเข้าใกล้พื้นดิน (ยอดอาคาร) ความเครียดสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้เกิดสตรีมเมอร์พุ่งขึ้นจากพื้นดินเข้าหาหัวนำร่อง เกิดเป็นลำฟ้าผ่ามีเสียงดังและแสงจ้าจากพื้นโลกขึ้นไปสู่ก้อนเมฆด้วยความเร็วประมาณ 50×10^3 km/s การไหลของประจุชั่วคราวตรงข้ามขึ้นไปยังก้อนเมฆนี้เรียกว่า ลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (Return stroke) แนวช่องที่มีการไหลของประจุในอากาศยังคงมีความนำไฟฟ้าสูง การไหลของประจุสามารถเกิดขึ้นได้อีกเพื่อถ่ายเทประจุจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินเกิดเป็นลำฟ้าผ่าซ้ำ (Multi stroke)

ระยะกั้วตามสุดท้ายก่อนหัวนำร่องจากก้อนเมฆกระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์จากพื้นดินเรียกว่า ระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 m [11]

2.2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่า

2.2.2.1 ผลกระทบจากฟ้าผ่าด้านความร้อน

ผลทางความร้อน มีผลทำให้เกิดเพลิงไหม้กับสิ่งที่ถูกฟ้าผ่า เนื่องจากเมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าจากฟ้าผ่าโดยลำแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K ดังสมการที่ 2.1

$$W = U \int_0^\infty i dt = U_{A-K} Q \quad (2.1)$$

โดยที่

W	คือ	พลังงานฟ้าผ่า
U_{A-K}	คือ	แรงดันตกคร่อมแอโนด-แคโทดตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบ
Q	คือ	ประจุไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ (หรือแอมป์-วินาที)

ในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า ซึ่งต้องใช้เสาต่อฟ้าเป็นตัวล่อหรือรับให้ฟ้าลง และมีสายตัวนำลงดินที่ทำหน้าที่เป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นคือ สายตัวนำลงดินจะต้องมีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดใหญ่

2.2.2.2 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางแรงกลบิตหรือแรงระเบิด

แรงกลบิตหรือแรงระเบิดมีผลทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าพังทลายลงได้ ลักษณะของแรงระเบิดที่เกิดขึ้นนั้น มีสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิตขึ้นกับตัวนำนั้น เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสกำลังสอง I^2 เป็นสัดส่วนกลับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง d นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำจะคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$(Fdt) = \frac{10^{-7}}{d} \int i^2 dt \frac{N \text{ sec}}{m} \quad (2.2)$$

ถ้าล่อฟ้าผ่าลงตั้งฉากกับแนวของตัวนำจะเกิดแรงอิมพัลส์กระทำต่อตัวนำในแนวต่อตรงออกไปของล่อฟ้าผ่า ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$\int Fdt = 10^{-7} \int i^2 dt N \text{ sec} \quad (2.3)$$

เมื่อ $i^2 dt$ เป็น $A^2 \text{ sec}$

ถ้ากระแสไหลในตัวนำที่เป็นบ่วงหรือวงแหวน จะเกิดแรงทำให้บ่วงนั้นขยายหรือยืดวงกว้างออก ส่วนแรงกลแบบที่สอง เนื่องจากล่อฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมากทำให้อากาศรอบ ๆ ล่อฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือแสงแผ่กระจายไปรอบล่อฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียกว่าฟ้าร้องนั่นเอง สำหรับในกรณีที่ฟ้าผ่าลงวัสดุนั้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดัน อาจมีผลทำให้ระเบิดได้

2.2.2.3 ผลกระทบจากฟ้าผ่าทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าเกิดแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นผลเสียต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสาร และเกิดแรงดันช่วงก้ำวที่เป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ ดังนี้

2.2.2.3.1 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดฟ้าผ่าจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไป รบกวนระบบสื่อสารก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดสปาร์คได้

2.2.2.3.2 แรงดันสปาร์คด้านข้าง

ถ้ากระแสฟ้าผ่า I ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_e จะทำให้แรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ 2.4

$$\Delta U = R_e i + L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ di/dt คือความชันของของคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ถ้าความต้านทานของรากสายดินหรือความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูงจะทำให้ศักย์ไฟฟ้า ΔU นี้มีค่าสูงอาจมากพอที่จะทำให้เกิดสปาร์คด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดีซึ่งการเกิดสปาร์คด้านข้างนี้ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้

2.2.2.3.3 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือ ถ้าฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า I วิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้ง

สองทางของจุดที่ผ่าลงมา มีค่าเท่ากับแรงดันสูงเมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

2.2.2.3.4 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

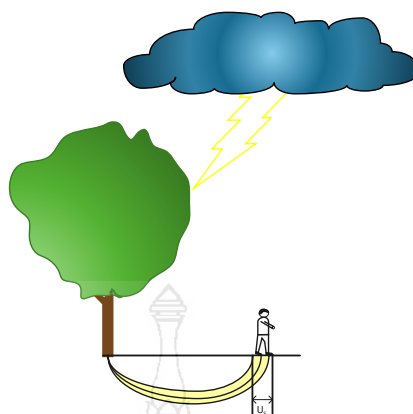
แรงดันเกินที่เกิดขึ้นอาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งกำลังแรงสูงแต่มีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงงาน เพราะอุปกรณ์แรงดันต่ำเหล่านี้ ความเป็นฉนวนมีค่าต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็น 10 กิโลโวลต์ ได้

2.2.2.3.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงที่ที่อยู่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูงต้นไม้สูงเด่น หรือคนที่ยืนอยู่ในที่โล่ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่ภายนอกอาคารบ้านเรือนนั้นมีโอกาสเป็นไปได้ถ้าหากไปยืนเด่นในกลางที่แจ้ง เช่น ท้องทุ่ง สนาม บริเวณที่กว้างปราศจากต้นไม้ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรืออยู่ในเส้นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าได้สะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้สูงเด่นที่ถูกฟ้าผ่า หรือหลบฝนอยู่โคนต้นไม้สูงเด่น หรือต้นเดียวกลางทุ่งนา ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย เกิดอันตรายแก่คนที่หลบใกล้โคนต้นไม้ ทั้งนี้เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสไฟฟ้าไหลลงตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์คผ่านอากาศเข้าหาคนได้

2.2.2.3.6 อันตรายจากแรงดันช่วงกาวและแรงดันสัมผัส

แรงดันช่วงกาวและแรงดันสัมผัส เป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดินซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงกาว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์ เมื่อมีกระแสไฟไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีความต้านทานจะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายและเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้าหลังของสัตว์ เรียกว่าแรงดันช่วงกาว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึงความต่างศักย์ระหว่างตัวนำหรือโครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่รากสายดิน ที่คนมีโอกาสสัมผัสถึงดินที่ยืนอยู่ [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แรงดันช่วงก้าว U_s (Stepped Voltages)

2.2.3 ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ลักษณะเฉพาะของระบบป้องกันฟ้าผ่าหาได้จากลักษณะเฉพาะของสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกันและจากระดับป้องกันฟ้าผ่าที่พิจารณา ซึ่งเป็นตัวกำหนดชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่าแบ่งออกเป็น 4 ชั้น [13]-[14] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับชั้นป้องกันฟ้าผ่า

ระดับการป้องกันฟ้าผ่า (LPL)	ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า (class of LPS)	ประสิทธิภาพของระดับการ ป้องกัน (%)
I	I	99
II	II	97
III	III	91
IV	IV	84

จากตารางที่ 2.1 ระดับการป้องกันฟ้าผ่าที่ I เป็นระดับการป้องกันที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.4 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

จุดมุ่งหมายของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก คือ การรับวาบฟ้าผ่าโดยตรงลงสิ่งปลูกสร้างรวมทั้งวาบฟ้าผ่าเข้าสู่ด้านข้างสิ่งปลูกสร้าง และนำกระแสฟ้าผ่าจากจุดฟ้าผ่าลงสู่ดิน อีกหนึ่ง

จุดประสงค์ คือ การกระจายกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกลและทางความร้อน รวมทั้งไม่ทำให้เกิดประกายอันตรายที่อาจจุดชนวนให้เกิดเพลิงไหม้ หรือการระเบิด

2.2.4.1 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบไม่แยกอิสระ

ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบไม่แยกอิสระ คือ ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกที่ยึดติดกับสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกัน ข้อเสีย คือ ถ้าเกิดความร้อนที่จุดฟ้าผ่าหรือบนตัวนำที่นำกระแสฟ้าผ่าอาจทำความเสียหายให้กับสิ่งปลูกสร้าง ระยะห่างระหว่างตัวนำของระบบป้องกันฟ้าผ่ากับวัสดุที่ติดไฟได้ต้องมีค่าน้อย 0.1 เมตร (10 เซนติเมตร)

2.2.4.2 ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ

ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระจะพิจารณาเลือกใช้เมื่อสิ่งที่อยู่ในสิ่งปลูกสร้างไม่สามารถรับระดับการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากพัลส์กระแสฟ้าผ่าที่ไหลผ่านตัวนำลงดิน ทำให้ต้องลดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแยกอิสระก็ยังติดตั้งบนสิ่งปลูกสร้างที่ทำจากวัสดุเช่น อิฐ หรือ ไม้ และต้องไม่มีการต่อเข้ากับส่วนตัวนำของสิ่งปลูกสร้างหรือเข้ากับบริเวณที่ติดตั้งอยู่ใน ยกเว้นเพียงการต่อเข้ากับรากสายดินที่ระดับดินระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกที่ยึดติดกับสิ่งปลูก

2.2.5 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้า

วิธีการที่ยอมรับที่ใช้ในการหาตำแหน่งการจัดวางระบบตัวนำล่อฟ้า [15] ได้แก่

- ก) วิธีมุมป้องกัน เหมาะสำหรับอาคารที่มีรูปทรงง่าย
- ข) วิธีทรงกลมกลิ้ง เหมาะสำหรับทุกกรณี
- ค) วิธีตาข่าย เหมาะสำหรับป้องกันพื้นผิวที่เป็นระนาบ

2.2.5.1 การจัดวางตำแหน่งระบบตัวนำล่อฟ้าโดยวิธีมุมป้องกัน

ลักษณะพื้นที่ของการป้องกันจะเป็นรูปทรงกรวย [16] การวางตำแหน่งของตัวนำล่อฟ้าต้องให้สิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกันทั้งหมดอยู่ในปริมาตรป้องกันของระบบตัวนำล่อฟ้าตัวนำล่อฟ้า แท่งตัวนำล่อฟ้า เสาล่อฟ้า และลวดซึ่ง ควรมีการจัดวางตำแหน่งเพื่อให้ส่วนต่าง ๆ ของสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกันอยู่ภายในปริมาตรป้องกัน ระนาบอ้างอิงด้วยมุม ดังแสดงในตารางที่ 2.2

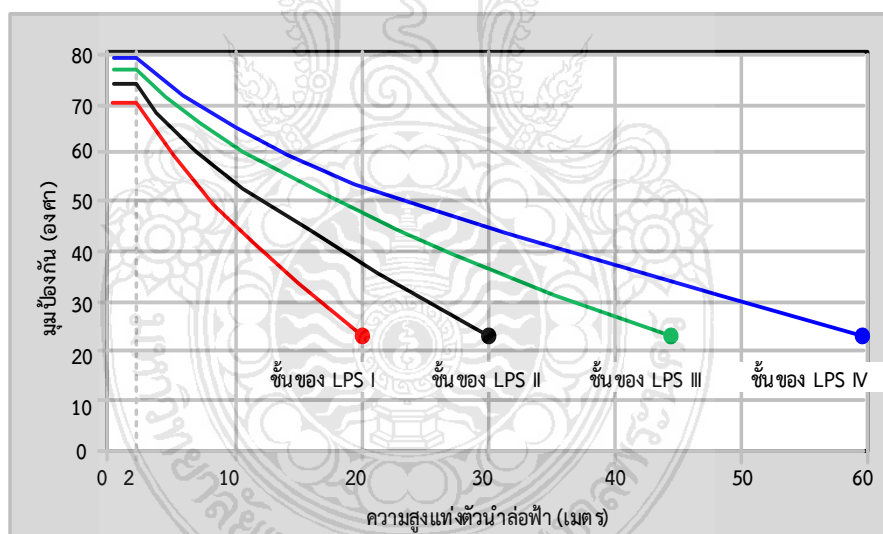
ตารางที่ 2.2 ระบายอ้างอิงด้วยมุม

ความสูง แท่งตัวนำ ล่อฟ้า h (เมตร)	ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ I		ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ II		ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ III		ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ IV	
	มุม ป้องกัน a (องศา)	รัศมี ของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)	มุม ป้องกัน a (องศา)	รัศมี ของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)	มุม ป้องกัน a (องศา)	รัศมี ของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)	มุม ป้องกัน a (องศา)	รัศมี ของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)
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	10.26	54	13.76	61	18.04	65	21.45
11	43	10.07	52	14.08	59	18.31	64	22.55
12	40	10.16	50	14.30	58	19.20	62	22.57
13	38	10.17	49	14.95	57	20.02	61	23.45
14	36	10.12	47	15.01	55	19.99	60	24.25
15	34	10.00	45	15.00	54	20.65	59	24.96
16	32	9.42	44	15.45	53	21.23	58	25.61
17	29	9.17	42	15.31	51	20.99	57	26.18
18	27	8.86	40	15.10	50	21.45	56	26.69
19	25	8.49	39	15.39	49	21.86	55	27.13
20	23		37	15.07	48	22.21	54	27.53

ตารางที่ 2.2 ระบายอ้างอิงด้วยมุม (ต่อ 2)

ความสูง แท่ง ตัวนำล่อ ฟ้า h (เมตร)	ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ I		ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ II		ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ III		ชั้นของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ระดับ IV	
	มุม ป้องกัน o (องศา)	รัศมีของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)	มุม ป้องกัน o (องศา)	รัศมีของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)	มุม ป้องกัน o (องศา)	รัศมีของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)	มุม ป้องกัน o (องศา)	รัศมีของ บริเวณ ป้องกัน (เมตร)
59							24	26.27
60							23	25.47

จากตารางที่ 2.2 ค่าของมุมป้องกันมีค่าคงที่ของความสูงที่ต่ำกว่า 2 เมตร มุมป้องกันที่สมนัยกับชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 มุมป้องกันที่สมนัยกับชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า

2.2.5.2 การจัดวางตำแหน่งระบบตัวนำล่อฟ้าโดยวิธีทรงกลมกลิ้ง

การวางตำแหน่งระบบตัวนำล่อฟ้าต้องไม่มีจุดใดของสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกันสัมผัสกับทรงกลมที่มีรัศมีตามชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในตารางที่ 2.3

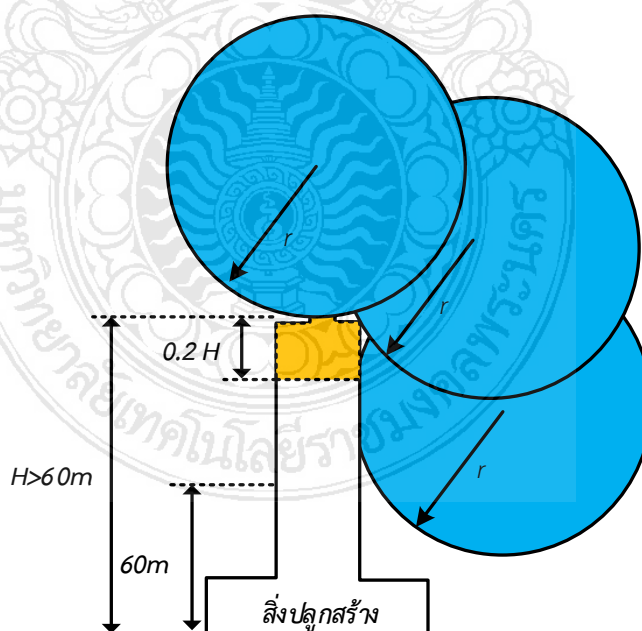
ตารางที่ 2.3 ค่าสูงสุดของรัศมีทรงกลมกลิ้ง ตามชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	รัศมีของทรงกลมกลิ้ง (เมตร)
I	20
II	30
III	45
IV	60

โดยกลิ้งทรงกลมไปโดยรอบและด้านบนของสิ่งปลูกสร้างทุกทิศทางที่เป็นไปได้ ทรงกลมนี้จะสัมผัสกับระบบตัวนำล่อฟ้าเท่านั้น รัศมีของทรงกลมกลิ้งจะสัมพันธ์กับค่ายอดของกระแสฟ้าผ่าที่ผ่าลงสิ่งปลูกสร้างสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$r = 10 \times i^{(0.65)} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 i มีหน่วยเป็น kA และ r มีหน่วยเป็นเมตร การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง

เมื่อทรงกลมกลิ้งใช้กับสิ่งปลูกสร้างและสัมผัสกับตัวนำล่อฟ้าในกรณีตัวนำล่อฟ้าแนวระดับ 2 เส้นขนานกันวางอยู่เหนือระนาบอ้างอิงแนวระดับ ระยะล่งล้ำ(p) ของทรงกลมกลิ้งที่ต่ำกว่าระดับของตัวนำล่อฟ้าในปริมาตรระหว่างตัวนำล่อฟ้าทั้งสองสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$p=r-\left[r^2-\left(\frac{d}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

โดยที่ h_t คือ ความสูงของแท่งตัวนำล่อฟ้าเหนือระนาบอ้างอิง
 p คือ ระยะล่งล้ำของทรงกลมกลิ้ง
 h คือ ความสูงของตัวนำล่อฟ้า
 r คือ รัศมีของทรงกลมกลิ้ง
 d คือ ระยะการแยกระหว่างลวดซึ่งล่อฟ้าแนวระดับ 2 เส้นที่ขนานกันหรือระหว่างแท่งตัวนำล่อฟ้า 2 แท่ง

2.2.5.3 การจัดวางตำแหน่งระบบตัวนำล่อฟ้าโดยวิธีตาข่าย

กรณีที่ต้องการป้องกันพื้นผิวราบ การใช้ตาข่ายถือว่าป้องกันพื้นผิวได้ทั้งหมด

2.2.5.3.1 ตำแหน่งของตัวนำล่อฟ้าต้องติดตั้งที่

2.2.5.3.1.1 แนวขอบหลังคา

2.2.5.3.1.2 ที่ยื่นออกมาของหลังคา

2.2.5.3.1.3 แนวเส้นสันหลังคา

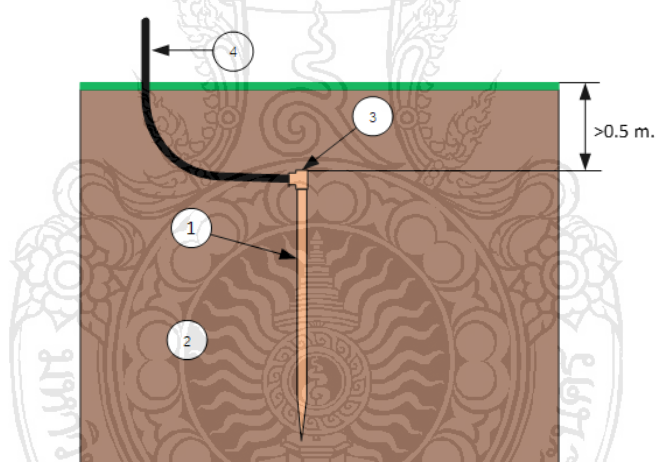
โดยที่วิธีตาข่ายเหมาะสมกับหลังคาราบและเอียงที่ไม่มีความโค้งเหมาะสำหรับผิวราบด้านข้าง เพื่อป้องกันวาบฟ้าผ่าด้านข้าง และถ้าความชันของหลังคาเกิน 1/10 อาจใช้ตัวนำล่อฟ้าเดินขนานกันแทนตาข่ายโดยให้ระยะห่างระหว่างตัวนำล่อฟ้ามีค่าไม่มากกว่าความกว้างของตาข่ายที่ต้องการ ค่าสูงสุดของตาข่ายตามชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสูงสุดของตาข่ายตามชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	รัศมีของทรงกลมกึ่ง (เมตร)
I	5 X 5
II	10 X 10
III	15 X 15
IV	20 X 20

2.2.6 การติดตั้งรากสายดิน

ค่าความต้านทานการต่อลงดินต้องไม่เกิน 5 โอห์ม ยกเว้นพื้นที่ที่ยากในการปฏิบัติ และการไฟฟ้าฯ เห็นชอบ ยอมให้ค่าความต้านทานของหลักการต่อลงดินดินดินต้องไม่เกิน 25 โอห์ม หากทำการวัดแล้วยังมีค่าเกิน ให้ปักหลักดินเพิ่มอีก 1 แท่งและต่อสายเชื่อมกับหลักดินทุกแห่งเข้าด้วยกันอย่างใช้ได้ผลดี [17] การจัดวางรากสายดินแบบ ก ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจัดวางรากสายดินแบบ

- โดยที่
- 1 คือ แท่งรากสายดินที่ต่อเพิ่มความยาวได้
 - 2 คือ ข้อต่อแท่งรากสายดิน
 - 3 คือ ดิน
 - 4 คือ แคลมป์ยึดตัวนำ (สายดิน) กับแท่งรากสายดิน
 - 5 คือ ตัวนำรากสายดิน

2.3 รูปคลื่นอิมพัลส์

2.3.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

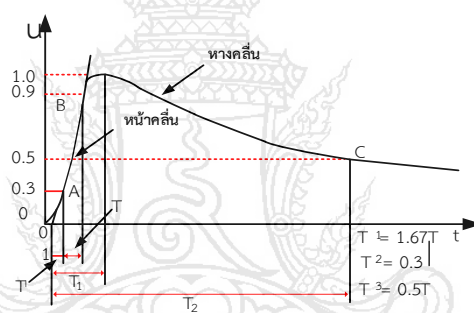
แรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยข้อกำหนดต่อไปนี้

2.3.1.1 ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ที่เกิดจากออสซิลเลชันใกล้เคียงๆ ยอดรูปคลื่น ให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก

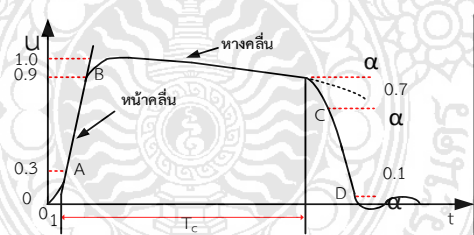
2.3.1.2 ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับดิน

2.3.1.3 เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด

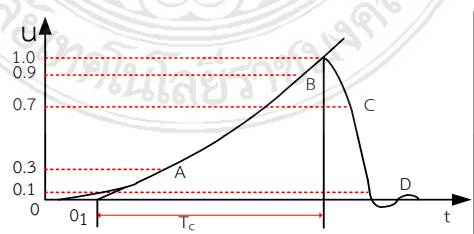
2.3.1.4 เวลาช่วงหน้าคลื่น T_2 หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด



ก) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม



ข) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่ทางคลื่น



ค) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

รูปที่ 2.9 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

จากรูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบ่งรูปคลื่นได้ ดังนี้

ก) รูปคลื่นเต็ม (Full wave) หมายถึง รูปคลื่นที่ขนาดเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นศูนย์

ข) รูปคลื่นตัด (Chopped wave) หมายถึง เกิดจากการบ่อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ และการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันที่บ่อนเข้าไปไม่ได้ ซึ่งเกิดกา รสปาร์กผ่าน เกิดวาทไปตามผิวหรือเกิดเบรกดาวนเงาทะเล ทำให้เกิดลัดวงจร ณ จุดนั้น

ค) รูปคลื่นตัดมีส่วนที่สำคัญ คือ ช่วงเวลาคลื่นตัด (Chopped wave) T_c ถ้า เกิดตัดที่หลังคลื่นขนาดแรงดัน คือ ค่ายอด (Peak) ถ้าเกิดตัดที่หน้าคลื่นขนาดแรงดันคือ ค่าที่ได้ณ จุดตัด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่เหลือ

ถ้าต้องการทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมานั้น เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1 , T_2 และ T_c โดยวิธีที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 คือ

ก) เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $0.84 - 1.56 \mu s$

ข) เวลาช่วงหลังคลื่น $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$ คือ จะต้องอยู่ในช่วง $40 - 60 \mu s$

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า จะเรียกตามค่าเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นตาม มาตรฐานเป็น T_1/T_2 นั่นคือ $1.2/50 \mu s$ ส่วนกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์สวิตซ์ จะเรียกตามเวลาหน้าคลื่น กับเวลาหลังคลื่นเช่นกัน คือ T_{cr}/T_2 นั่นคือ $250/2500 \mu s$

ซึ่งแตกต่างไปจากแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าก็คือ ช่วงหน้าคลื่นจะยาวกว่า ความหมายของเวลาช่วงหลังคลื่น T_2 จะมีนิยามเหมือนอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ส่วนเวลาช่วงหน้าคลื่นจะ กำหนดเป็น T_{cr} ซึ่งหมายถึง ช่วงเวลาที่นับจากจุดที่แรงดันเริ่มจากศูนย์จริงไปจนถึงเวลาที่แรงดัน เพิ่มขึ้นถึงค่ายอด รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตซ์ โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่น $250/2500 \mu s$ และ กำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนได้อยู่ในเกณฑ์ดังนี้

$$T_{cr} = 250 \mu s \pm 20\%$$

$$T_2 = 2500 \mu s \pm 60\%$$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าหรือสวิตซ์ จะสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิด แรงดันอิมพัลส์ โดยอาศัยวงจรทรานเซียนต์ RC หรือ RLC แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่สร้างขึ้นใช้

กันมาก มักได้จากวงจร RC คือ อาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ จนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ ($U = Q/C$) แล้วปล่อยให้คายประจุ หรือดิสชาร์จผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการ [18]

2.4 การบำรุงรักษา และตรวจสอบพินิจระบบป้องกันฟ้าผ่า

วัตถุประสงค์ของการตรวจพินิจ มีดังนี้

- ก) เพื่อให้ระบบป้องกันฟ้าผ่าเป็นไปตามมาตรฐาน
- ข) เพื่อให้องค์ประกอบทั้งหมดของระบบป้องกันฟ้าผ่าอยู่ในสภาพที่ดีสามารถทำหน้าที่ได้ถูกต้อง ไม่มีการกัดกร่อน และมีความพร้อมใช้งานทางกายภาพ
- ค) เพื่อให้ระบบสาธารณูปโภคและการก่อสร้างใหม่เพิ่มเติมใด ๆ มีความปลอดภัยตามมาตรฐานป้องกันฟ้าผ่า

คาบเวลาสูงสุดระหว่างการตรวจพินิจระบบป้องกันฟ้าผ่าแต่ละครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คาบเวลาสูงสุดระหว่างการตรวจพินิจระบบป้องกันฟ้าผ่าแต่ละครั้ง

ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า	การตรวจพินิจ (ปี)	การตรวจพินิจแบบสมบูรณ์ (ปี)	การตรวจพินิจทั้งหมดในกรณีที่มีสถานที่เฉพาะ ^{(ก),(ข)} (ปี)
1 และ 2	1	2	1
3 และ 4	2	4	1

จากตารางที่ 2.5 หมายเหตุตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานกำหนดเกณฑ์ความปลอดภัยเพิ่มดังนี้

- ก) ระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ใช้งานซึ่งรวมถึงสิ่งปลูกสร้างที่มีความเสี่ยงจากวัตถุระเบิด ควรมีการตรวจพินิจทุก 6 เดือน การทดสอบทางไฟฟ้าของการติดตั้งควรทำทุก 1 ปี ช้อยกเว้นที่ยอมรับได้ต่อคาบเวลาในการทดสอบประจำปี คือ จะทดสอบเป็นรอบ 14 ถึง 15 เดือน ในกรณีที่พิจารณาว่าจะมีประโยชน์ที่จะทำการทดสอบความต้านทานดินในระยะเวลาที่ต่างกันของปี เพื่อจะได้ทราบการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

ข) สถานที่เฉพาะหมายถึง สิ่งปลูกสร้างที่มีระบบภายในที่อ่อนไหว กลุ่มอาคารสำนักงาน อาคารพาณิชย์ สถานที่ซึ่งอาจมีคนอยู่จำนวนมาก หรือสิ่งปลูกสร้างที่เคยถูกฟ้าผ่า

2.4.1 แผนงานการบำรุงรักษา

แผนงานการบำรุงรักษาต้องจัดเตรียมดังต่อไปนี้

2.4.1.1 การทดสอบตัวนำทั้งหมดของระบบป้องกันฟ้าผ่า และองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ

2.4.1.2 การทดสอบความต่อเนื่องทางไฟฟ้าของสิ่งติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า

2.4.1.3 การวัดความต้านทานดินของระบบกราวด์สายดิน

2.4.1.4 การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

2.4.1.5 การกวดยึดขององค์ประกอบและตัวนำ

2.4.1.6 การทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่าประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าไม่ลดลง ภายหลังการเพิ่มเติมหรือการเปลี่ยนแปลงในสิ่งปลูกสร้างและสิ่งติดตั้งติดตั้งของสิ่งปลูกสร้าง

2.5 โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และความรุนแรง (FMECA)

ในโลกแห่งการวิเคราะห์ความเสี่ยง FMEA และ FMECA เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดสองประการ FMEA หมายถึงโหมดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบ ในขณะที่ FMECA ย่อมาจาก Failure Modes, Effects และ Criticality Analysis เป็นวิธีการที่เป็นระบบที่ใช้ในการระบุความล้มเหลวในผลิตภัณฑ์ กระบวนการ หรือระบบ แม้ว่าวิธีการทั้งสองจะมีเป้าหมายร่วมกัน แต่ก็มีคุณลักษณะและความซับซ้อนที่ต่างกัน ในการทบทวนที่ครอบคลุมนี้ เราจะเจาะลึกถึงความแตกต่างระหว่าง FMECA และ FMEA ยิ่งกว่านั้น ทำความรู้จักกับเครื่องมือขั้นยอดที่จะสร้าง FMEA และ FMECA การวิเคราะห์

2.5.1 ความหมาย FMECA

FMECA ย่อมาจาก Failure Modes, Effects และ Criticality Analysis ตรวจสอบและจัดการความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการ นอกจากนี้ยังสร้างจากหลักการของโหมดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบ (FMEA) ไม่เพียงแต่รูปแบบความล้มเหลว สาเหตุ และผลกระทบเท่านั้น แต่ยังรวมถึงวิกฤตและผลที่ตามมาด้วย การวิเคราะห์ FMECA มุ่งเป้าไปที่โหมดความล้มเหลวที่สำคัญที่สุด หมายถึงสิ่งที่มีผลกระทบร้ายแรงต่อความปลอดภัย

ประสิทธิภาพ หรือด้านอื่นๆ นอกจากนี้ยังประเมินปัจจัยต่างๆ เช่น ความน่าจะเป็น ความรุนแรง และความสามารถในการตรวจจับ การทำเช่นนี้ FMECA ช่วยให้องค์กรต่างๆ มอบหมายทรัพยากรเพิ่มเติม เพื่อแก้ไขปัญหาที่มีความเสี่ยงสูง

2.5.2 ความหมายของ FMEA

FMEA หรือโหมดความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบ ระบุโหมดความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น มันเกี่ยวข้องกับการแบ่งระบบออกเป็นส่วนประกอบต่างๆ จากนั้น ทำความเข้าใจความเป็นไปได้ที่ส่วนประกอบจะล้มเหลวและประเมินผลที่ตามมา FMEA กำหนดหมายเลขลำดับความสำคัญความเสี่ยง (RPN) ให้กับแต่ละโหมดความล้มเหลว แต่ละโหมดความล้มเหลวจะขึ้นอยู่กับความรุนแรง โอกาสที่จะเกิดขึ้น และความสามารถในการตรวจจับ การจัดลำดับความสำคัญนี้ช่วยให้องค์กรมุ่งเน้นไปที่การแก้ไขปัญหาที่สำคัญที่สุดก่อน ด้วยการระบุและลดความเสี่ยง FMEA ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือ ความปลอดภัย และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เป็นเครื่องมืออันทรงคุณค่าในการป้องกันปัญหา ลดข้อบกพร่อง และปรับปรุงประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ FMEA จึงเป็นส่วนสำคัญของการลดความเสี่ยงในการจัดการคุณภาพ

2.5.3 เปรียบเทียบ FMECA และ FMEA

FMECA และ FMEA ใช้ในการประเมินความเสี่ยงและการวิเคราะห์ความล้มเหลว แม้ว่าพวกเขาจะเกี่ยวข้องกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

2.5.3.1 ความลึกของการวิเคราะห์

2.5.3.1.1 FMEA มุ่งเน้นไปที่การระบุและประเมินรูปแบบความล้มเหลวสาเหตุ และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเท่านั้น โดยให้กรอบการทำงานที่เป็นระบบเพื่อทำความเข้าใจสิ่งที่อาจเกิดขึ้นผิดพลาด

2.5.3.1.2 FMECA สร้างขึ้นจาก FMEA โดยการเพิ่มการประเมินภาวะวิกฤต นอกจากโหมดความล้มเหลวแล้ว ยังประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบหรือกระบวนการอีกด้วย ขั้นตอนที่เพิ่มเข้ามานี้จะช่วยระบุระหว่างโหมดความล้มเหลวกับระดับความรุนแรง

2.5.3.2 การประเมินภาวะวิกฤต

2.5.3.2.1 FMEA คือ การวิเคราะห์ที่ไม่ได้กำหนดค่าวิกฤตให้กับแต่ละโหมดความล้มเหลว แต่จะถือว่าโหมดความล้มเหลวที่ระบุทั้งหมดเท่าเทียมกัน ดังนั้นจึงไม่อาจแยกความแตกต่างระหว่างประเด็นสำคัญและประเด็นสำคัญน้อยกว่าได้

2.5.3.2.2 FMECA คือ การประเมินความวิกฤตของแต่ละโหมดความล้มเหลว โดยจะประเมินความน่าจะเป็น ความรุนแรงของผลกระทบ และความสามารถในการตรวจจับความล้มเหลว เพื่อพิจารณาถึงภาวะวิกฤติ การประเมินนี้ช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงได้อย่างชัดเจน

2.5.3.3 ความซับซ้อนและกรณีการใช้งาน

2.5.3.3.1 FMEA เหมาะอย่างยิ่งสำหรับระบบ กระบวนการ หรือผลิตภัณฑ์ที่เรียบง่าย บางอุตสาหกรรมใช้วิธีนี้โดยไม่จำเป็นต้องประเมินภาวะวิกฤติโดยละเอียด

2.5.3.3.2 FMECA มีไว้สำหรับระบบที่ซับซ้อนหรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง นอกจากนี้ การทำความเข้าใจถึงความวิกฤตของความล้มเหลวเป็นสิ่งสำคัญ

2.5.3.4 การจัดสรรทรัพยากร

2.5.3.4.1 FMEA ไม่มีการประเมินภาวะวิกฤติอาจไม่เป็นแนวทางในการจัดสรรทรัพยากรสำหรับ FMEA เนื่องจากโหมดความล้มเหลวที่ระบุทั้งหมดได้รับการปฏิบัติเหมือนกัน ดังนั้นจึงอาจนำไปสู่การจัดสรรทรัพยากรและความพยายามในทางที่ผิด

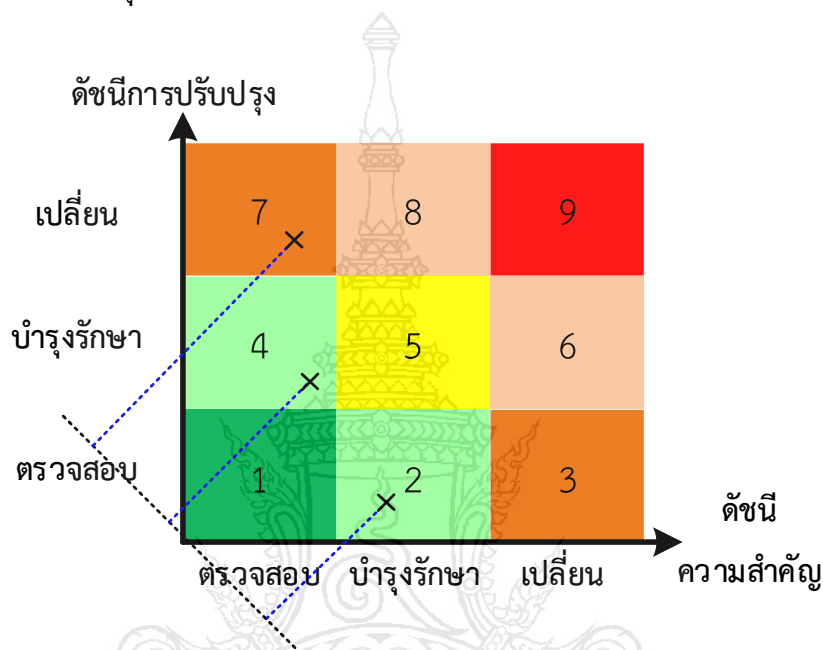
2.5.3.4.2 การประเมินภาวะวิกฤตของ FMECA ช่วยให้สามารถจัดสรรทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ช่วยให้มั่นใจว่าสามารถจัดการกับความเสี่ยงที่สำคัญและมีผลกระทบสูงสุด ดังนั้นจึงช่วยให้องค์กรต่างๆ มุ่งเน้นทรัพยากรของตนไปยังจุดที่ต้องการมากที่สุดได้

2.5.3.5 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

2.5.3.5.1 FMEA ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย รวมถึงการผลิต สิ่งของสำหรับคนทั่วไป อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการผลิตขั้นพื้นฐาน สถานที่เหล่านี้คือจุดที่คุณไม่จำเป็นต้องมองให้ลึกลงไปว่าสิ่งเลวร้ายจะเกิดขึ้นได้อย่างไรหากมันพัง

2.5.3.5.2 FMECA กำลังถูกใช้ในพื้นที่ที่ซับซ้อนและมีความสำคัญอย่างยิ่ง รวมถึงเครื่องบิน โรงพยาบาล กองทัพ และการผลิตรถยนต์ ในสถานที่เหล่านี้ การรู้ว่าสิ่งเลวร้ายจะเกิดขึ้นได้อย่างไรหากทำผิดพลาดเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพราะผลลัพธ์อาจจะแย่มาก [19]

2.5.4 การบำรุงรักษาตามความเสี่ยง



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเมทริกซ์ความเสี่ยง

วิธีการถ่วงน้ำหนักและการให้คะแนน ความเสี่ยงในรูปแบบของดัชนีการปรับปรุง (%RI) และดัชนีความสำคัญ (%ImI) ของระบบป้องกันฟ้าผ่าแต่ละอุปกรณ์ ถูกคำนวณและวางในแผนภูมิความเสี่ยงตามแกน y และแกน x ตามลำดับ โดยใช้ %RI และ %ImI ในแผนภูมิความเสี่ยง การจัดการตามความเสี่ยงบนความเป็นไปได้ของการเสียหายสามารถถูกบอกเป็นนัยได้ %RI และ %ImI ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ สีของ %RI คือ สีเขียว สีเหลือง และสีแดง แทนสภาพดี พอใช้ และแย่ ในขณะที่สีของ %ImI แทนความสำคัญต่อระบบต่ำ ปานกลาง และสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สำหรับการแบ่งโซน %RI ช่วงที่ใช้จริงจะถูกกำหนดตามผลการทดสอบที่สะท้อน %RI การจัดการการบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ช่วงที่ใช้จริงสำหรับ %ImI ถูกกำหนดตามนโยบายของสาธารณูปโภค [20]

2.6 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.6.1 ความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพีเอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอนจนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% ซึ่งปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่า 15% แล้ว ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียมหรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศ ต่อมามีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลกมากขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรก ๆ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาดำ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่าง ๆ กันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียว ทอง เป็นต้น เพื่อความสวยงาม

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic System) เป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) เป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าสนใจสูงขึ้นเนื่องจากสามารถช่วยเสริมความมั่นคงในระบบสายส่งไฟฟ้า ระบบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามการใช้งานเป็น 2 ระบบคือระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่องานจำหน่าย

การประเมินความต้องการพลังงานในการออกแบบระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในการติดตั้งระบบ off-grid หรือไฮบริดมีขั้นตอน ดังนี้

- 2.6.1.1 ประเมินความต้องการพลังงาน (การประเมินโหลด)
- 2.6.1.2 ประเมินขนาดของแบตเตอรี่แบงค์
- 2.6.1.3 ประเมินพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่
- 2.6.1.4 กำหนดขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.6.1.5 กำหนดขนาดตัวควบคุมการชาร์จ
- 2.6.1.6 กำหนดขนาดอินเวอร์เตอร์
- 2.6.1.7 ปรับระบบให้เหมาะสม
- 2.6.1.8 กำหนดขนาดสายเคเบิล

2.6.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.6.2.1 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน จะแบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น คือ แบบที่เป็นรูปผลึก (Crystal) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon Solar Cell)

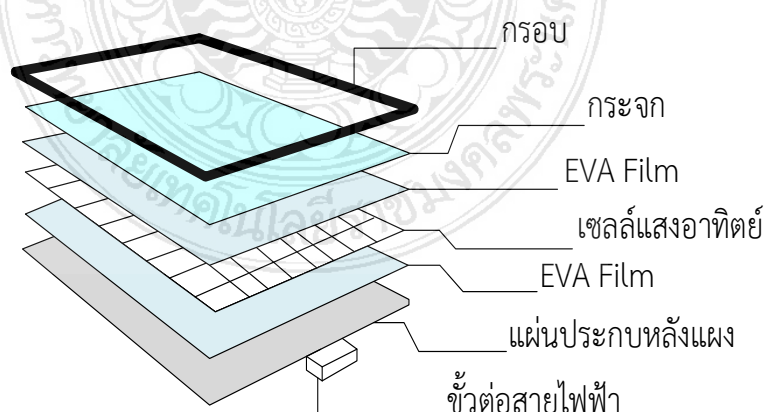
ข) ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell)

และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) คือ ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell)

2.6.2.2 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน ซึ่งประเภทนี้ จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25%. ขึ้นไป แต่มีราคาสูงมาก ส่วนใหญ่ใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาขบวนการผลิตสมัยใหม่จะทำให้มีราคาถูกลงและนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต

2.6.3 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียวจะมีค่าต่ำมาก การนำมาใช้งานจะต้องนำเซลล์หลายเซลล์ มาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงขึ้น เซลล์ที่นำมาต่อกันในจำนวนและขนาดที่เหมาะสมเรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module หรือ Solar Panel) การทำเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นแผงก็เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน ด้านหน้าของแผงเซลล์ ประกอบด้วย แผ่นกระจกที่มีส่วนผสมของเหล็กดำ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยอมให้แสงผ่านได้ดี และยังเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์อีกด้วย แผงเซลล์จะต้องมีการป้องกันความชื้นที่ดีมาก เพราะจะต้องอยู่กลางแจ้ง กลางฝนเป็นเวลานาน



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบโซลาร์เซลล์

ในการประกอบจะต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนและป้องกันความชื้นที่ดี เช่น ซิลิโคน และอีวีเอ (Ethelele Viny! Acetate) เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์ จึงต้องมีการทำกรอบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง ดังนั้นแผงเซลล์จึงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (Laminate) ซึ่งสะดวกในการติดตั้ง

2.6.4 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า ได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าไปใช้งานได้ทันที

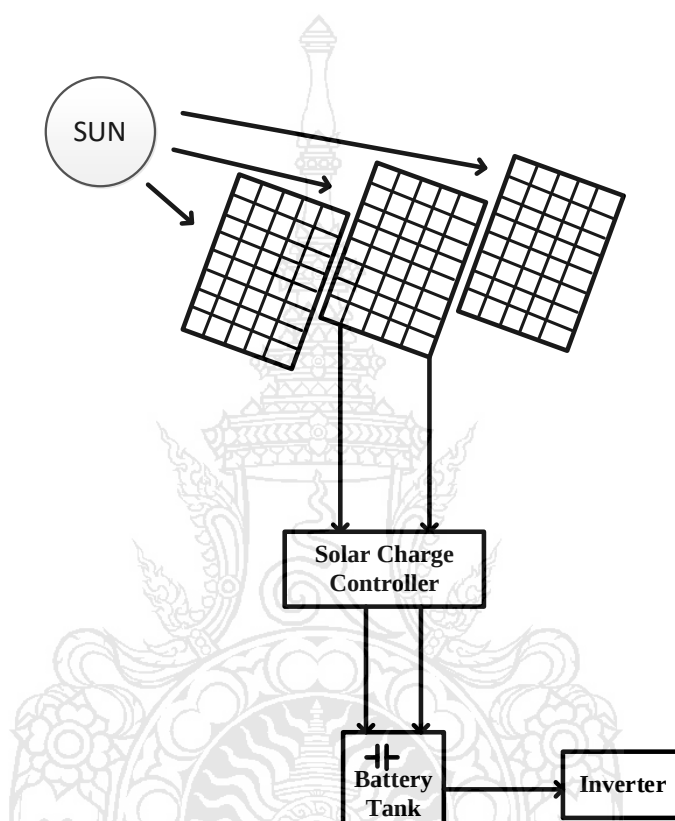
2.6.4.1 N-type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการโด๊ปปิ้งด้วยสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ P-type ซิลิคอน คือสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการโด๊ปปิ้งด้วยสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิด มาประกบต่อกันด้วย P-N junction จึงทำให้เกิดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่ยังไม่มีแสงแดด N-type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนประกอบส่วนใหญ่พร้อมจะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมี โฮลปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ด้านหน้าของ N-type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วน P-type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย ด้านหลังของ P-type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล

2.6.4.2 เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น N-type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น P-type

2.6.4.3 อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และ โฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจาก Front Electrode และ Back Electrode ให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน

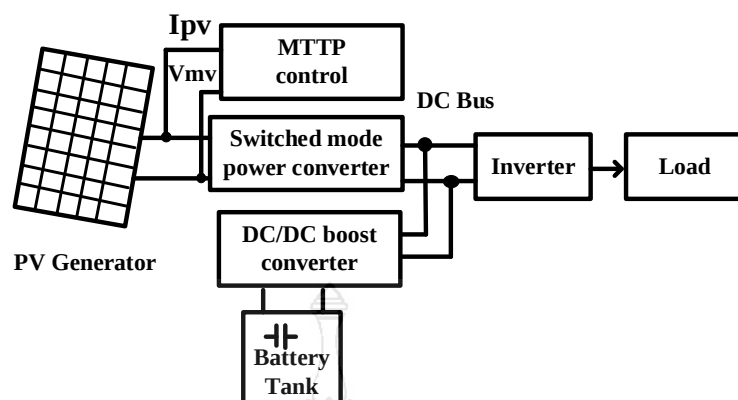
2.6.5 ประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.6.5.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระเป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟกระสตรงเป็นไฟกระแสสลับแบบอิสระ



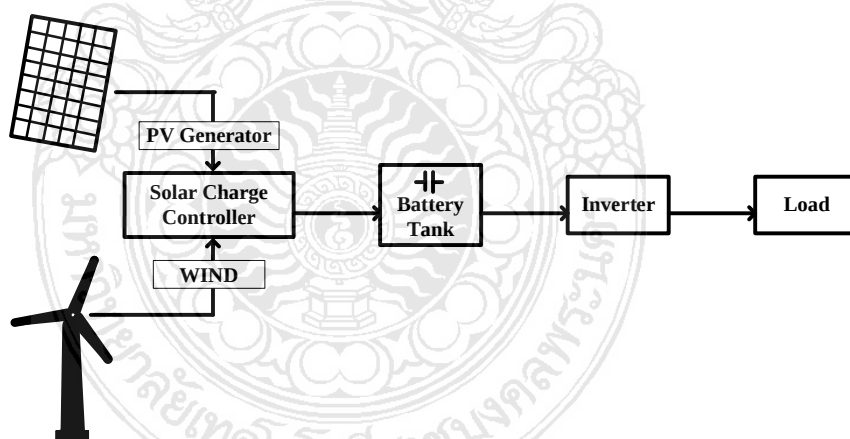
รูปที่ 2.12 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

2.6.5.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบ สำหรับผลิตไฟฟ้าอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟกระสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรงใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้า เข้าถึงอุปกรณ์ ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟกระสตรงเป็น ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.6.5.3 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานเป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ



รูปที่ 2.14 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า อาคารสำนักงานของโรงงานไทยคาร์บอน (รังสิต) เซอร์วิส จำกัด จังหวัดปทุมธานี ซึ่งอาคารโรงงานมีความสูงกว่าบริเวณโดยรอบ จึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า จึงทำให้เกิดการประเมินโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และความรุนแรง (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis : FMECA) โดยการนำเสนอส่วนย่อยแต่ละส่วนของระบบป้องกันฟ้าผ่นำมาประเมินด้วยเทคนิค FMECA โดยการเก็บข้อมูลลงในโปรแกรม Microsoft Excel หลังจากทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMECA ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับเมทริกซ์วิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยแบ่งออกเป็นแถบสี 4 แถบ ดังนี้ สีแดง สีส้ม สีเหลือง และสีเขียว ซึ่งแต่ละแถบสีจะแสดงให้เห็นถึงระดับความเสี่ยงสูงมาก ความเสี่ยงสูง ความเสี่ยงปานกลาง และความเสี่ยงต่ำ ตามลำดับ

	ความวิกฤต				
ความล้มเหลว	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 3.1 เมทริกซ์วิกฤต

การวิเคราะห์ FMECA ใช้กำหนดความเสี่ยงของระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งระบุความสำคัญเป็นเกณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ ด้านประสิทธิภาพ ด้านความปลอดภัย ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านการเงิน ของ

ระบบป้องกันฟ้าผ่า หลังจากวิเคราะห์เกณฑ์ทั้งหมดแล้ว จึงนำมาทำการการวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษาดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษา

คะแนน	คำอธิบาย
22 - 25	เป็นระดับที่ยอมรับไม่ได้เลย เหนือทางแก้ไข
16 - 21	ระดับที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหาทางแก้ไข
5 - 15	ระดับที่ยอมรับได้แต่ต้องมีการตรวจสอบและป้องกัน
1 - 4	ระดับที่ยอมรับได้เลย

เกณฑ์การประเมินด้านต่างๆ พิจารณาระบบป้องกันฟ้าผ่า ใน %HI ของระบบป้องกันฟ้าผ่า จำเป็นต้องใช้หลายวิธีการทดสอบและการตรวจสอบด้วยสายตา เพื่อประเมินสภาพของส่วนประกอบในแต่ละอุปกรณ์ การคำนวณ %HI แสดงในสมการที่ 3.1 ถูกใช้เพื่อระบุคะแนนของวิธีการทดสอบ [21-22]

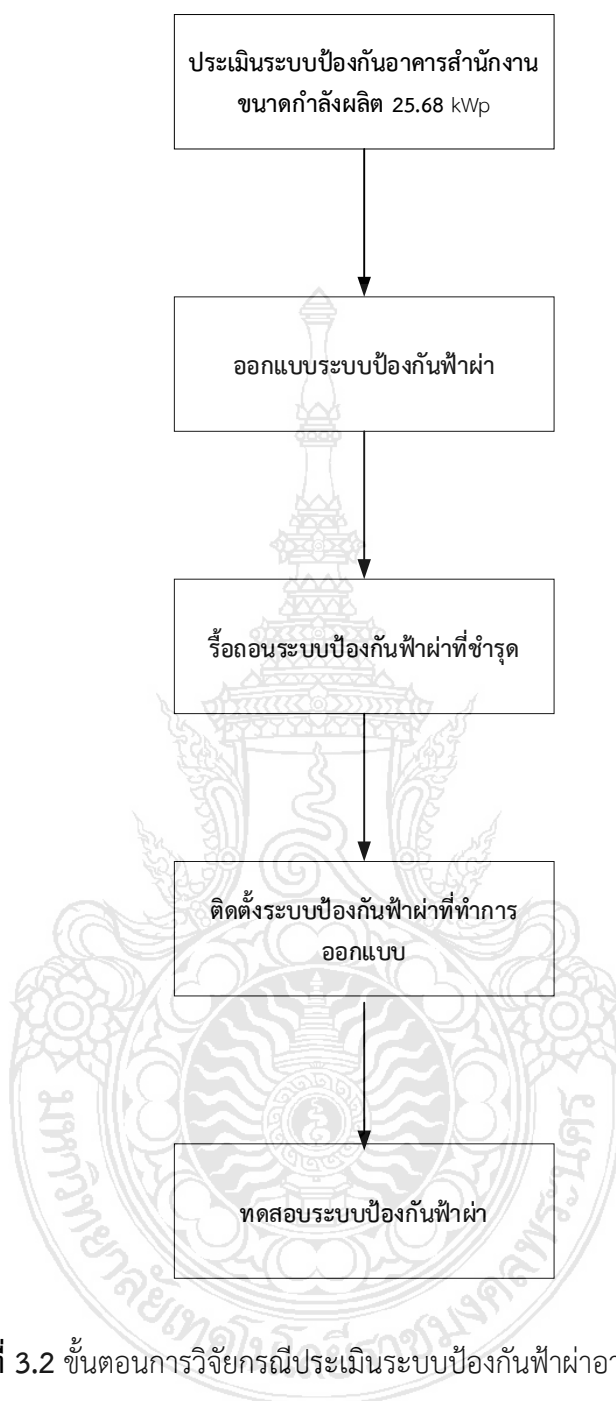
$$\%HI = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^N (S_{max} \times W_i)} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ %HI คือ คะแนนการประเมิน
 S_i คือ คะแนน
 S_{max} คือ คะแนนสูงสุด
 W_i คือ ค่าน้ำหนักของผลการวินิจฉัยลำดับที่

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารสำนักงาน

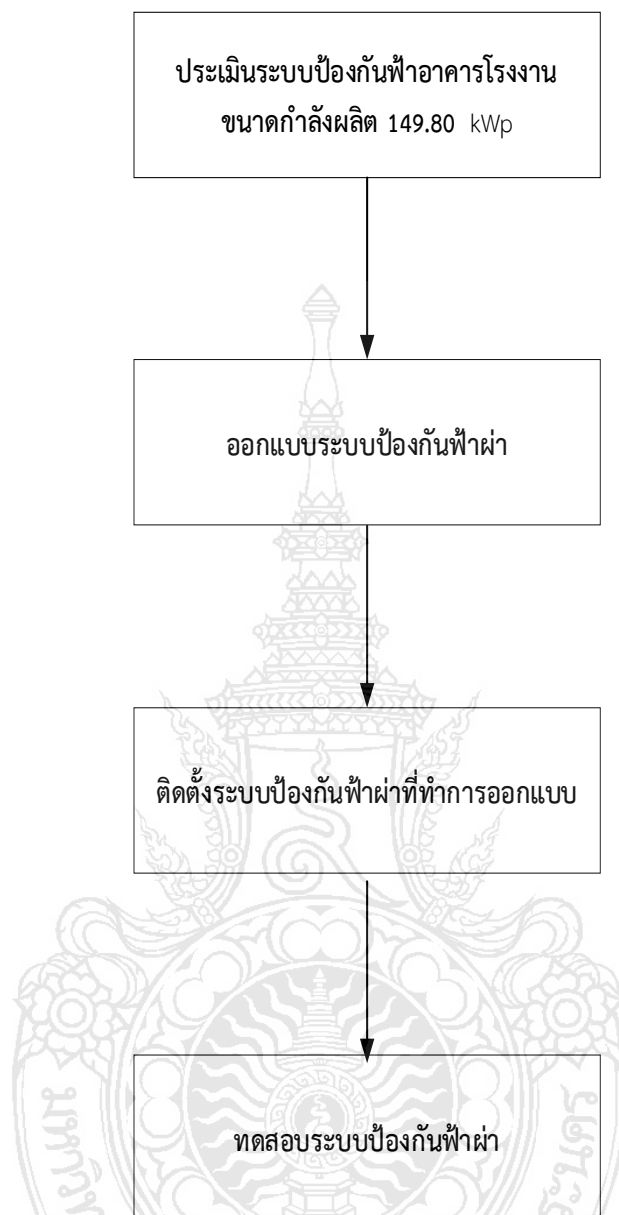
มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้ ทำการประเมิน หลังจากประเมินด้วยเทคนิค FMECA จึงทำการออกแบบตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย หลังจากนั้นทำการรื้อถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ชำรุดเพื่อติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและวัดค่าทดสอบระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการวิจัยกรณีประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารสำนักงาน

3.2.2 ขั้นตอนการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารโรงงาน

มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้ ทำการประเมิน หลังจากประเมินด้วยเทคนิค FMECA จึงทำการออกแบบตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย หลังจากนั้นติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและวัดค่าทดสอบระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการวิจัยกรณีประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารโรงงาน

3.3 กรณีศึกษาการประเมินด้านประสิทธิภาพ

การประเมินด้านประสิทธิภาพมีเกณฑ์ดังนี้ การตรวจด้วยสายตา ,วัดค่าความต้านทานสายดิน (โอห์ม) และตรวจสอบเครื่องนับจำนวนฟ้าผ่า เป็นต้น และใช้เก็บคะแนนสำหรับการวิเคราะห์ด้านประเมินด้านประสิทธิภาพตามเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การประเมินสภาพของส่วนประกอบระบบป้องกันฟ้าผ่า

เกณฑ์	คะแนน				
	1	2	3	4	5
การตรวจด้วย สายตา	ปกติ	มีสนิมเล็กน้อย	มีสนิม	เริ่มฉีกขาด	สายตัวนำ สัมผัสหลังคา
วัดค่าความ ต้านทานสายดิน (โอห์ม)	0 - 5	6 - 10	11 - 15	16 - 25	มากกว่า 25
ตรวจสอบเครื่อง นับจำนวนฟ้าผ่า	เพิ่มขึ้น				ไม่เพิ่มขึ้น

3.4 กรณีศึกษาการประเมินความรุนแรงด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินความรุนแรงด้านสิ่งแวดล้อม[23-24] มี 3 เกณฑ์ เช่น อายุการใช้งาน ผลกระทบต่อหลังคา และสถานที่ตั้ง เป็นต้น ที่และใช้เก็บคะแนนสำหรับการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความรุนแรงในเรื่องสิ่งแวดล้อม

เกณฑ์	คะแนน				
	1	2	3	4	5
อายุการใช้งาน	0 - 2	3 - 5	6 - 8	9 - 10	11 ปีขึ้นไป
ผลกระทบ1ต่อ หลังคา	ไม่มี ผลกระทบ		สายตัวนำ หย่อน		สายตัวนำ สัมผัสหลังคา

ตารางที่ 3.3 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความรุนแรงในเรื่องสิ่งแวดล้อม (ต่อ)

เกณฑ์	คะแนน				
	1	2	3	4	5
สถานที่ติดตั้ง	ติดตั้งที่มีอาคารสูงล้อมรอบ			ติดตั้งที่โล่ง	

3.5 กรณีศึกษาการประเมินความรุนแรงด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ

การประเมินความรุนแรงด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือมี 3 เกณฑ์ เช่น ค่าความต้านทานสายดิน (โอห์ม) ระบบแรงดัน (โวลต์) และการป้องกัน เป็นต้น และใช้เก็บคะแนนสำหรับการวิเคราะห์ด้านประเมินด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือตามเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ

เกณฑ์	คะแนน				
	1	2	3	4	5
ค่าความต้านทานสายดิน (โอห์ม)	0 – 5	6 – 10	11 – 15	16 – 25	มากกว่า 25
ระบบแรงดัน (โวลต์)	220 - 146	11 – 33 k	69 k	115 k	มากกว่า 115 k
การป้องกัน	ต่อลงดินตามมาตรฐาน		ต่อลงดินไม่ตามมาตรฐาน		ต่อลงดินแบบผิดวิธี

3.6 กรณีศึกษาการประเมินความรุนแรงด้านการเงิน

การประเมินความรุนแรงด้านการเงินจะมีการเก็บคะแนนความคุ้มค่าแทนความเสี่ยง เช่น ค่าร้อยละของราคาส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาลังแสดงในตารางที่ 3.6 และ 3.7 และทำการเก็บคะแนนตามเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์คะแนนการประเมินความรุนแรงด้านการเงิน

คะแนน	คำอธิบาย
1	น้อยกว่า 10% ต่อราคาทั้งหมด
2	10 – 29% ต่อราคาทั้งหมด
3	30 – 49% ต่อราคาทั้งหมด
4	50 – 69% ต่อราคาทั้งหมด
5	70 – 100% ต่อราคาทั้งหมด

ตารางที่ 3.6 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ส่วนประกอบ	ราคา (บาท)	อัตราร้อยละ (%)
หัว Air Terminal สูง 0.60 เมตร	49,500.00	8.71
สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	294,120.00	51.78
แท่งตัวนำลงดิน เส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x 10 นิ้ว	20,400.00	3.59
บ่อกราวด์	17,200.00	3.03
ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	7,600.00	1.34

ตารางที่ 3.6 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp (ต่อ)

ส่วนประกอบ	ราคา (บาท)	อัตราร้อยละ (%)
Ground Test Box	29,200.00	5.14
Sandle Clamp Support	93,000.00	16.3
Exthermo Weld	42,000.00	7.39
Test Commissioning	15,000.00	2.64
รวม	568,020.00	100%

ตารางที่ 3.7 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

ส่วนประกอบ	ราคา (บาท)	อัตราร้อยละ (%)
หัว Air Terminal สูง 0.60 เมตร	148,500.00	11.44
สายทองแดงเปลือย 50 ตร.มม.	298,000.00	22.94
แท่งตัวนำลงดิน เส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x 10 นิ้ว	81,600.00	6.28
บ่อกราวด์	68,800.00	5.29
ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	30,400.00	2.34

ตารางที่ 3.7 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp (ต่อ)

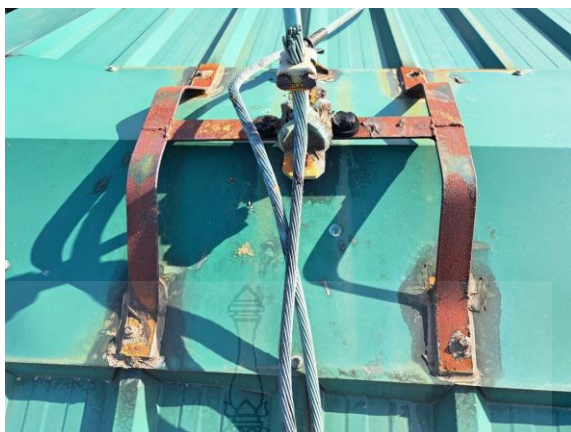
ส่วนประกอบ	ราคา (บาท)	อัตราร้อยละ (%)
Ground Test Box	116,800.00	8.99
Sandle Clamp Support	372,000.00	28.64
Exthermo Weld	168,000.00	12.93
Test Commissioning	15,000.00	1.15
รวม	1,299,100.00	100%

3.7 กรณีศึกษาทำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

ทำการตรวจสอบระบบป้องกันฟ้าผ่าเรื่องอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพตามการใช้งาน ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรได้รับการปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพ ทำการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้โดยใช้มาตรฐานวิศวกรรมสถาน โดยใช้วิธี 3 วิธี ดังนี้ วิธีทรงกลมกลิ้ง วิธีมุมป้องกัน และวิธี ตาข่าย

3.8 กรณีศึกษารื้อถอนระบบป้องกันฟ้าผ่า

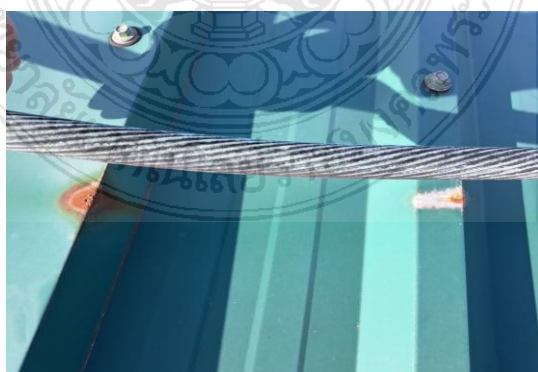
ทำการกำหนดเวลาในการรื้อถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp ด้วยสภาพและความชำรุดของระบบป้องกันฟ้าผ่าจึงต้องมีการรื้อถอน เพื่อติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบตามมาตรฐาน รูปภาพอุปกรณ์และความเสียหายหลังคาของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp แสดงดังรูปที่ 3.4 – 3.6



รูปที่ 3.4 ฐานตัวจับยึดแท่งตัวนำ



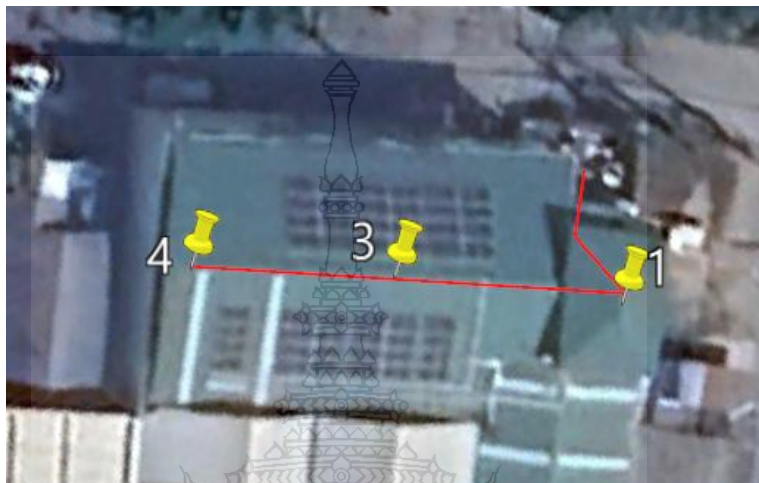
รูปที่ 3.5 ตัวจับยึดสายตัวนำ



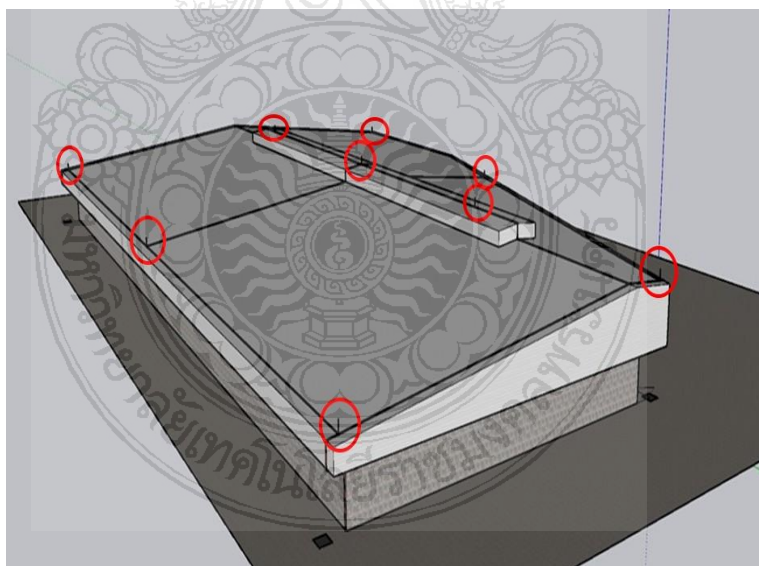
รูปที่ 3.6 สายตัวนำหย่อนติดหลังคา

3.9 กรณีศึกษาการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า

ทำการติดตั้งตามการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ด้วยขั้นตอนตามมาตรฐานและกำหนดการติดตั้ง ล่อฟ้าใน Google Earth เพื่อประมาณขนาดก่อนติดตั้งจริง



รูปที่ 3.6 วางแผนติดตั้งใน Google Earth



รูปที่ 3.7 ทำการวางผัง 3D อาคารที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด

149.80 kWp

บทที่ 4

ผลวิจัย

4.1 ผลลัพธ์การประเมิน

4.1.1 ผลลัพธ์การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ในการประเมินสภาพระบบป้องกันฟ้าผ่า ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วนประกอบ ซึ่งประกอบด้วย หัว Air Terminal สายทองแดงเปลือย แท่งตัวนำลงดิน บ่อกราวด์ ท่อพีวีซี Ground Test Box Sandle Clamp Support และ Exthermo Weld ตามลำดับ วิธีการทดสอบที่จำเป็นสำหรับการประเมินสภาพของแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 วิธีการทดสอบเพื่อการประเมินสภาพบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ลำดับ	ส่วนประกอบ	การทดสอบ
1	หัว Air Terminal สูง 0.60 เมตร	การตรวจพินิจด้วยสายตา
2	สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	การตรวจพินิจด้วยสายตา และวัด ความต้านทาน
3	แท่งตัวนำลงดินเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x 10 นิ้ว	การตรวจพินิจด้วยสายตา
4	บ่อกราวด์	การตรวจพินิจด้วยสายตา
5	ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	การตรวจพินิจด้วยสายตา

ตารางที่ 4.1 วิธีการทดสอบเพื่อการประเมินสภาพบนหลังคาขนาด 25.68 kWp (ต่อ)

ลำดับ	ส่วนประกอบ	การทดสอบ
6	Ground Test Box	การตรวจพินิจด้วยสายตา และทดสอบการใช้งาน
7	Sandle Clamp Support	การตรวจพินิจด้วยสายตา
8	Exthermo Weld	การตรวจพินิจด้วยสายตา

หลังจากทำการเก็บข้อมูลลงโปรแกรม Microsoft Excel จึงนำคะแนนมาลงในตารางแถวที่ 1 – 4 ตามลำดับการอุปกรณ์ 1 – 8 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกตัวอย่างเช่น ประเมินคะแนนด้านประสิทธิภาพได้มาจะลงในแถวที่ 1 ตามลำดับของอุปกรณ์ที่ทำการประเมิน

ตารางที่ 4.2 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

แถวที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ลำดับที่	ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า	ความรุนแรง				ความล้มเหลว	ความวิกฤติ			
		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน
1	แท่งตัวนำ	4	4	4	1	4	16	16	16	4
2	สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	4	4	4	4	4	16	16	16	16
3	แท่งตัวนำลงดิน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x 10 นิ้ว	4	4	4	1	4	16	16	16	4
4	บ่อกราวด์	4	4	4	1	4	16	16	16	4

ตารางที่ 4.2 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kwp (ต่อ)

แถวที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ลำดับที่	ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า	ความรุนแรง				ความล้มเหลว	ความวิกฤติ			
		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน
5	ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	4	4	4	1	4	16	16	16	4
6	Ground Test Box	4	4	4	1	4	16	16	16	4
7	Sandle Clamp Support	4	4	4	2	4	16	16	16	8
8	Exthermo Weld	4	4	4	1	4	16	16	16	4

จากตารางที่ 4.2 หลังจากทำการเก็บข้อมูลลงในความรุนแรงตามลำดับแถวที่แล้ว ต้องทำการหาค่าความวิกฤติ โดยทำการนำแต่ละแถวที่ และแต่ละลำดับ นำมาคูณ เพื่อให้ได้คะแนนความวิกฤติ ยกตัวอย่างเช่น จะหาความวิกฤติของประสิทธิภาพ ในอุปกรณ์ลำดับที่ 1 โดยทำการนำคะแนนจาก แถวที่ 1 ลำดับที่ 1 มาคูณกับ แถวที่ 5 ลำดับที่ 1 จะได้ค่าดังนี้ $4 \times 4 = 16$ และนำค่ามาใส่ในความวิกฤติของประสิทธิภาพ ในอุปกรณ์ลำดับที่ 1

ผลลัพธ์คะแนนความวิกฤติถูกคำนวณและนำไปพล็อตลงในเมทริกซ์ความวิกฤติ 4 ด้าน ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และด้านการเงิน แสดงในรูปที่ 4.1 – 4.4 จากรูปที่ 4.1 – 4.4 กรอบตัวเลขคะแนนสีดำที่กำหนดลงเมทริกซ์ความเสี่ยงตั้งแต่เลข 1-8 ซึ่งได้จากตารางที่ 4.2 คือ หัว Air Termianl สายทองแดงเปลือย แท่งตัวนำลงดิน บ่อกราวด์ ท่อพีวีซี Ground Test Box Sandle Clamp Support และ Exthermo Weld ตามลำดับ และแสดงให้เห็นว่ามีความเสี่ยงสูงสุดในการปฏิบัติงาน เนื่องจากความสำคัญในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ อยู่ในเขตโซนสีแดง เนื่องจากระบบป้องกันฟ้าผ่ามีอายุการใช้งาน และอยู่ในสภาพที่ไม่ดี ทั้งเสี่ยงต่อการเกิดการฟ้าผ่าตามสถิติการเกิดฝนฟ้าคะนองของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้กล่าวว่าเฉลี่ยการเกิดฝนปี พ.ศ. 2549 - พ.ศ. 2564 ค่าเฉลี่ยเกิดฝนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 67 ในด้านการเงินอยู่ในเขตสีเขียว เหลือง และแดง

	ประสิทธิภาพ				
ความล้มเหลว	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.1 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านประสิทธิภาพบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

	สิ่งแวดล้อม				
ความล้มเหลว	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.2 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านสิ่งแวดล้อมบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

	ความปลอดภัย				
ความล้มเหลว	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.3 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านความปลอดภัยบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ความล้มเหลว	การเงิน				
	5	10	15	20	25
	1 3 4 5 6 8 7			2	
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.4 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านการเงินบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

4.1.2 ผลลัพธ์การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp

ในการประเมินสภาพระบบป้องกันฟ้าผ่า ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วนประกอบ ซึ่งประกอบด้วย หัว Air Terminal, สายทองแดงเปลือย, แท่งตัวนำลงดิน, บ่อกราวด์, ท่อพีวีซี, Ground Test Box, Sandle Clamp Support และ Exthermo Weld วิธีการทดสอบที่จำเป็นสำหรับการประเมินสภาพของแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 วิธีการทดสอบเพื่อการประเมินสภาพบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

ลำดับ	ส่วนประกอบ	การทดสอบ
1	หัว Air Terminal สูง 0.60 เมตร	การตรวจพินิจด้วยสายตา
2	สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	การตรวจพินิจด้วยสายตา
3	แท่งตัวนำลงดินเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x10 นิ้ว	การตรวจพินิจด้วยสายตา
4	บ่อกราวด์	การตรวจพินิจด้วยสายตา

ตารางที่ 4.3 วิธีการทดสอบเพื่อการประเมินสภาพบนหลังคาขนาด 149.80 kWp (ต่อ)

ลำดับ	ส่วนประกอบ	การทดสอบ
5	ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	การตรวจพินิจด้วยสายตา
6	Ground Test Box	การตรวจพินิจด้วยสายตา
7	Sandle Clamp Support	การตรวจพินิจด้วยสายตา
8	Exthermo Weld	การตรวจพินิจด้วยสายตา

หลังจากทำการเก็บข้อมูลลงโปรแกรม Microsoft Excel จึงนำคะแนนมาลงในตารางแถวที่ 1 – 4 ตามลำดับการอุปกรณ์ 1 – 8 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ยกตัวอย่างเช่น ประเมินคะแนนด้านประสิทธิภาพได้มาจะลงในแถวที่ 1 ตามลำดับของอุปกรณ์ที่ทำการประเมิน

ตารางที่ 4.4 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

แถวที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ลำดับที่	ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า	ความรุนแรง				ความล้มเหลว	ความวิกฤติ			
		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน
1	แท่งตัวนำ	5	5	4	2	5	25	25	20	10
2	สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	5	5	4	2	5	25	25	20	10

ตารางที่ 4.4 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kwp (ต่อ)

แถวที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ลำดับที่	ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า	ความรุนแรง				ความล้มเหลว	ความวิกฤติ			
		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน
3	แท่งตัวนำลงดิน ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x10 นิ้ว	5	5	4	1	5	25	25	20	5
4	บ่อกราวด์	5	5	4	1	5	25	25	20	5
5	ท่อพีวีซี ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	5	5	4	1	5	25	25	20	5
6	Ground Test Box	5	5	4	1	5	25	25	20	5
7	Sandle Clamp Support	5	5	4	2	5	25	25	20	10
8	Exthermo Weld	5	5	4	1	5	25	25	20	5

จากตารางที่ 4.4 หลังจากทำการเก็บข้อมูลลงในความรุนแรงตามลำดับแถวที่แล้ว ต้องทำการหาค่าความวิกฤติ โดยทำการนำแต่ละแถวที่ และแต่ละลำดับ นำมาคูณ เพื่อให้ได้คะแนนความวิกฤติ ยกตัวอย่างเช่น จะหาความวิกฤติของประสิทธิภาพ ในอุปกรณ์ลำดับที่ 1 โดยทำการนำคะแนนจาก แถวที่ 1 ลำดับที่ 1 มาคูณกับ แถวที่ 5 ลำดับที่ 1 จะได้ค่าดังนี้ $5 \times 5 = 25$ และนำค่ามาใส่ในความวิกฤติของประสิทธิภาพ ในอุปกรณ์ลำดับที่ 1

ผลลัพธ์คะแนนความวิกฤติถูกคำนวณและนำไปพล็อตลงในเมทริกซ์ความวิกฤติ 4 ด้าน ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และด้านการเงิน แสดงในรูปที่ 4.5 – 4.8 จากรูปที่ 4.5 – 4.8 กรอบตัวเลขคะแนนสีดำที่กำหนดลงเมทริกซ์ความเสี่ยงตั้งแต่เลข 1-8 ซึ่งได้จากตารางที่ 4.3 คือ หัว Air Termianl สายทองแดงเปลือย แท่งตัวนำลงดิน บ่อกราวด์ ท่อพีวีซี Ground Test Box Sandle Clamp Support และ Exthermo Weld ตามลำดับ และแสดงให้เห็นว่ามีความเสี่ยงสูงสุดในการปฏิบัติงาน เนื่องจากความสำคัญในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือ

ความน่าเชื่อถือ อยู่ในเขตโซนสีแดง เนื่องจากไม่มีระบบป้องกันฟ้าบนอาคารโรงงานและสภาพอาคารโดยรอบของอาคารโรงงานต่ำกว่าอาคาร ในด้านการเงินอยู่ในเขตสีเหลือง และส้ม

ความล้มเหลว	ประสิทธิภาพ				
	5	10	15	20	1 2 3 4 5 6 25 7 8
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.5 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านประสิทธิภาพบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

ความล้มเหลว	สิ่งแวดล้อม				
	5	10	15	20	1 2 3 4 5 6 25 7 8
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.6 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านสิ่งแวดล้อมบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

ความล้มเหลว	ความปลอดภัยบน				
	5	10	15	1 2 3 4 5 6 20 7 8	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.7 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านความปลอดภัยบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

	การเงิน				
	3 4 5 6 8	1 2 7			
	5	10	15	20	25
ความล้มเหลว	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4.8 เมทริกซ์วิกฤตของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านการเงินบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

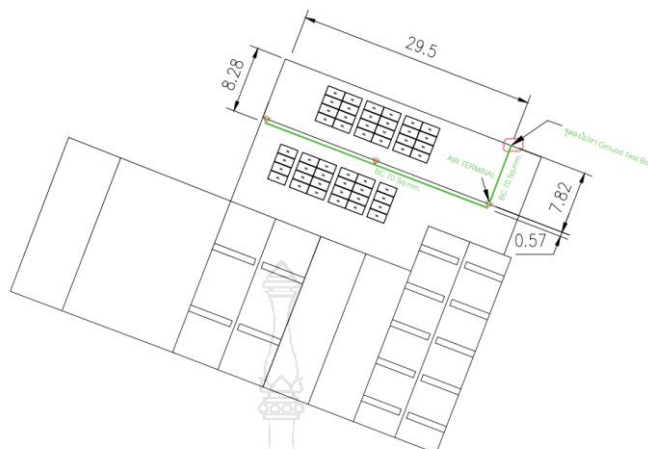
4.2 ผลลัพธ์การออกแบบ

4.2.1 ผลลัพธ์การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า มีการออกแบบเสาให้ครอบคลุมหลังคาอาคารโรงงานดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยมีรายละเอียดอุปกรณ์และแบบติดตั้งแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.12 และใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าวิธีตายายในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งจะได้ผลลัพธ์อยู่ในคลาสที่ 2 นั่นคือ ขนาดตาราง (เมตร) คือ 10 X 10 เมตร ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางการออกแบบล่อฟ้า

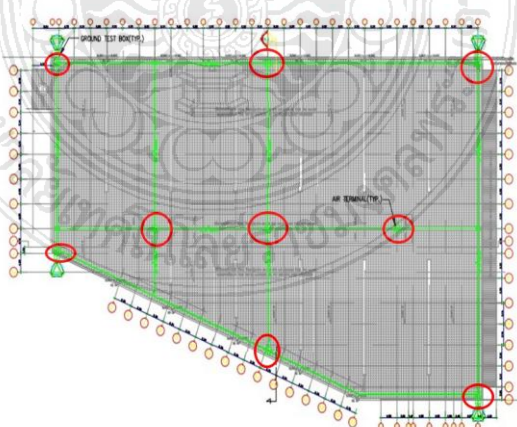
คลาสระบบป้องกันฟ้าผ่า	การออกแบบทรงกลมกลิ้ง (รัศมี)	การออกแบบตาราง (เมตร)
1	20 m	5 x 5 m
2	30 m	10 x 10 m
3	45 m	15 x 15 m
4	60 m	20 x 20 m



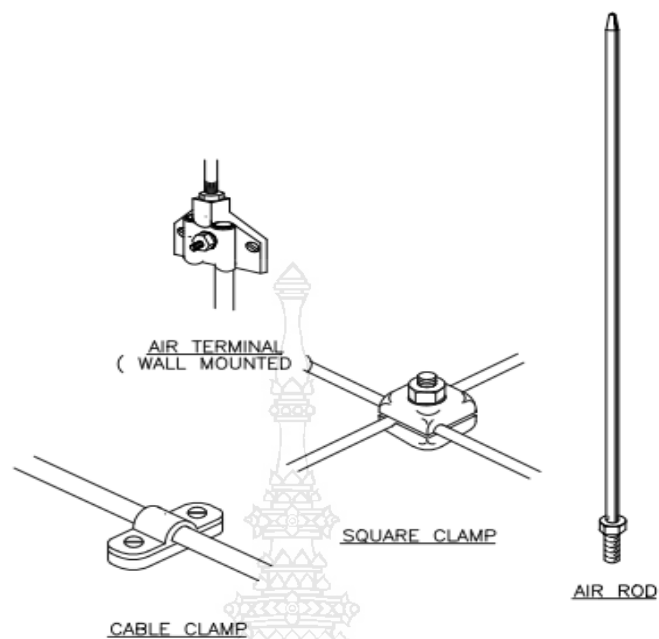
รูปที่ 4.9 แบบในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

4.2.2 ผลลัพธ์การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp

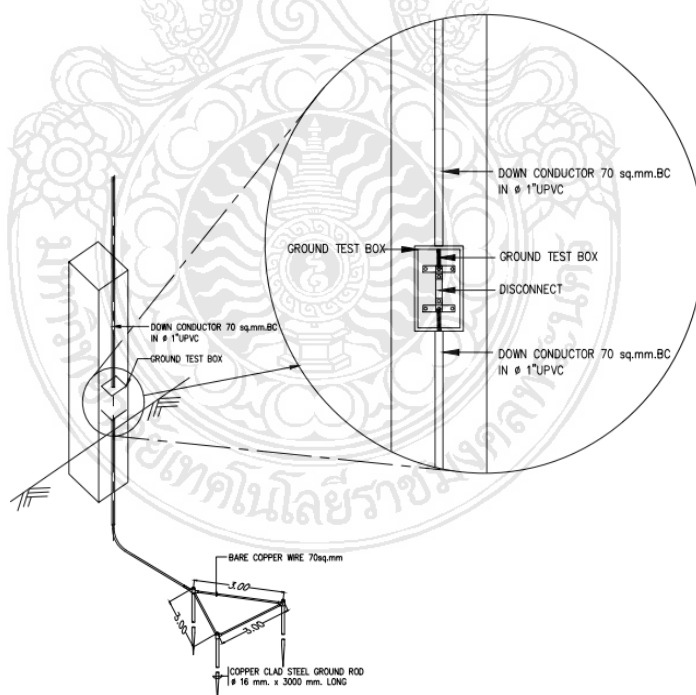
ในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า มีการออกแบบเสาให้ครอบคลุมหลังคาอาคารโรงงานดังแสดงในรูปที่ 4.10 ใช้อุปกรณ์ในการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.12 ดังเช่นกรณีที่ 1 ใช้วิธีการจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าวิธีตาข่ายในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งจะได้ผลลัพธ์อยู่ในคลาสที่ 4 นั่นคือ ขนาดตาราง (เมตร) คือ 20 X 20 เมตร ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.10 แบบในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาขนาด 149.80 kWp



รูปที่ 4.11 รายละเอียดโดยทั่วไปของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

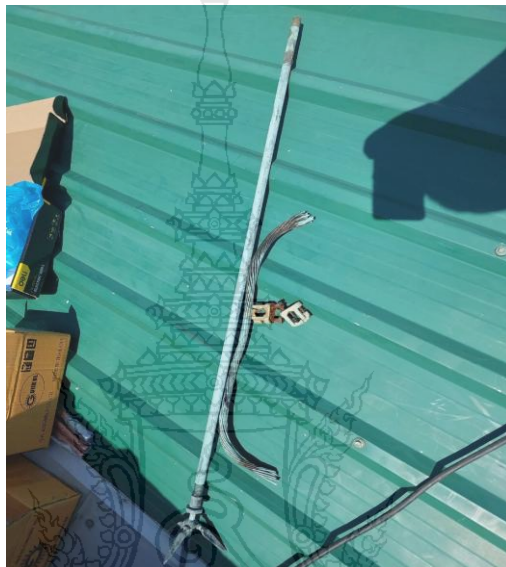


รูปที่ 4.12 แบบติดตั้ง Down Conductor

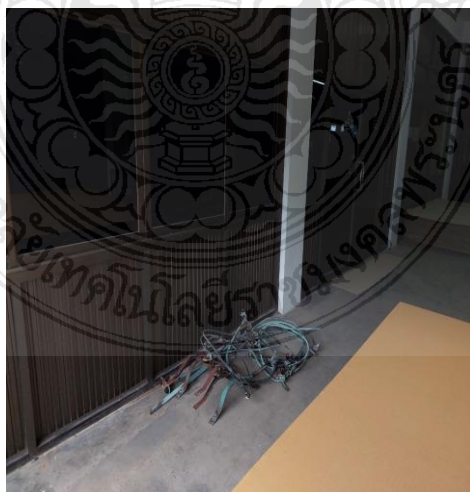
4.3 ผลลัพธ์การร้อยถอน

4.3.1 ผลลัพธ์การร้อยถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ บนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ร้อยถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ชำรุดเพื่อจะดำเนินการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับ
ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp ดังแสดงในรูปที่ 4.13 – 4.14



รูปที่ 4.13 ถอดเสาและร้อยถอนระบบป้องกันฟ้าผ่าเก่า



รูปที่ 4.14 นำส่งระบบป้องกันฟ้าผ่าเก่าให้กับโรงงาน

4.4 ผลลัพธ์การติดตั้ง

4.4.1 ผลลัพธ์การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ บนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ติดตั้งเสาหล่อฟ้า เสาตัวนำหล่อฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงสิ่งปลูกสร้างหรือบริเวณที่ที่จะป้องกัน มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเป็นไปได้ที่จะเกิดฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างภายในย่านการป้องกันที่มี การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบแยกอิสระเมื่อมีการติดตั้งเสาตัวนำมากกว่าหนึ่งต้น อาจมีการต่อถึง กันโดยตัวนำเหนือดิน และบริเวณใกล้เคียงของสิ่งติดตั้งไปยังระบบป้องกันฟ้าผ่าต้องมีการแยก



รูปที่ 4.15 การติดตั้งแท่งตัวนำ

ติดตั้งสายตัวนำและตัวจับยึด ตัวนำบนหลังคาและการต่อแท่งตัวนำหล่อฟ้าอาจติดยึด เข้ากับหลังคาโดยใช้ตัวคั่นและตัวจับยึดที่เป็นตัวนำหรือฉนวนก็ได้ ตัวนำอาจติดตั้งบนพื้นผิวของผนังก็ได้ถ้าผนังทำจากวัสดุไม่ติดไฟ ระยะห่างระหว่างตัวจับยึดที่แนะนำของตัวนำแสดงในตารางที่ 4.6 และ แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การติดตั้งสายตัวนำ

ตารางที่ 4.6 ตารางการออกแบบตัวนำ

การจัดวาง	ระยะห่างระหว่างตัวจับยึด สำหรับตัวนำที่เป็นเทป ตัวนำตี เกลียว และตัวนำกลมแบบ อ่อน (soft drawn) (มิลลิเมตร)	ระยะห่างระหว่างตัวจับยึด สำหรับตัวนำกลมตัน (มิลลิเมตร)
ตัวนำแนวระดับบนพื้นผิวแนว ระดับ	1,000	1,000
ตัวนำแนวระดับบนพื้นผิว แนวตั้ง	500	1,000
ตัวนำแนวตั้งที่สูงจากพื้นจนถึง ระยะ 20 เมตร	1,000	1,000
ตัวนำแนวตั้งที่สูงจากพื้น 20 เมตร ขึ้นไป	500	1,000

ติดตั้ง Ground Test Box กล่องทดสอบกราวด์มิให้ใช้เพื่อวัดความต้านทานของระบบ
ชั่วคราวและความต่อเนื่องของจุดเชื่อมต่อในระบบชั่วคราวที่จุดเชื่อมต่อของชั่วคราวแต่ละตัว
ตัวนำกราวด์แต่ละตัวต้องติดตั้งกล่องทดสอบกราวด์



รูปที่ 4.17 งานติดตั้ง Ground Test Box

ติดตั้งบ่อกราวด์คอนกรีต ต้องติดตั้งขั้วไฟฟ้าลงดินโดยให้ปลายด้านบนอยู่ลึกอย่างน้อย 0.5 เมตร และควรติดตั้งให้กระจายอย่างสม่ำเสมอมากที่สุดเพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าภายในดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 งานติดตั้งบ่อกราวด์คอนกรีต

4.4.2 ผลลัพธ์การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ บนหลังคาขนาด 149.80 kWp

จากการประเมิน FMECA จะเห็นได้ว่าอาคารขนาด 149.80 kWp เป็นพื้นที่เปิดโล่ง และเห็นถึงความเสี่ยงของการประเมินดังรูปที่ 4.5 - 4.8 และการเงินในการติดตั้งเป็นความคุ้มค่า ดังนั้นจึงเริ่มติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 4.19 - 4.23



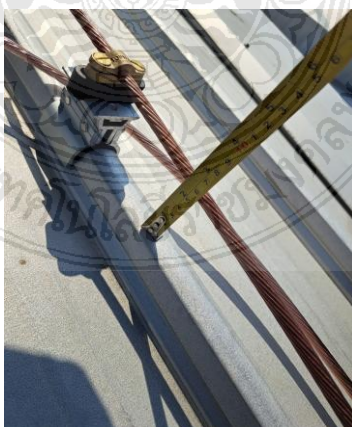
รูปที่ 4.19 งานติดตั้งแท่นยึดตัวนำ



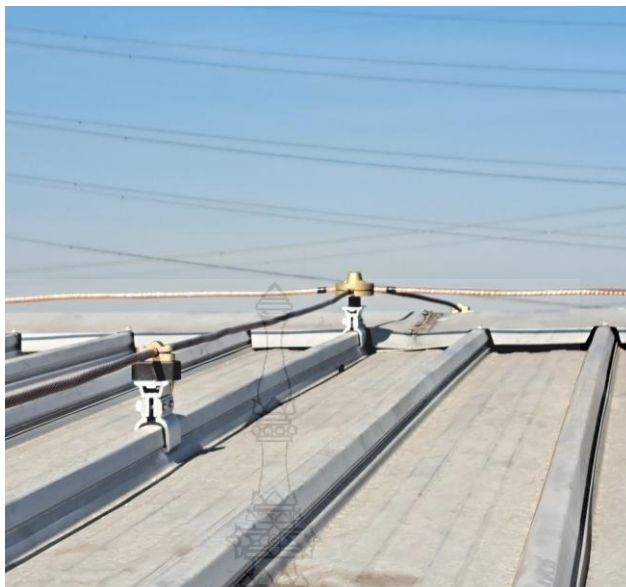
รูปที่ 4.20 งานติดตั้ง Ground Test Box อาคารขนาด 149.80 kWp



รูปที่ 4.21 งานติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน



รูปที่ 4.22 งานติดตั้งสายตัวนำตามมาตรฐาน



รูปที่ 4.23 งานติดตั้ง Exothermic Weld

4.5 ผลลัพธ์การวัดค่าความต้านทานหลักดิน

4.5.1 ผลลัพธ์การวัดค่าความต้านทานหลักดินระบบป้องกันฟ้าผ่าระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp

ใช้อุปกรณ์วัดค่าความต้านทานหลักดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและติดตั้ง [26] ได้ค่าความต้านทานตามจุดที่ทำการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.7 และแสดงในรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่าความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

รอบที่	จุดที่วัด	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
1	Earth Bus	1.61 โอห์ม
2	Earth Bus	1.62 โอห์ม
3	Earth Bus	1.60 โอห์ม
4	Earth Bus	1.61 โอห์ม



รูปที่ 4.24 เครื่องทดสอบความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 25.68 kWp

4.5.2 ผลลัพธ์การวัดค่าความต้านทานหลักดินระบบป้องกันฟ้าผ่าระบบป้องกันฟ้าผ่า สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp

ใช้อุปกรณ์วัดค่าความต้านทานหลักดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและติดตั้ง
ได้ค่าความต้านทานตามจุดที่ทำการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.8 และแสดงในรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่าความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 149.80 kWp

รอบที่	จุดที่วัด	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
1	Earth Bus	2.20 โอห์ม
2	Earth Bus	1.62 โอห์ม
3	Earth Bus	1.60 โอห์ม
4	Earth Bus	1.61 โอห์ม



รูปที่ 4.25 ผลลัพธ์การวัดเครื่องทดสอบความต้านทานดินบนหลังคาขนาด 149.80 kWp



บทที่ 5

สรุปผลการจำลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลอง

จากการประเมินพบว่า ระบบป้องกันฟ้าผ่ามีอายุการใช้งานและเสื่อมสภาพตามการใช้งาน ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรได้รับการปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การประเมินเพื่อจัดหาวิธีที่มีประสิทธิภาพจะพิจารณาเกณฑ์ความรุนแรง 4 ประการ ดังนี้ ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ และการเงิน โดยการเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และแสดงผลการวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษาระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้เทคนิค FMECA

กรณีที่ 1 ผลลัพธ์ของการประเมินด้วยเทคนิค FMECA แสดงให้เห็นว่าระบบป้องกันฟ้าผ่ามีความเสี่ยงสูงสุดในเกณฑ์ด้านประสิทธิภาพ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ เนื่องจากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าด้านต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น อยู่ในโซนอันตรายต้องรีบทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ ซึ่งมีความสำคัญสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 25.68 kWp เนื่องจากระบบป้องกันฟ้าผ่ามีอายุการใช้งานและอยู่ในสภาพที่ไม่ดี ทั้งเสี่ยงต่อการเกิดการฟ้าผ่า ทั้งนี้ตามสถิติการเกิดฝนฟ้าคะนองของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้กล่าวว่าเฉลี่ยการเกิดฝนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 - พ.ศ. 2564 ค่าเฉลี่ยเกิดฝนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 67

กรณีที่ 2 ผลลัพธ์ของการประเมินด้วยเทคนิค FMECA โดยที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 149.80 kWp ไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยการประเมินแสดงให้เห็นในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ อยู่ในเขตโซนสีแดง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงสูงมากของระบบ ทั้งเสี่ยงต่อการเกิดการฟ้าผ่าตามสถิติการเกิดฝนฟ้าคะนอง ในด้านการเงินอยู่ในเขตเหลือง และส้ม ซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า

เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และความเสี่ยงของทั้งสองกรณี ที่ใช้เทคนิค FMECA เป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งจะดำเนินการให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่า หรือเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถาน เมื่อทำการออกแบบและนำเสนอกับทางโรงงานจึงมีการเริ่มทำการเปลี่ยน และติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้งสองกรณีใหม่ หลังจากทำการเริ่มติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าตามมาตรฐานความปลอดภัยและมาตรฐาน

วิศวกรรมสถาน จะดำเนินการทดสอบด้วยอุปกรณ์วัดค่าความต้านทานหลักดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและติดตั้งใหม่ ซึ่งได้ค่าความต้านทานตามจุดที่ทำการวัด อยู่ที่เฉลี่ย 1.61 โอห์ม และ 1.75 โอห์ม และทำการตรวจสอบค่าความต้านทานหลักดินที่ตรวจวัดของระบบป้องกันฟ้าผ่าอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถาน แสดงว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าที่นำเสนอนี้สามารถใช้งานได้จริง

จากผลการศึกษาส่งผลให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทั้ง 2 ข้อ ได้แก่

5.1.1 เพื่อการบูรณาการเทคโนโลยีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อป้องกันระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

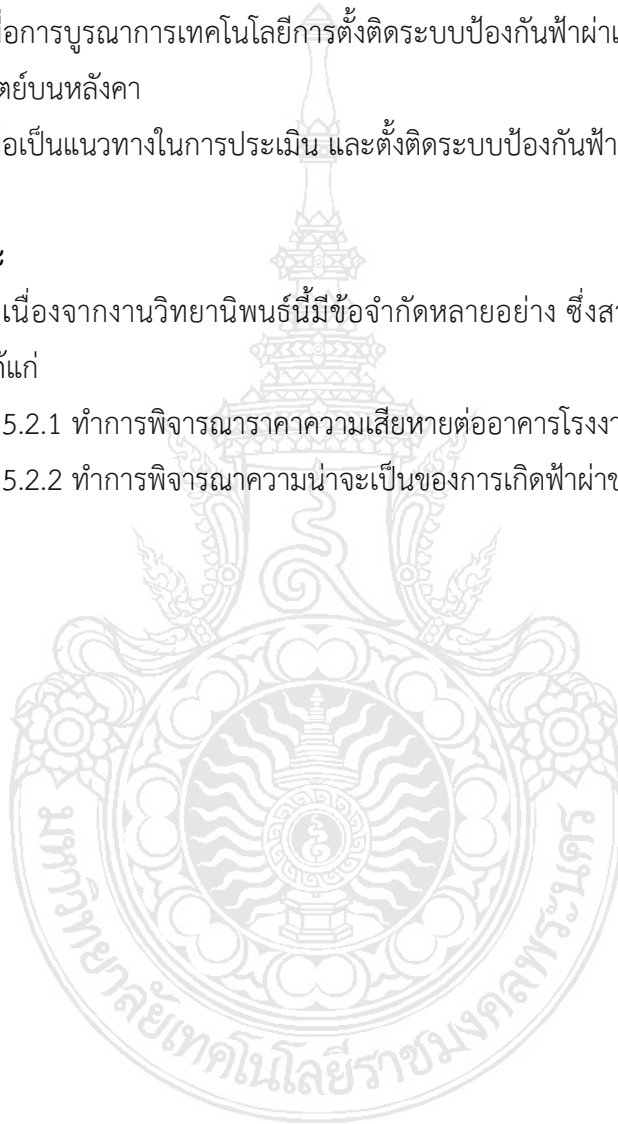
5.1.2 เพื่อเป็นแนวทางในการประเมิน และติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคา

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์นี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง ซึ่งสามารถพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขในอนาคตได้แก่

5.2.1 ทำการพิจารณาราคาความเสียหายต่ออาคารโรงงาน และอาคารสำนักงาน

5.2.2 ทำการพิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดฟ้าผ่าของพื้นที่ลงในวิทยานิพนธ์



เอกสารอ้างอิง

- [1] N. H. Zaini, M. Z. A. Ab-Kadir, M. A. M. Radzi, N. Azis, N. I. Ahmad, M. S. M. Nasir, M M. Izadi, N. F. Ab Aziz and Z. Ali, "Lightning Surge on the DC and AC Side of Solar PV System," 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), vol.7, no.725, June 2019.
- [2] Boris Dumnić, Elizaveta Liivik, Bane Popadić, Frede Blaabjerg, Dragan Milićević and Vladimir Katić, "Comparative Analysis of Reliability for String and Central Inverter PV Systems in Accordance with the FMECA," 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), vol.1, no.333, September 2020.
- [3] Loredana Cristaldi, Elena Molena and Emil Petkovski, "An application of Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) method to the assessment of Battery Life Cycle," 2022 IEEE International Conference on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE), vol.2, no.208, October 2022.
- [4] H. Zhang, H. Sun, J. Zou and Z. Guo, "Reliability analysis of horizontal machining center based on fuzzy FMECA," 13th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2023), vol.9, July 2023.
- [5] H. Chen, C. Guo, H. Li, C. Li and S. Xie, "Reliability analysis of intelligent cleaning robots based on FMECA and FTA," 13th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2023), vol.14, July 2023.
- [6] วิศรุต อัครฉัตรสกุล. แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2561), หน้า 3.

- [7] วิศรุต อัครฉัตรสกุล และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์. การวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินที่กระแสฟ้าผ่าทางตรงขนาด 5 kA 10kA และ 20 kA. (วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2562)
- [8] สำเริง อินท่าไม้ ,นิमित บุญภิรมย์ ,ภรชัย จูธนวัฒน์กุล และวันชัย จันไกรผล. การทดสอบการตอบสนองต่ออิมพัลส์ฟ้าผ่าของระบบบรากสายดิน. (วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2563)
- [9] นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ ,สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ,ปพน งามประเสริฐ และจิรวัฒน์ ไม้แก่น. การศึกษาปัจจัยการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์. (วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2564)
- [10] DEHN SE & Co KG, “When Lightning Strikes: What to do during a Thunderstorm”, 2012.
- [11] ณัฐพงศ์ ตันทนุช. (2564). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. หน้า 348-350
- [12] สำรวย สังข์สะอาด. (2553). ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและมาตรการความปลอดภัย. ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติไบเทค.
- [13] คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า ฝนคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2566). มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 9-11
- [14] เจษฎา เวียงจันทิก. การประเมินการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับโครงสร้างภายนอกอาคารของรถไฟฟ้าสายสีม่วง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2559). เลขหน้า (27).
- [15] สำรวย สังข์สะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 9-26
- [16] วิศรุต อัครฉัตรสกุล. แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2561). เลขหน้า (41-43).
- [17] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2564 Thai Electrical Code 2021.- กรุงเทพฯ. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565. เลขหน้า 4-14

- [18] ญัฐธนิชา ไพรหงส์ ,ดุสิต ชูศิลป์ และธนะประสงค์ พันธุ์ไม้. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 200 kV_{PEAK} 4 kJ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2550.)
- [19] เจต โมราเลส. ความเข้าใจความแตกต่างระหว่าง FMEA และ FMECA. สืบค้นจาก <https://www.mindonmap.com/th/blog/fmea-vs-fmea/>
- [20] C. Suwanasri, T. Suwanasri, and W. Luejai, “ Cost-Benefit for HV Transmission Line Renovation and Replacement Based on Failure Probability and Risk-Based Maintenance,” Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 197–207, 2020.
- [21] T.L. Saaty, “Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process” In Review of the Royal Spanish Academy of SSciences, vol. 102, pp. 251–318, 2008.
- [22] H. Tanaka, S.Tsukao, D. Yamashita, T. Niimmura, and R. Yokoyama “Multiple Criteria Assessment of Substation Conditions by Pair-Wise Comparison of Analytic Hierarchy Process” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, No.4, pp. 3017–3023, 2010.
- [23] J. Chitpong, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, “ Evaluation criteria for condition and importance assessment of high voltage transmission line,” 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiangmai, Thailand, 2016
- [24] C. Suwanasri, S. Saribut, W. Luejai, and T. Suwanasri, “Risk Assessment of HV Transmission Lines Using Failure Modes, Effects and Criticality Analysis” International Electrical Engineering Transactions., vol. 6, No.1, pp. 21–27, 2020.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. มนัส บุญเทียรทอง ,สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ,**นาวิน รอดเรือง** ,ปพน งามประเสริฐ1 และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, “การออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ณ โรงแรมฟอร์จูน ริเวอร์วิว นครพนม จังหวัดนครพนม 1-3 พฤษภาคม 2566.
2. **Nawin Rodrueang** ,Sakhon Woothipatanapan ,Narate Charlangsut ,Papon Ngamprasert ,Natchapol Ruangsap and Nattachote Rugthaicharoencheep, “Risk Assessment of the Lightning Protection System for Hybrid Solar Power Generation Rooftop System on the Factory Using the FMECA Technique”, 2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2024), Nakhon Ratchasima (Korat), October 16-18 2024.
3. **นาวิน รอดเรือง** ,พนา ดุสิตากร ,ปพน งามประเสริฐ ,สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, “การประเมินความเสี่ยงระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคาโรงงานด้วยเทคนิคเอฟเอ็มอีซีเอ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี, 13-15 พฤศจิกายน 2567.





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15
The 15th Electrical Engineering Network 2023
1-3 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมฟอร์จูน ริเวอร์ไซด์ นครพนม

ยานยนต์ไฟฟ้าและรถไฟฟ้าระบบรางอนาคตการคมนาคมในประเทศไทย
Next Generation of Electric Vehicles and Railway Transit in Thailand

Abstract

Conference Topic

1. Electrical Power (PW)
ไฟฟ้ากำลัง
2. Electronics, Circuit and Communication (EC)
อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร
3. Power Electronics (PE)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
4. Computer and Information Technology (CP)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
5. Control Systems and Instrumentation (CT)
ระบบควบคุมและการวัด
6. Digital Signal Processing (DS)
ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
7. Energy and Conservation of Energy (ES)
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
8. Innovation and Invention (IN)
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
9. General Electrical Engineering (GN)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า
10. Special Session on Electric Vehicles and Railway Transit (SS)
หัวข้อพิเศษทางยานยนต์และรถไฟฟ้าระบบราง

STC
VENUS SUPPLY
SEATEK
GW ADVANCE ENGINEERING
dio innovation
SILK Technology
ANS
กฟผ. ALL
IRCT
PTS

บริษัท เนโอ ไดดักติก จำกัด
NEO DIDACTIC CO., LTD.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

การออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

Design and Installation of Lightning Protection System for Rooftop Solar Power Generation System

นพต บุตติยธรทอง¹ สาคร วุฒิพัฒน์พัญ์² นวีน รอดเรือง³ ปพน จามประเสริฐ⁴ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ⁵¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ในกรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา อาจส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่เกิดความเสียหาย จึงมีแนวคิดในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าตามเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย โดยบทความนี้เลือกใช้อิทธิพลของลมฟ้าผ่าเพราะวิธีนี้มีใช้กันแพร่หลายและมีรูปทรงไม่แน่นอน มันจึงมีความเหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา เมื่อทดสอบวัดค่าความต้านทานหลังคา ผลที่ได้คือค่าความต้านทานอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

คำสำคัญ: ระบบป้องกันฟ้าผ่า, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา, ค่าความต้านทานดิน

Abstract

This article presents the design and installation of a lightning protection system for a rooftop solar power generation system. In the event of a lightning incident in the area where the solar power generation system is installed on the roof, it may result in damage to the solar power generation system and the associated power system. Therefore, the concept of designing and installing a lightning protection system was developed according to the standards of the Engineering Institute of Thailand. In this paper, the rolling sphere method was chosen. Since the method is often used for buildings with irregular shapes. Therefore, it is suitable for use with rooftop solar power generation system. When measuring the grounding electrode resistance. The result is that the resistance value is within the standards of the Engineering Institute of Thailand.

Keywords: Lightning Protection, Solar Rooftop, Earth Resistance

1. บทนำ

ความต้องการไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มสูงขึ้น การผลิตไฟฟ้าด้วยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่นิยมมากขึ้น โรงงานที่ให้เป็นกรณีศึกษาในงานนี้มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา แต่ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า จึงทำการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงานเพื่อป้องกันความเสียหายเมื่อเกิดฟ้าผ่าในบริเวณดังกล่าว

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามหาวิทยาลัยเกี่ยวกับระบบป้องกันฟ้าผ่าในรูปแบบต่าง ๆ ก่อนหน้านี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและติดตั้ง เช่น การศึกษาการลดความเสี่ยงจากฟ้าผ่าลงในอุปกรณ์แผงโซลาร์เซลล์ แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาและกรณีติดตั้งแต่ละครั้งมีอันตรายเฉพาะจากฟ้าผ่าหรือกระแสไฟฟ้าจาก บทความนี้จะระบุจุดของสายดินและการป้องกันฟ้าผ่า [1] งานวิจัยนี้ที่นำเสนอเสนอแนะป้องกันฟ้าผ่า นักนิเทศแบบใหม่สำหรับอาคารป้องกันฟ้าผ่า สายเคเบิลป้องกันฟ้าผ่า ชนิดนี้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยครอบคลุมส่วนต่อโลหะบนเชือกพลาสติก [2] การออกแบบและการใช้งานอุปกรณ์ป้องกันสำหรับแผงโซลาร์เซลล์ นอกจากนี้ที่แผงเหล่านี้เป็นสองติดตั้งบนหลังคากลางแจ้งเพื่อให้อิทธิพลของแสงอาทิตย์สูงสุด แผงโซลาร์เซลล์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเกิดฟ้าผ่าโดยตรง [3] งานวิจัยที่เกี่ยวกับฟ้าผ่าที่ด้านไฟฟ้ากระแสตรง และด้านไฟฟ้ากระแสสลับของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ได้กลายเป็นทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่มีการเกิดฟ้าผ่าบ่อยครั้ง ดังนั้นการศึกษานี้จึงสนับสนุนการเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของฟ้าผ่าที่ฟาร์มพลังงานแสงอาทิตย์ [4] งานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการป้องกันฟ้าผ่าตามโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง เพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการป้องกันเบื้องต้นสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบการวางแผนระบบป้องกันฟ้าผ่าหลักที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในตามทฤษฎี PMAS ในโซนต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้า [5] งานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่แน่นอนเพื่อประเมินความเสี่ยงสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา [6]

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



2. มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

2.1 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้สอดคล้องเหมาะสมที่สุดทั้งทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ ขั้นตอนการออกแบบและการก่อสร้างระบบป้องกันฟ้าผ่ากับขั้นตอนการออกแบบและการก่อสร้างที่จะป้องกัน โดยผลการออกแบบสิ่งปลูกสร้างและการใช้ประโยชน์ของส่วนใดของสิ่งปลูกสร้างเป็นส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วย

เอกสารการออกแบบของระบบป้องกันฟ้าผ่าต้องมีข้อมูลพื้นฐานที่เพียงพอเพื่อให้มั่นใจในการติดตั้งอย่างถูกต้องและสมบูรณ์ ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรได้รับการออกแบบและติดตั้ง โดยผู้ออกแบบและผู้ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ผ่านการอบรมมาเป็นอย่างดีและมีวุฒิเชี่ยวชาญ [7]

2.2 การเลือกระบบป้องกันฟ้าฟ้ายานนอก

โดยส่วนใหญ่ ระบบป้องกันฟ้าฟ้ายานนอกจะติดตั้งกับสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกัน ควรพิจารณาเลือกใช้ระบบป้องกันฟ้าฟ้ายานนอกแบบแยกอิสระ เมื่อเกิดกระแสเบต ๗ จุดฟ้าผ่า หรือบนความถี่ที่มากกว่า ๕ ฟ้าผ่าต่อความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง

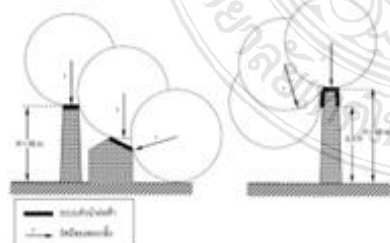
2.3 ระบบตัวนำล่อฟ้า

ระบบตัวนำล่อฟ้าประกอบด้วยการรวมกันขององค์ประกอบดังต่อไปนี้

- ก. แท่งตัวนำ (รวมถึงเสาที่ติดตั้งอิสระ)
- ข. สายล่อฟ้า
- ค. ตัวนำแบบสาย

2.4 วิธีทรงกลมกลิ้ง

วิธีนี้จะใช้ทรงกลมที่มีลูกบอลโลหะเหมือนกรวยเหล็กวางลงไปตามสิ่งปลูกสร้างบนส่วนของอาคาร ในการออกแบบจึงต้องติดตั้งระบบป้องกันฟ้าฟาดชนิดที่เป็นเหล็กกล่อฟ้าหรือเสาตัวนำขึ้นเสียด้าน และกลิ้งลูกบอล ส่วนใดของอาคารที่ฟ้าของอาคารเมื่อเคลื่อนถึงด้านนั้นส่วนที่ไม่ได้รับการป้องกัน ซึ่งวิธีนี้มักใช้กับอาคารสิ่งปลูกสร้างที่มีโครงสร้างซับซ้อน [8]



ภาพที่ 1 การคำนวณตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าวิธีทรงกลมกลิ้ง

2.5 การคำนวณตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าวิธีมุมป้องกัน

วิธีที่กำหนดมุมสำหรับการป้องกัน ฟ้าผ่ามีลักษณะพื้นที่ของการป้องกันจะเป็นรูปทรงกรวยจะปลดปล่อยจากฟ้าผ่า ตามะสำหรับสิ่งปลูกสร้างง่าย ๆ ต้องติดตั้งล่อฟ้าให้ห่างตัวนำล่อฟ้าครอบคลุมส่วนที่ต้องการป้องกัน มุมป้องกันจะแปรผันตามระดับการป้องกันและความสูงของตัวนำล่อฟ้า วิธีมุมป้องกันนี้เหมาะที่จะใช้กับตัวนำล่อฟ้าแบบแท่งตัวนำและบนตัวนำล่อฟ้า

2.6 การคำนวณตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าวิธีสาย

วิธีนี้เป็นการใช้ตัวนำล่อฟ้าแนวราบซึ่งบนส่วนของอาคาร ส่วนที่สูงที่สุดการติดตั้งที่มีการป้องกันที่ดี จะคงติดตั้งตัวนำแนวราบโดยรอบอาคาร

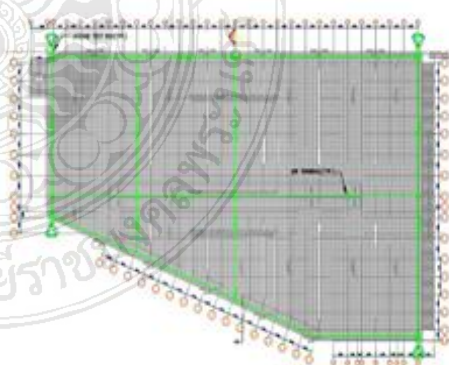
3. การออกแบบ

ในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า มีการออกแบบเสาให้ครอบคลุมหลังคาอาคาร โรงงานดังแสดงในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 โดยมีรายละเอียดอุปกรณ์และแบบติดตั้งแสดงในภาพที่ 4 และภาพที่ 5

เมื่อใช้วิธีทรงกลมกลิ้งในการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งจะได้อัตราอยู่ใน Class 4 นั่นคือ รัศมีของทรงกลมกลิ้ง (R) คือ 60 m และ ขนาดสาย (M) คือ 20 x 20 m ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางการออกแบบล่อฟ้า

Class of LPS	Radius of the rolling sphere (R)	Mesh size (M)
1	20 m	5 x 5 m
2	30 m	10 x 10 m
3	45 m	15 x 15 m
4	60 m	20 x 20 m



ภาพที่ 2 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



4.4 จานทดสอบ Ground Test Box



ภาพที่ 9 จานทดสอบ Ground Test Box

5. การวัดค่าความต้านทานต่อดิน

ใช้อุปกรณ์ Earth Tester 4105A วัดค่าความต้านทานต่อดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและติดตั้ง ได้ค่าความต้านทานตามจุดที่ทำการวัดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความต้านทานต่อดิน

No.	Point of Measurement	Ohm Resistance Value
1	Earth Bus	0.20 Ohm
2	Earth Bus	0.21 Ohm
3	Earth Bus	0.19 Ohm
4	Earth Bus	0.20 Ohm

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนกังหันลมของโรงงาน ซึ่งใช้เป็นการศึกษา โดยออกแบบและติดตั้งด้วยวิธีการจัดการความเสี่ยงด้วยแนวทางวิธีทางกลไก ซึ่งมีความเหมาะสมกับการป้องกันอาคารโรงงานและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความต้านทานต่อดินที่ตรวจวัดได้ของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและติดตั้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย แสดงว่าระบบป้องกันฟ้าผ่าที่นำเสนอนี้สามารถใช้งานได้จริง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และบริษัท ไลน์คาร์คอน (รังสิต) เซอร์วิส จำกัด ที่ให้การสนับสนุนบทความนี้จนประสบผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] D McMenamin and R Steward, " Risk mitigation of lightning incursion into network equipment via PhotoVoltaic systems It's not easy being "green", " INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference, 2008, doi: 10.1109/INTLEC.2008.4664035.
- [2] Z Duan, Y Zhao, X Si, S Qiu, C Song, K Yao and J Duan, " Lightning strike withstand capacity test research on a lightweight lightning protection cable," 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2015, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287266.
- [3] S Salman, A Xin, A Masood, S Iqbal, M Hanan, M Ullah Jan and S Khan, " Design and Implementation of Surge Protective Device for Solar Panels," 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018, doi: 10.1109/EI2.2018.8582997.
- [4] N. H. Zaini, M. Z. A. M. A. M. Radzi, N. Aziz, N. I. Ahmad, M. S. M. Nasir, M. Izadi, N. F. Ab Aziz and Z. Ali, " Lightning Surge on the DC and AC Side of Solar PV System," 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), 2019, doi: 10.1109/APL.2019.8815953.
- [5] G Kálcz, Z Tóth, N Szedenik, B Németh and I Kiss, " Zone-Based Lightning Protection Method for High-Performance Photovoltaic Power Plants," 2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), 2021, doi: 10.1109/ICLPandSIPDA34065.2021.9627397.
- [6] A E. Gomes, A Rousseau, M Guthrie, A Barwise and C Gomes, " Risk Assessment of Rooftop-Mounted Solar PV Systems," 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2022, doi: 10.1109/ICLP56858.2022.9942512.
- [7] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2559). มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าที่ 3 ความเสียหายทางกายภาพต่อสิ่งปลูกสร้างและอันตรายต่อชีวิต. หนังสือ, 9-11.
- [8] วิฑูล อิศวรสุต. (2561). แนวทางการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 41-44.



www.rmuti.ac.th

RMUTI

ราชภัฏเทคโนโลยี อีสาน นครราชสีมา

ICPEI 2024



CALL FOR PAPERS

The 2024 International Conference on Power, Energy and Innovations

16-18 October 2024

KORAT, THAILAND

<https://www.icpei.net/2024/>

The 2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2024), organized by Electrical Engineering Academic Associations (Thailand) EEAAT and All Departments of Electrical Engineering in Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI), technical support by IEEE Thailand Section and IEEE PES-Thailand Chapter. ICPEI is the conference of the Power, Energy and Innovations and provides a forum for researchers and engineers involved in electric power and energy engineering to share ideas and results.



Topics of interest for submission include, but are not limited to :

Power:

- Power quality
- Smart grid technologies
- High voltage engineering
- Power system management
- Modeling, analysis and operation
- Motor drives and motion control
- Power transmission and distribution
- Switch-mode power supplies and UPS
- Lightning protection of power systems
- Planning and operation of Power systems
- Power system dynamics, stability and control
- FACTS
- Others related topics

Innovation:

- IT and IoT innovation
- Nano technology
- Material engineering
- Information engineering
- Technology for big data
- Technological innovation
- Innovation in power system
- Technology-enhanced learning
- E-Car and Motorcycle conversion
- Communication technology

Energy:

- Wind energy
- Energy issues
- Biogas and biomass
- Solar electricity and PV applications
- Hydrogen and fuel cells
- Hybrid energy systems
- Solar thermal applications
- Renewable energy technologies
- Energy policy, planning and management
- Analysis and design of electrical machines
- Power electronics in traction and automotive
- Modelling and simulation in power electronics
- Modelling and simulation in electrical machine
- Energy conversions
- Battery and energy storage technology
- Advances in sustainable buildings sustainable cities
- Other related topics

Important Dates

Submission Deadline for Full Manuscript: ~~July 1, 2024~~ **July 15, 2024**
 Notification of Acceptance: **July 31, 2024**
 Camera-ready Submission Deadline: **August 18, 2024**
 Conference Dates: **16-18 October, 2024**

Contact:

Asst. Prof. Dr. Yuttana Kongjeen

E-mail: icpei2024@gmail.com



Risk Assessment of the Lightning Protection System for Hybrid Solar Power Generation Rooftop System on the Factory Using the FMECA Technique

Nawin Rodrueang
Department of Electrical
Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
nawin@ieee.org

Sakhon Woothipatanapan
Department of Electrical
Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
sakhon.w@rmutp.ac.th

Narate Charlangsut
Department of Electrical
Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
narate.c@rmutp.ac.th

Papon Ngamprasert
Department of Electrical and
Electronic Engineering, Kosen Institute
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
papon@ieee.org

Natchapol Ruangsap
Department of Electrical
Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
natchapol@ieee.org

Nattachote Rugthaicharoencheep
Department of Electrical
Engineering Faculty of Engineering
Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
nattachote.r@rmutp.ac.th

Abstract— This paper presents a risk assessment of the lightning protection system for hybrid solar power generation rooftop system on the factory using the FMECA technique. The case study focuses on lightning strikes affecting solar power systems on hybrid roofs, leading to damage. The installation of lightning protection systems to safeguard against natural phenomena, such as direct and indirect lightning strikes, requires an assessment for preventive maintenance. This assessment considers four criteria: efficiency, environment, safety/reliability, and finance. Data collection was carried out using Microsoft Excel, and the lightning protection system was critically analyzed using the FMECA technique. The results indicate that the highest risk in financial operations is within the green, yellow, and red zones, as repair costs are still manageable. The FMECA method proves to be an effective tool for assessing lightning protection systems, enhancing maintenance efficiency, and reinforcing the reliability and stability of the protection system within a suitable budget.

Keywords— Lightning Protection Systems, Hybrid Solar Power Generation Rooftop System, FMECA Technique

I. INTRODUCTION

The demand for electricity in the industrial sector is on the rise. Reducing electricity costs by installing solar power systems to supplement the power supply has become an increasingly popular option. The factory used as a case study in this work has installed a rooftop solar power system, but its lightning protection system is relatively old. To ensure effective lightning protection, regular inspection and maintenance of the lightning protection system are necessary. Thus, an analysis was conducted using the Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) technique to improve and enhance the efficiency of the lightning protection system

for solar power generation rooftop system to prevent damage when lightning occurs in the area. The components of the lightning protection system include air terminals, bare copper wires, grounding rods, ground wells, PVC pipes, ground test boxes, saddle clamp supports, and thermoweld. The results from the analysis allow for efficient resource management and maintenance planning.

II. ENGINEERING INSTITUTE OF THAILAND STANDARD LIGHTNING PROTECTION

A. Design of lightning protection system

Design lightning protection systems to achieve optimum results both technically and economically. It will be possible only when lightning protection system design, construction steps, design and construction steps to protect especially the design the building itself should utilize the metal parts of the building as components of the lightning protection system.

The design documentation of the lightning protection system must contain all the necessary information to ensure correct and complete installation. Lightning protection systems should be designed and installed. By designers and installers of lightning protection systems who are well trained and skilled [1]-[2].

B. Selection of external lightning protection system

In most cases, an external lightning protection system may be attached to the building to be protected. Consideration should be given to selecting an independent external lightning protection system. When an explosion occurs at the point of the lightning strike or on the conductor that carries the lightning current, it may cause damage to buildings.

Selection of external lightning protection system, air-termination system consists of a combination of the following elements.

- Lightning rod (including free-standing poles)
- Stranded conductor
- Mesh conductor

C. The maintenance and inspection of lightning protection systems

All lightning protection systems must be inspected at the following intervals:

- During the installation of the lightning protection system, especially while installing components that will be concealed within the structure and inaccessible afterward.
- When there are significant changes or repairs to the structure, or after a known lightning strike to the lightning protection system.
- Upon completion of the installation of the lightning protection system.
- At regular intervals as specified in Table I.

TABLE I. MAXIMUM INTERVAL BETWEEN EACH INSPECTION OF THE SYSTEM OF LIGHTNING PROTECTION.

Classification of lightning protection systems	Inspection (Years)	Complete inspection (Years)	Complete inspection in specific cases (4-15) (Years)
1 and 2	1	2	3
3 and 4	2	4	3

^a For facilities that include structures at risk of explosive materials, the lightning protection system should be inspected every 6 months. Electrical testing of the installation should be done every year. An acceptable exception to the annual testing interval is testing every 14 to 15 months. It may be beneficial to test ground resistance at different times of the year to understand seasonal variations.

^b Specific sites refer to structures with sensitive internal systems, office buildings, commercial buildings, locations that may have a large number of occupants, or structures that have previously been struck by lightning.

Visual inspections are performed to ensure that:

- The design complies with this standard.
- The system of lightning protection is good condition.
- No loose or accidentally disconnected conductors and connections in the system of lightning protection.
- No parts of the lightning protection system have deteriorated due to corrosion, especially at ground level.
- All visible grounding connections are intact and can still perform their intended functions.

D. Background of Lightning Protection Levels (LPL) and Classes of Lightning Protection Systems (LPS)

The lightning protection level is categorized into 4 levels based on the minimum lightning current, as shown in Table II.

TABLE II. THE MINIMUM LIGHTNING CURRENT SIZES FOR EACH LIGHTNING PROTECTION LEVEL (LPL)

Lightning protection level (LPL)	I	II	III	IV
Minimum lightning current size I_{min} (kA)	3	5	10	16

Based on the minimum lightning current sizes divided into 4 levels, the radius of the rolling sphere is calculated using the formula for the radius of the rolling sphere (r), which is equal to $10 \times (I_{min})^{0.65}$. This is used to determine the level of the lightning protection system (LPS), as shown in Table III.

TABLE III. THE PEAK VALUES OF THE MINIMUM LIGHTNING CURRENT (I_{min}) AND THE ROLLING SPHERE RADIUS ACCORDING TO EACH LEVEL

Lightning protection level (LPL)	I	II	III	IV
Class lightning protection system (Class of LPS)	I	II	III	IV
Minimum lightning current size (kA)	3	5	10	16
Rolling sphere radius size (m)	$\sim 10(3)^{0.65}$ ~ 20.423	$\sim 10(5)^{0.65}$ ~ 28.466	$\sim 10(10)^{0.65}$ ~ 44.668	$\sim 10(16)^{0.65}$ ~ 60.628

Rolling sphere radius size (m): according to LPS standards 20, 30, 45 and 60 in sequence.

For each lightning protection level with peak lightning current values, the relationship to surge protection devices can be demonstrated with the concept that, during a direct lightning strike (10/350 μ s waveform), half of the lightning current will flow into the ground, while the other half enters the building through a 3-phase, 4-wire electrical system. Therefore, surge protection devices are designed to handle only one-fourth of the total lightning current as their maximum current capacity. Additionally, if the power distribution is at a higher level, this current will be further reduced. The initial current size required for the first set of surge protection devices is shown in Table IV.

TABLE IV. THE MAXIMUM LIGHTNING CURRENT SIZE THAT THE FIRST SET OF SURGE PROTECTION DEVICES MUST HANDLE ACCORDING TO EACH LIGHTNING PROTECTION LEVEL (LPL)

Lightning protection level (LPL)	I	II	III	IV
Minimum lightning current size (kA)	200	150	100	100
Lightning current entering the building (kA)	100	75	50	50
Entering each surge protection device phase (kA)	25	18.75	12.5	12.5

III. PROPOSED METHOD

A. Risk-Based Maintenance

The method of scoring and weighting for risk in the form of improvement index (%RI) and the importance index (%ImI) for each component of the lightning protection system were calculated and plotted on a risk chart along the y-axis and x-axis, respectively. Using %RI and %ImI in the risk chart, risk management based on likelihood of damage can be inferred. %RI and %ImI are divided into three levels: the colors for %RI are green, yellow, and red, representing good, fair, and poor conditions. Meanwhile, the colors for %ImI indicate low, medium, and high importance to the system, as shown in Fig. 1. For %RI zoning, the actual ranges used are determined based on test results reflecting %RI, which requires expert experience to achieve appropriate ranges. Efficient and effective maintenance management requires these actual ranges for %ImI to be defined according to utility policies [3].

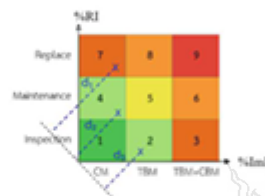


Fig. 1. Example of a Risk Matrix

B. Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis for Lightning Protection System

This article evaluates the lightning protection system, presenting the sub-components of each part in the safety assessment using FMECA through Microsoft Excel. After analyzing with the FMECA technique, the results are compared with the criticality matrix as shown in Fig. 2. The matrix is divided into four colored bands: green, yellow, orange, and red, which represent low risk, medium risk, high risk, and very high risk, respectively. The numbers one to twenty five indicate the severity from low to high.

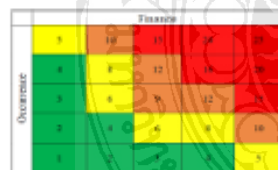


Fig. 2. Risk Matrix

FMECA analysis is used to determine the risk of the lightning protection system, identifying the importance of various criteria including performance, safety, environment, and finance of the lightning protection system. After analyzing all criteria, the maintenance methods and evaluation criteria are detailed in Table V.

TABLE V. CRITICALITY ANALYSIS AND ITS MAINTENANCE MANAGEMENT

Score	Condition of the conductor clamp
22-25	Unacceptable levels need to be expedited to manage the risk to acceptable level immediately.
16-21	Unacceptable level, which manage the risk in order to be in the next acceptable level.
5-15	Acceptable level but there must be control to prevent risk moving to an unacceptable level.
1-4	Acceptable level without risk control, no additional management.

C. Severity on Environment

Assessment of environmental severity [4]-[5] has 3 criteria, such as lifespan, impact on the roof, and location, etc., which are used to score for environmental severity analysis as shown in Table VI.

TABLE VI. SUB-CRITERIA FOR ENVIRONMENT

Criteria	Score				
	1	2	3	4	5
Age of lightning protection	0-2	3-5	6-8	9-10	More 11 year
Impact on the roof	No impact		Loose conduct or wire		Conductor wire in contact with the roof
Location	Installed in an open area				High animal activity area

D. Severity on Safety / Reliability

Assessment of safety or reliability severity has 3 criteria such as ground resistance (Ω), voltage system (V), and protection, etc., used for scoring in the analysis of severity in environmental matters as shown in Table VII.

TABLE VII. SUB-CRITERIA FOR SAFETY / RELIABILITY

Criteria	Score				
	1	2	3	4	5
Earth resistance value (Ω)	0 - 5	6 - 10	11 - 15	16 - 25	More 25
Voltage system (V)	220 - 416	11 - 33 k	69 k	115 k	More 115 k
Protection	Ground connection		Non-standard grounding		No grounding

E. Severity on Finance

The exact costs of the subcomponents of the lightning protection system must also be specified as shown in Table IX. Additionally, calculate the percentage (%) of the total costs, which can be compared with Table IV to obtain the financial severity analysis score. Score for finance as shown in Table VIII.

TABLE VIII. SCORE FOR FINANCE

Score	Description
1	Less than 10% of the total price
2	10 - 29% of the total price
3	30 - 49% of the total price
4	50 - 69% of the total price
5	70 - 100% of the total price

TABLE IX. FINANCE PART OF LIGHTNING PROTECTION

Part	Price (Baht)	Percentage (%)
Air Terminal Head, 0.60 meters high	49,500.00	8.714
Bare copper wire, 70 mm ²	294,120.00	51.78
Grounding rod with a diameter of 5/8" x 10'	20,400.00	3.591
Grounding pit	17,200.00	3.028
PVC pipe with a diameter of 1 1/4"	7,600.00	1.338
Ground Test Box	29,200.00	5.141
Saddle Clamp Support	93,000.00	16.373
Thermoweld	42,000.00	7.394
Test Commissioning	15,000.00	2.641
Total	568,020.00	100%

F. Severity on Efficiency Criterion

The performance criteria consider the condition of the lightning protection system in terms of the health index (%HI). Assessing the condition of the components within each group of the lightning protection system requires various testing methods and visual inspections, as shown in Table X. The weighted scoring method (WSM) is applied, while the analytical hierarchy process (AHP) is used to determine the weights of the testing methods [6]-[7].

$$\%HI = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^N (S_{max} \times W_i)} \times 100 \quad (1)$$

When S_i is score
 S_{max} is maximum
 W_i is weight of diagnostic result i_k

TABLE X. ASSESSMENT OF THE CONDITION OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEM COMPONENTS

Criteria	Score				
	1	2	3	4	5
Visual inspection	Normal	Slightly rusty	Rusty	Starting to tear	Conductor wire in contact with the roof
Earth resistance value (Ω)	0 - 5	6 - 10	11 - 15	16 - 25	More 25
Inspect the lightning strike counter	Increase				No increase

Technical data and test results will be collected and used to calculate the %HI of the lightning protection system components. This will be converted into scores for performance severity analysis as shown in Table V.

G. Calculation and Analysis of Critical Conditions

Critical condition analysis must determine the probability of failure. The score for the likelihood of failure for each component can be determined as shown in Table XI. Then, the severity of various factors such as performance, environment, safety/reliability, and finance will be established. Subsequently, the overall criticality can be calculated using equation (2) [8].

$$\text{Criticality} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \quad (2)$$

TABLE XI. CRITERIA FOR OCCURRENCE ANALYSIS

Score	Description
1	Zero failure per year
2	-
3	One - five failures/year
4	Six - ten failures/year
5	More than eleven failures/year

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The calculation of the criticality of the lightning protection system is based on the database established from the test results in terms of performance, environment, safety, and finance, as shown in Table XII.

TABLE XII. CRITICALITY SCORE OF LIGHTNING PROTECTION

Components of a lightning protection system	Severity				Occurrence	Criticality			
	Efficiency	Environment	Safety	Finance		Efficiency	Environment	Safety	Finance
Air Terminal Head, 0.60 meters high	4	4	4	1	4	16	16	16	4
Bare copper wire, 70 mm ²	4	4	4	4	4	16	16	16	16
Grounding rod with a diameter of 5/8" x 10'	4	4	4	1	4	16	16	16	4
Grounding pit	4	4	4	1	4	16	16	16	5
PVC pipe with a diameter of 1 1/4"	4	4	4	1	4	16	16	16	4
Ground Test Box	4	4	4	1	4	16	16	16	5
Saddle Clamp Support	4	4	4	2	4	16	16	16	8
Thermoweld	4	4	4	1	4	16	16	16	4

The criticality score for all components is assigned to the matrix for efficiency as shown in Fig 3.

Occurrence	Efficiency				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

Fig. 3. Criticality matrix of the lightning protection system for efficiency.

The criticality score for all components is assigned to the matrix for the environment, as shown in Fig 4.

Occurrence	Environment				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

Fig. 4. Criticality matrix of the lightning protection system for the environment.

The criticality score for all components is assigned to the matrix for safety or reliability as shown in Fig 5.

Occurrence	Safety				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

Fig. 5. Criticality Matrix of the Lightning Protection System for Safety.

The criticality score for all components is assigned to the matrix for finance, as shown in Fig 6.

Occurrence	Finance				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

Fig. 6. Criticality matrix of the lightning protection system for finance.

From Fig 4-6, the black-bordered numerical scores assigned to the risk matrix from 1 to 8, as obtained from Table VIII, are: air terminal heads, bare copper wire, grounding rods, ground pits, PVC pipes, ground test box, saddle clamp support, and exthermo weld, in that order.

V. CONCLUSION

Lightning protection systems have a lifespan and deteriorate with use. The lightning protection system should be effectively improved by using evaluations to find efficient methods, considering four severity criteria: performance, environment, safety or reliability, and finance. Data is collected using Microsoft Excel, and the results of the analysis and management of the lightning protection system maintenance are presented using FMECA techniques. The results indicate that there is a high risk of operation due to the importance of performance, environment, and safety or reliability being in the red zone for all subcomponents of the system. This is because the lightning protection system has reached the end of its lifespan and is in poor condition. Additionally, it is at risk of lightning strikes based on the statistics of thunderstorms from the Engineering Institute of Thailand under the Royal Patronage, which reported an average thunderstorm occurrence rate of 67% from 2006 to 2021. In terms of finance, it is in the green, yellow, and red zones due to maintenance costs still being manageable. The FMECA method can be an effective tool for evaluating lightning protection systems, improving maintenance performance, and enhancing the reliability and stability of the system within an appropriate budget.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express his sincere thanks to the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP), Thailand and Kosen Institute, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand for supporting.

2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2024)
October 16-18, 2024, Nakhon Ratchasima (Korat), THAILAND

REFERENCES

- [1] The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage, "Lightning Protection Standard," 2022.
- [2] N. Charlansut, N. Rodruang, S. Woothipatanapan, M. Boonthachong, P. Ngamprasert, and N. Rugthaicharoencheep, "Design and Installation Lightning Protection System to Protect Hybrid Solar Rooftop System," 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2023.
- [3] C. Suwanasri, T. Suwanasri, and W. Luejai, "Cost-Benefit for HV Transmission Line Renovation and Replacement Based on Failure Probability and Risk-Based Maintenance," Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, pp.197-207, 2020.
- [4] J. Chitpong, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, "Evaluation criteria for condition and importance assessment of high voltage transmission line," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiangmai, Thailand, 2016.
- [5] C. Suwanasri, S. Saribut, W. Luejai, and T. Suwanasri, "Risk Assessment of HV Transmission Lines Using Failure Modes, Effects and Criticality Analysis" International Electrical Engineering Transactions, vol. 6, No.1, pp. 21-27, 2020.
- [6] T. L. Saaty, "Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process," In Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, vol. 102, pp. 251-318, 2008.
- [7] H. Tanaka, S.Tsukao, D. Yamashita, T. Niimura, and R. Yokoyama, "Multiple Criteria Assessment of Substation Conditions by Pair-Wise Comparison of Analytic Hierarchy Process" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 3017-3023, 2010.
- [8] L. Promseela, T. Suwanasri, and R. Phadungthin, "Risk Assessment for Power Circuit Breaker by Using Failure Modes, Effects and Criticality Analysis," 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), Chiangmai, Thailand, pp. 149-152, 2020.







การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference

13 - 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2567
ณ โรงแรมเซ็นทาราอุดร จังหวัดอุดรธานี



จัดโดย
สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) ร่วมกับ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี







การประเมินความเสี่ยงระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

บนหลังคาโรงงานด้วยเทคนิคเอฟเอ็มอีซีเอ

Risk Assessment of Lightning Protection System for Hybrid Solar Power Generation System on Factory Rooftop Using FMECA Technique

นาวิน รอดเรือง¹ พนา ดุสิตากร¹ ปพน งามประเสริฐ² สาคร วุฒิพัฒน์³ และ บัณฑิต รักไทยเจริญชีพ^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร nattachote.r@gmail.com

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง papon@ieee.org

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินความเสี่ยงระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคาโรงงานด้วยเทคนิค FMECA กรณีเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าบริเวณที่ตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแบบผสมผสาน ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานเกิดความเสียหาย การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อป้องกันปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่าทางตรงและทางอ้อม ต้องมีการประเมินเพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยพิจารณาเกณฑ์ความรุนแรง 4 ประการ ดังนี้ ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ และการเงิน การเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และแสดงการวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้เทคนิค FMECA ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงสูงจากการปฏิบัติงาน ด้านการเงินอยู่ระดับสีเขียว เหลือง และแดง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษายังสามารถรับได้ สามารถใช้วิธี FMECA เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในการบำรุงรักษาเสริมความน่าเชื่อถือและความเสถียรของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยงบประมาณที่เหมาะสม

คำสำคัญ: ระบบป้องกันฟ้าผ่า, ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน, เทคนิค FMECA

Abstract

This paper presents a risk assessment of lightning protection system for hybrid solar power generation system on factory rooftop using FMECA technique. The case study focuses on lightning strikes affecting solar power systems on hybrid roofs, leading to damage. The installation of lightning protection systems to safeguard against natural phenomena, such as direct and indirect lightning strikes, requires an assessment for preventive maintenance. This assessment considers four criteria: efficiency, environment, safety/reliability, and finance. Data collection was carried out using Microsoft Excel, and the

lightning protection system was critically analyzed using the FMECA technique.

The results indicate that the highest risk in financial operations is within the green, yellow, and red zones, as repair costs are still manageable. The FMECA method proves to be an effective tool for assessing lightning protection systems, enhancing maintenance efficiency, and reinforcing the reliability and stability of the protection system within a suitable budget.

Keywords: Lightning Protection Systems, Solar PV Rooftop Hybrid, FMECA Technique

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมมีการนำเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนชนิดพลังงานแสงอาทิตย์มาติดตั้งบนหลังคาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดภาระทางไฟฟ้าด้วยจึงเป็นทางเลือกที่นิยมมากขึ้น กรณีศึกษาที่พิจารณาคือติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีระบบป้องกันฟ้าผ่าอยู่การใช้งานสูง เพื่อให้สามารถป้องกันฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ การตรวจสอบและบำรุงรักษาระบบป้องกันฟ้าผ่าอย่างสม่ำเสมอ สามารถการวิเคราะห์ทางเทคนิคด้วยโหมดความล้มเหลว ผลกระทบและความรุนแรง (Failure mode, effects, and criticality analysis : FMECA) เพื่อปรับปรุงและเสริมประสิทธิภาพระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและป้องกันความเสียหายเมื่อเกิดฟ้าผ่าในบริเวณดังกล่าว โดยส่วนประกอบระบบป้องกันฟ้าผ่าแบ่งออกเป็น 1.หัว Air Terminal 2.สายทองแดงเบรียล 3.แท่งตัวนำลงดิน 4.กล่องอาร์ค 5.ฟูลพีวีซี 6.Ground Test Box 7.Sandle Clamp Support 8.Thermoweld ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถวางแผนจัดการระบบป้องกันฟ้าผ่าและการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอประเมินความเสี่ยงระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคาโรงงานด้วยเทคนิค FMECA ค่าผลการผลิต 25.68 kWp ดังแสดงในรูปที่ 1 และนำเสนอระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ทำการประเมินด้วยเทคนิค FMECA

*ผู้ประพันธ์บทกึ่ง

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี



ดังแสดงในรูปที่ 2-4 เพื่อให้เห็นถึงตัวระบบป้องกันฟ้าผ่า และความสำคัญของการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มาตรฐานระบบป้องกันฟ้าผ่าวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

2.1.1 การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า

การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้ได้ผลที่เหมาะสมที่สุดทั้งทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์ เป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่ากับขั้นตอนการออกแบบและการก่อสร้างที่จะป้องกัน โดยเฉพาะการออกแบบสิ่งปลูกสร้างเอง ควรใช้ประโยชน์ของส่วนโลหะของสิ่งปลูกสร้างเป็นส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วย

เอกสารการออกแบบของระบบป้องกันฟ้าผ่าต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดโดยทั่วไปของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่จำเป็นทั้งหมดเพื่อให้มั่นใจในการติดตั้งอย่างถูกต้อง ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรได้รับการออกแบบและติดตั้ง โดยผู้ออกแบบและผู้ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ผ่านการอบรมมาเป็นอย่างดีและมีความเชี่ยวชาญ [1-2]



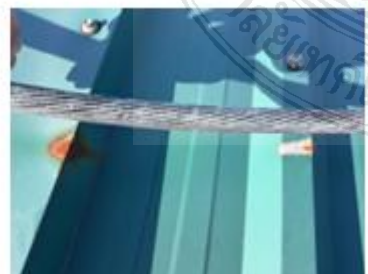
รูปที่ 1 รายละเอียดโดยทั่วไปของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



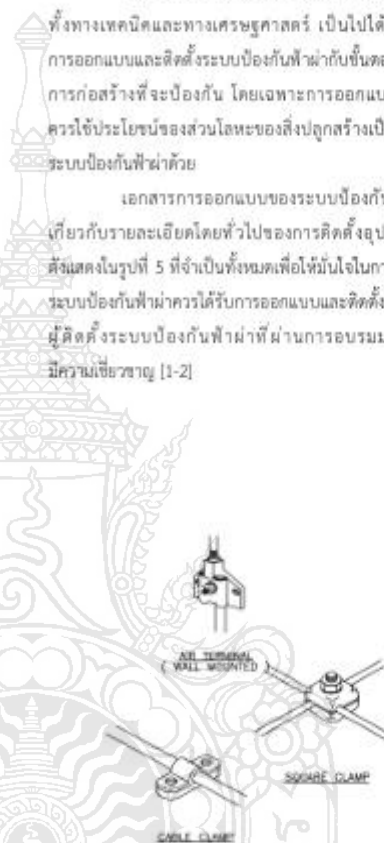
รูปที่ 2 ฐานตัวจับยึดแท่งตัวนำ



รูปที่ 3 ตัวจับยึดสายตัวนำ



รูปที่ 4 สายตัวนำหย่อนติดหลังคา



รูปที่ 5 รายละเอียดโดยทั่วไปของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

2.1.2 การเลือกระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

โดยส่วนใหญ่ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกอาจจะยึดติดกับสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกัน ควรพิจารณาเลือกใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกแบบแยกอิสระ เมื่อเกิดการระเบิด ณ จุดฟ้าผ่า หรือบนตัวนำที่นำกระแสไฟฟ้าอาจก่อความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง

2.1.3 ระบบตัวนำล่อฟ้า

ระบบตัวนำล่อฟ้าประกอบด้วยการรวมกันขององค์ประกอบดังต่อไปนี้

- ก. แท่งตัวนำ (รวมถึงเสาที่ติดตั้งอย่างอิสระ)
- ข. สายตัวนำล่อฟ้า
- ค. ตัวนำแบบตาข่าย

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

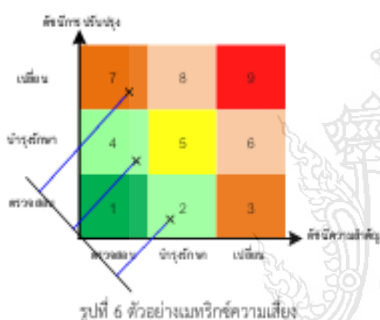
The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดนครราชสีมา



2.2 การบำรุงรักษาตามความเสี่ยง

วิธีการถ่วงน้ำหนักและการให้คะแนน ความเสี่ยงในรูปแบบของดัชนีการปรับปรุง (%RI) และดัชนีความเสี่ยง (%IRI) ของระบบป้องกันฟ้าผ่าแต่ละอุปกรณ์ ถูกคำนวณและวางในแผนภูมิความเสี่ยงตามแกน y และแกน x ตามลำดับ โดยใช้ %RI และ %IRI ในแผนภูมิความเสี่ยง การจัดการตามความเสี่ยงบนความเป็นไปได้ของการเสียหายสามารถถูกบอกเป็นนัยได้ %RI และ %IRI ถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ สีของ %RI คือ สีเขียว สีเหลือง และสีแดง แทนสภาพดี พอใช้ และแย ในขณะที่ยัง %IRI แทนความเสี่ยงต่อระบบต่ำ ปานกลาง และสูง ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับการแบ่งโซน %RI ช่วงที่ใช้จริงจะถูกกำหนดตามผลการทดสอบที่สะท้อน %RI การจัดการการบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ช่วงที่ใช้จริงสำหรับ %IRI ถูกกำหนดตามนโยบายของสาธารณูปโภค [3]



2.3 โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และการวิเคราะห์วิกฤต (FMECA) สำหรับระบบล่อฟ้า

หลังจากทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMECA ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับเมทริกซ์วิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยแบ่งออกเป็นแถบสี 4 แถบ ดังนี้ สีแดง สีส้ม สีเหลือง และสีเขียว ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงระดับความเสี่ยงสูงมาก ความเสี่ยงสูง ความเสี่ยงปานกลาง และความเสี่ยงต่ำตามลำดับ ตัวเลข 1 ถึง 25 เป็นการแสดงความรุนแรงจากต่ำไปสูง

ความถี่ความล้มเหลว	ความรุนแรง				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 7 เมทริกซ์วิกฤต

การวิเคราะห์ FMECA ถูกนำมาใช้ในการกำหนดความเสี่ยงของระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งระบุความสำคัญเกณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพ

ความปลอดภัย สิ่งแวดล้อม และการเงินของระบบป้องกันฟ้าผ่า หลังจากวิเคราะห์เกณฑ์ทั้งหมดแล้ว วิธีการบำรุงรักษาและเกณฑ์การวิพากษ์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษา

คะแนน	สภาพตัวจับยึดสายตัวนำ
22-25	เป็นระดับที่ยอมรับได้โดย เจ้าพนักงานแก้ไข
16-21	ระดับที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหาทางแก้ไข
5-15	ระดับที่ยอมรับได้แต่ต้องมีการตรวจสอบและป้องกัน
1-4	ระดับที่ยอมรับไม่ได้

3. การประเมินความรุนแรงด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินความรุนแรงด้านสิ่งแวดล้อม (4-5) มี 3 เกณฑ์ เช่น อายุการใช้งาน ผลกระทบต่อสังคม และสถานที่ตั้ง เป็นต้น ที่ใช้ในการได้คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความรุนแรงในเรื่องสิ่งแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความรุนแรงในเรื่องสิ่งแวดล้อม

เกณฑ์	1	2	3	4	5
อายุการใช้งาน	0-2 ปี	3-5 ปี	6-8 ปี	9-10 ปี	11 ปีขึ้นไป
ผลกระทบ	ไม่มี	น้อย	ปานกลาง	มาก	มากที่สุด
ต่อสังคม	ไม่มี	น้อย	ปานกลาง	มาก	มากที่สุด
สถานที่ตั้ง	ดี	พอใช้	ปานกลาง	ไม่ดี	เลว

4. การประเมินความรุนแรงด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ

การประเมินความรุนแรงด้านความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือมี 3 เกณฑ์ เช่น ค่าความต้านทานสายดิน (Ω) ระบบแรงดัน (V) และการป้องกัน เป็นต้น ที่ใช้ในการได้คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความรุนแรงในเรื่องสิ่งแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คะแนนสำหรับการวิเคราะห์ความปลอดภัย/ความน่าเชื่อถือ

เกณฑ์	1	2	3	4	5
ค่าความต้านทานสายดิน (Ω)	0 - 5	6 - 10	11 - 15	16 - 25	มากกว่า 25
ระบบแรงดัน (V)	220 - 415	11 - 33 k	69 k	115 k	มากกว่า 115 k
การป้องกัน	ดี	พอใช้	ปานกลาง	ไม่ดี	เลว

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี



5. การประเมินความรุนแรงด้านการเงิน

ระบุประเมินค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยเพื่อกำหนดคะแนนการเงินสำหรับแต่ละส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 4 ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าใช้จ่ายต่ำกว่า 10% ของราคาทั้งหมด คะแนนคือ '1' ต้องมีการระบุค่าใช้จ่ายที่แน่นอนของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยดังแสดงในตารางที่ 5 นอกจากนี้ ยังคำนวณอัตราร้อยละ (%) ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับตารางที่ 6 เพื่อขอคะแนนการวิเคราะห์ความรุนแรงทางการเงินได้

$$\%HI = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^N (S_i \times W_i)} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ S_i คือ คะแนน

S_{max} คือ คะแนนสูงสุด

W_i คือ ค่าน้ำหนักของผลการวินิจฉัยลำดับที่ i

ตารางที่ 4 เกณฑ์คะแนนการประเมินความรุนแรงด้านการเงิน

คะแนน	คำอธิบาย
1	น้อยกว่า 10% ต่อราคาทั้งหมด
2	10 – 29% ต่อราคาทั้งหมด
3	30 – 49% ต่อราคาทั้งหมด
4	50 – 69% ต่อราคาทั้งหมด
5	70 – 100% ต่อราคาทั้งหมด

ตารางที่ 6 การประเมินสภาพของส่วนประกอบระบบป้องกันฟ้าผ่า

เกณฑ์	คะแนน				
	1	2	3	4	5
การตรวจสายล่อฟ้า	ปกติ	มีสนิมเล็กน้อย	มีสนิม	เริ่มผุกร่อน	สายล่อฟ้าสนิมผุกร่อนหนัก
ค่าต้านทาน	0 - 5 โอห์ม	6 - 10	11 - 15	16 - 25	มากกว่า 25
ตรวจสอบเครื่องมือ	ดี	ดี	ดี	ดี	ไม่ดีขึ้น
จำนวนฟ้าผ่า					

ตารางที่ 5 ค่าใช้จ่ายของส่วนประกอบย่อยระบบป้องกันฟ้าผ่า

ส่วนประกอบ	ราคา (บาท)	อัตราร้อยละ (%)
หัว Air Terminal สูง 0.60 เมตร	49,500.00	8.714
สายล่อลวดเปลี่ยน 70 ตร.มม.	294,120.00	51.78
แท่งตัวนำลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8"x10"	20,400.00	3.591
ปลอกหุ้ม	17,200.00	3.028
ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/4"	7,500.00	1.338
Ground Test Box	29,200.00	5.141
Saddle Clamp Support	93,000.00	16.373
Thermoweld	42,000.00	7.394
Test Commissioning	15,000.00	2.641
รวม	568,020.00	100%

7. การคำนวณและการวิเคราะห์ภาวะวิกฤติ

การวิเคราะห์ภาวะวิกฤติต้องกำหนดความน่าจะเป็นในการเกิดความล้มเหลว คะแนนสำหรับการเกิดความล้มเหลวสำหรับแต่ละส่วนประกอบสามารถกำหนดได้ดังแสดงในตารางที่ 7 จากนั้นความรุนแรงของปัจจัยต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย/ความเชื่อถือได้ และการเงิน จะถูกกำหนดขึ้น จากนั้น ความวิกฤติของทั้งหมดสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (2) [8]

$$\text{ความวิกฤติ} = \text{ความรุนแรง} \times \text{ความล้มเหลว} \quad (2)$$

6. การประเมินความรุนแรงด้านประสิทธิภาพ

เกณฑ์ประสิทธิภาพที่พิจารณาสภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่า ในรูปแบบของดัชนีสุขภาพ (%HI) ของระบบป้องกันฟ้าผ่าจำเป็นต้องใช้หลายวิธีการทดสอบและการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อประเมินสภาพของส่วนประกอบ ในแต่ละกลุ่มตามที่น่าเสนอแสดงในตารางที่ 6 %HI คำนวณและแสดงในสมการที่ (1) วิธีการถ่วงน้ำหนักและการให้คะแนน (WSM) ถูกนำมาใช้ ในขณะที่วิธีการกระบวนกรลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) ถูกใช้เพื่อระบุน้ำหนักของวิธีการทดสอบ [6-7]

ตารางที่ 7 คะแนนการเกิดความล้มเหลว

คะแนน	คำอธิบาย
1	ไม่เคยล้มเหลวเลย
2	-
3	ล้มเหลว 1-5 ต่อปี
4	ล้มเหลว 6-10 ต่อปี
5	ล้มเหลว 11-15 ต่อปี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์คอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ จังหวัดนครราชสีมา



8. ผลลัพธ์

การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่า หลังจากกำหนดฐานข้อมูลจากผลการทดสอบในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และการเงิน ดังแสดงในตาราง 8

ตารางที่ 8 การคำนวณความวิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่า

ส่วนประกอบ ของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า	ความรุนแรง				ความถี่	ความวิกฤติ			
	ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน
แม่เหล็กไฟฟ้า	4	4	4	1	4	10	10	10	4
สายพอลิเมอร์ เบรค 70 ตรม.	4	4	4	4	4	10	10	10	10
แท่งไฟฟ้า ดินขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8"x10'	4	4	4	1	4	10	10	10	4
ปลอกหุ้ม	4	4	4	1	4	10	10	10	5
ท่อพีวีซี ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง 1 1/4"	4	4	4	1	4	10	10	10	4
Ground Test Box	4	4	4	1	4	10	10	10	5
Sand Clamp Support	4	4	4	2	4	10	10	10	8
Thermoweld	4	4	4	1	4	10	10	10	4

คะแนนความวิกฤติของส่วนประกอบทั้งหมดถูกกำหนดลงเมทริกซ์ด้านประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 8

ความถี่	ประสิทธิภาพ				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 8 เมทริกซ์วิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านประสิทธิภาพ

คะแนนความวิกฤติของส่วนประกอบทั้งหมดถูกกำหนดลงเมทริกซ์ด้านสิ่งแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 9

ความถี่	สิ่งแวดล้อม				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 9 เมทริกซ์วิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านสิ่งแวดล้อม

คะแนนความวิกฤติของส่วนประกอบทั้งหมดถูกกำหนดลงเมทริกซ์ด้านความปลอดภัยหรือความเชื่อถือได้ ดังแสดงในรูปที่ 10

ความถี่	ความปลอดภัย				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 10 เมทริกซ์วิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านความปลอดภัย

คะแนนความวิกฤติของส่วนประกอบทั้งหมดถูกกำหนดลงเมทริกซ์ด้านการเงินดังแสดงในรูปที่ 11

ความถี่	การเงิน				
	5	10	15	20	25
	4	8	12	16	20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 11 เมทริกซ์วิกฤติของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้านการเงิน

คะแนนความวิกฤติถูกคำนวณโดยใช้เกณฑ์เดียวกันและนำไปเพื่อลงในเมทริกซ์ความวิกฤติ 4 ด้าน ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และการเงิน จากรูปที่ 8-11 รอบตัวคะแนนสี่ด้านที่กำหนดลงเมทริกซ์ความเสี่ยงตั้งแต่ 1-8 ซึ่งได้จากตารางที่ 10 คือ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดนครราชสีมา



หัว Air Terminal, สายทองแดงเปลือย, แท่งตัวนำลงดิน, บ่อกราวด์, ท่อพีวีซี, Ground Test Box, Sandle Clamp Support และ Thermoweld ตามลำดับ เชี่ยว ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงระดับความเสี่ยงสูงมาก ความเสี่ยงสูง ความเสี่ยงปานกลาง และความเสี่ยงต่ำ ตามลำดับ ตัวเลข 1 ถึง 25

9. สรุป

ระบบป้องกันฟ้าผ่ามีอายุการใช้งานและเสื่อมสภาพตามการใช้งาน ระบบป้องกันฟ้าผ่าควรได้รับการปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การประเมินเพื่อจัดทรวีธีที่มีประสิทธิภาพจะพิจารณาเกณฑ์ความรุนแรง 4 ประการ ดังนี้ ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ และการเงิน โดยการเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และแสดงผลการวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษาระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้เทคนิค FMECA ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ามีความเสี่ยงสูงสุดในการปฏิบัติงาน เนื่องจากความสำคัญในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ อยู่ในเขตโซนสีแดงสำหรับทุกส่วนประกอบย่อยของระบบ เนื่องจากระบบป้องกันฟ้าผ่ามีอายุการใช้งานและอยู่ในสภาพที่ไม่ดี ทั้งเสี่ยงต่อการเกิดการฟ้าผ่าตามสถิติการเกิดฝนฟ้าคะนองของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้กล่าวว่าเฉลี่ยการเกิดฝนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549-พ.ศ. 2564 ค่าเฉลี่ยเกิดฝนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 67 ในด้านการเงินอยู่ในเขตสีเขียว เหลือง และแดง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสามารถรับได้ วิธี FMECA สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในการบำรุงรักษาและเสริมความน่าเชื่อถือและความเสถียรของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยงบประมาณที่เหมาะสม

10. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า ฝ่ายคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, "มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า," สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พฤศจิกายน 2565, หน้า 9-11

- [2] N. Charlanguit, N. Rodrueang, S. Woothipatanapan, M. Boonthienthong, P. Ngamprasert, and N. Rugthaicharoencheep, "Design and Installation Lightning Protection System to Protect Hybrid Solar Rooftop System," 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2023.
- [3] C. Suwanasri, T. Suwanasri, and W. Luejai, "Cost-Benefit for HV Transmission Line Renovation and Replacement Based on Failure Probability and Risk-Based Maintenance," *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering*, pp. 197-207, 2020.
- [4] J. Chitpong, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, "Evaluation criteria for condition and importance assessment of high voltage transmission line," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiangmai, Thailand, 2016
- [5] C. Suwanasri, S. Saribut, W. Luejai, and T. Suwanasri, "Risk Assessment of HV Transmission Lines Using Failure Modes, Effects and Criticality Analysis" *International Electrical Engineering Transactions*, vol. 6, No.1, pp. 21-27, 2020.
- [6] T.L. Saaty, "Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process" *in Review of the Royal Spanish Academy of Sciences*, vol. 102, pp. 251-318, 2008.
- [7] H. Tanaka, S. Tsukao, D. Yamashita, T. Nimmura, and R. Yokoyama "Multiple Criteria Assessment of Substation Conditions by Pair-Wise Comparison of Analytic Hierarchy Process" *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, No.4, pp. 3017-3023, 2010.
- [8] L. Promseela, T. Suwanasri, and R. Phadungthin, "Risk Assessment for Power Circuit Breaker by Using Failure Modes, Effects and Criticality Analysis" *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Chiangmai, Thailand, 2020, PP. 149-152

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล	นาวิน รอดเรือง	
วัน เดือน ปีเกิด	22 กรกฎาคม 2542	
ภูมิลำเนา	อำเภอบางยี่ขัน เขตบางพลัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร	
ประวัติการศึกษา		
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2564
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2567

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

พนักงานฝ่ายวิศวกรรม บริษัท เนสค (ประเทศไทย) จำกัด

ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ

