



การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของสายดินในระบบไฟฟ้า

Comparing the Resistance of Ground Wires in Electrical Systems



นายโกลด มะแก้ว

สารนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา การจัดการงานวิศวกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสยาม

พุทธศักราช 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสยาม



ใบรับรองสารนิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสยาม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ปริญญา

การจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย

(สาขาวิชา)

(คณะ)

เรื่อง การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของสายดินในระบบไฟฟ้า

Comparing the Resistance of Ground Wires in Electrical Systems

ผู้แต่ง นายโกมล มะแก้ว

Mr.Komon Makaew

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร)

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร)

ผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

วันที่ 7 เดือน ๖.๕ พ.ศ. 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่อง : การเปรียบเทียบค่าความต้านทานของสายดินในระบบไฟฟ้า

โดย : นายโกมล มะแก้ว

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : การจัดการงานวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา :

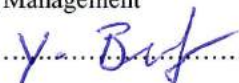
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร)

..... 7 / 3 / 63

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและวิเคราะห์ความแตกต่างของขนาดสายตัวนำไฟฟ้าในดินว่าส่งผลมากน้อยเพียงใดต่อการหาค่าความต้านทานของระบบสายดินในระบบไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบและทดลองโดยใช้ตัวอย่างของขนาดสายตัวนำไฟฟ้าในดิน ได้แก่ สายตัวนำขนาดเบอร์ 50, 70 และ 95 และได้ทำการสมมุติพื้นที่ขนาดหนึ่งๆขึ้นมา เพื่อใช้ในการทำการทดลองให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในการหาค่าความต้านทานของระบบสายดินในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งได้ทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ในพื้นที่ต่างกัน แล้วจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของความต้านทาน จากการทดลองพบว่าที่ขนาดสายตัวนำเบอร์ 50, 70 และ 95 มีค่าความต้านทานเท่ากับ 9.34, 9.32 และ 9.31 โอห์ม ตามลำดับ จากการทดสอบความแตกต่างโดยใช้ ANOVA ทำให้สรุปได้ว่าค่าความต้านทานจากสายตัวนำทั้ง 3 ขนาดดังกล่าวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เราจึงสามารถเลือกใช้สายตัวนำในดินขนาดต่ำสุดที่เบอร์ 50 ที่สามารถยอมรับให้ใช้ได้ มีราคาเมตรละ 229 บาท และสามารถทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของวัสดุสายดินลง 221 บาทคิดเป็นร้อยละ 49 เมื่อเทียบกับขนาดสายเบอร์ 95 ที่มีราคาเมตรละ 450 บาท

คำสำคัญ : ระบบสายดินในระบบไฟฟ้า, สายตัวนำไฟฟ้า, ANOVA, การลดค่าใช้จ่าย

Abstract

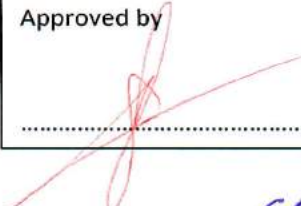
Title : Comparing the Resistance of Ground Wires in Electrical systems
 By : Mr. Komon Makaew
 Degree : Master of Engineering
 Major Field : Engineering Management
 IS Advisor : 
 (Assoc. Prof. Dr. Yuthachai Bunternngchit)
 7 / 3 / 20

The purposes of this research were to evaluate and analyze the differences in electrical conductivity in soil that affects the resistance of the grounding system. The research was carried out by using samples of conductor sizes in the soil, including numbers 50, 70 and 95. Three locations of the same size were selected for the experiments to get various parameters. The parameters were used as an element in determining the resistance of the grounding system in each location. Each location had three experiments using the different conductors. The averages of the resistance from the experiment in the three locations were found to be 9.34, 9.32 and 9.31 Ohms for the conductor numbers 50, 70 and 95, respectively. After using ANOVA, it was learned that the resistance of the three conductors were not different. Therefore, it was concluded from this experiment that the difference in the three conductors did not affect the ground resistance significantly. So, we can choose to use the conductor in the lowest size of the number 50, which was the minimum size that can be accepted. The price of the number 50 conductors was 229 Baht per meter. When compared to 450 Baht per meter for the conductor number 95, the first one was 221 Baht cheaper. So, the total reduction could be 49%.

Keyword: grounding system, conductor, ANOVA, cost reduced

Approved by

.....

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลและหน่วยงานหลาย ๆ ฝ่าย คือรองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและ นายชนปพน ชัยวานิชยา วุฒิวิศวกรสาขาไฟฟ้ากำลัง ได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แจงจุดบกพร่องต่าง ๆ รวมถึงช่วยตรวจสอบและแก้ไขเพื่อความสมบูรณ์ถูกต้องมากขึ้น จนกระทั่งสารนิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ค้นคว้า จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ประจำบัณฑิตวิทยาลัยทุก ๆ ท่าน ที่คอยหมั่นดูแล และให้คำชี้แนะต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ค้นคว้าสามารถค้นคว้าได้สำเร็จอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ผู้ประสานงานหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสยาม ที่คอยช่วยเหลืองานเอกสารและประสานงานต่าง ๆ ให้ลุล่วงไปด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ หากสารนิพนธ์นี้ มีส่วนดี และก่อให้เกิดประโยชน์แก่ส่วนรวม ผู้ค้นคว้าขอมอบความดีทั้งปวงนี้ให้ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว คณาจารย์และบุคลากรทุกท่านที่ได้ส่งเสริมสนับสนุนให้ผู้ค้นคว้า มีโอกาส มีความรู้ และความสามารถจนทุกวันนี้

โกมล มะแก้ว

ผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3	ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4	ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6	คำนิยามศัพท์เฉพาะ	3

บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1	ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า	4
2.2	มาตรการป้องกันฟ้าผ่า	5
2.3	ค่าความต้านทานของกราวด์	10
2.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)	12
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1	ขนาดสายไฟ	19
3.2	ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity)	20

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้าที่
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.3 พื้นที่ทำการทดลอง	22
3.4 การทดลอง	23
3.5 สูตรการคำนวณ	25
3.6 การคำนวณ	27
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	
4.1 ผลการทดลอง	35
4.2 ผลการเปรียบเทียบโดยวิธี ANOVA	38
4.3 การประมาณการค่าใช้จ่ายของวัสดุในการติดตั้งระบบท่อฟ้าในอาคาร	41
4.4 ผลการวิจัยและอภิปราย	46
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	47
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	48
5.3 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก	50
ประวัติผู้วิจัย	52

สารบัญรูป

รูปที่		หน้าที่
2.1	การถ่ายเทประจุทำให้เกิดฟ้าแลบฟ้าผ่า	4
2.2	ระบบการป้องกันจากฟ้าผ่า	5
2.3	แท่งตัวนำล่อฟ้าผ่า	6
2.4	สายตัวนำกระแสฟ้าผ่า	6
2.5	สายตัวนำกระแสไฟฟ้าในดิน	7
2.6	ระดับมุมป้องกันในค่าระดับการป้องกันต่างๆ ที่ต่างกัน	8
2.7	การป้องกันฟ้าผ่าของแบบวิธีมุมป้องกัน	8
2.8	ระดับชั้นของการป้องกันแบบทรงกลมกลิ้ง	9
2.9	ลักษณะการป้องกันฟ้าผ่าของวิธีทรงกลมกลิ้ง	9
2.10	ระดับชั้นของการป้องกันแบบวิธีดาข่าย	9
2.11	ลักษณะการป้องกันฟ้าผ่าของวิธีแบบดาข่าย	10
2.12	องค์ประกอบขั้วไฟฟ้ากราวด์	11
2.13	ลักษณะการวัดการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	12
3.1	สายไฟเปลือยขนาดต่างๆ	19
3.2	รูปแบบการวัดการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	20
3.3	การทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	20
3.4	ค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	21
3.5	รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานที่ออกแบบ	22
3.6	รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานที่หน้างานจริง	22
3.7	รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดที่หน้างานจริง	23
3.8	รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดที่หน้างานจริง	24
3.9	รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของระบบทดสอบ	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
4.1	ระดับค่าวิกฤติของการทดสอบ F – test	40
4.2	ลักษณะอาการและการติดตั้งระบบล่อฟ้า	42
4.3	ลักษณะแท่งตัวนำล่อฟ้า	42
4.4	เทพตัวนำกระแสไฟฟ้า	43
4.5	สายตัวนำกระแสไฟฟ้าในดิน	43
4.6	ลักษณะอาการและการติดตั้งระบบล่อฟ้าที่ใช้คำนวณ	44



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้าที่
2.1	ตารางสรุปสูตรการหาค่า F – test	14
2.2	ตารางการแจกแจงความถี่แบบ F	15
3.1	ค่าความจำเพาะของดินในลักษณะต่างๆ	21
3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ความต้านทานต่างๆของการคำนวณของสายขนาด 50	29
3.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ความต้านทานต่างๆของการคำนวณของสายขนาด 70	32
3.4	แสดงค่าพารามิเตอร์ความต้านทานต่างๆของการคำนวณของสายขนาด 95	34
4.1	แสดงผลการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดในครั้งที่ 1	36
4.2	แสดงผลการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดในครั้งที่ 2	36
4.3	แสดงผลการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดในครั้งที่ 3	37
4.4	แสดงผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและผลต่างความต้านทานของสายแต่ละขนาด	37
4.5	แสดงเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและผลต่างความต้านทานของสายแต่ละขนาด	38
4.6	ตารางสรุปผลลัพธ์การหาค่า F – test	40
4.7	ตารางแสดงการแจกแจงความถี่แบบ F ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05	41

บทที่ 1

บทนำ

ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ที่เริ่มจากการก่อตัวของก้อนเมฆ ที่มีประจุบวกและลบอยู่ภายใน และเมื่อการสะสมประจุมากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าปริมาณมหาศาล ระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน ที่เรียกว่า ฟ้าผ่า ความรุนแรงของฟ้าผ่านั้นส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตจนถึงขั้นเสียชีวิตได้ และถ้ากระทบที่วัตถุ เช่น ดึกสูง ต้นไม้ ก็ทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงได้เช่นกัน นับตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันจึงได้มีการป้องกันฟ้าผ่าในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นการป้องกันสิ่งมีชีวิตหรือทรัพย์สินไม่ให้เสียหาย อาทิเช่น ระบบป้องกันฟ้าผ่ากรงฟาราเดย์ ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบเออร์วีร์สตริมเมอร์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสายดินมีความสำคัญมากในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สิน รวมถึงการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้าให้มีความเสถียร และรวมถึงเครื่องจักรที่ต้องใช้อ้างอิงถึงระบบกราวด์เพื่อการใช้งาน ในปัจจุบันดึกสูงหรืออาคารต่างๆ จำเป็นต้องติดตั้งระบบสายดินแล้วทั้งสิ้น วัสดุหลักที่ใช้ในการติดตั้งได้แก่ แท่งกราวด์ทองแดง และสายไฟทองแดงเปลือยที่มีขนาดตั้งแต่ สายเบอร์ขนาด 50 70 และ 95 โดยสายไฟทองแดงเปลือยขนาดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ สายเบอร์ 95 ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการติดตั้งระบบสายดินและส่งผลให้ค่าติดตั้งระบบสายดินมีราคาที่สูง

ผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและเปรียบเทียบผลต่างของค่าความต้านของระบบสายดินในขนาดสายที่ต่างกัน ว่าส่งผลอย่างมีนัยยะสำคัญหรือไม่ และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของวัสดุในขนาดสายที่ต่างกัน โดยไม่ส่งผลต่อการใช้งานและข้อกำหนดของมาตรฐานการติดตั้งของระบบสายดินวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย และมีความเหมาะสมมากขึ้นเพียงใดต่อการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานและค่าใช้จ่ายของขนาดสายตัวนำในดินที่ต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

บทความนี้ผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาโดยเริ่มจาก การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินในพื้นที่ทำการทดลอง การหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์ในพื้นที่ตัวอย่าง ที่ใช้ทำการทดลอง โดยใช้ตัวแปรคือขนาดสายไฟที่มีขนาดต่างกัน ได้แก่ ขนาดสายไฟเบอร์ 50, 70 และ 95 และทำการสรุปผลถึงค่าที่ได้ออกมา ว่ามีผลและนัยยะสำคัญมากน้อยเพียงใด ต่อขนาดสายที่เปลี่ยนแปลงไป

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบค่าความต้านทานของระบบสายดินในพื้นที่หนึ่งๆ ว่ามีผลต่างมากน้อยเพียงใดเมื่อได้ทำการทดลองโดยใช้สายไฟเปลือยที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยได้ทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาปัญหาของการติดตั้งระบบล่อฟ้า และระบบการนำไฟฟ้าในดิน
2. ศึกษาโดยการสำรวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการป้องกันฟ้าผ่าและมาตรฐานการติดตั้ง
3. ศึกษาขนาดของสายตัวนำในดินที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้า
4. การวิเคราะห์หาสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าความต้านทาน
5. ทำการทดลองโดยสมมุติพื้นที่ขึ้นมาเพื่อใช้หาผลของการทดลอง
6. ทำการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความต้านทานของสายตัวนำขนาด 50 70 และ 95 รวมถึงค่าใช้จ่ายของสาย
7. สรุปผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้รู้ถึงการติดตั้งและการป้องกันฟ้าผ่า ตามมาตรฐานการติดตั้งของประเทศไทย
2. ทำให้สามารถวิเคราะห์และรับรู้สาเหตุของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแตกต่างของความต้านทานของระบบสายดินในระบบไฟฟ้า
3. ทำให้สามารถปรับปรุงและเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการติดตั้งระบบสายดินของระบบไฟฟ้าได้
4. ทำให้สามารถลดอุบัติเหตุจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าในงานก่อสร้างได้
5. ทำให้สามารถงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานของระบบสายดิน

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

คำนิยามศัพท์เฉพาะมีดังต่อไปนี้

1. ระบบสายดิน (Grounding system) คือ ระบบที่ใช้อ้างอิงของระบบไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัย เสถียร ของการใช้งานได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังเป็นส่วนหนึ่งของระบบฟ้าผ่า เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะก่อให้เกิดกับคนและสิ่งของ
2. การป้องกันฟ้าผ่า (Lightning protection) หมายถึง การป้องกันฟ้าผ่าที่จะลงสู่วัตถุหรือสิ่งมีชีวิต โดยทำการล่อฟ้าผ่าให้ลงสู่วัตถุล่อฟ้าหรือระบบป้องกันฟ้าผ่าอย่างปลอดภัย

บทที่ 2

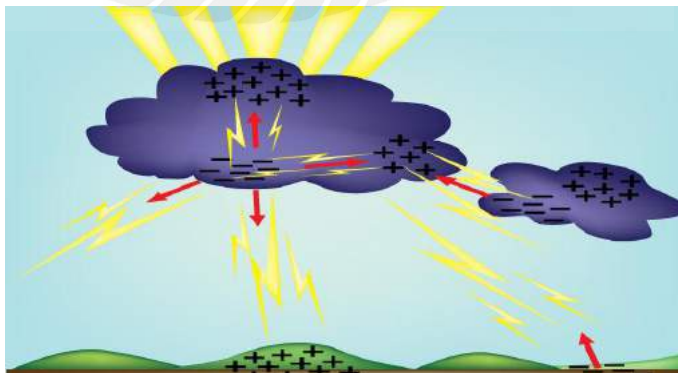
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่อง “การลดขนาดสายไฟของระบบสายดินในระบบไฟฟ้า” ผู้วิจัยได้กำหนดประเด็นการศึกษาเพื่อใช้เป็นกรอบพื้นฐานและประกอบแนวทางการศึกษา โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

1. ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
2. มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า
3. ค่าความต้านทานของกราวด์
4. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า (Thunder) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนภายในก้อนเมฆ หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน การเคลื่อนที่ขึ้นลงของกระแสอากาศภายในเมฆคิวมูโลนิมบัส ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละบริเวณของก้อนเมฆและพื้นดินด้านล่าง เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตำแหน่งทั้งสองที่มีค่าระดับหนึ่ง จะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยมีประจุบวกอยู่ทางตอนบนของก้อนเมฆ ประจุลบอยู่ทางตอนล่างของก้อนเมฆ พื้นดินบางแห่งมีประจุบวก พื้นดินบางแห่งมีประจุลบ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน, 2551) ดังที่แสดงในภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทประจุทำให้เกิดฟ้าแลบฟ้าผ่า (หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน, 2551)

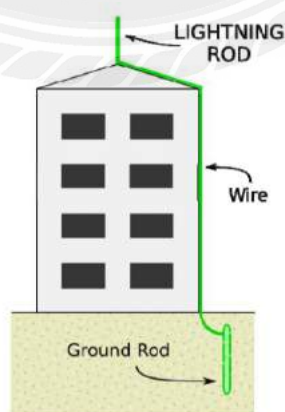
ลักษณะของฟ้าแลบ ฟ้าผ่า

- เมื่อประจุลบบริเวณฐานเมฆถูกเหนี่ยวนำเข้าหาประจุบวกที่อยู่ด้านบนของก้อนเมฆ ทำให้เกิดแสงสว่างในก้อนเมฆเรียกว่า "ฟ้าแลบ"
- เมื่อประจุไฟฟ้าลบบริเวณฐานเมฆก้อนหนึ่งถูกเหนี่ยวนำไปประจุบวกในเมฆอีกก้อนหนึ่ง จะมองเห็นสายฟ้าวิ่งข้ามระหว่างก้อนเมฆเรียกว่า "ฟ้าแลบ"
- เมื่อประจุลบบริเวณฐานเมฆถูกเหนี่ยวนำเข้าหาประจุบวกที่อยู่บนพื้นดิน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากก้อนเมฆพุ่งลงสู่พื้นดินเรียกว่า "ฟ้าผ่า"
- กลับกัน ประจุบที่อยู่บนพื้นดินถูกเหนี่ยวนำเข้าหาประจุบวกในก้อนเมฆ มองเห็นเป็นฟ้าแลบจากพื้นดินขึ้นสู่ท้องฟ้า

2.2 มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า

2.2.1 ระบบการป้องกันฟ้าผ่าทั่วไป

ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกมีหน้าที่ดักวาบฟ้าผ่าโดยตรงแทนที่จะลงถึงปลุกสร้าง รวมทั้งวาบฟ้าผ่าที่เข้าสู่ด้านข้างปลุกสร้างและนำกระแสฟ้าผ่าจากจุดที่ผ่าลงสู่ระบบดิน ระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกยังมีหน้าที่กระจายกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกลและทางความร้อน รวมทั้งไม่ทำให้เกิดประกายไฟ ที่อาจจุดชนวนให้เกิดไฟไหม้หรือการระเบิด (คณะอนุกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)



รูปที่ 2.2 ระบบการป้องกันจากฟ้าผ่า (คณะอนุกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

2.2.2 อุปกรณ์ล่อฟ้า

การเลือกชนิดและวัสดุอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ามีความจำเป็นและสำคัญอย่างมากในการป้องกันฟ้าผ่าลงสู่อาคาร ระบบตัวนำฟ้าผ่าประกอบไปด้วย

1. แท่งตัวนำฟ้าผ่า เป็นสิ่งแรกที่เป็นสิ่งที่ล่อให้ฟ้าผ่า ฟ้าลงสู่แท่งตัวนำก่อนที่จะนำไปสู่อุปกรณ์อื่นจนไปถึงระบบดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แสดงแท่งตัวนำล่อฟ้าผ่า



รูปที่ 2.3 แท่งตัวนำล่อฟ้าผ่า (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

2. สายตัวนำ สายตัวนำมีหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าที่ได้มาจากการล่อฟ้าผ่าจากแท่นตัวนำไปสู่ระบบดินต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงสายตัวนำกระแสฟ้าผ่า



รูปที่ 2.4 สายตัวนำกระแสฟ้าผ่า (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

3. สายตัวนำในดิน เป็นสายไฟฟ้าเปลือยทำหน้าที่กระจายกระแสไฟฟ้ารอบๆ ตัวออกสู่ดิน และเป็นตัวนำไปสู่แท่งกราวด์ในดินอีกด้วย สายตัวนำในดินเบอร์ 95 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สายตัวนำกระแสไฟฟ้าในดิน

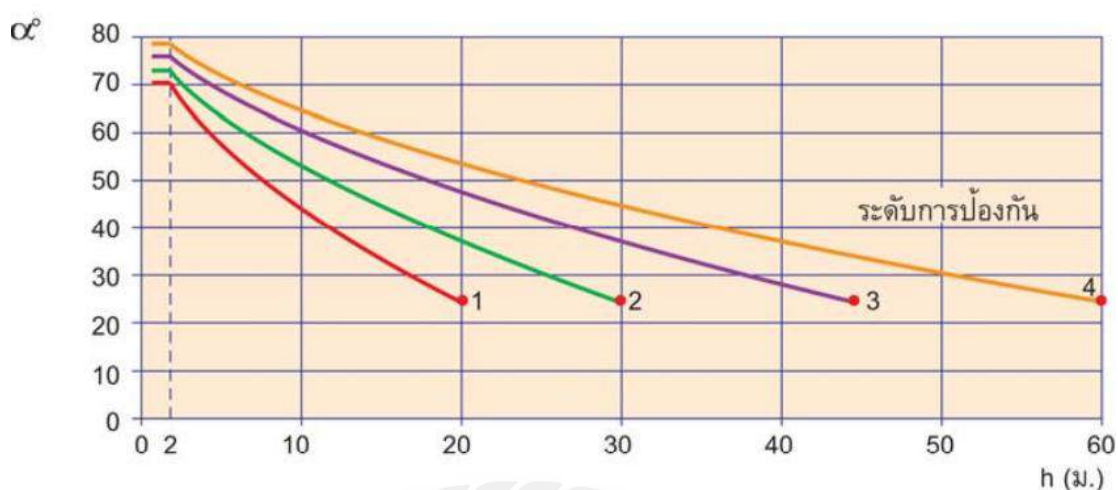


รูปที่ 2.5 สายตัวนำกระแสไฟฟ้าในดิน (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

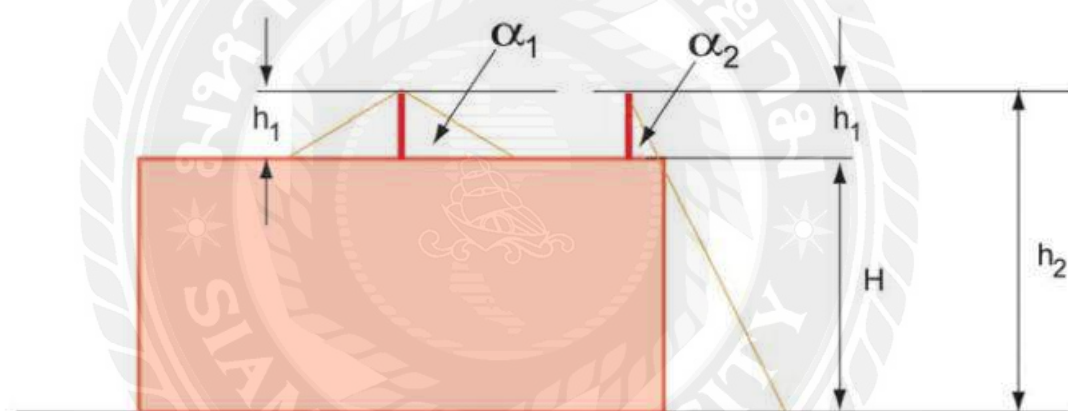
2.2.3 ระบบป้องกันฟ้าผ่า

ส่วนประกอบของตัวนำล่อฟ้าที่ติดตั้งบนสิ่งปลูกสร้างต้องวางในตำแหน่งหัวมุมในจุดที่เปิดโล่งและริมขอบ (โดยเฉพาะระดับบนของส่วนปิดหน้าอาคาร) วิธีที่ยอมรับในการหาตำแหน่งระบบตัวนำล่อฟ้า

วิธีมุมป้องกัน วิธีมุมป้องกันต้องจัดวางอุปกรณ์ล่อฟ้าให้ครอบคลุมสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในบริเวณป้องกัน ซึ่งสร้างโดยมุม α ที่ฉายไปในทุกทิศทุกทางในแนวดิ่ง รูปที่ 2.6 แสดงระดับมุมป้องกันในค่าระดับการป้องกันต่างๆที่ต่างกันของวิธีมุมป้องกัน และในรูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบของการป้องกันฟ้าผ่าของวิธีมุมป้องกัน (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3 , 2553)



รูปที่ 2.6 ระดับมุมป้องกันในค่าระดับการป้องกันต่างๆที่ต่างกัน
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3 , 2553)

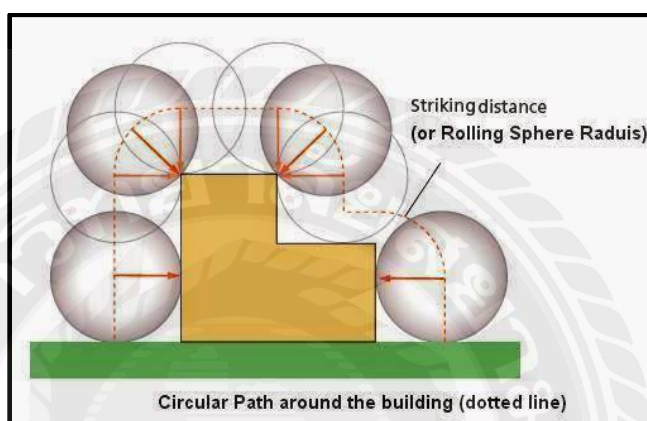


รูปที่ 2.7 การป้องกันฟ้าผ่าของแบบวิธีมุมป้องกัน
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3 , 2553)

1. **วิธีทรงกลมกลิ้ง** วิธีมุมป้องกันที่เหมาะสมกับทุกรูปแบบของอาคารใช้ได้หลากหลาย กล่าวคือในรัศมีที่วงกลมกลิ้งไปรอบๆสิ่งปลูกสร้าง จะทำการป้องกันจากกระแสฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และที่ระดับชั้นการป้องกันที่ต่างกัน จะมีค่ากระแสและรัศมีของมุมป้องกันที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3 , 2553)

ระดับชั้นการป้องกัน	I	II	III	IV
กระแสต่ำสุด (kA)	3	5	10	16
รัศมีทรงกลมกลิ้ง	20	30	45	60

รูปที่ 2.8 ระดับชั้นของการป้องกันแบบทรงกลมกลิ้ง
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3, 2553)

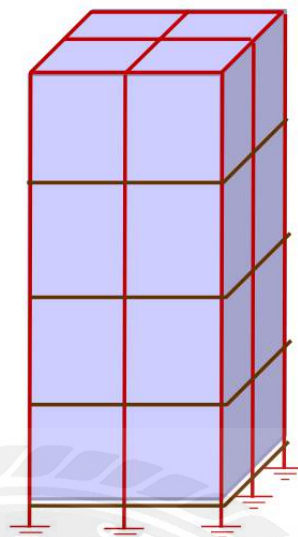


รูปที่ 2.9 ลักษณะการป้องกันฟ้าผ่าของวิธีทรงกลมกลิ้ง
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3, 2553)

2. วิธีดาข่าย วิธีดาข่ายเหมาะสมกับรูปแบบของอาคารที่เป็นลักษณะเรียบและเป็นระนาบดังแสดงในรูปที่ 2.11 และที่ระดับชั้นการป้องกันที่สูงขึ้น ขนาดความกว้างของดาข่ายในแต่ละช่องก็จะน้อยลงเช่นกัน ดังแสดงในรูป ที่ 2.10

ระดับชั้นการป้องกัน	ขนาดดาข่าย (ม)
1	5x5
2	10x10
3	15x15
4	20x20

รูปที่ 2.10 ระดับชั้นของการป้องกันแบบวิธีดาข่าย
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3, 2553)



รูปที่ 2.11 ลักษณะการป้องกันฟ้าผ่าของวิธีแบบตาข่าย
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3, 2553)

2.3 ค่าความต้านทานของกราวด์

2.3.1 กราวด์คือ

“การเชื่อมต่อที่นำไฟฟ้า ทั้งโดยตั้งใจหรือไม่ตั้งใจ ระหว่างวงจรไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้า กับพื้นดินหรือกับตัวนำไฟฟ้าบางอย่างที่ใช้แทนพื้นดิน” เมื่อพูดถึงการลงกราวด์ ในความเป็นจริงแล้วมีสองเรื่องที่แตกต่างกันอย่างมาก นั่นก็คือ การลงกราวด์พื้นดินกับการลงกราวด์อุปกรณ์ การลงกราวด์พื้นดินเป็นการเชื่อมต่อโดยตัวนำไฟฟ้าของวงจร ซึ่งปกติจะเป็นสาย N ไปยังขั้วกราวด์ที่ฝังลงในดิน การลงกราวด์อุปกรณ์จะทำให้การใช้งานอุปกรณ์ภายในสิ่งปลูกสร้างมีการอ้างอิงการลงกราวด์อย่างเหมาะสม ระบบกราวด์สองอย่างนี้มีความจำเป็นที่จะต้องแยกจากกัน ยกเว้นการเชื่อมต่อระหว่างสองระบบซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไปเนื่องจากฟ้าผ่า เป้าหมายของการลงกราวด์ นอกเหนือไปจากการป้องกันบุคคล โรงงานและอุปกรณ์ ก็คือการจัดให้มีเส้นทางในการกระจายกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาด เช่น จากฟ้าผ่า การแผ่ไฟฟ้าสถิต ตลอดจนสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้อย่างปลอดภัย (FLUKE, 2014)

2.3.2 ขั้วไฟฟ้ากราวด์

1. ขั้วไฟฟ้าและการเชื่อมต่อ

ความต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากราวด์และจุดเชื่อมต่อโดยทั่วไปมีต่ำมาก หลักราวด์โดยทั่วไปทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้ามีความต้านทานต่ำมาก เช่น เหล็กกล้าหรือทองแดง

2. ความต้านทานหน้าสัมผัสของดินโดยรอบของขั้วไฟฟ้า

ความต้านทานนี้มีน้อยมาก เมื่อขั้วไฟฟ้ากราวด์ไม่มีสาขาระบบ ฯลฯ เคลือบ และขั้วไฟฟ้ากราวด์สัมผัสกับเนื้อดินแบบแนบสนิท

3. ความต้านทานของเนื้อดินโดยรอบ

ขั้วไฟฟ้ากราวด์จะมีดินล้อมรอบซึ่งในทางทฤษฎีจะมีเปลือกที่รวมศูนย์เดียวกันและมีความหนาเท่ากันทั้งหมด ในพื้นที่หน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้ากราวด์ยิ่งมากก็ยิ่งส่งผลทำให้ค่าความต้านทานที่วัดออกมาได้นั้นมีค่าต่ำ กลับกันยิ่งหน้าสัมผัสที่สัมผัสกับพื้นดินมีค่าน้อยกลับทำให้ค่าความต้านทานที่วัดออกมาได้นั้นมีค่าสูงกว่า

4. จำนวนขั้วไฟฟ้ากราวด์

อีกวิธีในการลดความต้านทานของกราวด์ก็คือการเพิ่มขั้วไฟฟ้ากราวด์หลายจุด ในการออกแบบเช่นนี้ จะมีการปักขั้วไฟฟ้ากราวด์หลายอันในพื้นดินและเชื่อมต่อแบบขนาน เพื่อลดความต้านทาน เพื่อให้ขั้วไฟฟ้าเพิ่มเติมทำงาน มีประสิทธิภาพมาก ตามที่ระบุใน NEC 250.56 ในหน่วยงานที่มีอุปกรณ์ซึ่งมีความไวสูง ค่าที่ได้ควรไม่เกิน คือ 5.0 โอห์ม

รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของขั้วไฟฟ้ากราวด์และองค์ประกอบต่างๆ



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบขั้วไฟฟ้ากราวด์ (FLUKE, 2014)

2.3.3 ค่าความต้านทานของดิน

ความต้านทานของดินมีความจำเป็นมากที่สุดเมื่อพิจารณาการออกแบบระบบกราวด์สำหรับการติดตั้งใหม่ เพื่อให้ค่าความต้านทานเป็นไปตามความต้องการ การหาตำแหน่งติดตั้งระบบกราวด์นั้น องค์ประกอบของดิน ความชื้น และอุณหภูมิ ล้วนมีผลต่อความต้านทานของดินอย่างมาก ความต้านทานของดินจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่และระดับความลึก ซึ่งตามลักษณะทางธรรมชาติของการฝังหลักกราวด์ ควรฝังให้ลึกที่สุดเท่าที่จะทำได้ และควรติดตั้งหลักกราวด์ในตำแหน่งซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ เช่น ต่ำกว่าระดับที่ดินแข็งตัว เพื่อให้ระบบลงกราวด์มีประสิทธิภาพมากที่สุด รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะรูปแบบการวัดของเครื่องการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (FLUKE, 2014)

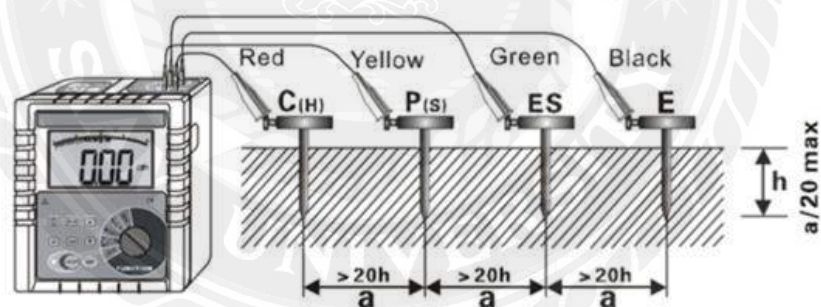
สูตรการคำนวณความต้านทานของดิน คือ $\rho = 2 \pi A R$

เมื่อ ρ = ค่าเฉลี่ยของความต้านทานจำเพาะของดินต่อความลึก (Ω -m)

$\pi = 3.1416$

A = ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)

R = ความต้านทานที่วัดได้



รูปที่ 2.13 ลักษณะการวัดการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (FLUKE, 2014)

2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Variance : ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis Of Variance : ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ทดสอบความแตกต่างระหว่าง ค่าเฉลี่ย (mean) ของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป อันเกิดจากการจัดกระทำที่ต่างกัน

จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1. ใช้ในการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป
2. ใช้วิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิจัยที่ออกแบบซับซ้อนหรือมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวได้
3. สามารถทดสอบได้ว่าตัวแปรอิสระสองตัวหรือมากกว่ามีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันหรือไม่คือ

ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ F เป็นสถิติทดสอบ โดยที่ F เป็นอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างได้มาโดยสุ่มจากประชากร (Random Sampling) และหากกลุ่มตัวอย่างเลือกมาโดยการสุ่มจากประชากรที่มีการกระจายเป็นโค้งปกติ ในการคำนวณค่า F ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) จะเป็นอิสระจากกัน

2. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะต้องได้มาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม (Variance Homogeneity)

3. ความเป็นปกติ (Normality) ตัวอย่างแต่ละกลุ่มสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ หากจำเป็นต้องแปลงข้อมูล (Transformation) ให้มีการแจกแจงแบบโค้งปกติก่อนหรือเพิ่มตัวอย่างให้มีขนาดมากขึ้น และใช้กลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่าๆ กันในแต่ละกลุ่มจะหลีกเลี่ยงการละเมิดข้อตกลงข้อนี้ได้

4. ข้อมูลของตัวแปรตามที่นำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ในอันดับหรืออัตราส่วน ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรประเภทพหุวิภาค (Polychromatic)

สมมติฐาน

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้น สมมติฐานไร้นัยสำคัญ (Null hypothesis) จะกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของประชากรแต่ละกลุ่ม มีค่าเท่ากัน สอดสมมติฐานทางเลือก (Alternative hypothesis) กำหนดให้ว่าจะมีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน เขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

H_1 : มี μ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

(หรือ $H_1: \mu_i \neq \mu_j$ เมื่อ $i \neq j$)

ค่าสถิติที่ต้องคำนวณ

สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือการคำนวณผลบวกของคะแนนเบี่ยงเบนยกกำลังสอง (The sum of square) ซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปหาค่าความแปรปรวน

1. Total sum of squares (SS_T) หาได้จาก

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \frac{T^2}{N} \quad \text{หรือ} \quad SS_T = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X})^2$$

2. Between – groups sum of squares (SS_B)

$$\sum_{j=1}^K \left(\frac{T_j^2}{n_j} \right) - \frac{T^2}{N} \quad \text{หรือ} \quad \sum_{j=1}^K n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

3. Within – group sum of squares (SS_W)

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \sum_{j=1}^K \left(\frac{T_j^2}{n_j} \right) \quad \text{หรือ} \quad \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

ค่า SS_T หรือ SS_B และ SS_W เมื่อหารด้วยค่าองศาอิสระ (df) ของแต่ละตัวจะหมายถึงความแปรปรวน (Mean of square : MS) โดยมี $df_T = N - 1$, $df_B = K - 1$ และ $df_W = N - K$ เมื่อ N คือจำนวนข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดและ K คือจำนวนกลุ่ม

การคำนวณค่าสถิติ F – test

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 3 ค่าขึ้นไปนั้นจะใช้ F – test สำหรับการทดสอบซึ่งในกรณีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวนี้ ค่า F หาได้จากอัตราส่วนความแปรปรวนโดยหาจากความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS_B) หารด้วยความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS_W) ซึ่งมีค่า $df = K - 1$ (degree of freedom for the numerator) และ $df_L = N - K$ (degree of freedom for the denominator) การหาค่า F – test สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

Source of variation	SS	df	MS	F
Between groups	SS_B	$K - 1$	$SS_B / K - 1$	MS_B / MS_W
Within groups	SS_W	$N - K$	$SS_W / N - K$	
Total	$SS_B + SS_W$	$N - 1$		

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปสูตรการหาค่า F – test

ความหมายของสัญลักษณ์

T_i = ผลรวมของคะแนน n ค่าในแต่ละกลุ่ม

T = ผลรวมของคะแนนทั้งหมด

n_j = จำนวนข้อมูลในแต่ละกลุ่ม

K = จำนวนกลุ่ม

X_{ij} = ข้อมูลตัวที่ i ในกลุ่ม j

$\bar{X}_j$ = ค่าเฉลี่ยของกลุ่ม j

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยรวม

$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^2$ = ผลรวมของคะแนนแต่ละตัวยกกำลังสองทุก ๆ ค่าในทุกกลุ่ม

ตารางการแจกแจงความถี่แบบ F

ตารางที่ 2.2 ตารางการแจกแจงความถี่แบบ F ที่ระดับนัยยะสำคัญที่ 0.1



df2/df1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	50	100	inf
1	19.86	49.59	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.22	61.74	62.09	62.26	62.53	62.79	63.06	63.33
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.48	9.49
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.20	5.18	5.16	5.17	5.16	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.79	3.78	3.76
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.14	3.12	3.11
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.84	2.82	2.80	2.78	2.76	2.74	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.59	2.58	2.56	2.54	2.51	2.49	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.30	2.28	2.25	2.23	2.21	2.18	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.20	2.18	2.16	2.13	2.11	2.08	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.03	2.00	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.06	2.04	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.92	1.90	1.87	1.85	1.82	1.79	1.76
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.89	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72
17	3.03	2.65	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.86	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.89	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76	1.73	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.79	1.77	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.83	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.84	1.80	1.74	1.71	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.61	1.57	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52

ตารางที่ 2.2 ตารางการแจกแจงความถี่แบบ F (พ้องอำไพ, 2016)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประดิษฐ์ เฟื่องฟู (2014) : ได้แสดงการรวบรวมการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์ร็อดที่ใช้ในระบบของ กฟภ. เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบการต่อลงดินได้อย่างเหมาะสมถูกต้องตามมาตรฐาน เพื่อความปลอดภัยและความมั่นคงของระบบส่งจ่ายและระบบป้องกันฟ้าผ่า สำหรับการนำสูตรการคำนวณไปใช้งานเพื่อให้การหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์ร็อดมีความถูกต้อง อันนำไปสู่การออกแบบการต่อลงดินที่เหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีความเหมาะสมในการติดตั้ง แต่อาจพบปัญหาในการใช้งานเนื่องจากจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์บางค่า เช่น ชนิดของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และอื่นๆ

FLUKE (2014) : ได้สรุปว่า ในระบบความต้านทานระบบไฟฟ้าในดินนั้นการลงกราวด์ที่ไม่เหมาะสมมีส่วนทำให้เกิดการหยุดทำงานโดยไม่จำเป็น และยังเป็นอันตรายและเพิ่มความเสี่ยงที่อุปกรณ์จะขัดข้องด้วย อีกหากไม่มีระบบกราวด์ที่มีประสิทธิภาพ เราอาจได้รับ ความเสี่ยงที่จะถูกไฟฟ้าช็อต อุปกรณ์อาจมีข้อผิดพลาด เกิดปัญหาความผิดปกติของฮาร์ดแวร์ โมดูล ปัญหา บั๊กจ๊อฟลังงาน และปัญหาที่เกิดแบบไม่สม่ำเสมออีกมากมาย ถ้ากระแสที่ผิดพลาดไม่มีเส้นทางลงกราวด์ผ่านระบบกราวด์ที่ออกแบบและดูแลเป็นอย่างดี กระแสไฟฟ้าจะหาเส้นทางไหลอื่นๆ ซึ่งอาจรวมถึงบุคคล องค์กร ซึ่งในบทความนี้มีข้อเสนอแนะหรือมาตรฐาน สำหรับการลงกราวด์เพื่อให้เกิดความปลอดภัย

คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3 (2553) : ได้ระบุถึงข้อกำหนดสำหรับการป้องกันสิ่งปลูกสร้างจากความเสียหาย ทางกายภาพจากฟ้าผ่าโดยใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่า และการป้องกันการบาดเจ็บของสิ่งมีชีวิตเนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำวในบริเวณใกล้เคียงกับระบบป้องกันฟ้าผ่า (อ้างอิงมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่1) มาตรฐานนี้ครอบคลุมถึง

ก) การออกแบบ การติดตั้งการตรวจสอบและบำรุงรักษาระบบป้องกันฟ้าผ่าของสิ่งปลูกสร้าง โดยไม่จำกัดในเรื่องความสูง

ข) กำหนดมาตรการป้องกันการบาดเจ็บของสิ่งมีชีวิตเนื่องจากแรงดันสัมผัสและ แรงดันช่วงก้ำว

ก) ชั้นของระบบป้องกันฟ้าผ่า คุณลักษณะของระบบป้องกันฟ้าผ่ากำหนดโดยคุณลักษณะของสิ่งปลูกสร้างที่จะป้องกันและระดับป้องกันฟ้าผ่าที่พิจารณา

คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4 (2557) : ได้ระบุถึงข้อกำหนดสำหรับความจำเป็นในการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เกิดขึ้นเนื่องจากระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับผลจากแม่เหล็กไฟฟ้าของฟ้าผ่ามีมูลค่าความเสียหายเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะสำคัญคือระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการประมวลผลและเก็บข้อมูล รวมถึงกระบวนการควบคุมความปลอดภัยของเครื่องจักร ซึ่งมีราคา ขนาด และความซับซ้อนสูง ซึ่งหากเกิดการหยุดชะงักของระบบดังกล่าวจะไม่ใช่สิ่งที่พึงประสงค์อย่างยิ่ง ด้วยเหตุผลทางด้านค่าใช้จ่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ให้ข้อมูลสำหรับการออกแบบ การติดตั้ง การตรวจสอบ การบำรุงรักษา และการทดสอบของระบบมาตรฐานป้องกันอิมพัลส์จากแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่าสำหรับระบบไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ในสิ่งปลูกสร้าง สามารถลดความเสี่ยงที่จะเกิดความล้มเหลวอย่างถาวร เนื่องจากอิมพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่า

Earthing calculation (2560) ได้สรุปว่า ระบบสายดินในอาคาร มีความสำคัญมากเกี่ยวข้องกับการปกป้องผู้คนและอุปกรณ์และการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของระบบไฟฟ้า รวมถึงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวัตถุนำไฟฟ้า (เช่นอุปกรณ์โลหะ, อาคาร, ท่อ ฯลฯ) ไปยังระบบสายดินป้องกันสำหรับแรงดันไฟฟ้าชั่วคราวเช่นฟ้าผ่า ไฟกระชาก และ ไฟเกิน การเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพช่วยป้องกันการสะสมและคายประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งอาจทำให้เกิดประกายไฟได้เมื่อมีพลังงานที่เพียงพอ ระบบสายดินมีศักยภาพในการอ้างอิงสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์และช่วยลดเสียงรบกวนทางไฟฟ้าสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์เครื่องมือวัดและการสื่อสาร การคำนวณนี้เป็นไปตามหลักปฏิบัติที่จัดทำโดย IEEE Std 80 (2000), "

การคำนวณการต่อลงดินช่วยในการออกแบบระบบสายดินที่เหมาะสม เมื่อใช้ผลลัพธ์ของการคำนวณในการหาค่า

1. กำหนดขนาดขั้นต่ำของตัวนำสายดินที่จำเป็นสำหรับตารางสายดินหลัก
2. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าการออกแบบสายดินนั้นเหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดอันตรายและโอกาสในการสัมผัส

Klangfaifa (2016): ได้สรุปถึง ราคาสายไฟ สายไฟทองแดงเปลือย และสายไฟชนิดต่างๆ ในราคากลางที่ขายอยู่ในท้องตลาด เพื่อใช้ในการอ้างอิงและเปรียบเทียบราคาถึงในขนาดสายที่ต่างกัน

พองอำไพ (2016): : ได้แสดงการรวบรวมการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ เทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้เพื่อ ทดสอบสมมติฐานที่มีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 2 กลุ่ม ขึ้นไป (ตัวแปรอิสระเป็นแบบจัดกลุ่ม ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิง ปริมาณ) การวิเคราะห์ห้มีทั้งในกรณีที่กลุ่มเป็นอิสระจากกัน และ กลุ่มมีความสัมพันธ์กัน ในการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่มากกว่าสองค่าจึงทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วยสถิติ F –test

หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน (2551) : ได้สรุปปรากฏการณ์ธรรมชาติ ไฟฟ้าแลบ ไฟร้อง ไฟผ่า (Thunder) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติซึ่งเกิดจากสาเหตุการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนภายในก้อนเมฆ หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน พื้นดินบางแห่งมีประจุลบ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า และส่งผลอย่างไรต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งปลูกสร้างต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบค่าความต้านทานของระบบสายดินในพื้นที่หนึ่งๆ ว่ามีผลต่างมากน้อยเพียงใดเมื่อได้ทำการทดลองโดยใช้สายไฟเปลือยที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยได้ทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีขั้นตอนการทําวิจัยมีดังนี้

3.1 ขนาดสายไฟ

ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาโดยการเลือกขนาดสายไฟทองแดงเปลือย ซึ่งใช้เป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ใช้ฝังลงในดิน ขนาดต่างกัน จำนวน 3 ขนาด มาใช้ทำการทดลองดังนี้ สายไฟเปลือย ขนาด 50, 70 และ 95 มม² เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบและหาค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน (Klangfaifa , 2016)

3.1.1 สายไฟเปลือยขนาดที่ต่างกัน

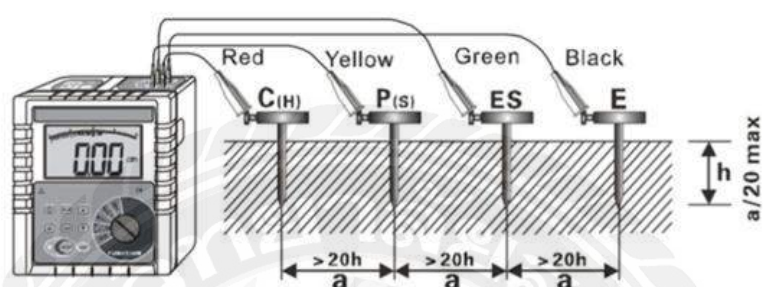


รูปที่ 3.1 สายไฟเปลือยขนาดต่างๆ (Klangfaifa , 2016)

3.2 ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity)

3.2.1 การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ผู้จัดทำได้ทำการวัดและประเมินค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity) (ρ) โดยใช้เครื่องทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพื่อที่จะได้นำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานของดินต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบการวัดการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (FLUKE, 2014)

3.2.2 บริเวณที่ใช้ทำการทดสอบ

ลักษณะดินที่ผู้จัดทำทำการทดสอบเป็นดินร่วนและดินทราย ซึ่งผู้จัดทำได้ทำการปักแท่งอิเล็กโทรดทดสอบ เพื่อทำการวัดค่าหาความต้านทานจำเพาะของดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

3.2.3 ค่าที่ได้จากการวัดค่าความจำเพาะของดิน

เมื่อได้ทำการทดลองแล้วทำให้ทราบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้ทำการทดลองอยู่ในช่วงระหว่าง 92.5 – 100 โอห์มเมตร ซึ่งอยู่ในลักษณะของดิน ที่เป็นดินทรายและ ผู้จัดทำจึงได้นำค่าดินที่ได้ดังกล่าว มาใช้ในการหาค่าความต้านทานในสูตรต่างๆ และความต้านทานรวมต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ค่าที่ได้จากการทดสอบหาความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางที่ 3.1 แสดงการหาความจำเพาะของดินในลักษณะต่างๆ

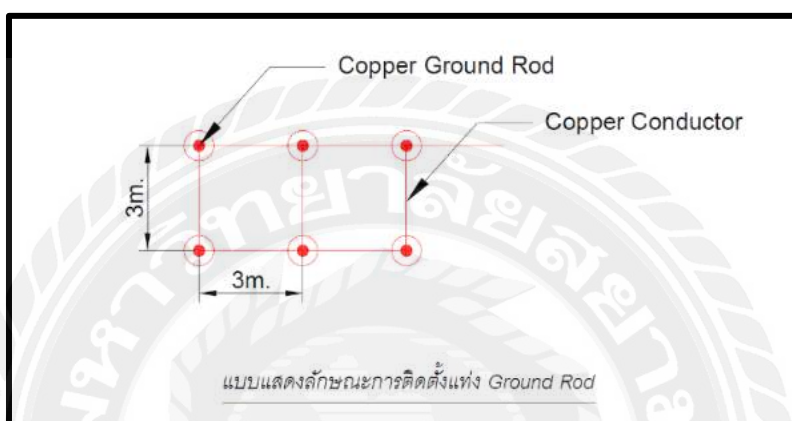
หมวดหมู่ของดิน	ชนิดของดิน	ค่าอ้างอิงของความต้านทานจำเพาะ (Ωm)	ช่วงความต้านทานจำเพาะที่มีความชื้นที่แตกต่างกัน(Ωm)		
			เปรียบเทียบกรณีเปียก (พื้นที่ทั่วไป, พื้นที่ฝนตก)	เปรียบเทียบกรณีแห้ง (พื้นที่แห้งแล้ง, พื้นที่ทะเลทราย)	ภูมิภาคน้ำเค็ม (กับน้ำใต้ดินที่มีเกลือ)
ดิน	ดินดอนปากแม่น้ำ	5	-	-	-
	ดินเหนียวสำหรับทำภาชนะดินเผา	10	5-20	10-100	3-10
	ดินซากพืช, หินซากพืช, ที่ขึ้นแฉะ	20	10-30	50-300	3-30
	ดินดำ, ดินร่วนซุย, ดินเหนียว	50	30-100	50-300	10-30
	ดินยูคาลิปตัส, ดินเหนียว	60	30-100	50-300	10-30
	ดินทราย	100	30-300	80-1000	10-80
	ดินลมหอบ	200	100-200	250	30
	ดินเหนียวปนทราย	300	100-1000	>1000	30-100
	ดินแข็ง	400			
	ดินลาดลาดตากฝนในชั้นบนสุด, หินดินดานสีแดงในชั้นล่าง	500 (30% humidity)			

ตารางที่ 3.1 ค่าความจำเพาะของดินในลักษณะต่างๆ

3.3 พื้นที่ทำการทดลอง

3.3.1 การติดตั้งแท่งและสายกราวด์

ผู้จัดทำได้สมมุติพื้นที่ขึ้นมาพื้นที่หนึ่งๆขึ้น เพื่อที่จะทำเป็นจุดอ้างอิงที่จะใช้ในการหาค่าความต้านทานของระบบสายดินในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งผู้จัดทำได้กำหนดพื้นที่ขึ้นมาขนาด กว้าง 3 เมตร และ ยาว 6 เมตร รวมเป็นพื้นที่ 18 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานที่ออกแบบ

รูปที่ 3.6 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานที่หน้างานจริง



รูปที่ 3.6 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานที่หน้างานจริง

3.4 การทดลอง

3.4.1 การติดตั้งแท่งและสายกราวด์

ผู้จัดทำได้ทำการปักกราวด์แท่งลงไป มีความยาว 3 เมตร จำนวน 6 เส้น โดยรอบพื้นที่ และได้เชื่อมต่อเข้ากับสายทองแดงเปลือยที่ได้เตรียมไว้ โดยได้เริ่มจากการใช้สายไฟเปลือยขนาดต่างๆ ดังที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น มาใช้ในการทดลองหาค่าความต้านทานของระบบ แล้วจึงสับเปลี่ยนไปใช้สายไฟขนาดที่ต่างกัน โดยเริ่มจากการใช้สายขนาดเบอร์ 50, 70 และ 95 มม² ตามลำดับ ซึ่งผู้จัดทำได้ทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดที่หน้างานจริง

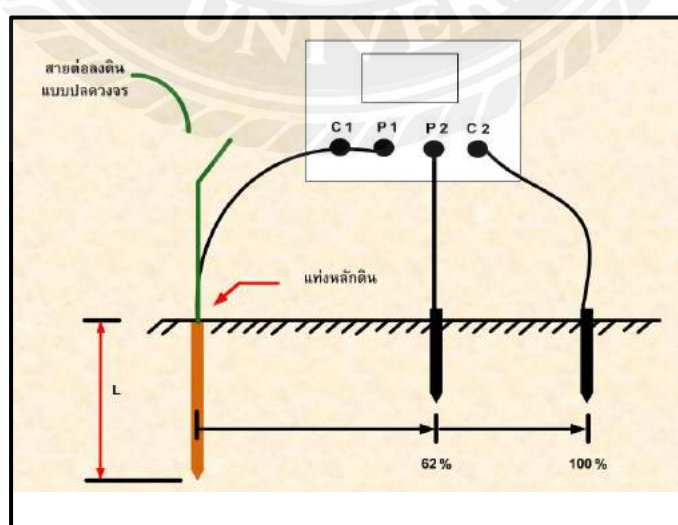


รูปที่ 3.7 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดที่หน้างานจริง



รูปที่ 3.8 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดที่หน้างานจริง

เมื่อผู้จัดทำได้ทำการติดตั้งแท่งและสายกราวด์เรียบร้อยแล้ว ผู้จัดทำได้ทำการใช้เครื่องวัดค่าความต้านทานเพื่อหาค่าความต้านทาน โดยเครื่องทดสอบจะสร้างกระแสไฟฟ้าที่รู้ค่าระหว่างหลักภายนอก(C2) และขั้วไฟฟ้ากราวด์ใน(C1) ขณะที่การลดลงของศักย์จะถูกวัดค่าระหว่างหลักกราวด์ภายใน(P2) และขั้วไฟฟ้ากราวด์(C1) เมื่อใช้กฎของโอห์ม ($V = IR$) เครื่องมือทดสอบจะคำนวณความต้านทานของขั้วไฟฟ้ากราวด์ออกมา (FLUKE, 2014) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแบบลักษณะการติดตั้งเพื่อหาค่าความต้านทานของระบบทดสอบ (FLUKE, 2014)

3.5 สูตรการคำนวณ

ผู้จัดทำได้ทำการคำนวณหาค่าความต้านทานในระบบรวมของสายนั้นๆ โดยใช้สูตรของ Schwarz's Equation (IEEE 80-2013) (OPEN ELECTRICAL, 2017)

3.5.1 Ground Resistance of Ground Rod (R_{rod})

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์ซึ่งในการทดลองของผู้จัดทำได้ใช้แท่งกราวด์ ที่ความยาว 3 เมตร จำนวน 6 เส้น

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi n L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (3.1)$$

3.5.2 Ground Resistance of Grid Only (R_g)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้พื้นที่ขนาด 18 ตารางเมตร

$$R_g = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{\sqrt{d_g h}} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (3.2)$$

3.5.3 Mutual ground (R_m)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระหว่างแท่งกราวด์ และพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง จากบทความข้างต้น

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (3.3)$$

3.5.4 Total Ground Resistance (R_T)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานรวมระหว่างสูตรต่างๆ ของค่าความต้านทานข้างต้น ในสูตรนี้จะเป็นการสรุปหาความต้านทานของระบบ

$$R_r = \frac{R_g R_{Rod} - R_m^2}{R_g + R_{Rod} - 2R_m} \quad (3.4)$$

3.5.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

ρ = Soil resistivity (Ω -m)

LT = Total length of grid's wire (m)

A = Area (m³)

h = Grid burial depth (m)

k1 = Coefficients of Schwarz's formula

k2 = Coefficients of Schwarz's formula

x = Length to Width Ratio

dg = Diameter of grid's conductor (m)

n = Number of rod (ea)

Lr = Length of each rod (m)

d = Diameter of each rod (m)

3.6 การคำนวณ

ผู้จัดทำได้ทำการนำค่าของความต้านทานที่ได้จากการวัด ของขนาดสายต่างๆ มาเพื่อ คำนวณหาค่าความต้านทานในระบบรวมของสายนั้นๆ โดยใช้สูตรของ Schwarz's Equation (IEEE 80-2013) ดังที่กล่าวไปแล้วเริ่มต้น ดังนี้

3.6.1 การคำนวณความต้านทานรวมของขนาดเบอร์สาย 50

3.6.1.1 Ground Resistance of Ground Rod (R_{rod})

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานของแท่งกราวด์ ซึ่งในการทดลองของผู้จัดทำ ได้ใช้แท่งกราวด์ที่มีความยาว 3 เมตร จำนวน 6 เส้น

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi n L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$\square\square\square = \frac{100}{2(3.14)(6)(3)} \left(\ln \left(\frac{4(3)}{0.0142} \right) - 1 + \frac{2(1.37)(3)}{\sqrt{18}} (\sqrt{6} - 1)^2 \right)$$

$$\square\square\square = 8.67 \square\square\square$$

3.6.1.2 Ground Resistance of Grid Only (R_g)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานของกราวด์กริดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้พื้นที่ขนาด 18 ตารางเมตร

$$R_g = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{\sqrt{d_g h}} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

$$\square\square = \frac{100}{2(3.14)(21)} \left(\ln \left(\frac{2(21)}{\sqrt{(0.008)(0.5)}} \right) + \frac{(1.37)(21)}{\sqrt{18}} - 5.65 \right)$$

$$\square\square = 11.57 \square\square\square$$

3.6.1.3 Mutual ground (R_m)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระหว่างแท่งกราวด์ และพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง จากบทความข้างต้น

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

$$\square\square = \frac{100}{(3.14)(21)} \left(\ln \left(\frac{2(21)}{\sqrt{3}} \right) + \frac{(1.37)(21)}{\sqrt{18}} - 5.65 + 1 \right)$$

$$\square\square = 7.23 \square\square\square\square$$

3.6.1.4 Total Ground Resistance (R_T)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานรวมระหว่างสูตรต่างๆ ของค่าความต้านทานข้างต้น ในสูตรนี้จะเป็นการสรุปหาค่าความต้านทานของระบบ

$$R_T = \frac{R_g R_{Rod} - R_m^2}{R_g + R_{Rod} - 2R_m}$$

$$\square\square = \frac{(11.57)(8.67) - 7.23^2}{(11.57) + (8.67) - 2(7.23)}$$

$$\square\square = 8.32 \square\square\square\square$$

3.6.1.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

$$\rho = \text{Soil resistivity } (\Omega\text{-m}) = 100 (\Omega\text{-m})$$

$$LT = \text{Total length of grid's wire (m)} = 21 \text{ m.}$$

$$A = \text{Area (m}^2\text{)} = 18 \text{ m.}$$

$$h = \text{Grid burial depth (m)} = 0.5 \text{ m.}$$

$$k_1 = \text{Coefficients of Schwarz's formula} = 1.37$$

$$k_2 = \text{Coefficients of Schwarz's formula} = 5.65$$

$$dg = \text{Diameter of grid's conductor (m)} = 0.008 \text{ m. (wire size 50 mm.)}$$

$$n = \text{Number of rod (ea)} = 6$$

$$L_r = \text{Length of each rod (m)} = 3 \text{ m.}$$

$$d = \text{Diameter of each rod (m)} = 0.0142 \text{ m.}$$

เมื่อผู้จัดทำได้ทำการทดลองและแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสูตรสามารถสรุปค่าการคำนวณของสายขนาด 50 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

SIZE (mm ²)	50
R_{rod}	8.67
R_g	11.57
R_m	7.23
R_t	8.32

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ความต้านทานต่างๆของการคำนวณของสายขนาด 50

3.6.2 การคำนวณความต้านทานรวมของขนาดเบอร์สาย 70

3.6.2.1 Ground Resistance of Ground Rod (R_{rod})

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์ซึ่งในการทดลองของผู้จัดทำได้ใช้แท่งกราวด์ที่มีความยาว 3 เมตร จำนวน 6 เส้น

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$\square_{\square\square\square} = \frac{100}{2(3.14)(6)(3)} \left(\ln \left(\frac{4(3)}{0.0142} \right) - 1 + \frac{2(1.37)(3)}{\sqrt{18}} (\sqrt{6} - 1)^2 \right)$$

$$\square_{\square\square\square} = 8.67 \square\square\square\square$$

3.6.2.2 Ground Resistance of Grid Only (R_g)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้พื้นที่ขนาด 18 ตารางเมตร

$$R_g = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{\sqrt{d_g h}} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

$$\square_{\square} = \frac{100}{2(3.14)(21)} \left(\ln \left(\frac{2(21)}{\sqrt{(0.0095)(0.5)}} \right) + \frac{(1.37)(21)}{\sqrt{18}} - 5.65 \right)$$

$$\square_{\square} = 11.44 \square\square\square\square$$

3.6.2.3 Mutual ground (R_m)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระหว่างแท่งกราวด์ และพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง จากบทความข้างต้น

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

$$\square_{\square} = \frac{100}{(3.14)(21)} \left(\ln \left(\frac{2(21)}{\sqrt{3}} \right) + \frac{(1.37)(21)}{\sqrt{18}} - 5.65 + 1 \right)$$

$$\square_{\square} = 7.23 \square\square\square\square$$

3.6.2.4 Total Ground Resistance (R_T)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานรวมระหว่างสูตรต่างๆ ของค่าความต้านทานข้างต้น ในสูตรนี้จะเป็นการสรุปหาความต้านทานของระบบ

$$R_T = \frac{R_g R_{Rod} - R_m^2}{R_g + R_{Rod} - 2R_m}$$

$$\square\square = \frac{(11.44)(8.67) - 7.23^2}{(11.44) + (8.67) - 2(7.23)}$$

$$\square\square = 8.30 \square\square\square\square$$

3.6.2.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

$$\rho = \text{Soil resistivity } (\Omega\text{-m}) = 100 (\Omega\text{-m})$$

$$LT = \text{Total length of grid's wire (m)} = 21 \text{ m.}$$

$$A = \text{Area (m}^2\text{)} = 18 \text{ m.}$$

$$h = \text{Grid burial depth (m)} = 0.5 \text{ m.}$$

$$k1 = \text{Coefficients of Schwarz's formula} = 1.37$$

$$k2 = \text{Coefficients of Schwarz's formula} = 5.65$$

$$dg = \text{Diameter of grid's conductor (m)} = 0.0095 \text{ m. (wire size 70 mm.)}$$

$$n = \text{Number of rod (ea)} = 6$$

$$Lr = \text{Length of each rod (m)} = 3 \text{ m.}$$

$$d = \text{Diameter of each rod (m)} = 0.0142 \text{ m.}$$

เมื่อผู้จัดทำได้ทำการทดลองและแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสูตรสามารถสรุปค่าการคำนวณของสายขนาด 70 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

SIZE (mm ²)	70
R_{rod}	8.67
R_g	11.44
R_m	7.23
R_t	8.30

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ความต้านทานต่างๆของการคำนวณของสายขนาด 70

3.6.3 การคำนวณความต้านทานรวมของขนาดเบอร์สาย 95

3.6.3.1 Ground Resistance of Ground Rod (R_{rod})

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานของแท่งกราวด์ซึ่งในการทดลองของผู้จัดทำได้ใช้แท่งกราวด์ที่มีความยาว 3 เมตร จำนวน 6 เส้น

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi n L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{d} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

$$\square\square\square\square = \frac{100}{2(3.14)(6)(3)} \left(\ln \left(\frac{4(3)}{0.0142} \right) - 1 + \frac{2(1.37)(3)}{\sqrt{18}} (\sqrt{6} - 1)^2 \right)$$

$$\square\square\square\square = 8.67 \square\square\square\square$$

3.6.3.2 Ground Resistance of Grid Only (R_g)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานของกราวด์กริดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้พื้นที่ขนาด 18 ตารางเมตร

$$R_g = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{\sqrt{d_s h}} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

$$\square_{\square} = \frac{100}{2(3.14)(21)} \left(\ln \left(\frac{2(21)}{\sqrt{(0.011)(0.5)}} \right) + \frac{(1.37)(21)}{\sqrt{18}} - 5.65 \right)$$

$$\square_{\square} = 11.33 \square\square\square\square$$

3.6.3.3 Mutual ground (R_m)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระหว่างแท่งกราวด์ และพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง จากบทความข้างต้น

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_T} \left[\ln \left(\frac{2L_T}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_T}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

$$R_m = \frac{100}{(3.14)(21)} \left(\ln \left(\frac{2(21)}{\sqrt{3}} \right) + \frac{(1.37)(21)}{\sqrt{18}} - 5.65 + 1 \right)$$

$$\square_{\square} = 7.23 \square\square\square\square$$

3.6.3.4 Total Ground Resistance (R_T)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานรวมระหว่างสูตรต่างๆ ของค่าความต้านทานข้างต้น ในสูตรนี้จะเป็นการสรุปหาค่าความต้านทานของระบบ

$$R_T = \frac{R_g R_{Rod} - R_m^2}{R_g + R_{Rod} - 2R_m}$$

$$\square_{\square} = \frac{(11.33)(8.67) - 7.23^2}{(11.33) + (8.67) - 2(7.23)}$$

$$\square_{\square} = 8.28 \square\square\square\square$$

3.6.3.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

$$\rho = \text{Soil resistivity } (\Omega\text{-m}) = 100 (\Omega\text{-m})$$

$$LT = \text{Total length of grid's wire (m)} = 21 \text{ m.}$$

$$A = \text{Area (m}^2\text{)} = 18 \text{ m.}$$

$$h = \text{Grid burial depth (m)} = 0.5 \text{ m.}$$

$$k1 = \text{Coefficients of Schwarz's formula} = 1.37$$

$$k2 = \text{Coefficients of Schwarz's formula} = 5.65$$

$$dg = \text{Diameter of grid's conductor (m)} = 0.011 \text{ m. (wire size 95 mm.)}$$

$$n = \text{Number of rod (ea)} = 6$$

$$Lr = \text{Length of each rod (m)} = 3 \text{ m.}$$

$$d = \text{Diameter of each rod (m)} = 0.0142 \text{ m.}$$

เมื่อผู้จัดทำได้ทำการทดลองและแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสูตร สามารถสรุปค่าการคำนวณของสายขนาด 95 ดังแสดงในตารางที่ 3.4

SIZE (mm ²)	95
R_{rod}	8.67
R_g	11.33
R_m	7.23
R_t	8.28

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ความต้านทานต่างๆของการคำนวณของสายขนาด 95

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลศึกษาและเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานในขนาดของสายที่ต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขและลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบไฟฟ้าสายใต้ดินต่อไป โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ผู้ศึกษาทำการทดลองใช้สายขนาดเบอร์ 50, 70 และ 95 ตามลำดับ เพื่อหาค่าความต้านทาน
2. ผู้ศึกษาทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อทำการทดลองหาค่าเฉลี่ย
3. ผู้ศึกษาทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้ง 3 ครั้งโดยวิธีการ ANOVA
4. ผู้ศึกษาได้ทำการเทียบและประมาณค่าใช้จ่ายค่าวัสดุในการติดตั้งของอาคารฯ หนึ่ง

4.1 ผลการทดลอง

จากการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาแทนลงในสูตรการหาค่าความต้านทานในแต่ละสูตรเพื่อหาค่าความต้านทานรวม R_t จำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้ง เพื่อที่จะทำการหาค่าเฉลี่ยได้ค่าดังตารางต่อไปนี้

4.1.1 การทดลองครั้งที่ 1 และผลการทดลอง

ผู้ทดลองได้ทำการทดลอง โดยเริ่มจากขนาดสาย 50, 70 และ 95 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของความต้านทานต่างๆ เพื่อนำไปหาความต้านทานรวม ได้ค่าดังนี้ สายขนาด 50, 70 และ 95 มีค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 8.32, 8.30 และ 8.28 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

SIZE (mm ²)	50	70	95
R_{rod}	8.67	8.67	8.67
R_g	11.57	11.44	11.33
R_m	7.23	7.23	7.23
R_t	<u>8.32</u>	<u>8.30</u>	<u>8.28</u>

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดในครั้งที่ 1

4.1.2 การทดลองครั้งที่ 2 และผลการทดลอง

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองในครั้งที่ 2 ในพื้นที่ใกล้เคียง โดยเริ่มจากขนาดสาย 50, 70 และ 95 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของความต้านทานต่างๆ เพื่อนำไปหาความต้านทานรวม ได้ค่าดังนี้ สายขนาด 50, 70 และ 95 มีค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 9.93, 9.92 และ 9.91 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

SIZE (mm ²)	50	70	95
R_{rod}	10.55	10.55	10.55
R_g	12.25	12.14	12.08
R_m	8.74	8.74	8.74
R_t	<u>9.93</u>	<u>9.92</u>	<u>9.91</u>

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดในครั้งที่ 2

4.1.3 การทดลองครั้งที่ 3 และผลการทดลอง

ผู้ทดลองได้ทำการทดลองในครั้งที่ 3 ในพื้นที่ใกล้เคียง โดยเริ่มจากขนาดสาย 50, 70 และ 95 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของความต้านทานต่างๆ เพื่อนำไปหาความต้านทานรวม ได้ค่าดังนี้ สาย

ขนาด 50, 70 และ 95 มีค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 9.78, 9.76 และ 9.74 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

SIZE (mm ²)	50	70	95
R_{rod}	10.48	10.48	10.48
R_g	12.75	12.62	12.49
R_m	8.33	8.33	8.33
R_t	<u>9.78</u>	<u>9.76</u>	<u>9.74</u>

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณหาความต้านทานของสายแต่ละขนาดในครั้งที่ 3

4.1.4 ค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

ผู้จัดทำได้ทำการทดลองเป็นจำนวน 3 ครั้ง พร้อมทั้งได้หาค่าเฉลี่ยและผลต่างออกมาเพื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความต้านทานดังแสดงในตารางที่ 4.4

SIZE (mm ²)	50	70	95
R_{t1}	8.32	8.30	8.28
R_{t2}	9.93	9.92	9.91
R_{t3}	9.78	9.76	9.74
$R_{t(average)}$	<u>9.34</u>	<u>9.32</u>	<u>9.31</u>
Difference	<u>0.21%</u>	<u>0.17%</u>	<u>0.00%</u>

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและผลต่างความต้านทานของสายแต่ละขนาด

4.2 การเปรียบเทียบโดยวิธีการ ANOVA

ผู้จัดทำได้ทำการเปรียบเทียบผลต่างของค่าความต้านว่าส่งผลมากน้อยเพียงใดและมีความสำคัญหรือไม่ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนและมีตัวแปรทางเดียวคือขนาดสายที่ต่างกัน

4.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1. สมมติฐานทางสถิติ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : มี $\square$ อย่างน้อย 1 คู่ แตกต่างกัน

2. กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ $\square = .05$
3. กำหนดให้ตัวแปร คือขนาดสายที่ต่างกัน
4. คำนวณค่า F มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและผลต่างความต้านทานของสายแต่ละขนาด

SIZE (mm ²)	50	70	95
R_{11}	8.32	8.30	8.28
R_{12}	9.93	9.92	9.91
R_{13}	9.78	9.76	9.74
$\square_{\square}$	3	3	3

ตารางที่ 4.5 แสดงเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและผลต่างความต้านทานของสายแต่ละขนาด

1) คำนวณหาค่า SS_B

$$\text{หา } \square_{\square} ; \square_1 = 8.32 + 9.93 + 9.78 = 28.03$$

$$\square_2 = 8.30 + 9.92 + 9.76 = 27.98$$

$$\square_3 = 8.28 + 9.91 + 9.74 = 27.93$$

$$\text{หา } \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n};$$

$$\frac{\sum_{i=1}^3 x_{1i}^2}{n_1} = \frac{(28.03)^2}{3} = 261.8936$$

$$\frac{\sum_{i=1}^3 x_{2i}^2}{n_2} = \frac{(27.98)^2}{3} = 260.9601$$

$$\frac{\sum_{i=1}^3 x_{3i}^2}{n_3} = \frac{(27.93)^2}{3} = 260.0283$$

$$\text{หา } T = 28.03 + 27.98 + 27.93 = 83.94$$

$$\text{หา } N = 3 + 3 + 3 = 9$$

$$\text{หา } \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} = \frac{(83.94)^2}{9} = 782.8804$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } SS_B &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}{n_i} \right) - \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} \text{ จะได้} \\ &= [261.8936 + 260.9601 + 260.0283] - 782.8804 \\ &= 782.8847 - 782.8804 \\ &= 0.0043 \end{aligned}$$

2) คำนวณหาค่า SS_W

$$\text{หา } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 \text{ แต่ละกลุ่ม}$$

$$\text{กลุ่มที่ 1 } 8.32^2 + 9.93^2 + 9.78^2 = 263.47$$

$$\text{กลุ่มที่ 2 } 8.30^2 + 9.92^2 + 9.76^2 = 262.55$$

$$\text{กลุ่มที่ 3 } 8.28^2 + 9.91^2 + 9.74^2 = 261.63$$

$$\begin{aligned} \text{หา } \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 &= 263.47 + 262.55 + 261.63 \\ &= 787.65 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } SS_W &= \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n_i} \text{ จะได้} \\ &= 787.65 - 782.8804 \\ &= 4.77 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 \text{ จาก } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = SS_B + SS_W \text{ จะได้}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = 0.0043 + 4.77$$

$$= 4.7743$$

$$\text{MSB จาก } SS_B / K - 1 = 0.0043 / (3-1) = 0.0021$$

$$\text{MSW จาก } SS_W / N - K = 4.77 / (9-3) = 0.7950$$

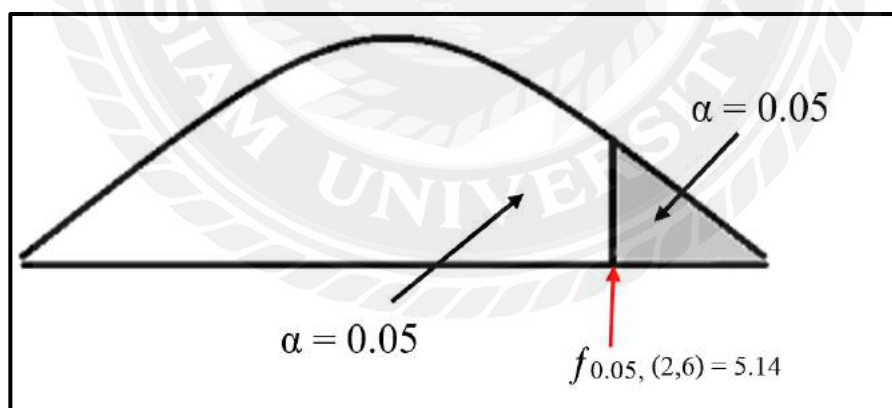
$$\text{ค่า } F \text{ จาก } \text{MSB} / \text{MSW} = 0.0021 / 0.7950 = 0.0026$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในตารางเพื่อหาค่า F ดังแสดงในตารางที่ 4.6

Source of variation	SS	df	MS	F	F(Crit)
Between groups	0.0043	2	0.0021	0.0026	5.1432
Within groups	4.77	6	0.7950		
Total	3.0130	8			

ตารางที่ 4.6 ตารางสรุปผลลัพธ์การหาค่า F – test

รูปที่ 4.1 แสดงระดับค่าวิกฤติของการทดสอบ F – test



รูปที่ 4.1

ระดับค่าวิกฤติของการทดสอบ F – test

- นำค่า F ที่ได้จากการคำนวณ $F = 0.0026$ ไปเทียบกับค่าวิกฤติซึ่งดูจากตารางค่าวิกฤติของ F 5.143 พบว่า $F_{\text{คำนวณ}} < F_{\text{วิกฤติ}}$ ที่ $\alpha = 0.05, 2, 6$ จึงยอมรับ μ_0 และปฏิเสธ μ_1
- ผลจากการทดสอบสรุปได้ว่า การทดลองโดยใช้ขนาดสายที่แตกต่างกัน ไม่มีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการแจกแจงความถี่แบบ F ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

of the F Distribution

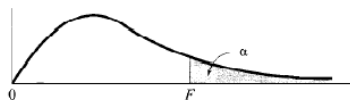


Table 1 $\alpha = 0.05$

		Degrees of Freedom for Numerator																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	
Degrees of Freedom for Denominator	1	161.4	199.5	215.8	224.8	230.0	233.8	236.5	238.6	240.1	242.1	245.7	248.4	248.9	250.5	250.8	252.6	
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.43	19.44	19.46	19.47	19.48	19.48	
	3	10.13	9.35	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.58	
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.44	
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.75	
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.32	
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.02	
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.80	
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.18	
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.08	
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.91		
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.86		
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.82		
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.79		
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.76		
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.66		
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.87	1.79	1.73	1.69	1.64	1.61		

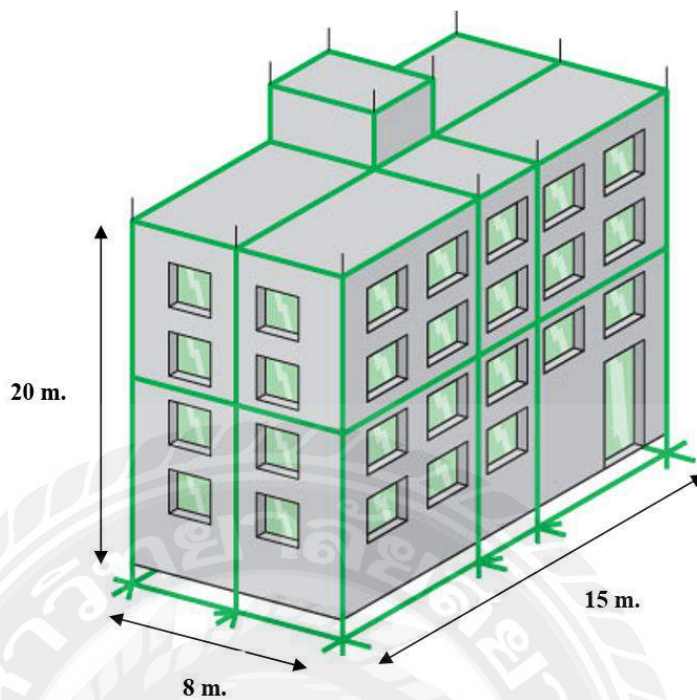
ตารางที่ 4.7 ตารางการแจกแจงความถี่แบบ F ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

4.3 การประมาณการค่าใช้จ่ายของวัสดุในการติดตั้งระบบล่อฟ้าในอาคาร

ผู้จัดทำได้ทำการประมาณการค่าใช้จ่ายของวัสดุในการติดตั้งระบบล่อฟ้าในอาคาร โดยได้ออกแบบและยกตัวอย่างในการติดตั้งในอาคารหนึ่งๆขึ้นมาเพื่อใช้เปรียบเทียบการประมาณค่าใช้จ่ายในขนาดสายที่ต่างกัน

4.3.1 รูปแบบอาคาร

อาคารที่ใช้เป็นอาคารพาณิชย์ที่ใช้เป็นสำนักงานทั่วไปมี 4 ชั้น โดยอาคารมีพื้นที่ขนาด 120 ตารางเมตร และมีความสูง 18 เมตร ซึ่งในการติดตั้งระบบล่อฟ้าของอาคารนี้เป็นในรูปแบบลักษณะผสม คือ วิธีมุงป้องกันและวิธีมุงตาข่ายดักภาพ ซึ่งราคาของวัสดุได้มาจากราคาซื้อขายในท้องตลาดทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะอาคารและการติดตั้งระบบล่อฟ้า



รูปที่ 4.2 ลักษณะอาคารและการติดตั้งระบบล่อฟ้า

4.3.2 วัสดุที่ใช้ในการติดตั้ง

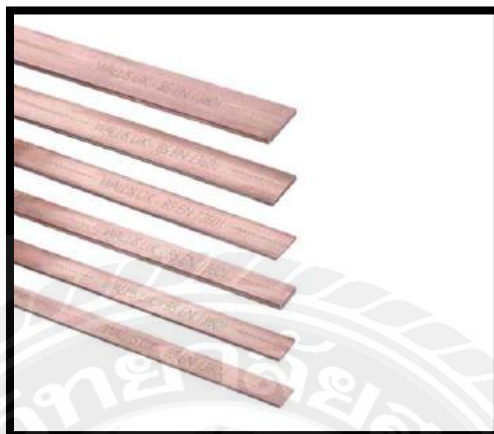
วัสดุหลักที่ใช้ในการติดตั้งระบบล่อฟ้าหลักๆ ได้แก่ สายไฟฟ้าเปลือย แท่งกราวด์ แท่งล่อฟ้า และเทปตัวนำล่อฟ้า

1.แท่งตัวนำล่อฟ้า ผู้จัดทำได้เลือกแท่งตัวนำล่อฟ้าชนิดทองแดง มีขนาดความยาว 1 เมตร มีความหนา 5/8 นิ้ว มีราคาแท่งละ 1,835 บาท (Klangfaifa, 2016)



รูปที่ 4.3 ลักษณะแท่งตัวนำล่อฟ้า (คณะอนุกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

2.เทปตัวนำกระแสไฟฟ้า ผู้จัดทำได้เลือกเทปตัวนำกระแสไฟฟ้ามีขนาด มีขนาด 25x3 มิลลิเมตร มีราคาเมตรละ 550 บาท (Klangfaifa, 2016)



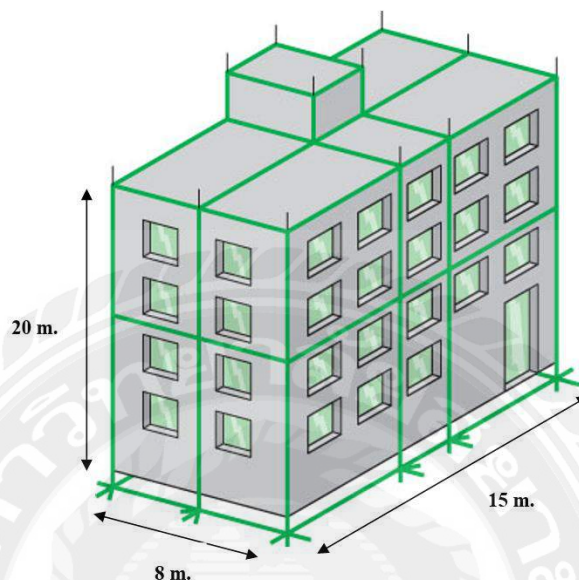
รูปที่ 4.4 เทปตัวนำกระแสไฟฟ้า (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

3.สายไฟเปลือย ผู้จัดทำได้เลือกสายไฟเปลือยทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในดินมี ขนาด มีขนาด 95 ตารางมิลลิเมตร มีราคาเมตรละ 450 บาท และขนาด 50 ตารางมิลลิเมตร มีราคา เมตรละ 229 บาท (Klangfaifa, 2016)



รูปที่ 4.5 สายตัวนำกระแสไฟฟ้าในดิน
(คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4, 2557)

4.3.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายของวัสดุในการติดตั้ง



รูปที่ 4.6 ลักษณะอาคารและการติดตั้งระบบล่อฟ้าที่ใช้คำนวณ

1. แท่งตัวนำล่อฟ้า ในการออกแบบของอาคารแห่งนี้มีจำนวนแท่งตัวนำล่อฟ้าทั้งหมด 12 แท่ง มีราคาแท่งละ 1,835 บาท รวมเป็นเท่ากับ **22,020 บาท**
2. เทปตัวนำกระแสไฟฟ้า ในการออกแบบของอาคารแห่งนี้มีจำนวนความยาวของเทปตัวนำล่อฟ้าทั้งหมด 84 เมตร มีราคาเมตรละ 550 บาท รวมเป็นเท่ากับ 46,200 บาท
3. แท่งกราวด์ไต้ดิน ในการออกแบบของอาคารแห่งนี้มีจำนวนแท่งกราวด์ตัวนำในดินทั้งหมด 30 แท่ง มีราคาแท่งละ 2,450 บาท รวมเป็นเท่ากับ **73,500 บาท**
4. สายไฟเปลือย ในการออกแบบของอาคารแห่งนี้ในการคำนวณหาความยาวของสายไฟเปลือยถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน
 1. สายไฟเปลือยที่อยู่ในอาคารเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากหลังคาสู่ระบบกราวด์ไต้ดิน มีจำนวนรวมกันทั้งหมด 250 เมตร
 2. สายไฟเปลือยที่อยู่ระบบกราวด์ไต้ดินรวมถึงกราวด์ลูปรอบ ๆ อาคารมีจำนวนรวมกันทั้งหมด 120 เมตร

3. สายไฟรวมจากสองส่วนทั้งหมด คือ 270 เมตร และมีราคาเมตรละ 450 บาท ของสายไฟเบอร์ 95 ซึ่งรวมเป็นเงินทั้งสิ้น **121,500 บาท**
4. สายไฟรวมจากสองส่วนทั้งหมด คือ 270 เมตร และมีราคาเมตรละ 229 บาท ของสายไฟเบอร์ 50 ซึ่งรวมเป็นเงินทั้งสิ้น **61,830 บาท**
5. ค่าใช้จ่ายของวัสดุทั้งหมด เมื่อรวมค่าใช้จ่ายของวัสดุในการติดตั้งระบบล่อฟ้าของอาคารแห่งนี้ของสายขนาด 95 เท่ากับ $46,200 + 73,500 + 121,500 = 241,200$ บาท
หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายดังกล่าว ไม่ได้รวมค่าแรงกับค่าอุปกรณ์เบ็ดเตล็ดต่างๆ
6. การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเมื่อเปลี่ยนจากสายขนาดเบอร์ 95 เป็นเบอร์ 50 เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดสายจะได้ค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ $46,200 + 73,500 + 61,830 = 181,530$ บาท
7. ผลต่างของราคาของการเปลี่ยนขนาดสาย จากขนาดสาย 95 เป็น 50 เท่ากับ **59,670 บาท**

4.3.5 สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการติดตั้งระบบกราวด์และล่อฟ้าของอาคารนี้เมื่อเปลี่ยนจากสายขนาดเบอร์ 95 เป็นเบอร์ 50 เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดสายจะได้ค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 181,530 บาท ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายเดิมของวัสดุของสายขนาดเบอร์ 95 ซึ่งเท่ากับ 241,200 บาท เปรียบเทียบเป็นผลต่างของราคาเท่ากับ 59,670 บาท และคิดเป็นร้อยละของราคาที่ลดลงเท่ากับ 24.7

หมายเหตุ : ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการวัดค่าและคำนวณจากพื้นที่ที่หน้างานจริง หากค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าสูงและยังไม่ได้ตามค่าที่ได้รับการออกแบบไว้ อาจจำเป็นต้องเพิ่มขนาดสาย หรือต่อจำนวนลูปสายกราวด์เพื่อลดค่าความต้านทานรวมลง ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นได้

4.4 ผลการวิจัยและอภิปราย

จากตารางที่ 1, 2, และ 3 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานของสายแต่ละขนาดที่ R_{rod} และ R_m มีค่าเท่ากันในทุกขนาดสาย แต่ที่ค่า R_g มีค่าต่างกัน เนื่องจากตัวแปรคือความต่างของขนาดสายซึ่งอยู่ในสูตรในการคำนวณในการหาค่าของ R_g จึงส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีความแตกต่างกัน ในการทดลองนี้ผู้จัดทำได้ทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองครั้งที่ 1 ได้ค่าความต้านทานรวม(R_g) ดังนี้ สายขนาด 50, 70 และ 95 มม² เท่ากับ 8.32, 8.30 และ 8.28 โอห์ม ในการทดลองครั้งที่ 2 ได้ค่าความต้านทานรวม เท่ากับ 9.93, 9.92 และ 9.91 โอห์ม และในการทดลองครั้งที่ 3 ได้ค่าความต้านทานรวม เท่ากับ 9.78, 9.76 และ 9.74 โอห์ม และผู้จัดทำได้นำค่าความต้านทานรวมทั้ง 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความต้านทานรวมในการทดลอง ของสายขนาด 50, 70 และ 95 มม² ได้เท่ากับ 9.34, 9.32 และ 9.31 ตามลำดับ เพื่อหาค่าความแตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับสายขนาดเบอร์ 95 เมื่อเทียบกับขนาดสายเบอร์ 70 มีความแตกต่างร้อยละ 0.17 และเมื่อเทียบกับขนาดสายเบอร์ 50 มีความแตกต่างร้อยละ 0.21 และหลังจากที่ได้ใช้วิธีการ ANOVA ในการคำนวณ ทำให้ทราบว่าค่า F ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 0.0026 มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤติที่ 5.14 ไม่อยู่ในช่วงค่าวิกฤติจึงสามารถสรุปได้ว่าการทดลองนี้ ความแตกต่างของขนาดสายไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานอย่างมีนัยสำคัญ

และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมของค่าวัสดุในการติดตั้งระบบกราวด์ล่อฟ้า โดยการออกแบบอาคารหนึ่งขึ้นมาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ที่การเลือกใช้งานการติดตั้งระบบล่อฟ้าและเลือกใช้สายไฟเปลี่ยนขนาดเบอร์ 95 มีค่าใช้จ่ายวัสดุทั้งหมด 241,200 บาท และเมื่อทำการเปลี่ยนเป็นขนาดสายเบอร์ 50 มีค่าใช้จ่ายวัสดุทั้งหมด 181,530 บาท เปรียบเทียบเป็นผลต่างของราคา 59,670 บาท และคิดเป็นร้อยละของราคาที่ลดลงเท่ากับ 24.7

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดหลังจากที่ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบ ค่าความต้านทานของระบบความต้านทานในดิน ของขนาดสายที่ต่างกัน ได้ผลสรุปออกมาดังต่อไปนี้

1. สรุปผลการวิจัย
2. ปัญหาและอุปสรรค
3. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาและการวัดผลการดำเนินงานของการวัดค่าความต้านทานรวมของแต่ละขนาดของสายไฟฟ้า สามารถสรุปว่า ค่าความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบสายขนาดเบอร์ 95 เมื่อเทียบกับขนาดสายเบอร์ 70 มีความแตกต่างร้อยละ 0.17 และเมื่อเทียบกับขนาดสายเบอร์ 50 มีความแตกต่างร้อยละ 0.21 และหลังจากที่ได้ใช้วิธีการ ANOVA ในการเปรียบเทียบความต้านทานจากสายทั้ง 3 ขนาด พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสายตัวนำในดินขนาดต่ำสุดที่เบอร์ 50 ที่สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยสามารถยอมรับให้ใช้งานได้นำมาใช้ในการทำระบบความต้านทานรวมของอาคารหรือสถานที่ต่างๆ สามารถทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของวัสดุให้ลดลงที่ร้อยละ 49 ได้อีกด้วย (คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3, 2553)

แนวทางการลดความผิดพลาด จัดให้มีการออกสำรวจสภาพดินพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง ก่อนที่จะทำการติดตั้งระบบความต้านทานดิน และวางแผนทางการแก้ไขการทำงานร่วมกันของหน่วยงานออกแบบ และหน่วยงาน และนำผลจากการดำเนินการประชุม มาสรุปทำความเข้าใจและลงมือปฏิบัติเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ และการประหยัดค่าใช้จ่าย สามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

1. ทำให้สามารถวิเคราะห์และรับรู้สาเหตุปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานรวม มีความแตกต่างกัน
2. ทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงการหาแนวทางในการพัฒนาระบบความต้านทานในระบบไฟฟ้าต่อไป
3. ทำให้สามารถวิเคราะห์ถึงการหาแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบความต้านทานในดิน

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการศึกษาพบปัญหาและอุปสรรคดังนี้

1. ในแต่ละสภาพพื้นที่การทดลอง ในการทดลองหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานรวมของระบบ
2. ในบางพื้นที่ ที่สภาพดินส่งผลให้ค่าความต้านทานไม่ได้ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องหาวิธีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่ต้องการ ซึ่งอาจส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม
3. ขนาดของสายไฟเปลือยและแท่งกรวดตัวนำเป็นปัจจัยหลักในการส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบดิน

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการติดตั้งระบบความต้านทานดิน สภาพพื้นที่ดินที่ทำการติดตั้งเป็นปัจจัยสำคัญในการหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์นั้นๆ ผู้ทำการติดตั้งต้องทำการสำรวจพื้นที่หน้าดินนั้นๆ ว่าเหมาะสมหรือไม่ เพื่อที่จะทำการติดตั้งระบบกราวด์และให้ได้ค่าความต้านทานที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายให้ได้มากที่สุด เพื่อไม่ให้เป็นการใช้วัสดุที่เกินความจำเป็น ในปัจจุบันในการติดตั้งระบบสายกราวด์ ค่าความต้านทานรวมที่ยอมรับได้โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ต้องไม่เกินกว่า 5 โอห์ม จึงจะมีความเสถียรภาพของการใช้งาน ซึ่งเมื่อทำการติดตั้งแล้วหากค่าที่ได้ยังสูงกว่า ผู้ทำการติดตั้งจำเป็นต้องเพิ่มการติดตั้งระบบกราวด์ในระบบ จึงจะทำให้ค่าความต้านทานที่ได้ต่ำลงอีก (คณะอนุกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3, 2553) ทั้งนี้งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดสายเท่านั้น การเลือกใช้ขนาดสายตัวนำนั้น ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกด้วย

บรรณานุกรม

คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 3. (2553). *มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาค*

ที่ 3 ความเสียหายทางกายภาพต่อสิ่งปลูกสร้างและอันตรายต่อชีวิต. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาคที่ 4. (2557). *มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าภาค*

ที่ 4 ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ภายในสิ่งปลูกสร้าง. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

ประดิษฐ์ เพื่องฟู. (2557). *การคำนวณของความต้านทานรื้อดในดินเนื้อเดียว*. เข้าถึงได้จาก

https://www.peac2eng.com/wp-content/uploads/2014/07/ground_new.pdf

พ้องอำไพ. (2559). *การวิเคราะห์ความแปรปรวน*. เข้าถึงได้จาก

<http://www.norththonburi.com/attachments/article/77>

พลุก. (2556). *ความต้านทานการลงกราวด์*. เข้าถึงได้จาก [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902776_THA_A_W.PDF)

[public/9902776_THA_A_W.PDF](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902776_THA_A_W.PDF) (บทความ7)

หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน. (2551). *ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า*. เข้าถึงได้จาก

<http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/phenomenon/thunder>

Klangfaifa. (2016). *Bare copper price list*. Retrieved from

<https://www.klangfaifa.com/Cable-Thaiyazaki-Phelpsdodge/Barecopper.html>

OPEN ELECTRICAL. (2017). *Earthing calculation*. Retrieved from

https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Earthing_Calculation. (บทความ6)

ภาคผนวก

IEC02 THW (f) : 450/750 70°C Flexible conductor PVC insulated, Single core TIS 11 Part 3-2553

สายอ่อนชนิดขดลวดหุ้มด้วยฉนวน ตามมาตรฐาน มอก. 11 3--2553



การติดตั้ง THW(f)

• เดินในช่องเดินสาย และต้องป้องกันน้ำเข้าช่องเดินสาย

Flexible 300/500 70°C IEC 06 IV Cable 0.5-1 Sqmm.

Flexible 450/750 70°C 60227 IEC 02 THW (f) Cable 1.5-2.5 Sqmm.

600V-KV Flexible 450/750 70°C 60227 IEC 02 THW (f) Cable 4-35 Sqmm.

Number of Core จำนวนแกน	Cross Section พื้นที่หน้าตัด (ตร.มม.)	Thaiya, Phelpsodge, MCI-draaka,BCC,CTW	ยี่ห้อ Fuhrer
		Price (THB/Meter) ราคา (บาทต่อเมตร)	
1 C 300V	0.5	4.90	3.18
	0.75	6.00	3.94
	1	7.30	4.76
	1.5	9.50	6.20
	2.5	14.40	9.40
1 C 600V	4	21.58	17.30
	6	37.30	27.00
	10	59.76	43.60
	16	85.69	67.50
	25	129.91	99.70
	35	-	149.00
	50	-	210.00

THW-A : 750V 70°C PVC insulated Aluminum Conductor Single Core

BARE COPPER :Hard Drawn Copper Stranded Conductor.

การติดตั้ง Bare Copper

• เดินลอยในอากาศ
• สึงดินโดยตรง

Cross Section พื้นที่หน้าตัด(ตร.มม.)	THW-A Price (THB/Meter)			Bare Copper Price (THB/Meter)
6	THAIYAZAKI	BCC	FUHRER	30.00
10	13.5	9.08	9.08	49.30
16	18	12.32	12.32	76.50
25	25	18.17	18.17	120.00
35	33	23.48	23.48	170.50
50	44	31.64	31.64	229.20
70	66	49.66	49.66	327.70
95	86	64.88	64.88	451.50
120	112	79.33	79.33	572.00
150	135	96.46	96.46	700.00
185	199	120.06	120.06	879.00
240	268	157.03	157.03	1,153.00
300	330	192.08	192.08	1,445.00
400	-	-	-	1,850.00
500	-	-	-	2,395.00

(Klangfaifa, 2016)

ราคาสายทองแดงเปลือย	(ราคา/เมตร)
สายทองแดงเปลือย 16 sqmm.	76.50
สายทองแดงเปลือย 25 sqmm.	120.00
สายทองแดงเปลือย 35 sqmm.	170.50
สายทองแดงเปลือย 50 sqmm.	229.20
สายทองแดงเปลือย 70 sqmm.	327.70
สายทองแดงเปลือย 95 sqmm.	451.50
สายทองแดงเปลือย 120 sqmm.	572.00
สายทองแดงเปลือย 150 sqmm.	700.00
สายทองแดงเปลือย 185 sqmm.	879.00
สายทองแดงเปลือย 240 sqmm.	1,153.00
สายทองแดงเปลือย 300 sqmm.	1,445.00
สายทองแดงเปลือย 400 sqmm.	1,850.00
สายทองแดงเปลือย 500 sqmm.	2,395.00

(Klangfaifa, 2016)

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ	นายโกมล มะแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	4 เมษายน 2534
สถานที่เกิด	47 ซ.ร่วมพัฒนา ถ.กลางเมือง อ.เมือง จ.นครพนม 48000
โทรศัพท์	085-4556879
อีเมลล์	Komon.mak@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	- กำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม (Engineering Management) มหาวิทยาลัยสยาม - สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี - สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย - สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้น โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย
สถานที่ทำงาน	บริษัท Denso international Asia Co., Ltd. 888 หมู่ 1 ตำบลบางบ่อ, ถนนบางนา-ตราด กม. 27.5, อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ, 10560 ตำบล บางบ่อ อำเภอบางบ่อ สมุทรปราการ 10560
ตำแหน่ง	Car innovation & safety engineering