

การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลัง  
เพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า

AN OPTIMIZATION OF STRENGTHENING POSITION TO AVOID  
PROGRESSIVE FAILURE IN UTILITY POLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-093-008

การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลัง  
เพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า

AN OPTIMIZATION OF STRENGTHENING POSITION TO AVOID  
PROGRESSIVE FAILURE IN UTILITY POLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-093-008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN OPTIMIZATION OF STRENGTHENING POSITION TO AVOID  
PROGRESSIVE FAILURE IN UTILITY POLES

TANISORN SATHAPORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-EN-M-093-008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า
นักศึกษา	นายธนีสร สถาพร
รหัสประจำตัว	59601279
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร

### บทคัดย่อ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเกิดเหตุการณ์เสาไฟฟ้าหักโค่นเป็นจำนวนมากซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากรถชนเสาไฟฟ้า รถเกี่ยวสายไฟฟ้าหรือสายสื่อสาร และต้นไม้ล้มทับเสาและสายไฟฟ้า ส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ทำให้ประชาชนผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับความเดือดร้อนไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นระยะเวลาานาน และเกิดอันตรายต่อประชาชนทั่วไปจากเสาสายไฟฟ้าที่หักโค่น จึงนำมาสู่การศึกษาแนวทางการป้องกันเสาไฟฟ้าหักโค่น โดยจะมุ่งเน้นศึกษาวิธีที่จะลดผลกระทบจากการหักโค่นล้มของเสาไฟฟ้าให้น้อยลงที่สุด โดยมีแนวคิดในการกำหนดตำแหน่งของจุดที่เกิดการหักบนเสาไฟฟ้าให้สูงกว่าการหักโค่นที่ระดับพื้นดินจะสามารถช่วยลดแรงที่กระทำต่อเสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ เมื่อเสาไฟฟ้าต้นที่เกิดอุบัติเหตุหักโค่นลง และส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นที่อยู่ข้างๆทั้ง 2 ด้าน เสาไฟฟ้าทั้ง 2 ต้น จะได้รับแรงกระทำ และหักที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ด้วยการเสริมกำลัง จะสามารถช่วยลดการหักโค่นไปสู่เสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ ด้วยหลักการนี้จึงนำไปสู่การสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองขึ้นจากแบบของเสาไฟฟ้า เพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น และหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเสริมกำลัง โดยจากผลการวิเคราะห์ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการเสริมกำลังอยู่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณจากโคนเสา

<b>Thesis</b>	An Optimization of Strengthening Position to Avoid Progressive Failure in Utility Poles.
<b>Student</b>	Mr.Tanisorn Sathaporn
<b>Student ID.</b>	59601279
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Arthit Phetchsasithon

## ABSTRACT

In the past several years, a large number of electrical poles have been failed. Most of the failure caused by a car crash, electrical cables or communication cables pulled by a truck and falling tree over electrical poles and cables. As a result, affection on a wide area of people suffer from lack of electricity for a long period of time and danger from electrical poles fall over and the electric leakage. The study was approached to prevent the electrical poles failure. The study was focused on reducing the impact of electrical poles failure. The concepts were determined to locate the breaking point on electrical poles to be higher than the ground level which could reduce force which transfers to the next adjacent electrical poles. When the electrical poles fell and transferring the force to the next adjacent electrical poles on both side. Both electrical poles were loaded and failed at the fixed point by using reinforcement and It should stop the failure of the next electrical poles. This principle led to simulate the electrical poles structure models by the finite element method and comparing the analysis from the finite element method with the hypothesis and optimized reinforcement position. The results revealed that the optimize reinforcement position was observed be about 50 percent of the pole height from the bottom level of the pole.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะฯ ข้อคิดเห็นต่างๆ ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้ และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ดร.อภิวุฒิย์ สุจริตพงศ์ ที่ได้ให้แนวคิด คำชี้แนะ ช่วยเหลือในการให้ข้อมูลในดำเนินการวิจัย และพาไปดูการผลิตเสาไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

ขอขอบคุณครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจเสมอมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา



ธนีสร สถาพร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 แนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย.....	1
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การศึกษากลไกการเอียงของเสาไฟฟ้าต้นเดียวผ่านการทดสอบภาคสนาม.....	3
2.1.1 รายละเอียดการทดลอง.....	4
2.1.2 การใส่แรงกระทำ และอุปกรณ์.....	8
2.1.3 ผลการทดลอง.....	10
2.1.4 สรุปผลการทดลอง.....	11
2.2 ประสิทธิภาพของโครงสร้างเสาคอนกรีตที่ใช้ในการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย.....	13
2.2.1 รายละเอียดการทดลอง.....	14
2.2.2 การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์.....	17
2.2.2.1 พฤติกรรมของวัสดุ.....	18
2.2.2.2 การสร้างแบบจำลองเสาคอนกรีต.....	19
2.2.2.3 การตรวจสอบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีต.....	21
2.2.2.4 การสร้างแบบจำลองสายจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย.....	23
2.2.2.5 การศึกษาตัวแปรของจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย.....	25
2.2.2.6 การวิเคราะห์แบบผลึกของจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย.....	28
2.2.3 ข้อสรุป.....	30
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	31
3.1 แนวคิดในการหาตำแหน่งของจุดที่เกิดการหักบนเสาไฟฟ้า.....	31
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
3.2.1 มาตรฐานในการติดตั้งเสาไฟฟ้า.....	32
3.2.2 ข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า.....	35

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ .....	35
3.2.4 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า .....	36
3.2.5 แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าเมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง.....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	43
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW.....	45
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. 5 T-m.....	46
4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.35 m. 6.5 T-m.....	47
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 18 T-m.....	48
4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 25 T-m.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	51
เอกสารอ้างอิง .....	52
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	101

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดแบบเสาคอนกรีตอัดแรง .....	5
2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของดิน .....	6
2.3 ผลสรุปของค่าที่วัดได้จากการทดลอง .....	10
2.4 แรงกระทำเนื่องจากสภาพอากาศ.....	13
2.5 ลักษณะเฉพาะของเสาคอนกรีต.....	13
2.6 กำลังระบบแรงต้านของเสา 12 เมตร.....	17
2.7 ผลการทดสอบแรงต้านข้าง.....	17
2.8 ลักษณะเฉพาะของเหล็กเสริมแนวยาวและแนวขวาง .....	19
2.9 คุณสมบัติเชิงกลของตัวนำไฟฟ้า โดย Yang และคณะ .....	24
2.10 การเคลื่อนตัวสูงสุดของการระบบจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายภายใต้สภาพอากาศเลวร้าย .....	27
3.1 รายละเอียดแบบมาตรฐานการก่อสร้างการก่อสร้างเสาไฟฟ้า .....	33
3.2 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 12.00 m. GW มีระยะปักลงไปในดิน 1.75 เมตร .....	37
3.3 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 12.00 m. 5 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 1.75 เมตร.....	37
3.4 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 12.35 m. 6.5 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 2.10 เมตร.....	38
3.5 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 22.00 m. 18 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 2.00 เมตร.....	38
3.6 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 22.00 m. 25 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 2.00 เมตร.....	39
ข.1 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร จากโคนเสา.....	58
ข.2 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา.....	59
ข.3 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 3.00 เมตร จากโคนเสา.....	61
ข.4 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา.....	62
ข.5 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 5.00 เมตร จากโคนเสา.....	63
ข.6 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา.....	64
ข.7 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 7.00 เมตร จากโคนเสา.....	65
ข.8 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา.....	66
ข.9 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 9.00 เมตร จากโคนเสา.....	66
ข.10 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร จากโคนเสา.....	67
ข.11 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา.....	68
ข.12 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 3.00 เมตร จากโคนเสา.....	70
ข.13 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา.....	71
ข.14 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 5.00 เมตร จากโคนเสา.....	72
ข.15 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา.....	73
ข.16 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 7.00 เมตร จากโคนเสา.....	74
ข.17 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา.....	75
ข.18 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 9.00 เมตร จากโคนเสา.....	75

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.19 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 2.10 เมตร จากโคนเสา.....	76
ข.20 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 3.00 เมตร จากโคนเสา .....	77
ข.21 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา .....	78
ข.22 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 5.00 เมตร จากโคนเสา .....	80
ข.23 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา .....	81
ข.24 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 7.00 เมตร จากโคนเสา .....	82
ข.25 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา .....	83
ข.26 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 9.00 เมตร จากโคนเสา.....	83
ข.27 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา.....	84
ข.28 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา.....	85
ข.29 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา.....	87
ข.30 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา.....	88
ข.31 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 10.00 เมตร จากโคนเสา.....	89
ข.32 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 12.00 เมตร จากโคนเสา.....	90
ข.33 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 14.00 เมตร จากโคนเสา.....	90
ข.34 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 16.00 เมตร จากโคนเสา.....	91
ข.35 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 18.00 เมตร จากโคนเสา.....	92
ข.36 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 20.00 เมตร จากโคนเสา.....	92
ข.37 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา.....	92
ข.38 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา.....	94
ข.39 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา.....	95
ข.40 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา.....	96
ข.41 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 10.00 เมตร จากโคนเสา.....	97
ข.42 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 12.00 เมตร จากโคนเสา.....	98
ข.43 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 14.00 เมตร จากโคนเสา.....	99
ข.44 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 16.00 เมตร จากโคนเสา.....	99
ข.45 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 18.00 เมตร จากโคนเสา.....	100
ข.46 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 20.00 เมตร จากโคนเสา.....	100

# สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการเอียงของเสาไฟฟ้า .....	3
2.2 รายละเอียดของการติดตั้งการทดสอบ .....	4
2.3 รายละเอียดของเสาคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา(หน่วยมิลลิเมตร;ไม่ได้สเกล).....	5
2.4 (ก.) การเตรียมหลุมดิน (ข.) การทดสอบหาความหนาแน่นของดิน (ค.) การตั้งเสา (ง.) โครงเหล็กรับแรง (จ.) การติดตั้งที่สมบูรณ์ .....	6
2.5 (ก.) กลไกการใส่แรงกระทำ (ข.) อุปกรณ์วัดค่าแรง (ค.) มิเตอร์วัดแรงดึง (ง.) ระบบเก็บ ข้อมูล .....	7
2.6 การประมาณค่าจุดครากของการเสียรูปและแรงจากการทดลอง.....	8
2.7 การผลการทดลองระหว่างแรงและการเสียรูป (ก.) เสาต้นที่1 (ข.) เสาต้นที่2 (ค.) เสาต้นที่3 ..	9
2.8 (ก.) การเสียรูปหลังจากการทดลอง (ข.) รอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นบนเสา (ค.) รอยร้าวที่ เกิดขึ้นบริเวณฐานราก (ง.) ช่องว่างระหว่างเสากับดิน.....	11
2.9 การจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย .....	13
2.10 การพังของเสาคอนกรีตเนื่องจากแรงลม และหิมะ.....	14
2.11 รายละเอียดเสา 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง .....	15
2.12 รูปแบบการจัดเรียงของเสา .....	15
2.13 รายละเอียดของแขน และลูกถ้วย.....	16
2.14 รูปแบบของแท่นที่ใช้ในการทดสอบเสาคอนกรีต .....	16
2.15 แท่นทดสอบเสา .....	17
2.16 ความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีต.....	18
2.17 ความเค้นและความเครียดดึงของคอนกรีต .....	18
2.18 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาสูง 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง โดยทั่วไป .....	19
2.19 เหล็กเสริมทั้งแนวยาวและแนวขวางในคอนกรีต .....	20
2.20 ขนาดของเอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตขนาดต่างๆ (ก.) เอลิเมนต์แบบละเอียด (0.05 เมตร) (ข.) เอลิเมนต์แบบปานกลาง (0.1 เมตร) (ค.) เอลิเมนต์แบบหยาบ (0.15 เมตร).....	20
2.21 แรงและการเคลื่อนตัวเนื่องจากขนาดของเอลิเมนต์.....	21
2.22 การสร้างแบบจำลองเสาคอนกรีต.....	22
2.23 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบจริงกับแบบจำลองเชิงตัวเลขในกราฟแรง และการเคลื่อน ตัว ของเสาคอนกรีตสูง 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง.....	22
2.24 ความเสียหายเนื่องจากแรง 400, 600 และ 1200 กิโลกรัมแรง.....	23
2.25 ความเค้นในเหล็กเสริม (Pa).....	23
2.26 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สายไฟฟ้า นำเสนอโดย Yang และคณะ.....	24
2.27 การกระจายตัวของแรงดึงตัวนำไฟฟ้า (N) โดย Yang และคณะ .....	24
2.28 การกระจายตัวของแรงดึงตัวนำไฟฟ้า (N) .....	24
2.29 รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย .....	25
2.30 สายที่ปกคลุมด้วยน้ำแข็ง.....	26
2.31 แรงกระทำต่อหนึ่งช่วงเสาของการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย .....	26

## สารบัญรูปรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 แผนภาพการเคลื่อนตัวภายใต้แรงลมและน้ำแข็งแบบปานกลาง.....	27
2.33 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวแบบแรงไม่สมดุลของน้ำแข็งและแรงสมดุลของลม.....	27
2.34 ตำแหน่งความเสียหายและข้อหมุนพลาสติกในระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย.....	28
2.35 ลูกถ้วยที่มีกลไกการแตกหักแบบยึดหยุ่น.....	29
2.36 ลูกถ้วยที่มีกลไกการแตกหักแบบเปราะ.....	29
3.1 ภาพจำลองเหตุการณ์เมื่อเสาไฟฟ้าหักโค่น.....	31
3.2 ตัวอย่างแบบมาตรฐานเสาไฟฟ้าคอนกรีต.....	34
3.3 (ก.) แบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้าความสูง 12.00 m. (ข.) เหล็กเสริมภายในโครงสร้าง เสาไฟฟ้า.....	35
3.4 ภาพการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง.....	36
3.5 ภาพแสดงการเกิดมุมแนวราบและแนวตั้งเมื่อเกิดเสาไฟฟ้าหักที่ตำแหน่งเสริมกำลัง.....	39
3.6 ตัวอย่างการใส่แรงกระทำเนื่องจากแรงดึง และแรงกระทำที่จำลองการอัดของลวดอัดแรงบน แบบจำลองเสาไฟฟ้า.....	41
4.1 (ก.) ตัวอย่างการเกิด Stress บนแบบจำลองเสาไฟฟ้า (ข.) ตัวอย่างแบบจำลองเสาไฟฟ้าที่ แสดงให้เห็นจุดที่ Safety factor ต่ำสุด.....	45
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW.....	46
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. 5 T-m. ....	47
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 12.35 m. 6.5 T-m. ....	48
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 18 T-m. ....	49
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 25 T-m. ....	50
ก.1 แบบแสดง EP. 12.00 M. GW.....	53
ก.2 แบบแสดง EP. 12.00 M. 5 T-M. เสริมเหล็ก DB.....	54
ก.3 แบบแสดง EP. 12.35 M. 6.5 T-M. ....	55
ก.4 แบบแสดง EP. 22.00 M. 18 T-M. ....	56
ก.5 แบบแสดง EP. 22.00 M. 25 T-M. ....	57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประสบปัญหาจากปัจจัยภายนอกมากระทำกับเสาและสายไฟฟ้าของ กฟน. เป็นเหตุให้เสาไฟฟ้าหักโค่นล้มเป็นจำนวนหลายต้นต่อเหตุการณ์ โดยพบว่าปัจจัยภายนอกที่มากระทำส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากรถชนเสาไฟฟ้า รถเกี่ยวสายไฟฟ้าหรือสายสื่อสาร และต้นไม้ล้มทับเสาและสายไฟฟ้า ส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟน. ได้รับความเดือดร้อนไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นระยะเวลาานาน และเกิดอันตรายต่อประชาชนทั่วไปจากเสาและสายไฟฟ้าที่หักโค่น

กฟน. จึงต้องการจัดทำโครงการศึกษาแนวทางการป้องกันเสาไฟฟ้าหักโค่นล้ม เพื่อควบคุมและลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่เสียหาย เพื่อให้สามารถซ่อมแซมแก้ไขกลับมาใช้งานได้ภายในระยะเวลาไม่นาน และลดความเดือดร้อนของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ และเนื่องจากจำนวนเหตุการณ์เสาหักโค่นล้มมีจำนวนมาก โครงการฯจึงมุ่งเน้นการป้องกันเหตุการณ์ที่เป็นเหตุทำให้เสาไฟฟ้าหักโค่นล้มพร้อมกันหลายต้น จึงนำไปสู่งานวิจัยนี้ งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาวิธีที่จะลดผลกระทบจากการหักโค่นล้มของเสาไฟฟ้าให้น้อยลงที่สุด

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาไฟฟ้าเนื่องจากแรงกระทำจากการล้มของเสาไฟฟ้าต้นข้างเคียง
2. เพื่อหาความสูงของจุดหักบนเสาไฟฟ้าที่จะทำให้เสาไฟฟ้าต้นข้างเคียงไม่ได้รับผลกระทบหรือได้รับผลกระทบน้อยลงมากที่สุด

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

มีระยะความสูงจากพื้นของจุดหักบนเสาไฟฟ้าระยะหนึ่ง ที่ส่งผลให้เกิดแรงกระทำต่อเสาไฟฟ้าลดน้อยลงจนสามารถทำให้เสาไฟฟ้าต้นถัดไปไม่หักโค่นล้ม

### 1.4 แนวคิดที่ใช้ในการทำวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างของเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการเสริมกำลังเพื่อที่จะช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า โดยมีแนวคิดในการกำหนดตำแหน่งของจุดที่เกิดการหักบนเสาไฟฟ้าให้สูงกว่าการหักโค่นที่ระดับพื้นดินจะสามารถช่วยลดแรงที่กระทำต่อเสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ เมื่อเสาไฟฟ้าต้นที่เกิดอุบัติเหตุหักโค่นลง และส่งแรงไปถึงเสาไฟฟ้าต้นที่อยู่ข้างๆทั้ง 2 ด้าน เสาไฟฟ้าทั้ง 2 ต้น จะที่ได้รับแรงกระทำ และหักที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ด้วยการเสริมกำลัง จะสามารถช่วยลดการหักโค่นไปสู่เสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ ด้วยหลักการนี้จึงนำไปสู่การสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองขึ้นจากแบบของเสาไฟฟ้า เพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมมุติฐานที่ตั้งขึ้น และหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเสริมกำลัง

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. เสไฟฟ้าคอนกรีตในระบบ 12/24 kV ความสูง 12, 12.35 เมตร
2. เสไฟฟ้าคอนกรีตในระบบ 69/115 kV ความสูง 22 เมตร

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาแบบเสไฟฟ้าคอนกรีต และแรงที่มากระทำกับเสไฟฟ้า
2. สร้างแบบจำลองเสไฟฟ้าในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์
3. จำลองการเกิดแรงกระทำกับแบบจำลองเสไฟฟ้าในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ออกแบบเสไฟฟ้าจากข้อมูลที่ได้การจำลองในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากเสไฟฟ้าหักโค่นล้ม
2. เป็นแนวทางในการป้องกันและลดจำนวนเสไฟฟ้าหักโค่นล้ม
3. สามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการออกแบบการเสริมกำลังเพื่อป้องกันและลดจำนวนเสไฟฟ้าหักโค่นล้ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การศึกษาผลกระทบเชิงของเสาไฟฟ้าต้นเดียวผ่านการทดสอบภาคสนาม

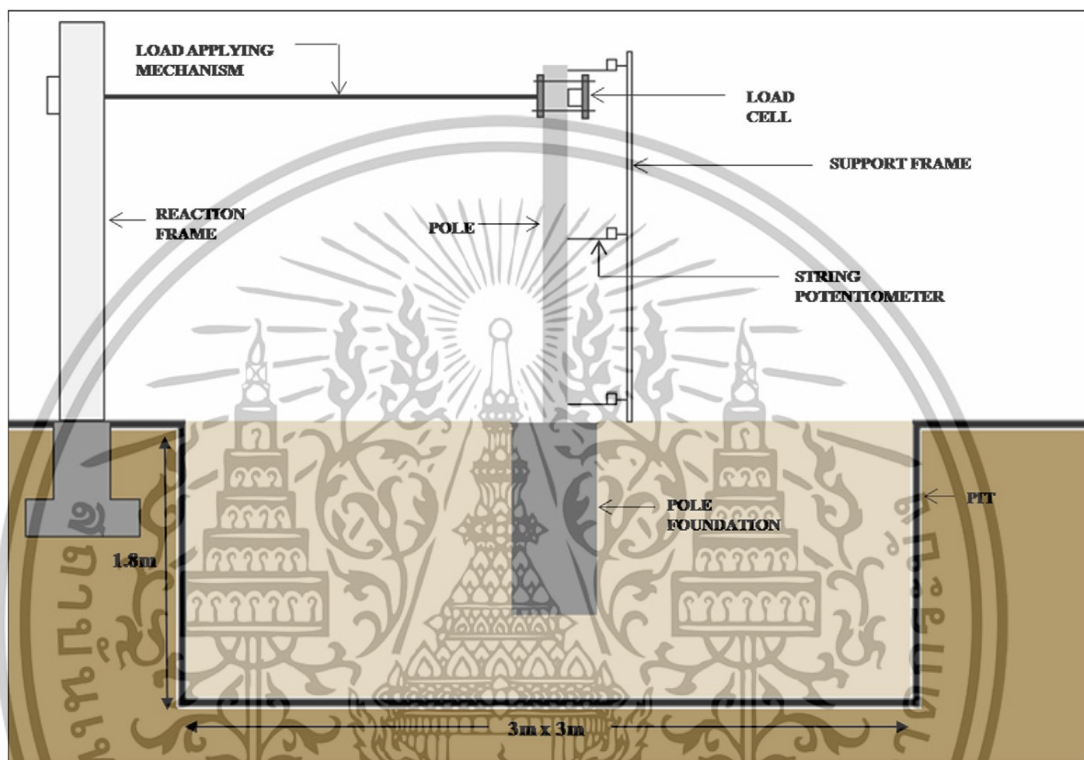
งานวิจัยนี้เป็นของ B. Vivek, S. Sharma, P. Raychowdhury, S. Ray-Chaudhri ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันอินเดียเทคโนโลยีกันปะรุ ประเทศอินเดีย [1] การกระจายพลังงานไฟฟ้าในชนบทของอินเดียโดยระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ เสาไฟฟ้าต้นเดียวใช้ในการติดตั้งระบบระบบจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะเนื่องจากสะดวกในการติดตั้งและมีต้นทุนต่ำ เสาไฟฟ้าต้นเดี่ยวยมีขนาดเล็ก และเหมาะกับพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ โดยทั่วไปเสาคอนกรีตอัดแรงจะใช้สำหรับส่งกำลังไฟฟ้า 220 โวลต์ถึง 33 กิโลโวลต์ โครงสร้างเสาทั่วไปประกอบด้วยตัวนำกระแสไฟฟ้าและแขนห้อยสายไฟฟ้าทั้งแบบ 2 ข้างและข้างเดียวที่ปลายของเสา ในชนบทของอินเดียการตั้งเสานั้นกระทำโดยการขุดหลุมแล้วจึงปักเสาลงไป และถมด้วยมวลรวมชนิดพิเศษ ดินตามสถานที่นั้นๆ หรือวัสดุที่ผลิตขึ้นกลับลงไป และอาจจะใช้คอนกรีตใส่ลงไปช่วยในบริเวณที่ดินอ่อนมาก



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเอียงของเสาไฟฟ้า

เสาไฟฟ้าต้นเดี่ยวมักจะได้รับแรงกระทำ 2 ประเภท 1. แรงกระทำเนื่องจากสายไฟฟ้าที่รั้งอยู่ เช่น แรงกระทำที่เสาต้นสุดท้ายเนื่องจากมีสายไฟฟ้ารั้งเพียงด้านเดียวแรงที่กระทำจึงไม่สมดุล หรืออาจเกิดแรงกระทำที่ไม่สมดุลเนื่องจากเสาหัก 2. แรงกระทำชั่วคราวจากแผ่นดินไหว หรือลมพายุ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

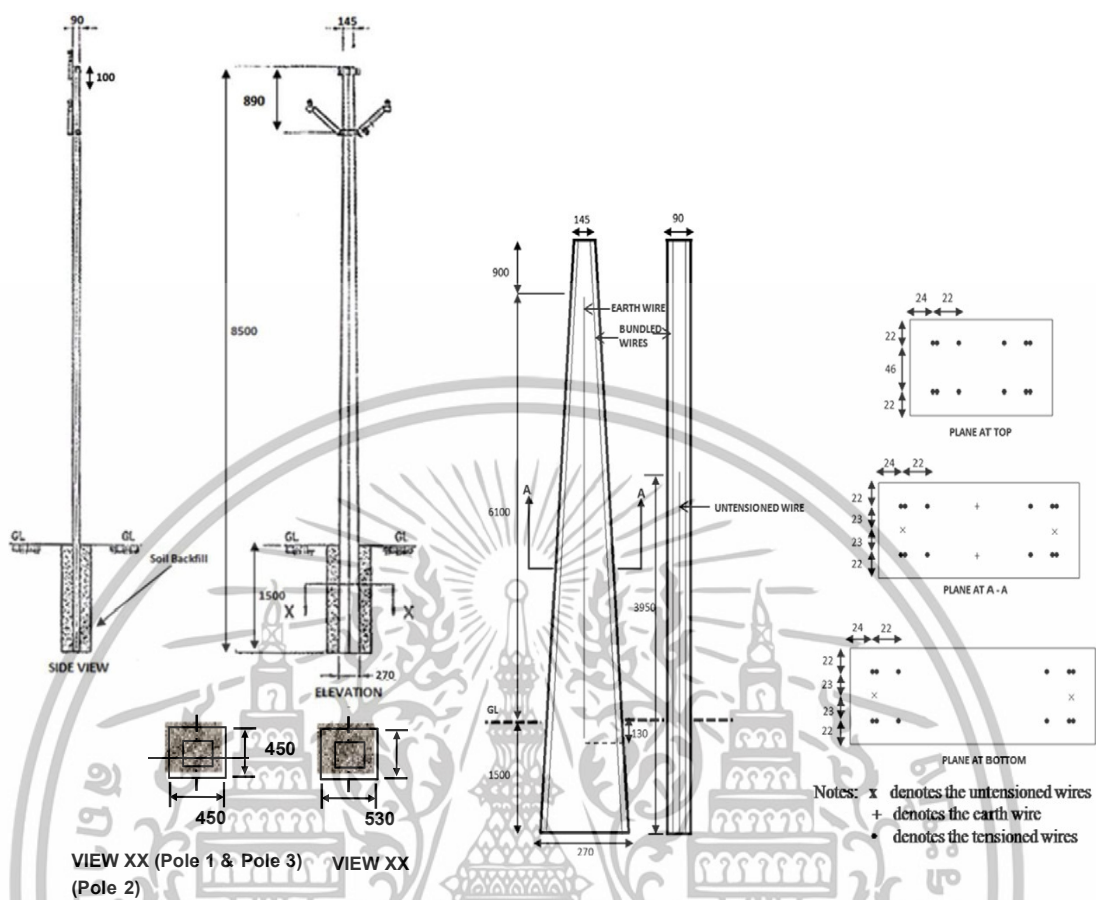
เสียหายจำนวนมากของเสาไฟฟ้าถูกพบเจอทั่วอินเดียนเนื่องจากการออกแบบที่ผิดพลาดและการติดตั้งที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจมาก รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความเสียหายโดยทั่วไปที่เกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าริมถนนแม้ว่าบางการศึกษาในอดีตจะมุ่งเน้นถึงการวิเคราะห์โครงสร้างโดยการปรับปรุงวัสดุ และเงื่อนไขในการต้านแรงกระทำรูปแบบต่างๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาและให้ความสำคัญเกี่ยวกับดิน



รูปที่ 2.2 รายละเอียดของการติดตั้งการทดสอบ

### 2.1.1 รายละเอียดการทดลอง

ใช้เสาคอนกรีตอัดแรงแบบเรียวแหลมสูง 8.5 เมตร มีหน้าตัดที่ปลายล่างเท่ากับ 27.0 x 9.0 เซนติเมตร และเรียวขึ้นที่ปลายบนเท่ากับ 14.5 x 9.0 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.3 และมีรายละเอียดตามตารางที่ 1 จะแบ่งการทดลองเป็นเสา 3 ต้น เสาต้นที่ 1 และ 2 ใช้ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดหน้าตัด 45 x 45 x 150 เซนติเมตร และ 53 x 53 x 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนต้นที่ 3 ใช้อิฐบดอัดใต้ดินรอบบริเวณที่ฝังเสาโดยขนาดเท่ากับฐานรากของเสาต้นที่ 1 เสาคอนกรีตผสมด้วยอัตราส่วน 1:2:4 (ซีเมนต์:ทราย:มวลรวมหยาบ)



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของเสาคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา(หน่วยมิลลิเมตร;ไม่ได้สเกล)

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดแบบเสาคอนกรีตอัดแรง

Grade of concrete	Diameter of prestressed wire	Number of tensioned wire	Number of untensioned wire	Clear cover to wires	Weight of the pole
M30	4 mm	12	2	20 mm	220 kg

แรงทางด้านข้างถูกใส่ไปที่เสาคอนกรีตอัดแรงโดยผ่านทางโครงเหล็กรับแรงโดยมีลักษณะเป็นแบบยึดแน่นที่ปลายเสา ดังรูปที่ 2.4 โครงเหล็กรับแรกทำมาจาก ISM250 2 ชั้น เชื่อมกับแผ่นเหล็ก 8 ชั้น ( 24 x 0.20 x 8 เซนติเมตร ) ทั้ง 2 ฝั่ง สูง 8 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 25 x 25 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

(ข.)

(ค.)



(ง.)

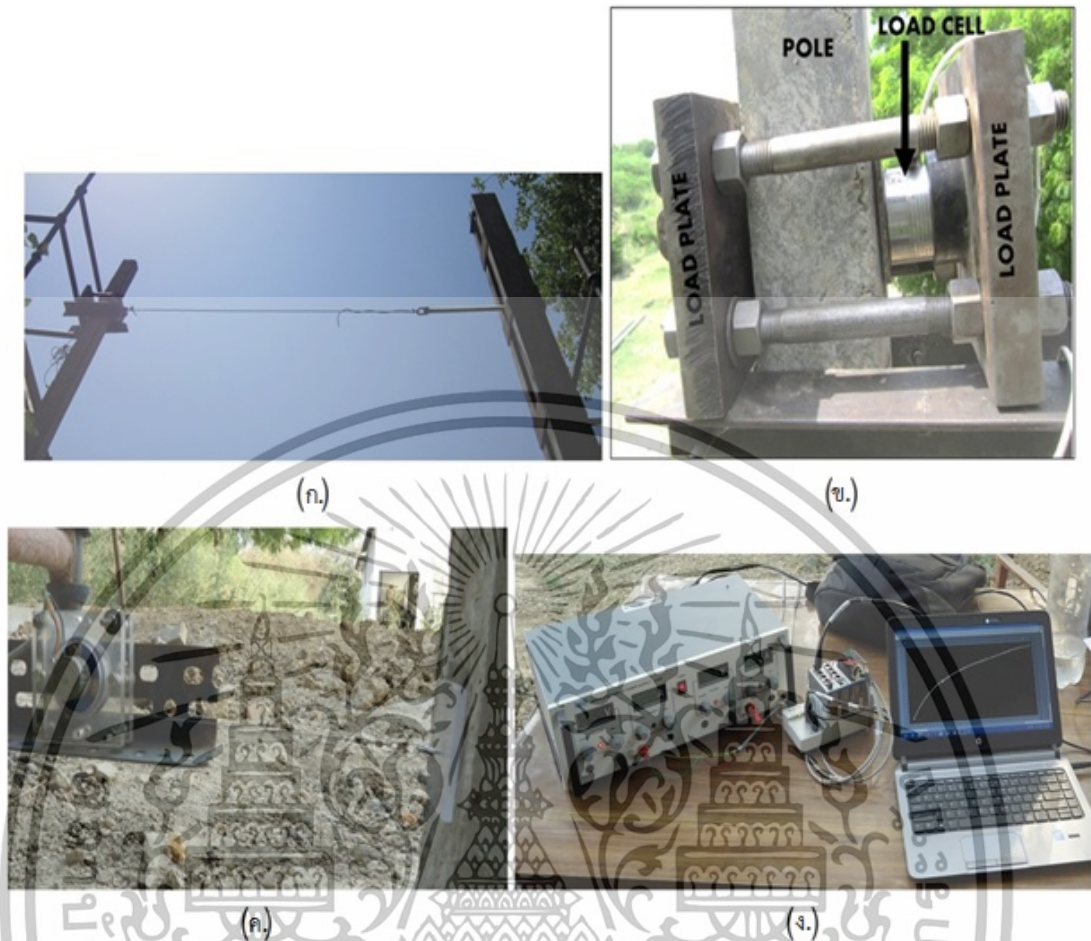
(จ.)

รูปที่ 2.4 (ก.) การเตรียมหลุมดิน (ข.) การทดสอบหาความหนาแน่นของดิน  
(ค.) การตั้งเสา (ง.) โครงเหล็กรับแรง (จ.) การติดตั้งที่สมบรูณ์

ตารางที่ 2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของดิน

Physical properties	Values
Soil type	Clayey silt
Optimum moisture content	12.72 %
Void ratio	0.52
Specific gravity	2.65
Maximum dry unit weight	17.29 kN/m <sup>3</sup>
Cohesion	18 kN/m <sup>2</sup>
Angle of internal friction	16°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

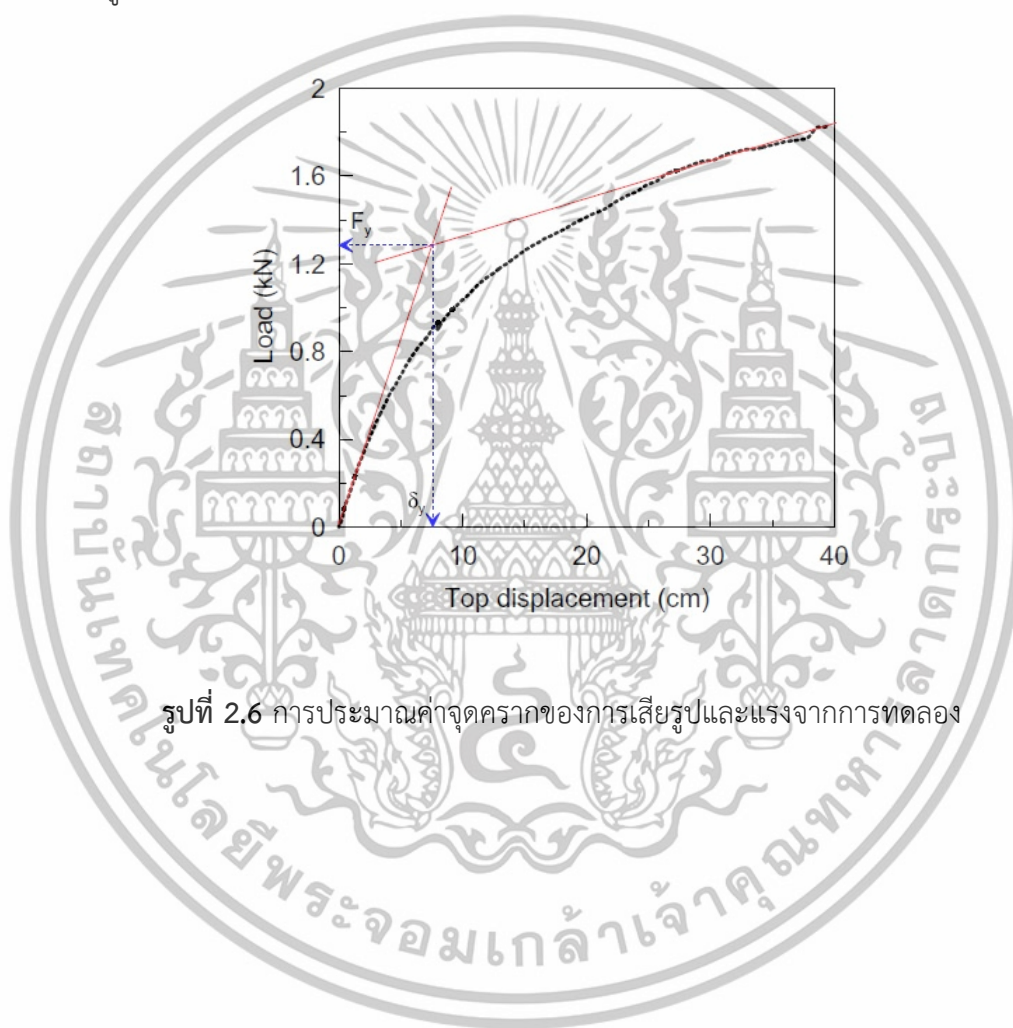


รูปที่ 2.5 (ก.) กลไกการใส่แรงกระทำ (ข.) อุปกรณ์วัดค่าแรง (ค.) มิเตอร์วัดแรงดึง (ง.) ระบบเก็บข้อมูล

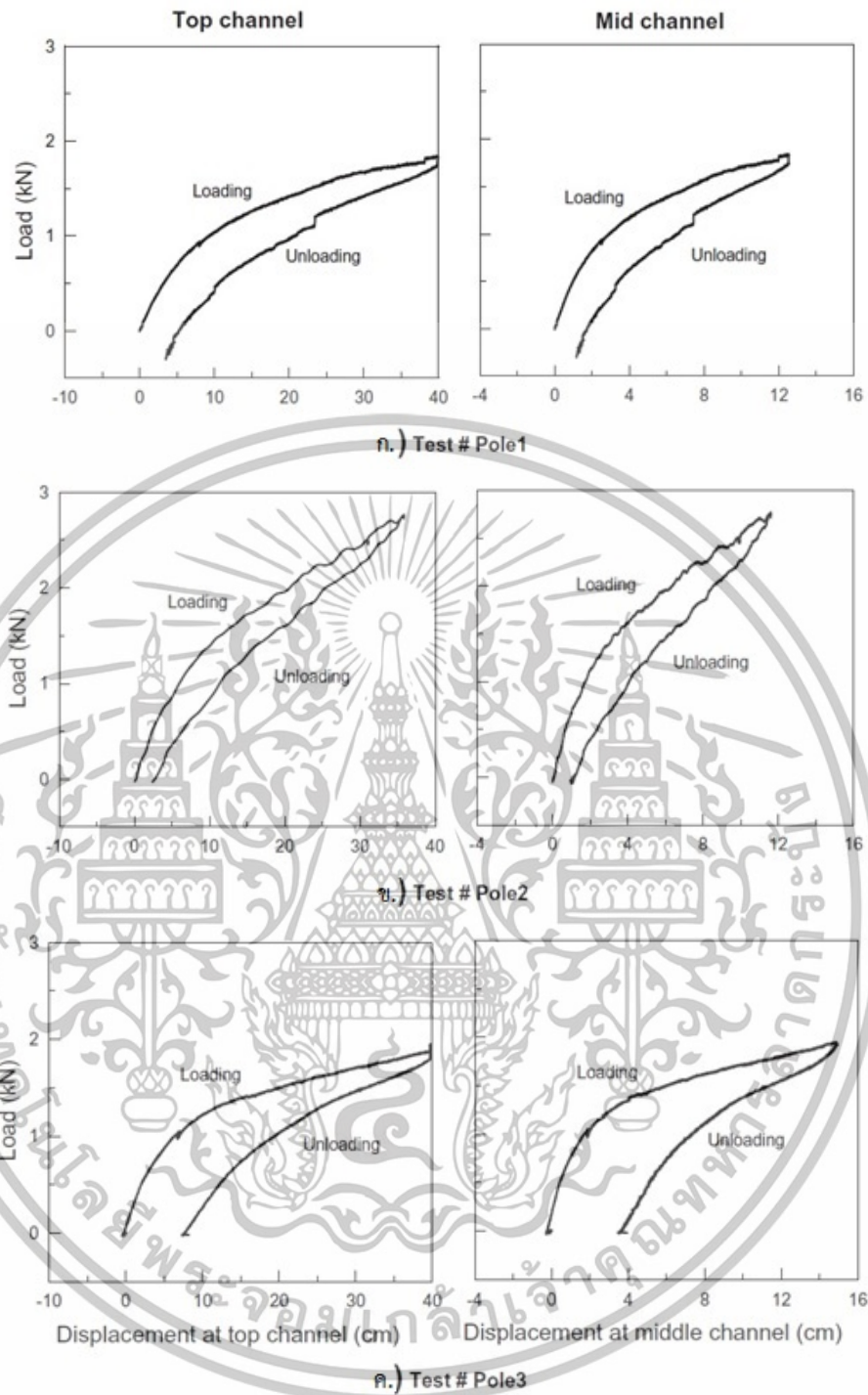
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 การใส่แรงกระทำ และอุปกรณ์

การเพิ่มแรงด้านข้างเข้าที่ปลายบนของเสาผ่านระบบสกรูและน็อตซึ่งสามารถเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนให้เป็นการเคลื่อนแบบเส้นตรง อุปกรณ์วัดค่าแรงถูกติดตั้งให้รับค่าแรงอัดโดยตรงเพื่อป้องกันค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการยึดรั้งแบบแน่นที่ไม่สมบูรณ์ของโครงเหล็กรับแรง แรงทางด้านข้างถูกใส่เข้าไปเป็นจุด จุดที่เทียบเท่ากับแรงดึงของสายไฟฟ้า 3 สาย นั่นก็คือ 63 เซนติเมตร จากปลายบนของเสา อุปกรณ์วัดค่าแรงจะเก็บข้อมูลแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆเมื่อเทียบกับเวลา และใช้มิเตอร์วัดแรงดึงที่ 3 ระบบ คือ ที่ความสูง 0.5 , 3.5 และ 6.95 เมตร ตามลำดับจากพื้นดิน



รูปที่ 2.6 การประมาณค่าจุดครากของการเสียรูปและแรงจากการทดลอง



รูปที่ 2.7 การผลการทดลองระหว่างแรงและการเสียรูป  
(ก.) เสาดันที่1 (ข.) เสาดันที่2 (ค.) เสาดันที่3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

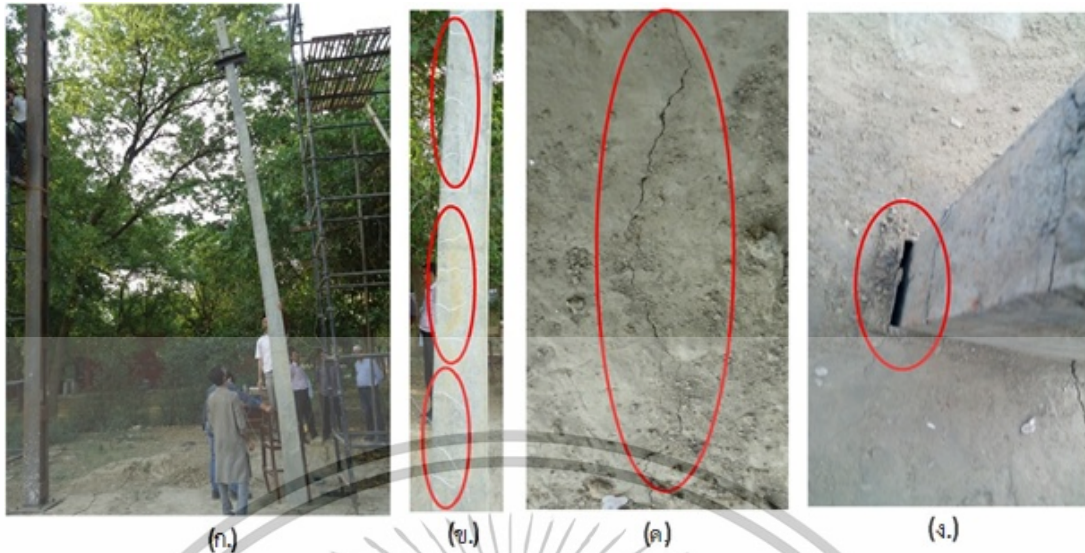
### 2.1.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองแรงกระทำและการเสียรูปแสดงออกมาในรูปที่ 2.7 ทุกๆต้นถูกใส่แรงทางด้านข้างเข้าไปที่ปลายเสาด้านบนและหลังจากนั้นก็ค่อยๆนำแรงกระทำออก และได้ผลดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลสรุปของค่าที่วัดได้จากการทดลอง

Subject	Pole 1	Pole 2	Pole 3
Load capacity (kN)	1.74	2.68	1.79
Max displacement at top (cm)	40	36	40
Residual disp at top (cm)	5.14	2.63	7.03
Max disp at middle (cm)	12.52	11.6	14.87
Residual disp at middle (cm)	1.69	1.12	3.61
Disp due to rigid body rotation (cm)	2.37	3.1	3.5
Disp due to flexure (cm)	37.63	32.9	36.5
Yield disp (cm)	7.54	6.09	5.10
Load at first yield (kN)	1.28	1.26	1.22

จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นแรงและการเสียรูปที่ความสูงระดับบนและระดับกลาง (สูง 6.95 และ 3.5 เมตรจากพื้นดินตามลำดับ) เสาต้นที่ 1 มีความสามารถในการรับแรงกระทำเท่ากับ 1.74 กิโลนิวตัน และเกิดการเสียรูปที่ความสูงระดับบนและระดับเคลื่อนไป 40 และ 13 เซนติเมตร ตามลำดับ เสาต้นที่ 2 มีความสามารถในการรับแรงกระทำเท่ากับ 2.68 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่าเสาต้นที่ 1 ด้วยการเพิ่มขนาดของฐานรากเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ (ฐานราก 53 x 53 เซนติเมตร จากปกติ 45 x 45 เซนติเมตร ของเสาต้นแรก) ทำให้สามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เสาต้นที่ 3 เสาต้นที่ฐานรากถมด้วยอิฐบดอัดน่าสนใจตรงที่มีลักษณะการรับแรงที่ออกมาคล้ายกับเสาต้นที่ 1 แรงมีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (1.79 กิโลนิวตัน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาจมีการนำอิฐบดอัดมาใช้แทนฐานรากคอนกรีตได้เป็นทางเลือกเพราะอิฐบดอัดในอินเดียสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก



รูปที่ 2.8 (ก.) การเสียรูปหลังจากการทดลอง (ข.) รอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นบนเสา  
(ค.) รอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณฐานราก (ง.) ช่องว่างระหว่างเสากับดิน

เสาทั้ง 3 ต้น เกิดการเสียรูปและรอยร้าวตลอดทั้งความสูงตั้งในรูปที่ 2.8a และ 2.8b อย่างไรก็ตามไม่เกิดร่องรอยของข้อหมุนพลาสติก และโครงสร้างเสาไม่มีการล้มหรือหัก เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณฐานรากดังรูปที่ 2.8c และในการทดลองของเสาต้นที่ 3 ยังทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเสากับดิน แสดงให้เห็นว่ามีฐานรากที่อ่อนแอกว่าทั้งเสาตั้งที่ 1 และต้นที่ 2 เนื่องจากการใช้อิฐบดอัดแทนคอนกรีตทำฐานราก และยังทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่มากกว่า ในความสูงระดับกลางเท่ากับ 14.87 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับเสาต้นที่ 1 และ 2 ( 12.52 และ 11.6 เซนติเมตรตามลำดับ )

#### 2.1.4 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบและทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการล้มของเสาคอนกรีตอัดแรงในพื้นที่ชนบทในเขตรัฐอุดรของอินเดียที่ซึ่งเกิดอุบัติเหตุมากมายจากการล้มของเสาไฟฟ้าเนื่องจากมีพายุถล่ม การทดสอบภาคสนามเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการล้มของเสาคอนกรีตอัดแรงที่ฝังอยู่ในดินเหนียวปนทรายละเอียด เสาคอนกรีตอัดแรงแบบเรียวยแหลมสูง 8.5 เมตร มีหน้าตัดที่ปลายล่างเท่ากับ  $27.0 \times 9.0$  เซนติเมตร และเรียวยขึ้นที่ปลายบนเท่ากับ  $14.5 \times 9.0$  เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.3 และมีรายละเอียดตามตารางที่ 1 จะแบ่งการทดลองเป็นเสา 3 ต้น เสาต้นที่ 1 และ 2 ใช้ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดหน้าตัด  $45 \times 45 \times 150$  เซนติเมตร และ  $53 \times 53 \times 150$  เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนต้นที่ 3 ใช้อิฐบดอัดใต้ดินรอบบริเวณที่ฝังเสาโดยขนาดเท่ากับฐานรากของเสาต้นที่ 1 ข้อสังเกตที่ได้จากการศึกษามีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสา 3 ต้น ตามลำดับดังนี้ 1.74, 2.68 และ 1.79 กิโลนิวตัน โดยที่ความสามารถในการรับน้ำหนักมีความสอดคล้องกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 5 เปอร์เซ็นต์ของปลายบน ความสามารถในการต้านแรงลมเป็น 0.95, 1.47 และ 0.98 เท่าของแรงลมตามการออกแบบ แสดงให้เห็นว่ามีเสาสองต้นสามารถรับแรงได้ต่ำกว่าแรงลมตามการออกแบบ

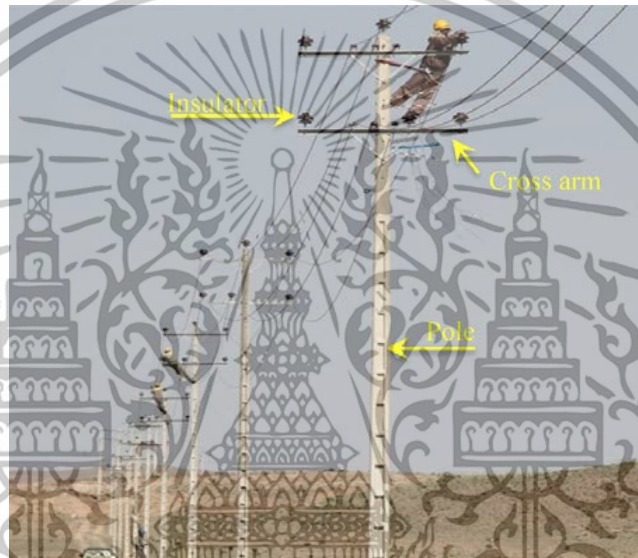
2. เสาต้นที่ 2 มีกำลังในการรับแรงที่สูงที่สุดเนื่องจากการขยายขนาดฐานราก สังเกตได้ว่าการเพิ่มฐานราก 20 เปอร์เซ็นต์จากฐานรากของเสาแบบแรกทำให้เพิ่มกำลังรับแรงสูงขึ้น 54 เปอร์เซ็นต์

3. การเลือกวัสดุมาทำฐานรากมีผลต่อกำลังรับแรงหรือพฤติกรรมการรับแรงน้อยมาก ฐานรากที่ทำด้วยอิฐบดอัดของเสาต้นที่ 3 มีความสามารถในการรับแรงคล้ายกับฐานรากที่ทำด้วยคอนกรีตของเสาต้นที่ 1 ซึ่งจากการศึกษานี้ทำให้สามารถใช้อิฐบดอัดมาเป็นตัวเลือกในการทำฐานรากได้ดีเพราะหาง่ายและมีราคาถูกในพื้นที่นั้น



## 2.2 ประสิทธิภาพของโครงสร้างเสาคอนกรีตที่ใช้ในการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

งานวิจัยนี้เป็นของ Mehran Zeynalian, Mehrdad Zamani Khorqsgani ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอิสฟาฮาน ประเทศอิหร่าน [2] การจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายเหมือนกับระบบไหลเวียนโลหิตของมนุษย์ เครือข่ายการจ่ายไฟฟ้าเหมือนกับหลอดเลือดแดงที่กระจายเครือข่ายต่อให้เส้นเลือดฝอย การจ่ายไฟฟ้าประกอบด้วย เสา (poles), แขน (cross arms) และลูกถ้วย (insulators) ดังรูปที่ 2.9 หนึ่งในปัญหาพื้นฐานของการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายคือเสาคอนกรีตล้มหรือหักโค่นเนื่องจากสภาพอากาศที่เลวร้าย เช่น แรงแลมและน้ำแข็ง ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งนำไปสู่ภาวะไฟฟ้าดับทำให้เกิดความสูญเสียทางการเงิน และอุบัติเหตุ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างเสาไฟฟ้าคอนกรีต

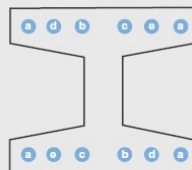


รูปที่ 2.9 การจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

ตารางที่ 2.4 แรงแกระทำเนื่องจากสภาพอากาศ

Loading type	Temperatures (°C)	Radial ice thickness (mm)	Wind load (kgf/m <sup>2</sup> )
Balanced loading			
Standard			
Moderate wind and ice	20	20	25
Limit state			
Heavy winds	15	-	100
Heavy ice	-5	40	-
Unbalanced loading			
Unbalanced longitudinal Load			
Ice and wind on one side of the span-wind without ice on the other side	-20	0-20	25
Minimum temperature	-30	-	-
Maximum temperature	35	-	-

ตารางที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของเสาคอนกรีต

No.	Type	12 m-400 kgf
1	Dimensions of top section (mm)	220 × 190
2	Dimensions of bottom section (mm)	460 × 310
3	F <sub>y</sub> (MPa) transverse rebars	300
4	F <sub>y</sub> (MPa) longitudinal rebars	400
5	Reinforcement pattern	
6	a	⊘ 16 L = 12 m
7	b	⊘ 14 L = 9.5 m
8	c	⊘ 14 L = 7.5 m
9	d	⊘ 14 L = 5.5 m
10	e	⊘ 14 L = 4.5 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายอาศัยหลักเกณฑ์ทั้งด้านไฟฟ้า และเครื่องกล รวมถึงลักษณะพื้นดิน และแรงที่กระทำ ดังนั้นการศึกษาการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายจึงศึกษาในเซมิโรม (บริเวณที่มีสภาพอากาศเลวร้ายในอิหร่าน) แรงกระทำต่างๆในสภาพอากาศที่เลวร้ายแสดงในตารางที่ 2.4 จากรายงานเสาไฟฟ้าคอนกรีต ความสูง 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง ถูกใช้ในการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย นั้นแสดงว่าเสาคอนกรีตรับแรงได้ 400 กิโลกรัมแรง จากด้านบนลงมา 60 เซนติเมตร นั้นแสดงว่าเสารับแรงประลัยได้ 1200 กิโลกรัมแรง รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.11 เสาต้นกลางของแนวจะตั้งแกนด้านที่แข็งตามแนวยาวดังรูปที่ 2.12 ในทางกลับกันเสาต้นริมสุด และต้นมุมจะตั้งแกนด้านที่แข็งตั้งฉากกับแนวการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย เสาต้นริมสุดจะเป็นต้นแรกและต้นสุดท้ายของแนว และจะมีความแข็งแรงกว่าเสาต้นกลางของแนว และเสาต้นมุมช่วงในการเปลี่ยนทิศทางของแนวและแข็งแรงกว่าเสาต้นกลางเช่นกัน นี้เป็นเพราะเสาต้นกลางสามารถใช้สมดุลแรงของเสาต้นข้างๆได้ทำให้สามารถตั้งอยู่ได้ แรงลมประทะสายตามแนวขวางและเป็นแรงที่สำคัญที่สุด แต่เสาต้นริมและต้นมุมแรงตั้งในสายจะมากที่สุดในทิศทางแนวยาว รายละเอียดของแขน และลูกถ้วย ดังรูปที่ 2.13

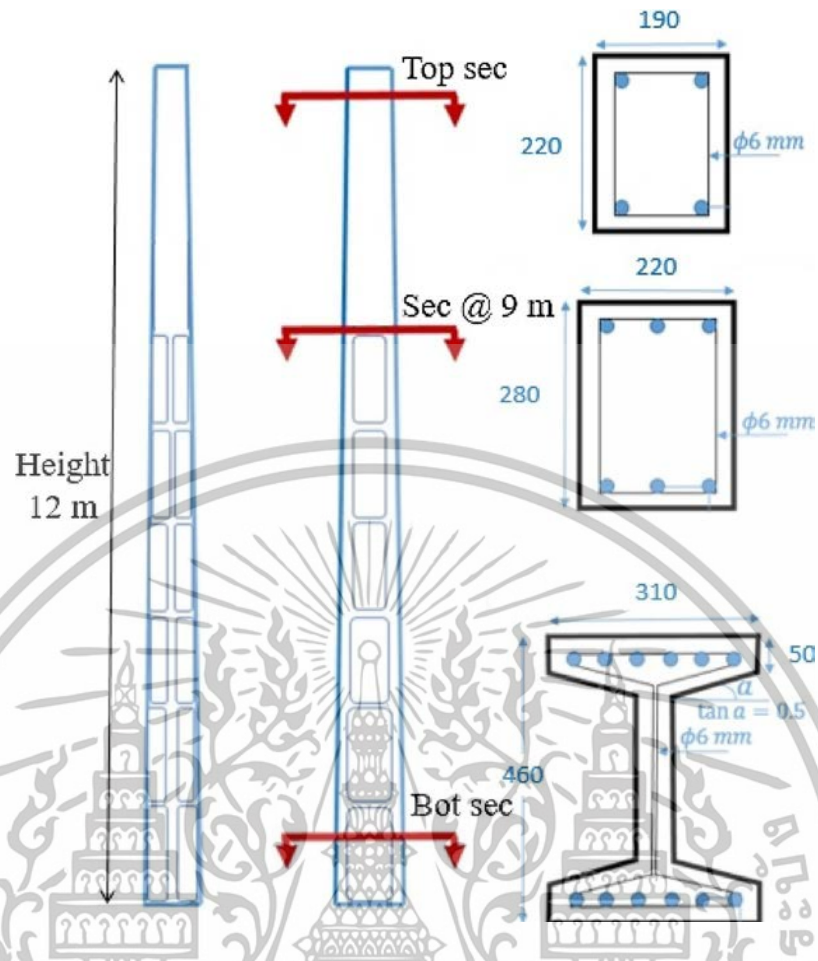


รูปที่ 2.10 การพังของเสาคอนกรีตเนื่องจากแรงลม และหิมะ

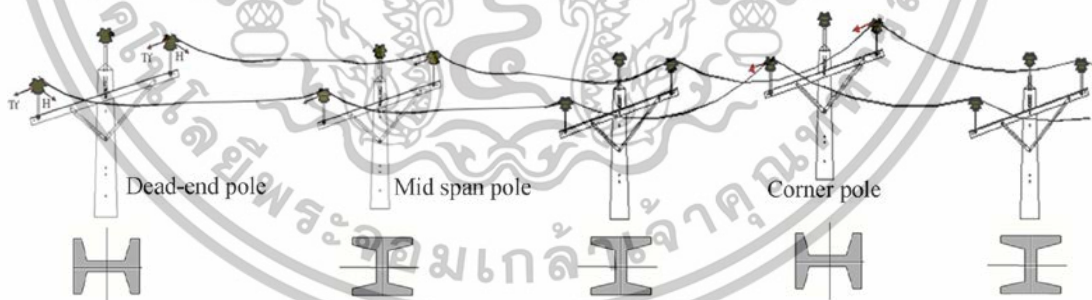
### 2.2.1 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองประกอบด้วยเสาไฟฟ้าความสูง 12 เมตร 3 ต้น เพื่อศึกษาการรับแรงด้านข้างดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 รูปแบบการทดลองติดตั้งการทดสอบดังรูปที่ 2.14 ตัวอย่างแต่ละชั้นถูกติดตั้งบนแท่นวางในแนวนอนระหว่างผนังคอนกรีตที่ฐานด้านล่าง ใช้ไฮดรอลิก 3 ตัว เพื่อยึดชิ้นงานทดสอบในแท่นโดยติดกับแผ่นไม้ ใช้โซในการติดกับโหลดเซลล์ที่ 0.6 เมตรจากปลายบนของเสา มีการวัดการเคลื่อนตัวทั้งแนวราบ และแนวตั้ง ข้อมูลทั้งหมดจะส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อสร้างกราฟ โดยจะทดสอบใน 3 ช่วง แรงปกติ แรงอีลาสติก แรงประลัย โดยเสาที่ทดสอบจะสำเร็จเมื่อ (1) ไม่มีรอยแตกร้าวบนเสา (2) การเคลื่อนตัวของปลายมีความสม่ำเสมอ (3) หลังจากผ่อนแรงออกเสาคจะเคลื่อนตัวกลับสู่ตำแหน่งตามปกติ ใส่แรงจนกว่าจะเห็นรอยแตกร้าว นั่นคือถึงจุดแรงอีลาสติก และเพิ่มแรงไปเรื่อยๆจนทำให้เกิดรอยร้าวมากและกำลังรับแรงลดลง นั่นคือถึงจุดแรงประลัย กำลังการต้านทานของเสาสูง 12 เมตร แสดงในตารางที่ 2.6 และผลการทดสอบในตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

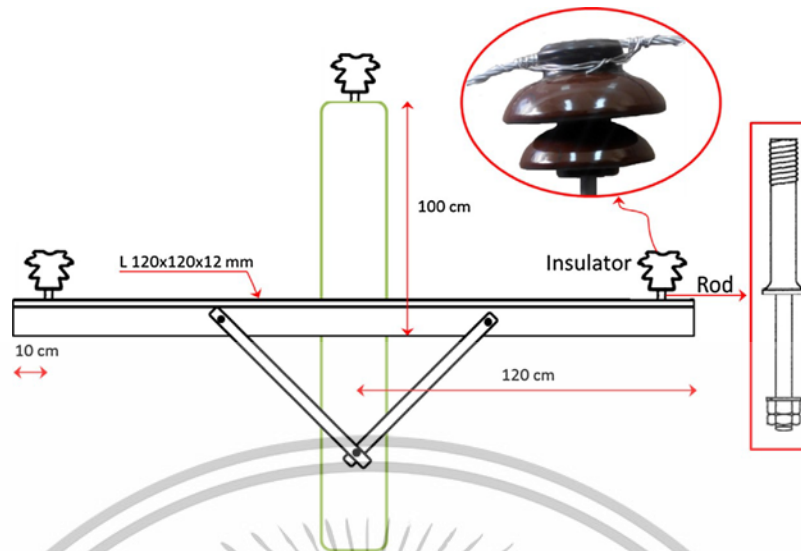


รูปที่ 2.11 รายละเอียดเสา 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง

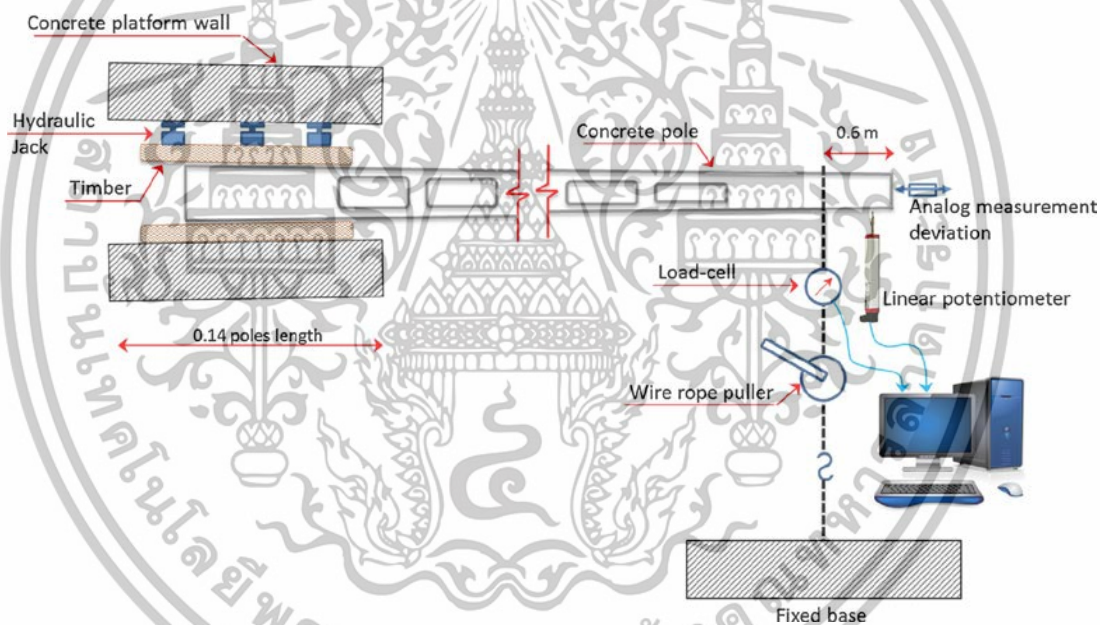


รูปที่ 2.12 รูปแบบการจัดเรียงของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รายละเอียดของแขน และลูกถ้วย



รูปที่ 2.14 รูปแบบของแท่นที่ใช้ในการทดสอบเสาคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์

สายจ่ายกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยโครงสร้างต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบให้แน่ใจว่าแต่ละส่วนทำงานอย่างเหมาะสมก่อนการติดตั้งระบบเครือข่าย การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์และการศึกษาประสิทธิภาพของการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย ขั้นตอนแรกคือสร้างเสาไฟฟ้าคอนกรีตและสายไฟฟ้า 7 ช่วงแยกกัน จากนั้นสายไฟฟ้าวิเคราะห์และพิจารณารอยต่อของสายไฟฟ้ากับเสา ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์จึงเป็นแบบไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์จำนวนและขนาดของเอลิเมนต์ที่ดีที่สุด การใช้เอลิเมนต์ที่เล็กนำไปสู่ค่าความถูกต้องสูง แต่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน ดังนั้นจึงต้องหาจุดที่สมดุลระหว่างความถูกต้องและเวลาในการวิเคราะห์

ตารางที่ 2.6 กำลังรับแรงต้านของเสา 12 เมตร

Height of pole (m)	Normal strength load (kgf)	Limit of elasticity load (kgf)	Ultimate strength load (kgf)
12	400	600	1200

ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบแรงด้านข้าง

Load (kgf)	Displacement (cm)		
	Test 1	Test 2	Test 3
0	0	0	0
100	0.2	0.3	0.4
200	1.5	1.5	1.7
300	4.5	4.0	4.5
400	7.3	6	6.7
500	8.8	8.1	8.1
600	12.1	11.4	11.6
700	14.4	12.8	12.8
800	19.3	18.5	18.1
900	20.7	20.1	20.7
1000	23.9	24.0	25.3
1100	27.4	28.9	29.3
1200	32.4	32.2	35.1

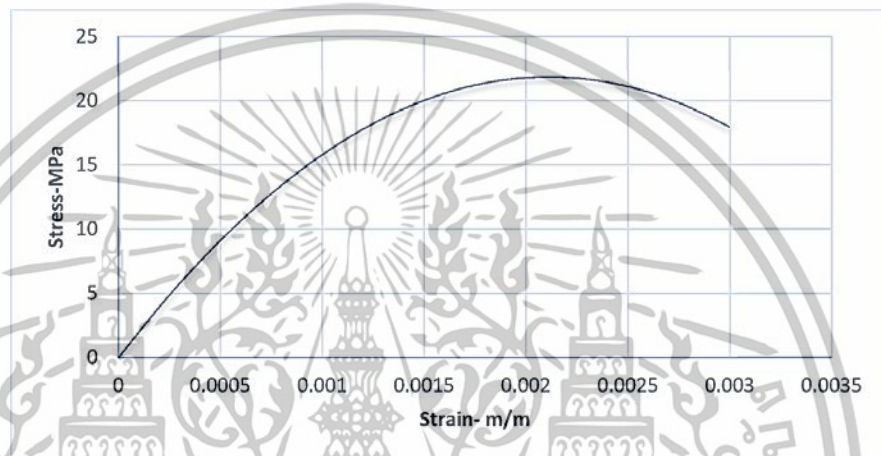


รูปที่ 2.15 แท่นทดสอบเสา

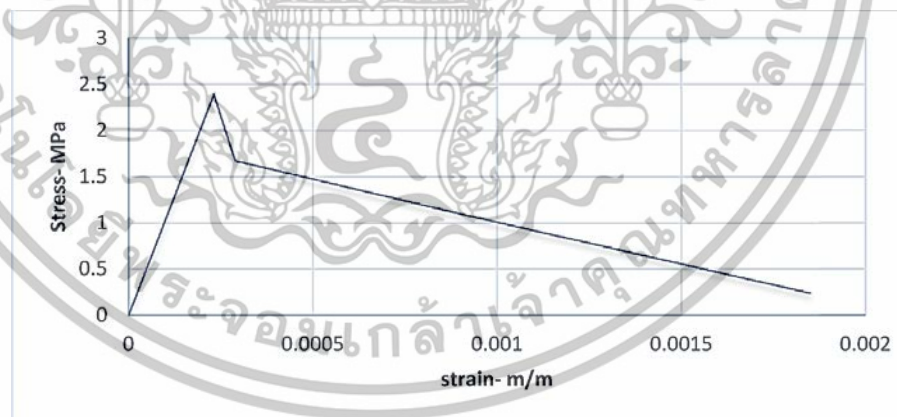
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.1 พฤติกรรมของวัสดุ

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความซับซ้อนมากที่สุดซึ่งการที่จะใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องมีการใส่ค่าอย่างถูกต้องที่สุด ซึ่งเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของวัสดุ เช่น กำลังรับแรงอัดและแรงดึง ช่วงอีลาสติกและพลาสติกคือส่วนที่มีผลต่อผลลัพธ์ที่ออกมามากที่สุด ซึ่งแบบจำลองคอนกรีตที่ใช้เป็นแบบจำลองพลาสติกที่เสียหายได้ทำให้วิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น และเห็นพฤติกรรมและการวิบัติของวัสดุได้ มีรายละเอียดดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 และแสดงข้อมูลหลักทั้งตามแนวยาวและขวางในตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.16 ความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีต



รูปที่ 2.17 ความเค้นและความเครียดดึงของคอนกรีต

ตารางที่ 2.8 ลักษณะเฉพาะของเหล็กเสริมแนวยาวและแนวขวาง

**Table 5 – Specifications of longitudinal and transverse rebars.**

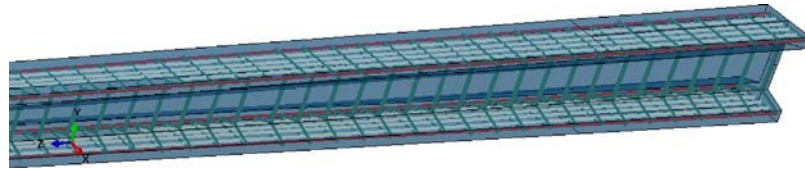
Transverse rebars (Type A2)	
$F_y$ (MPa)	300
$F_u$ (MPa)	500
Plastic relative deformation	19%
Poisson ratio	0.3
Modulus of elasticity (MPa)	2E5
Longitudinal rebars (Type A3)	
$F_y$ (MPa)	400
$F_u$ (MPa)	600
Plastic relative deformation	14%
Poisson ratio	0.3
Modulus of elasticity (MPa)	2E5

### 2.2.2.2 การสร้างแบบจำลองเสาคอนกรีต

แบบจำลองของเสาคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นเสาคอนกรีตที่ยังไม่เกิดการเสียรูปวิบัติและยังไม่ได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ และแสดงการใส่เหล็กในรูปที่ 2.19 ทั้งแนวขวาง และแนวยาว ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งขนาดเอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตเป็น 0.05, 0.1 และ 0.15 เมตร ดังรูปที่ 2.20 กราฟแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของเอลิเมนต์ทั้ง 3 ขนาดดังรูปที่ 2.21 จากกราฟจะเห็นว่าเอลิเมนต์ทั้ง 3 ขนาดมีผลลัพธ์ที่เท่ากันจนถึงช่วงแรงที่ 800 กิโลกรัมแรง จากนั้นก็เริ่มกระจายออกไป ทำให้เห็นว่าขนาดของเอลิเมนต์ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงเลือกเอลิเมนต์ขนาดกลางในกาวิเคราะห์



รูปที่ 2.18 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาสูง 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง โดยทั่วไป

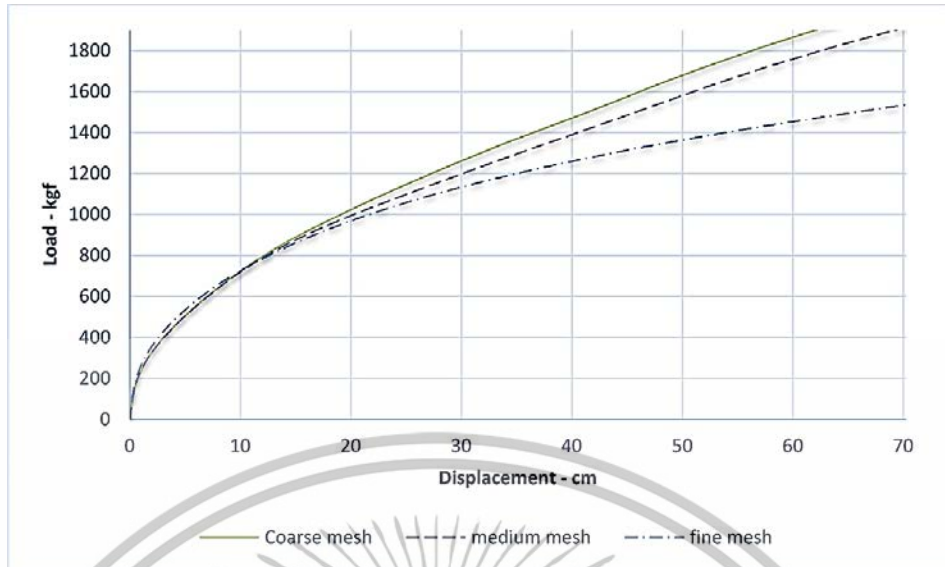


รูปที่ 2.19 เหล็กเสริมทั้งแนวยาวและแนวขวางในคอนกรีต



รูปที่ 2.20 ขนาดของเอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตขนาดต่างๆ (ก.) เอลิเมนต์แบบละเอียด (0.05 เมตร)  
(ข.) เอลิเมนต์แบบปานกลาง (0.1 เมตร) (ค.) เอลิเมนต์แบบหยาบ (0.15 เมตร)

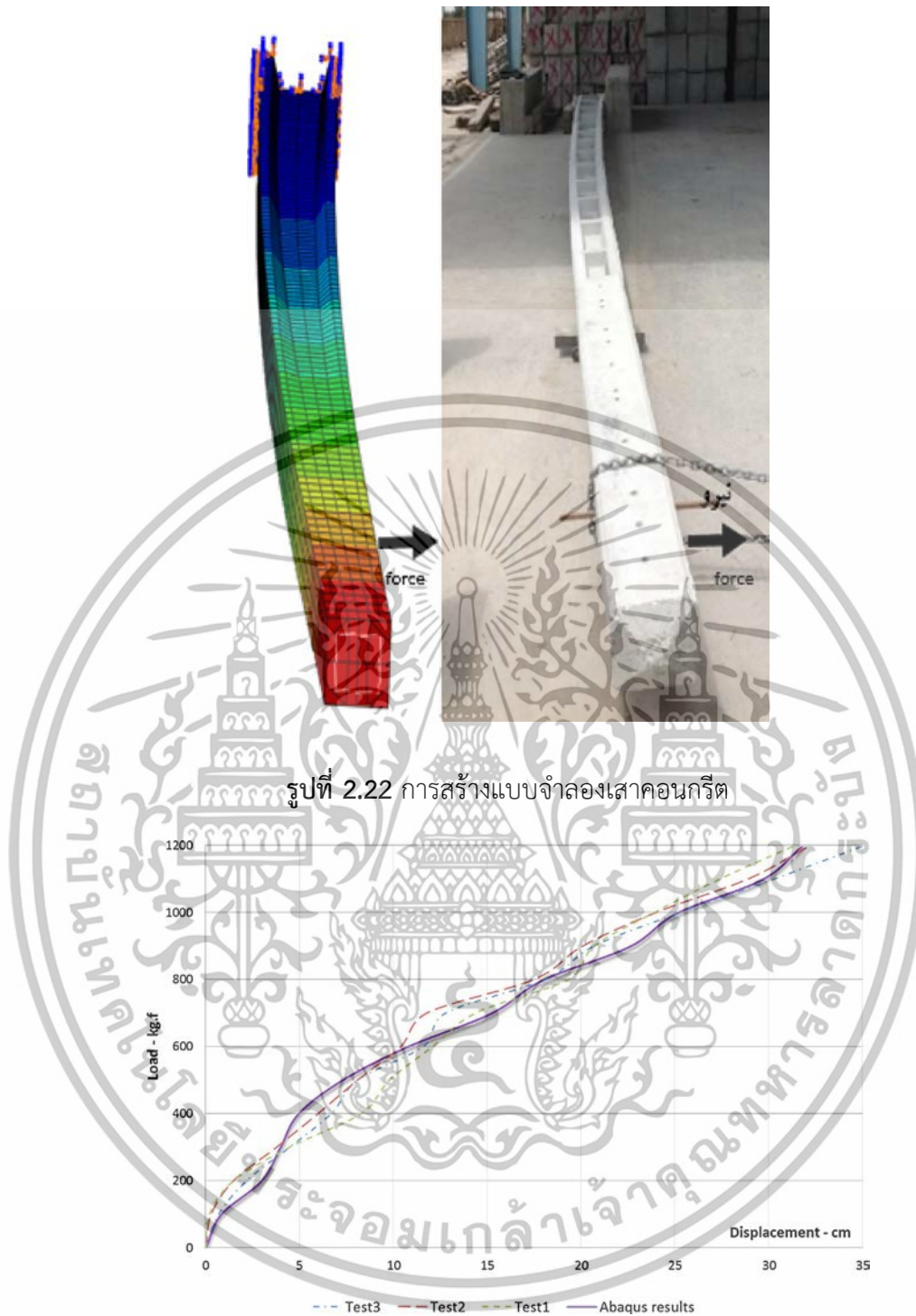
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แรงและการเคลื่อนตัวเนื่องจากขนาดของเอลิเมนต์

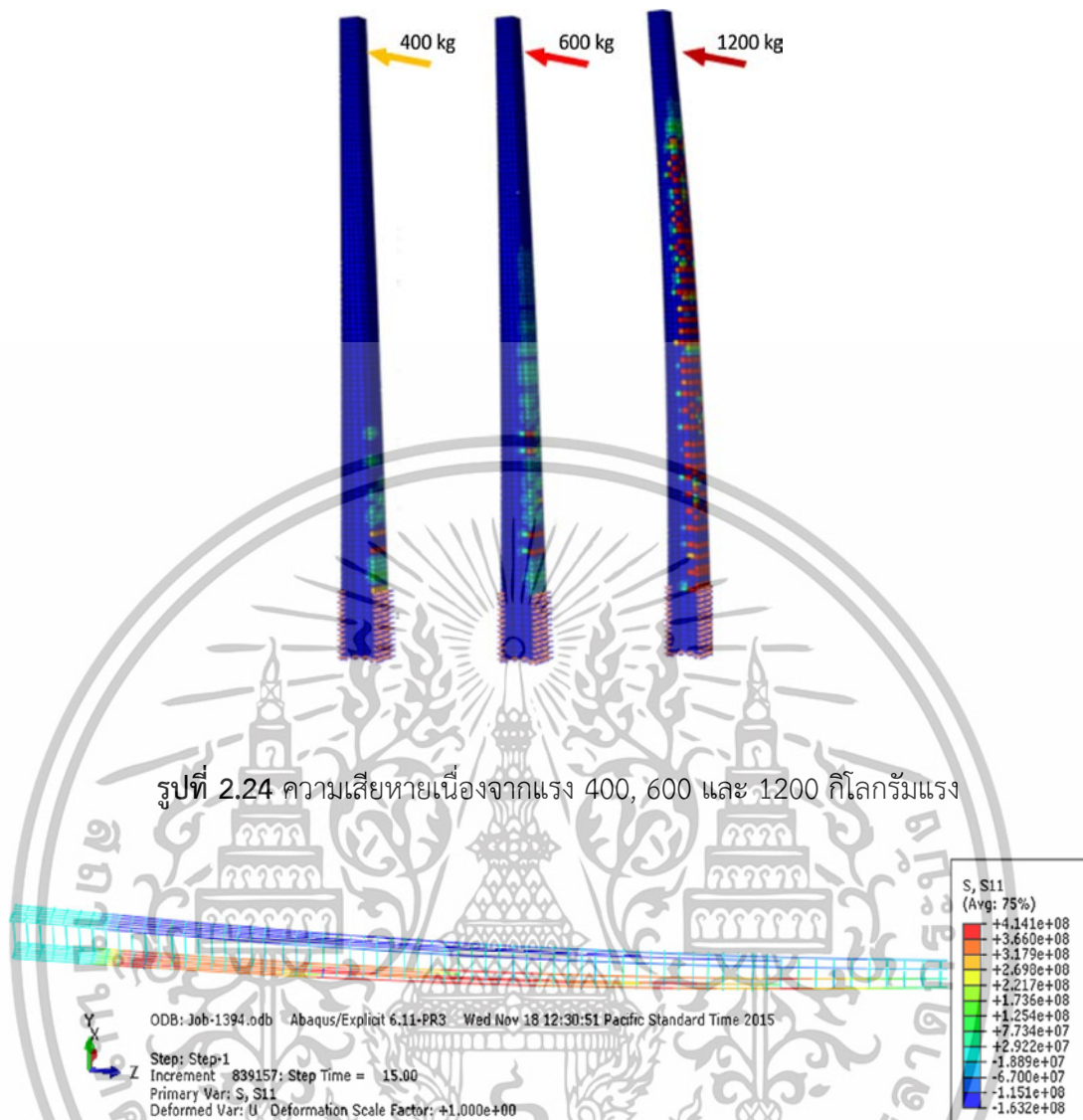
### 2.2.2.3 การตรวจสอบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีต

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงของเสาคอนกรีตดังตารางที่ 4 เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.23 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบจริงสอดคล้องกันและยอมรับได้ รูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นการวิบัติเนื่องจากแรง 3 ระดับประกอบด้วย 400 กิโลกรัมแรง (แรงปกติ), 600 กิโลกรัมแรง (ขีดจำกัดของอีลาสติก) และ 1200 กิโลกรัมแรง (แรงประลัย) ผลลัพธ์นี้สมเหตุสมผลและยอมรับได้ เนื่องจากจะเห็นได้จากการทดสอบ 400 กิโลกรัมแรงไม่ทำให้เกิดรอยแตกร้าว 600 กิโลกรัมแรงทำให้เกิดรอยแตกร้าว 1-2 รอย และ 1200 กิโลกรัมแรงทำให้เกิดรอยร้าวมากมาย รูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นความเค้นในเหล็กในเสาที่แรงเท่ากับ 1500 กิโลกรัมแรงเมื่อเสาพังแล้ว แรงเค้นดึงนี้มีค่ามากกว่าแรงครากนั้นหมายถึงเสาพัง แสดงให้เห็นว่าเสาทนแรงได้มากกว่าแรงประลัย



รูปที่ 2.23 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบจริงกับแบบจำลองเชิงตัวเลขในกราฟแรงและการเคลื่อนตัว ของเสาคอนกรีตสูง 12 เมตร 400 กิโลกรัมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



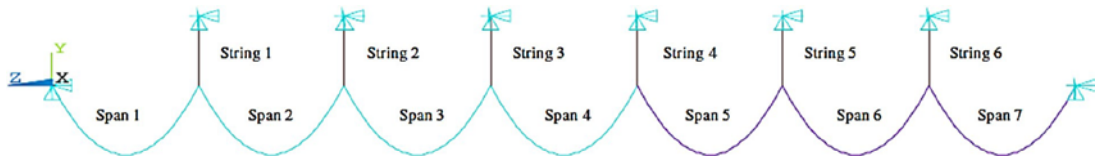
รูปที่ 2.25 ความเค้นในเหล็กเสริม (Pa)

#### 2.2.2.4 การสร้างแบบจำลองสายจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

ส่วนที่สำคัญของการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายอีกอย่างหนึ่งคือสายไฟฟ้า โดยใช้การทดลองของ Yang และคณะ เพื่อศึกษาเชิงตัวเลขของสายไฟฟ้าที่ต่อเนื่องกัน 7 ช่วง แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.26 พวกเขาศึกษาแรงดึงที่ไม่สมดุล และการเอนเอียงของสายภายใต้แรงในรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาระยะช่วงละ 450 เมตร และรายละเอียดต่างๆ ดังตารางที่ 2.9 ระยะความสูงของโครงสร้างจนถึงลูกถ้วยเท่ากับ 11.7 เมตร โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกถ้วย 100 มิลลิเมตร และความหนาแน่น 8814.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โมดูลัสอีลาสติกเท่ากับ 118 Gpa และมีค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.16 เมื่อเกิดน้ำแข็งหนา 20 มิลลิเมตร และลมแรง 10 เมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นการกระจายตัวของแรงดึงดังรูปที่ 2.27 คุณสมบัติของลูกถ้วยที่ใช้ของ Yang แสดงในตารางที่ 2.9 โดยการวิเคราะห์ของโดยกำหนดขอบเขต และการวิเคราะห์ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

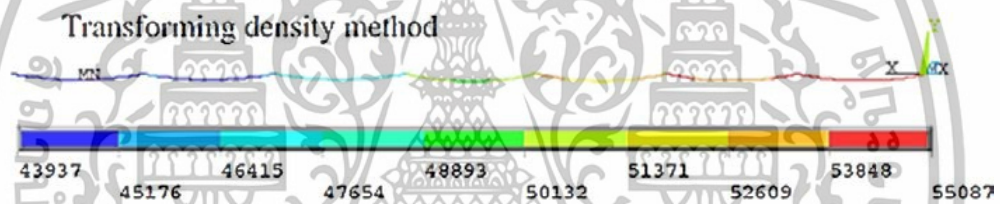
เชิงเส้นด้วย ABAQUS เมื่อเปรียบเทียบกับกันในรูปแบบที่ 2.27 และ 2.28 แสดงให้เห็นว่า ผลลัพธ์สอดคล้องกันทำให้แบบจำลองของ Yang และคณะ ถูกต้อง



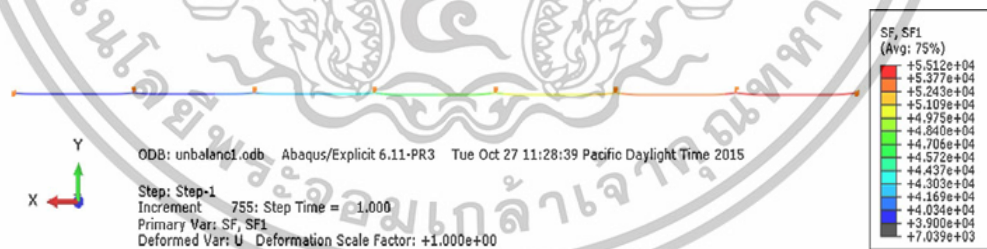
รูปที่ 2.26 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สายไฟฟ้า นำเสนอโดย Yang และคณะ

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติเชิงกลของตัวนำไฟฟ้า โดย Yang และคณะ

Table 6 – Mechanical properties of the conductors used by Yang et al. [13].				
Type	Section area (mm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Expansion coefficient	Ultimate tension (kN)
LG630/45	666.55	63.0	$2.09 \times 10E-5$	141.26



รูปที่ 2.27 การกระจายตัวของแรงดึงตัวนำไฟฟ้า (N) โดย Yang และคณะ



รูปที่ 2.28 การกระจายตัวของแรงดึงตัวนำไฟฟ้า (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

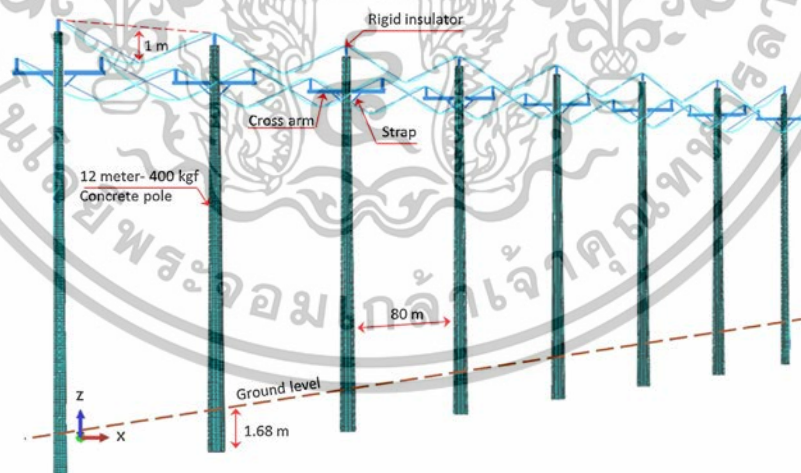
### 2.2.2.5 การศึกษาตัวแปรของจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

หลังจากที่ได้แบบจำลองเชิงตัวเลขของทั้งสองส่วนที่สำคัญแล้ว ด้วยการทดลองของ Yang จึงจะพิจารณาเสา 7 ช่วง เมื่อประกอบข้อมูลทุกอย่างแล้วจะได้รูปแบบดังรูปที่ 2.29 ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เสาฝังในฐานราก 1.68 เมตร และพิจารณาเป็นแบบยึดแน่น และลำดับการติดตั้งเสาเป็นไปตามรูปที่ 2.12 การใส่แรงกระทำดังตารางที่ 1 ในสภาพอากาศที่เลวร้าย น้ำแข็งปกคลุมสาย รูปแบบของสายออกมาในรูปที่ 2.30 โดยจะมีการคิมน้ำหนักจากสมการที่ 1 และ 2

$$W_i = \rho \times V = 0.913 \times \pi i \times (i + d) \times 10^{-3} \text{ [kgf/m]} \quad (1)$$

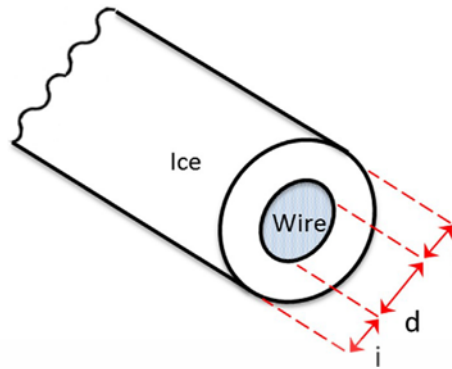
$$W_w = P_w \times A = P_w \times (d + 2i) \times 10^{-3} \text{ [kgf/m]} \quad (2)$$

โดย  $W_i$  = น้ำหนักของน้ำแข็งต่อความยาวสาย  
 $W_w$  = แรงลมต่อความยาวสาย  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำแข็ง  
 $i$  = ความหนาของน้ำแข็งรอบสาย (mm.)  
 $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของสาย (mm.)  
 $P_w$  = แรงดันลม (kgf/m<sup>2</sup>)  
 $V$  = ปริมาตรของน้ำแข็งต่อความยาวสาย  
 $A$  = พื้นที่ประทะลมของสาย



รูปที่ 2.29 รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 สายที่ปกคลุมด้วยน้ำแข็ง

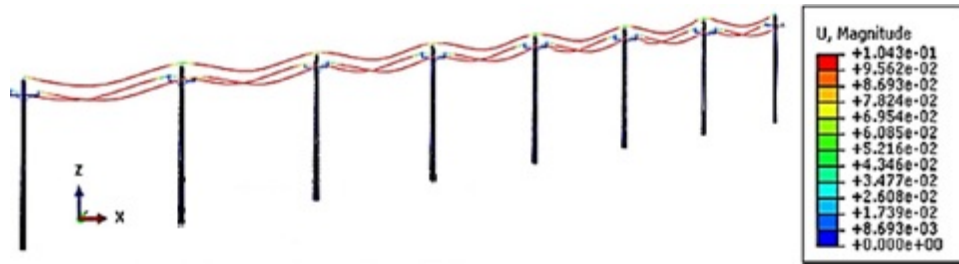
รูปที่ 2.31 แสดงให้เห็นการกระจายตัวของแรงในหนึ่งช่วงของเสา นอกจากสายแล้วก็ยังมีแรงลมที่ปะทะกับเสา และลูกถ้วย แรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดอยู่ในรูปแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ

การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นโดยโปรแกรม ABAQUS ด้วยแรงกระทำรูปแบบต่างๆในสภาพอากาศที่เลวร้ายมีผลลัพท์ออกมาดังรูปที่ 2.32 ในกรณีนี้ มีการเคลื่อนตัวสูงสุด 10 เซนติเมตร และไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นที่เสา โดยการเคลื่อนตัวสูงสุดในกรณีต่างๆจากสภาพอากาศที่เลวร้ายแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.10 โดยรูปแบบไม่สมดุลของแรงกระทำถูกกำหนดด้วย มีระยะ 4 ช่วงที่ถูกปกคลุมด้วยหิมะ และน้ำแข็งหนา 20 มิลลิเมตร และอีก 3 ช่วงไม่มีน้ำแข็ง โดยแสดงในรูปที่ 2.33 จากผลที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 ไม่เกิดความเสียหายต่อระบบจ่ายไฟฟ้า หรือแสดงให้เห็นว่าเสาไฟฟ้าออกแบบมาได้อย่างถูกต้องภายใต้แรงที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน



รูปที่ 2.31 แรงกระทำต่อหนึ่งช่วงเสาของการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

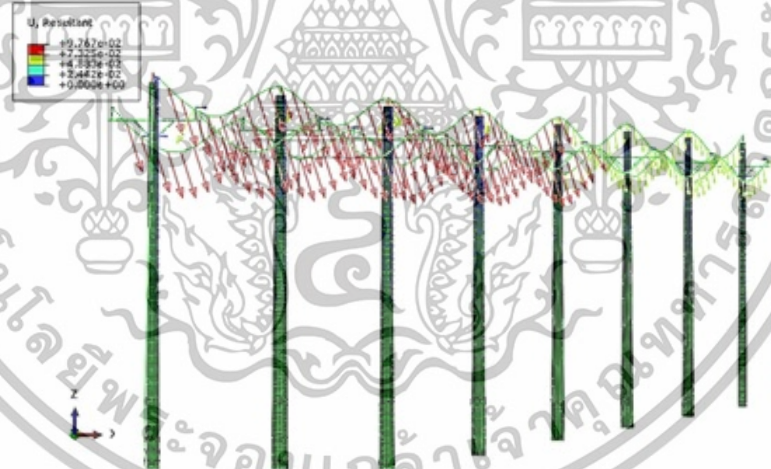


รูปที่ 2.32 แผนภาพการเคลื่อนตัวของสายใต้แรงลมและน้ำแข็งแบบปานกลาง

ตารางที่ 2.10 การเคลื่อนตัวสูงสุดของระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายภายใต้สภาพอากาศเลวร้าย

**Table 7 – Maximum displacements in the EPDN under heavy weather condition.**

Loading type	The maximum displacement (cm)
Balanced loading	
Standard	
Mediocre wind and ice	10.43
Limit state	
Heavy winds	13.79
Heavy ice	18.59
Unbalanced loading	
Ice and wind on one side of the span-wind without ice on the other side	9.77

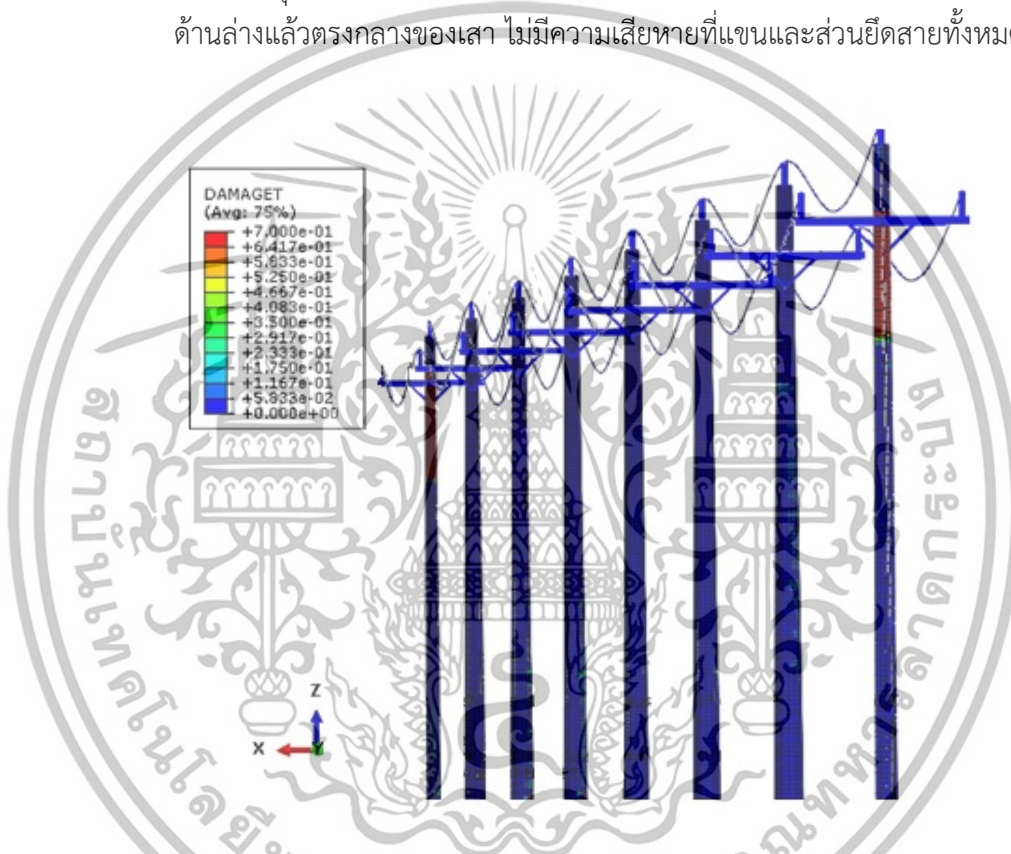


รูปที่ 2.33 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวแบบแรงไม่สมดุลของน้ำแข็งและแรงสมดุลของลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

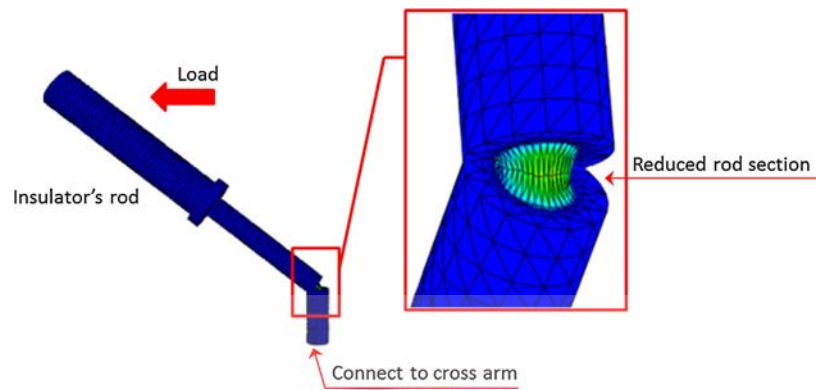
### 2.2.2.6 การวิเคราะห์แบบผลึกของจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

การพิจารณาเสาภายใต้แรงเนื่องจากการใช้งานทั่วไปไม่เกิดปัญหาอะไร ดังนั้นสรุปได้ว่าเสาพังเนื่องจากแรงที่ไม่ปกติเช่น ลมกระโชกแรง ดังนั้นการวิเคราะห์แบบผลึกไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม ABAQUS เพื่อหาส่วนที่อ่อนแอที่สุด โดยสามารถหาได้โดยการเพิ่มแรงกระทำเพื่อให้เห็นจุดที่อ่อนแอที่สุดของโครงสร้าง การวิบัติจะเกิดบนเสาคอนกรีต และพิจารณาข้อจำกัดของทั้งระบบ การเพิ่มแรงทำโดยการเพิ่มความหนาของน้ำแข็งที่ปกคลุมสายเป็น 40 มิลลิเมตร และเพิ่มความแรงของลม ทำให้เกิดตำแหน่งที่เสียหายและข้อหมุนพลาสติกดังรูปที่ 2.34 โดยตำแหน่งที่เกิดความเสียหายและข้อหมุนพลาสติก จะเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของเสาด้านริม และเสาด้านกลางจะเกิดที่ด้านล่างแล้วตรงกลางของเสา ไม่มีความเสียหายที่แขนและส่วนยึดสายทั้งหมด



รูปที่ 2.34 ตำแหน่งความเสียหายและข้อหมุนพลาสติกในระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

ดังนั้นเพื่อให้การจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่ายมีความมั่นคงมากยิ่งขึ้น และเพื่อช่วยไม่ให้ออกแบบเสาคอนกรีตเกินความจำเป็นเพื่อรับแรงที่ไม่คาดคิดเช่น ลมกระโชก เป็นต้น จึงเกิดเป็นความคิดที่จะออกแบบและปรับปรุงลูกถ้วยเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงให้เพิ่มความขึ้นโดยให้ลูกถ้วยฟังก่อนเสาคอนกรีตจะถึงจุดประลัย นั่นคือการทำให้ลูกถ้วยมีกลไกที่ทำให้ฟังก่อนที่เสาจะพัง เมื่อเกิดแรงที่เกินจากมาตรฐานจะทำให้ลูกถ้วยฟังก่อนที่เสาจะพังซึ่งมีราคาถูกและสามารถเปลี่ยนและติดตั้งใหม่ได้ง่ายเมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตฟังกดังรูปที่ 2.10 รูปที่ 2.35 และ 2.36 แสดงให้เห็นกลไกโดยการลดหน้าตัดของแท่งพิวส์ และขายึดพิวส์ โดยนี้เป็นเพียงแนวคิดที่จะมีการพัฒนาต่อในอนาคต



รูปที่ 2.35 ลูกถ้วยที่มีกลไกการแตกหักแบบยืดหยุ่น



รูปที่ 2.36 ลูกถ้วยที่มีกลไกการแตกหักแบบเปราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ข้อสรุป

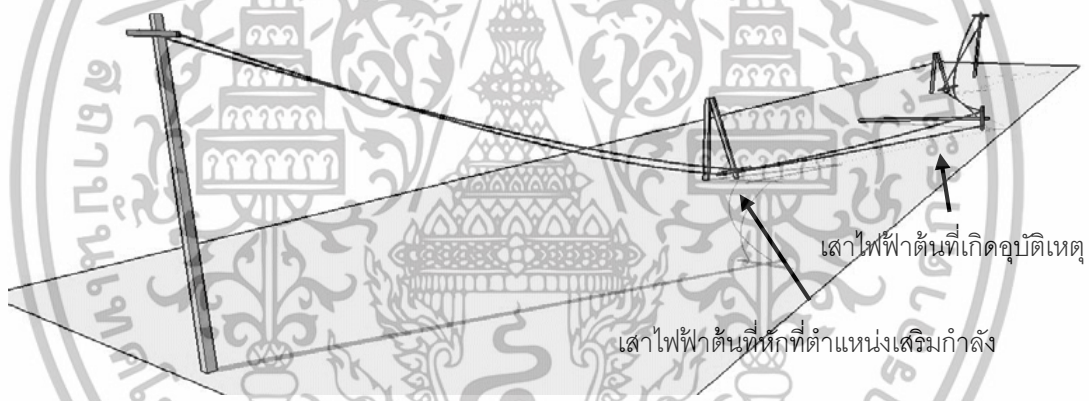
หนึ่งในส่วนที่สำคัญที่สุดของของการจ่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย คือ เสาคอนกรีตซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ระบบมีความมั่นคง ดังนั้นการศึกษาจึงเล็งไปที่ประสิทธิภาพของเสาคอนกรีต โดยการทดสอบเสาคอนกรีตเต็มรูปแบบ 3 ต้น โดยสนใจเฉพาะความสามารถในการรับแรงด้านข้าง และพฤติกรรมการเสียวรูป นอกจากนี้การศึกษาเชิงตัวเลขโดยการสร้างแบบจำลองเสา 7 ช่วงเพื่อหาจุดที่อ่อนแอที่สุดของระบบ แบบจำลองเชิงตัวเลขได้มีการปรับค่าให้ถูกต้องเมื่อเทียบกับการทดสอบจริง และยังได้ทดสอบการรับแรงด้านข้างโดยจำลองสภาพอากาศที่เลวร้าย จากรายงานแสดงให้เห็นว่าเสาคอนกรีตล้มเนื่องจากแรงจากลมและน้ำหนักของน้ำแข็ง แต่ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแรงนั้นๆโดยทั่วไปไม่ทำให้เสาพัง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแทนที่จะใช้เสาไฟฟ้าที่ออกแบบมาเกินความจำเป็นซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายสูง ลูกถ้วยแบบมีกลไกเพื่อใช้ในการป้องกันการพังของเสาเนื่องจากแรงกระทำที่ไม่อยู่ในการคำนวณตามมาตรฐาน โดยในการศึกษาต่อไปในภายภาคหน้าจะเป็นการออกแบบลูกถ้วยดังกล่าว



## บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 แนวคิดในการหาตำแหน่งของจุดที่เกิดการหักบนเสาไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการเสริมกำลัง เพื่อที่จะช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า โดยมีแนวคิดในการกำหนดตำแหน่งของจุดที่เกิดการหักบนเสาไฟฟ้าให้สูงกว่าการหักโค่นที่ระดับพื้นดินจะสามารถช่วยลดแรงที่กระทำต่อเสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ เมื่อเสาไฟฟ้าต้นที่เกิดอุบัติเหตุหักโค่นลง และส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นที่อยู่ข้างๆ ทั้ง 2 ด้าน เสาไฟฟ้า ทั้ง 2 ต้น จะที่ได้รับแรงกระทำ และหักที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ด้วยการเสริมกำลัง จะสามารถช่วยลดการหักโค่นไปสู่เสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ ด้วยหลักการนี้จึงนำไปสู่การสร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำลองขึ้นจากแบบของเสาไฟฟ้า เพื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น และหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเสริมกำลัง



รูปที่ 3.1 ภาพจำลองเหตุการณ์เมื่อเสาไฟฟ้าหักโค่น

เมื่อเสาไฟฟ้าเกิดอุบัติเหตุที่ควบคุมไม่ได้จนทำให้เสาไฟฟ้าหักทั้งต้น และส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไป เสาไฟฟ้าต้นถัดไปก็จะหักที่ตำแหน่งเสริมกำลัง และส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไป การวิเคราะห์จะเกิดขึ้นที่เสาต้นที่ถัดจากต้นที่หักที่ตำแหน่งเสริมกำลัง

### 3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรมเอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าคอนกรีตใน 2 ระบบ ได้แก่ เสาไฟฟ้าในระบบ 12/24 KV. มี 3 แบบ คือ 12.00 m. GW., 12.00 m. 5 T-m., 12.35 m. 6.5 T-m. และเสาไฟฟ้าในระบบ 69/115 KV. มี 2 แบบ 22.00 m. 18 T-m., 22.00 m. 25 T-m.

#### 3.2.1 มาตรฐานในการติดตั้งเสาไฟฟ้า

มาตรฐานในการติดตั้งเสาไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ความลึกของการปักเสาไฟฟ้า, ระยะห่างในการปักเสาไฟฟ้า และรายละเอียดแบบมาตรฐานการก่อสร้างการก่อสร้างเสาไฟฟ้า

3.2.1.1 ความลึกของการปักเสาไฟฟ้าจากระดับถนนในปัจจุบันกำหนดให้เสาไฟฟ้าคอนกรีตทุกขนาดต้องมี Reference Point มีลักษณะเป็นแถบสีดำเพื่อบอกระดับอ้างอิงในการปักเสามีรายละเอียดดังนี้

1. เสา 12.00 m. GW. ระยะปักลงไปดินจากระดับพื้นถนน 1.75 เมตร
2. เสา 12.00 m. 5 T-m. ระยะปักลงไปดินจากระดับพื้นถนน 1.75 เมตร
3. เสา 12.35 m. 6.5 T-m. ระยะปักลงไปดินจากระดับพื้นถนน 2.10 เมตร
4. เสา 22.00 m. 18 T-m. ระยะปักลงไปดินจากระดับพื้นถนน 2.00 เมตร
5. เสา 22.00 m. 25 T-m. ระยะปักลงไปดินจากระดับพื้นถนน 2.00 เมตร

3.2.1.2 ระยะห่างในการปักเสาไฟฟ้าในการปักเสาไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

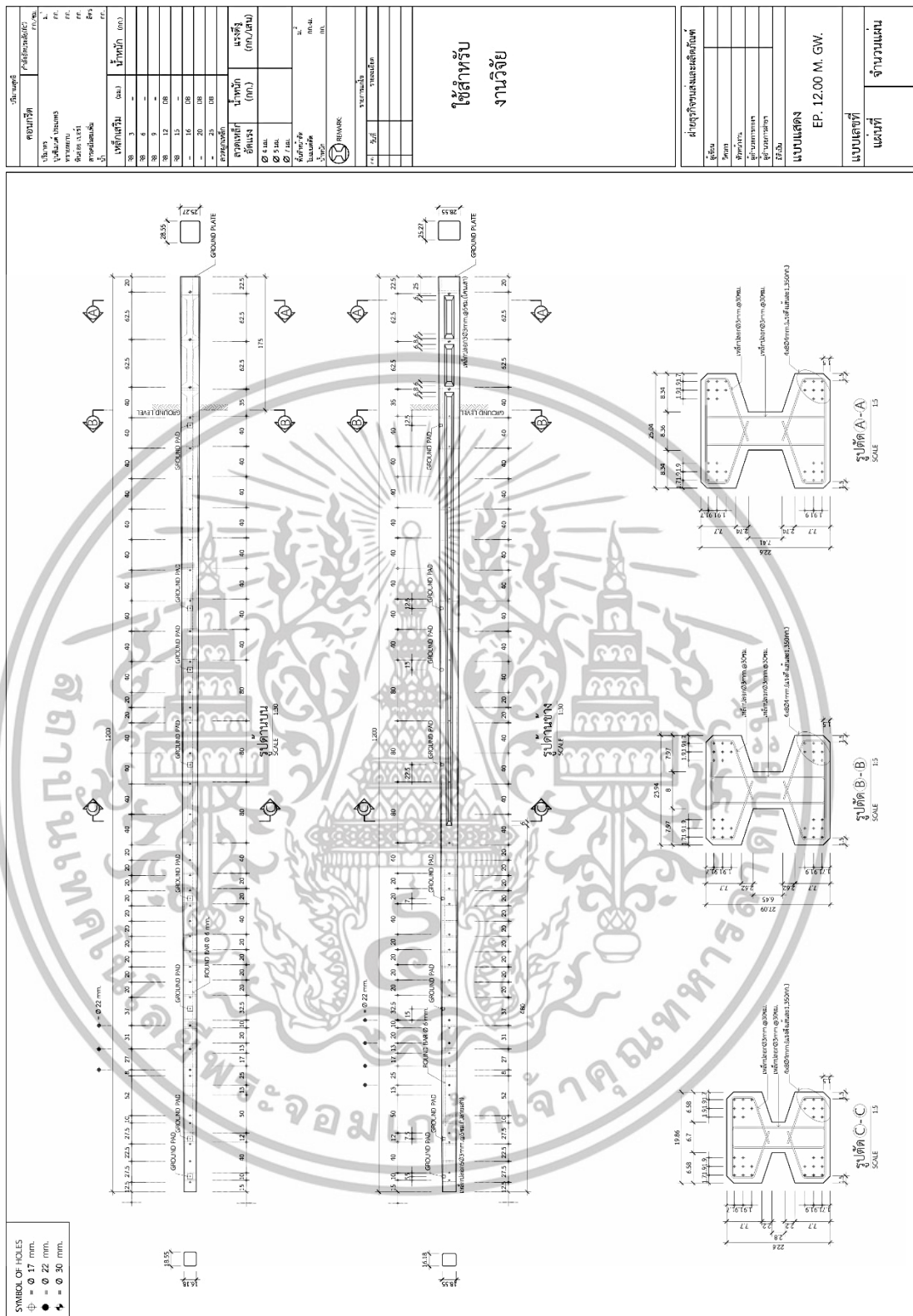
1. เสาไฟฟ้าในระบบ 12/24 KV. ระยะห่างช่วงเสาสูงสุด 40 เมตร
2. เสาไฟฟ้าในระบบ 69/115 KV. ระยะห่างช่วง เสาสูงสุด 80 เมตร

3.2.1.3 รายละเอียดแบบมาตรฐานการก่อสร้างเสาไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดแบบมาตรฐานการก่อสร้างการก่อสร้างเสาไฟฟ้า

รายการ	กำลังอัด ประลัยของ คอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	ลวดเหล็ก อัดแรง	เหล็ก ปลอก	เหล็ก ปลอก ปลายบน	เหล็ก ปลอก ปลาย ล่าง	เหล็กเสริม พิเศษ	ขนาด หน้าตัด ปลาย บน (ซม.)	ขนาด หน้าตัด ปลาย ล่าง (ซม.)
EP. 12.00 M. GW.						-		
EP. 12.00 M. 5 T-M.		4x8Ø4 มม. (แรงดึงเส้น ละ 1350 กก.)		5Ø3 มม. @5 ซม.	3Ø3 มม. @5 ซม.	4DB25 มม. (L=5.00 ม.) จากโคน /4DB12 มม. (L=5.00 ม.)	18.55x 16.18	28.55x 25.27
EP. 12.35 M. 6.5 T-M.	450	4x5Ø7 มม. (แรงดึงเส้น ละ 4000 กก.)	Ø3 มม. @30 ซม.	4Ø6 มม. @5 ซม.	4Ø6 มม. @5 ซม.	-	22.40x 22.40	35.63x 35.63
EP. 22.00 M. 18 T-M.		4x9Ø7 มม. (แรงดึงเส้น ละ 4500 กก.)		5Ø6 มม. @5 ซม.	3Ø6 มม. @2.5 ซม.	-	25.60x 25.60	43.60x 43.60
EP. 22.00 M. 25 T-M.		4x9Ø7 มม. (แรงดึงเส้น ละ 4500 กก.)		6Ø6 มม. @5 ซม.	12Ø6 มม. @5 ซม.	4Ø19 มม. (L=5.00 ม.) จากโคน	27.00x 27.00	57.25x 57.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

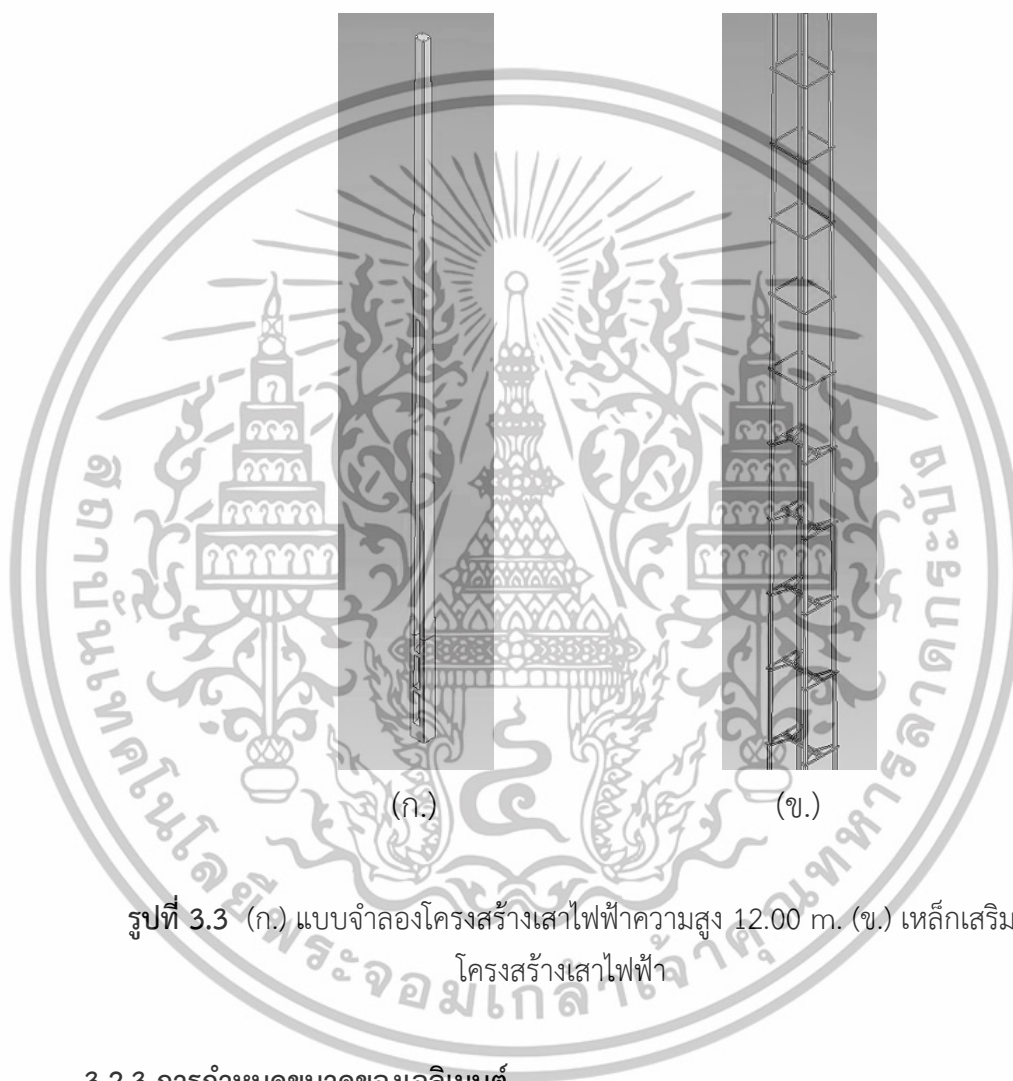


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแบบมาตรฐานเสาไฟฟ้าคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ข้อจำกัดในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า

1. รวมลวดเหล็กอัดแรงเป็นมุมละเส้นโดยยังคงพื้นที่หน้าตัดของลวดเหล็กอัดแรงไว้เท่าเดิม
2. แปลงหน้าตัดเหล็กทั้งหมดจากวงกลมเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยยังคงพื้นที่หน้าตัดเท่าเดิม
3. แปลงขนาดเหล็กปลอกขนาด  $\emptyset 3$  มม. เป็นเหล็กปลอกขนาด  $\emptyset 6$  มม. โดยเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุให้เทียบเท่ากัน
4. ตัดส่วนของเสาไฟฟ้าที่อยู่ในดินทั้งหมด และกำหนดจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น

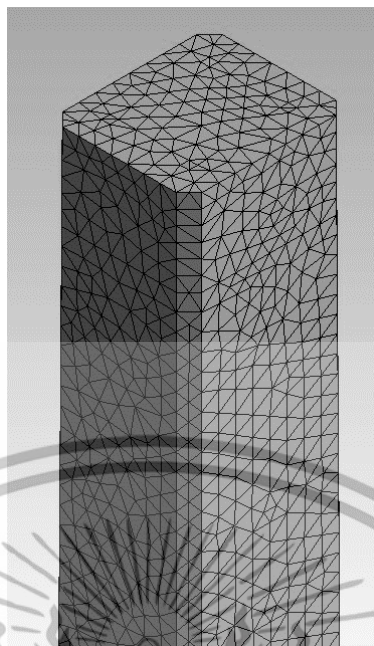


รูปที่ 3.3 (ก.) แบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้าความสูง 12.00 m. (ข.) เหล็กเสริมภายในโครงสร้างเสาไฟฟ้า

### 3.2.3 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์

ในการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์นั้นส่งผลถึงผลลัพธ์ที่จากการวิเคราะห์ ยิ่งกำหนดเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กเท่าไรก็ยิ่งได้คำตอบที่ถูกต้องมากเท่านั้น แต่ก็แลกมาด้วยเวลาในการคำนวณที่มากขึ้น แต่การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กเกินไปอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่มีค่าที่มากเกินไปกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ภาพการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์นี้ใช้ขนาดเอลิเมนต์คอนกรีตเท่ากับ 0.02 เมตร และเอลิเมนต์เหล็กเท่ากับ 0.01 เมตร

### 3.2.4 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า

1. ใส่จุดรองรับที่ระดับพื้นดินเป็นแบบยึดแน่น
2. ใส่แรงกระทำโดยมีขนาดมาจากน้ำหนักของเสาขณะลัมที่ระยะความสูงที่หัดต่างๆ
3. ใส่แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักของตัวเสาไฟฟ้า (แรงโน้มถ่วงของโลก)
4. ใส่แรงกระทำเนื่องจากลวดเหล็กอัดแรงให้กระจายตลอดทั้งหน้าตัด

### 3.2.5 แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าเมื่อเสาไฟฟ้าหัดที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง

แรงที่กระทำเกิดขึ้นจากน้ำหนักของเสาไฟฟ้าที่ลัมทำให้เกิดแรงดึงเนื่องจากสายไฟฟ้าไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไป เมื่อเสาไฟฟ้ามีส่วนที่หัดน้อยลงเนื่องจากการเสริมกำลังก็จะทำให้น้ำหนักส่วนที่หัดน้อยลงส่งผลให้เกิดแรงกระทำไปยังเสาต้นต่อไปน้อยลงเช่นกัน โดยใส่แรงกระทำจากน้ำหนักส่วนของเสาไฟฟ้าต้นที่หัดจากการเสริมกำลังที่ความสูงต่างๆ น้ำหนักของเสาไฟฟ้าคิดจากการหาปริมาตรของวัสดุคูณด้วยความหนาแน่นของวัสดุ โดยความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ 7850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 12.00 m. GW มีระยะปักลงไปในดิน 1.75 เมตร

ระยะความสูงของตำแหน่งที่เสริมกำลังจากระดับโคนเสา (เมตร)	น้ำหนักส่วนที่เหลือของเสาไฟฟ้าเมื่อหักที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง (กิโลกรัม)
1.75	1016.80
2.00	986.44
3.00	868.62
4.00	756.37
5.00	649.55
6.00	548.04
7.00	451.77
8.00	348.57
9.00	250.45

ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 12.00 m. 5 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 1.75 เมตร

ระยะความสูงของตำแหน่งที่เสริมกำลังจากระดับโคนเสา (เมตร)	น้ำหนักส่วนที่เหลือของเสาไฟฟ้าเมื่อหักที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง (กิโลกรัม)
1.75	1063.10
2.00	1018.40
3.00	901.50
4.00	778.52
5.00	660.97
6.00	556.99
7.00	458.22
8.00	352.54
9.00	251.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 12.35 m. 6.5 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 2.10

เมตร

ระยะความสูงของตำแหน่งที่เสริมกำลังจากระดับโคนเสา (เมตร)	น้ำหนักส่วนที่เหลือของเสาไฟฟ้าเมื่อหักที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง (กิโลกรัม)
2.10	1763.40
3.00	1580.70
4.00	1387.00
5.00	1202.80
6.00	1028.10
7.00	839.62
8.00	653.76
9.00	481.81

ตารางที่ 3.5 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 22.00 m. 18 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 2.00 เมตร

ระยะความสูงของตำแหน่งที่เสริมกำลังจากระดับโคนเสา (เมตร)	น้ำหนักส่วนที่เหลือของเสาไฟฟ้าเมื่อหักที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง (กิโลกรัม)
2.00	5088.6
4.00	4450.3
6.00	3854.1
8.00	3298.7
10.00	2781.1
12.00	2193.5
14.00	1658.9
16.00	1174.8
18.00	738.71
20.00	347.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

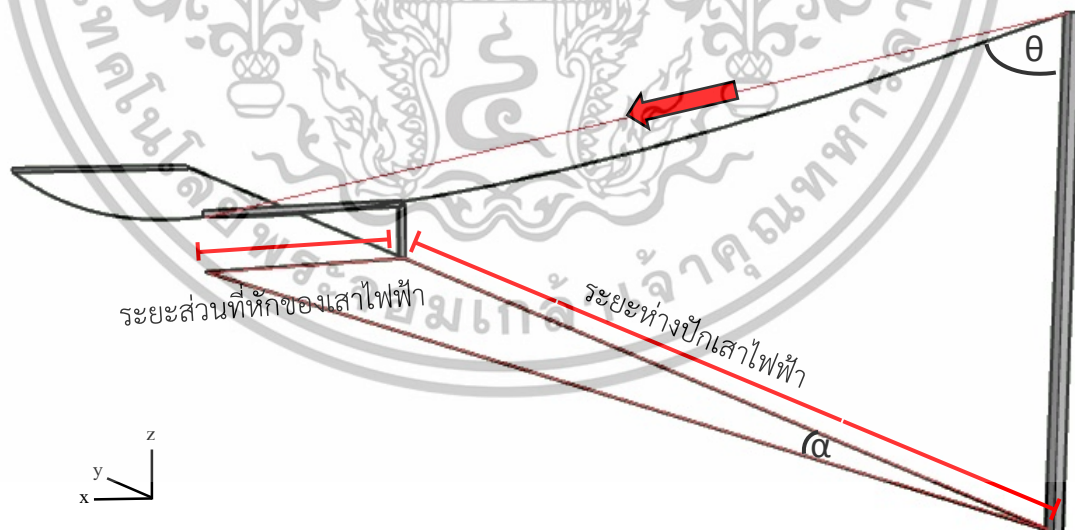
ตารางที่ 3.6 น้ำหนักของเสาไฟฟ้า EP 22.00 m. 25 T-m. มีระยะปักลงไปในดิน 2.00 เมตร

ระยะความสูงของตำแหน่งที่เสริมกำลังจากระดับโคนเสา (เมตร)	น้ำหนักส่วนที่เหลือของเสาไฟฟ้าเมื่อหักที่ตำแหน่งที่เสริมกำลัง (กิโลกรัม)
2.00	7175.9
4.00	6194.4
6.00	5294.7
8.00	4474.2
10.00	3720.9
12.00	2856.0
14.00	2098.7
16.00	1442.4
18.00	877.74
20.00	399.58

เมื่อเรารู้น้ำหนักแล้วก็จะสามารถหาแรงที่กระทำกับเสาไฟฟ้าได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{แรงกระทำ} = \text{สัมประสิทธิ์แรงกระทำ} \times \text{น้ำหนักของเสาไฟฟ้า} \times \text{มุมแนวแรงดึงราบและแนวตั้ง}$$

โดยสัมประสิทธิ์แรงกระทำ เท่ากับ 1.3



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการเกิดมุมแนวราบและแนวตั้งเมื่อเกิดเสาไฟฟ้าหักที่ตำแหน่งเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW เมื่อเสริมกำลัง และหักที่ความสูง 1.75 เมตร จากโคนเสา หรือเท่ากับระดับพื้นดิน

น้ำหนักของเสาไฟฟ้า = 1,016.80 กิโลกรัม

ระยะแกน x = 10.25 เมตร

ระยะแกน y = 40.00 เมตร

ระยะแกน z = -10.25 เมตร

กำหนดให้สัมประสิทธิ์แรงกระแทก เท่ากับ 1.3

แรงกระทำในแนวแกน x

$$= 1.3 \times 1,016.80 \times \frac{10.25}{\sqrt{(10.25)^2 + (40)^2 + (-10.25)^2}}$$

$$= 318.46 \text{ กิโลกรัม} = 3122.98 \text{ นิวตัน}$$

แรงกระทำในแนวแกน y

$$= 1.3 \times 1,016.80 \times \frac{40}{\sqrt{(10.25)^2 + (40)^2 + (-10.25)^2}}$$

$$= 1242.75 \text{ กิโลกรัม} = 12187.21 \text{ นิวตัน}$$

แรงกระทำในแนวแกน z

$$= 1.3 \times 1,016.80 \times \frac{-10.25}{\sqrt{(10.25)^2 + (40)^2 + (-10.25)^2}}$$

$$= -318.46 \text{ กิโลกรัม} = -3122.98 \text{ นิวตัน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้แรงในแนวแกนทั้ง 3 แรง นำไปใส่ในแบบจำลองบริเวณปลายบนของเสาไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการใส่แรงกระทำเนื่องจากแรงดึง และแรงกระทำที่จำลองการอัดของลวดอัดแรงบนแบบจำลองเสาไฟฟ้า

แบบจำลองมีทั้งหมด 46 แบบจำลอง และสามารถแบ่งแบบจำลองได้ดังนี้

EP. 12.00 m. GW. มี 9 แบบจำลอง แบ่งเป็น เมื่อเสริมกำลัง และหักที่ความสูง 1.75, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00 และ 9.00 เมตร จากโคนเสา

EP. 12.00 m. 5 T-m. มี 9 แบบจำลอง แบ่งเป็น เมื่อเสริมกำลัง และหักที่ความสูง 1.75, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00 และ 9.00 เมตร จากโคนเสา

EP. 12.35 m. 6.5 T-m. มี 8 แบบจำลอง แบ่งเป็น เมื่อเสริมกำลัง และหักที่ความสูง 2.10, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00 และ 9.00 เมตร จากโคนเสา

EP. 22.00 m. 18 T-m. มี 10 แบบจำลอง แบ่งเป็น เมื่อเสริมกำลัง และหักที่ความสูง 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00, 18.00 และ 20.00 เมตร จากโคนเสา

EP. 22.00 m. 25 T-m. มี 10 แบบจำลอง แบ่งเป็น เมื่อเสริมกำลัง และหักที่ความสูง 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00, 18.00 และ 20.00 เมตร จากโคนเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเสาไฟฟ้าเกิดอุบัติเหตุที่ควบคุมไม่ได้จนทำให้เสาไฟฟ้าหักและล้มทั้งต้น ส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไป เสาไฟฟ้าต้นถัดไปก็จะหักที่ตำแหน่งเสริมกำลัง และส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไป การวิเคราะห์จะเกิดขึ้นที่เสาต้นที่ถัดจากต้นที่หักที่ตำแหน่งเสริมกำลัง โดยใส่แรงกระทำจากน้ำหนักส่วนของเสาไฟฟ้าต้นที่หักจากการเสริมกำลังที่ความสูงต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลจากการวิเคราะห์จะทำได้โดยการเปรียบเทียบ Stress ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองเสาไฟฟ้าแล้วเทียบกับค่ากำลังของวัสดุ โดยจะเกิดการหักต่อเมื่อค่า Stress ที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุที่รับได้ ดังสมการที่ (1) เปรียบเทียบอยู่ในรูปของ Safety Factor ดังสมการที่ (2) โดยมีสมการดังนี้

$$\sigma_e \geq S_{limit} \quad (1)$$

Safety Factor

$$Fs = \frac{S_{limit}}{\sigma_e} \quad (2)$$

โดยเป้าหมายในการออกแบบ

$$\frac{S_{limit}}{\sigma_e} > 1 \quad (3)$$

$\sigma_e$  = Equivalent Stress (Pa)

$S_{limit}$  = Stress limit ของวัสดุ (Pa)

$Fs$  = Safety Factor

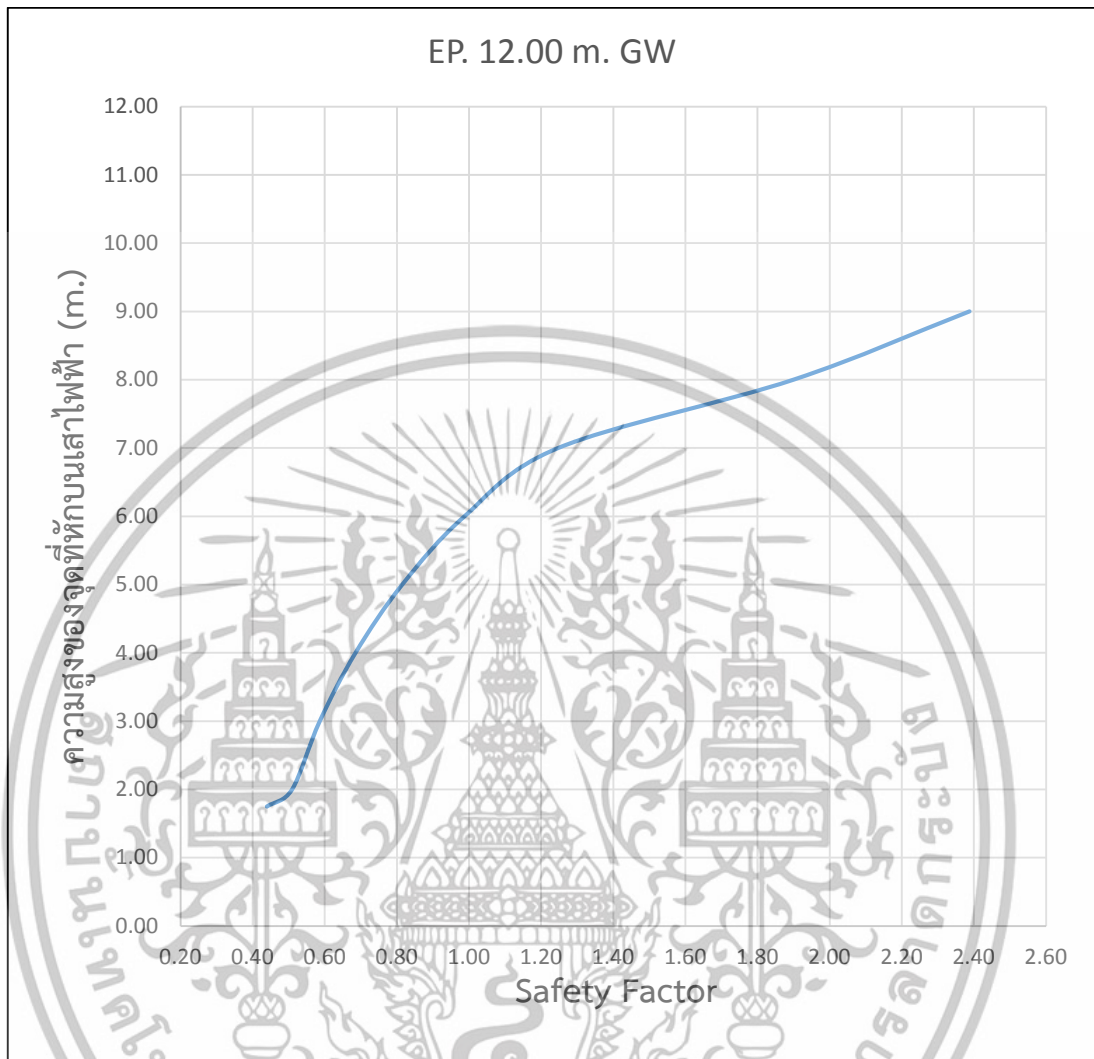
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในข้างต้น เกิดค่า Safety factor ต่ำสุดบนวัสดุคอนกรีตที่ระดับพื้นดิน แต่เหล็กยังคงสามารถรับแรงได้โดยไม่เกิดการวิบัติโดยมีค่า Safety factor มากกว่า 1.5 ทุกกรณีเมื่อเทียบกำลังจุดคราก ทำให้เราสามารถกำหนดตำแหน่งที่จะเสริมกำลังได้โดยกำหนดจุดหักบนเสาไฟฟ้าให้มีค่า safety factor มากกว่าหรือเท่ากับ 1 โดยจะต้องเสริมกำลัง



รูปที่ 4.1 (ก.) ตัวอย่างการเกิด Stress บนแบบจำลองเสาไฟฟ้า (ข.) ตัวอย่างแบบจำลองเสาไฟฟ้าที่แสดงให้เห็นจุดที่ Safety factor ต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

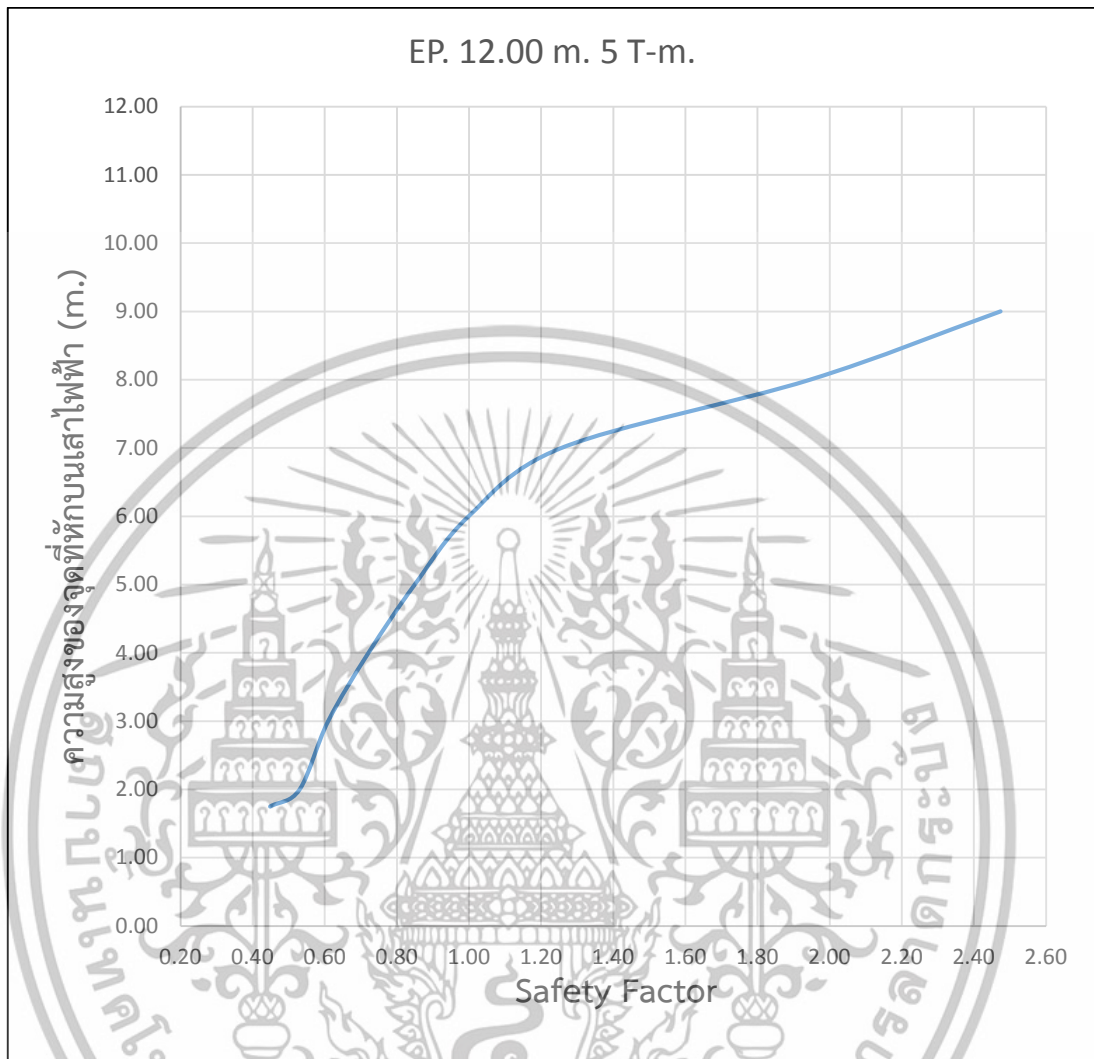
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW.



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW

ที่ Safety Factor เท่ากับ 1 ความสูงของจุดหักบนเสาไฟฟ้าเท่ากับ 6.05 เมตร

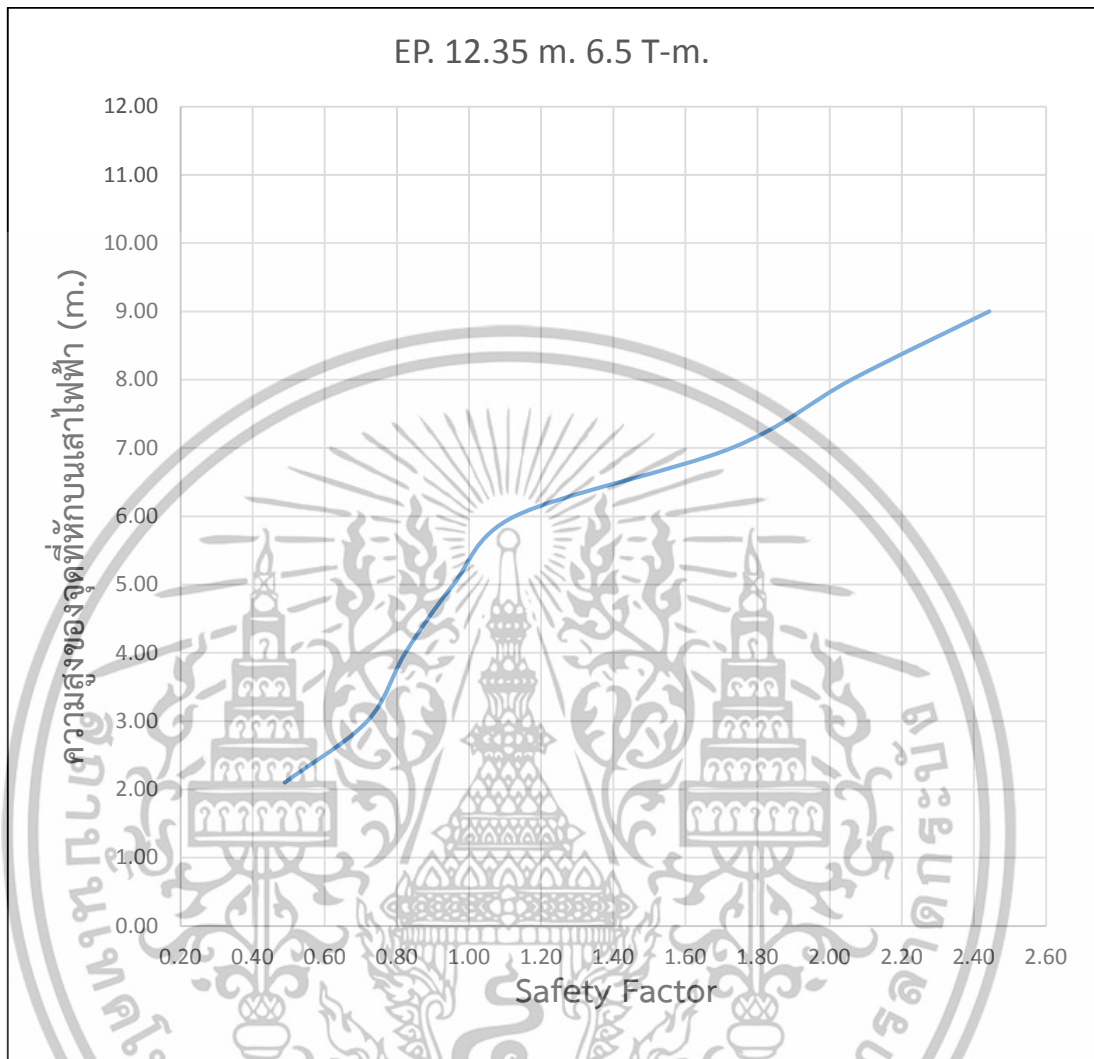
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. 5 T-m.



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. 5 T-m.

ที่ Safety Factor เท่ากับ 1 ความสูงของจุดหักบนเสาไฟฟ้าเท่ากับ 6.00 เมตร

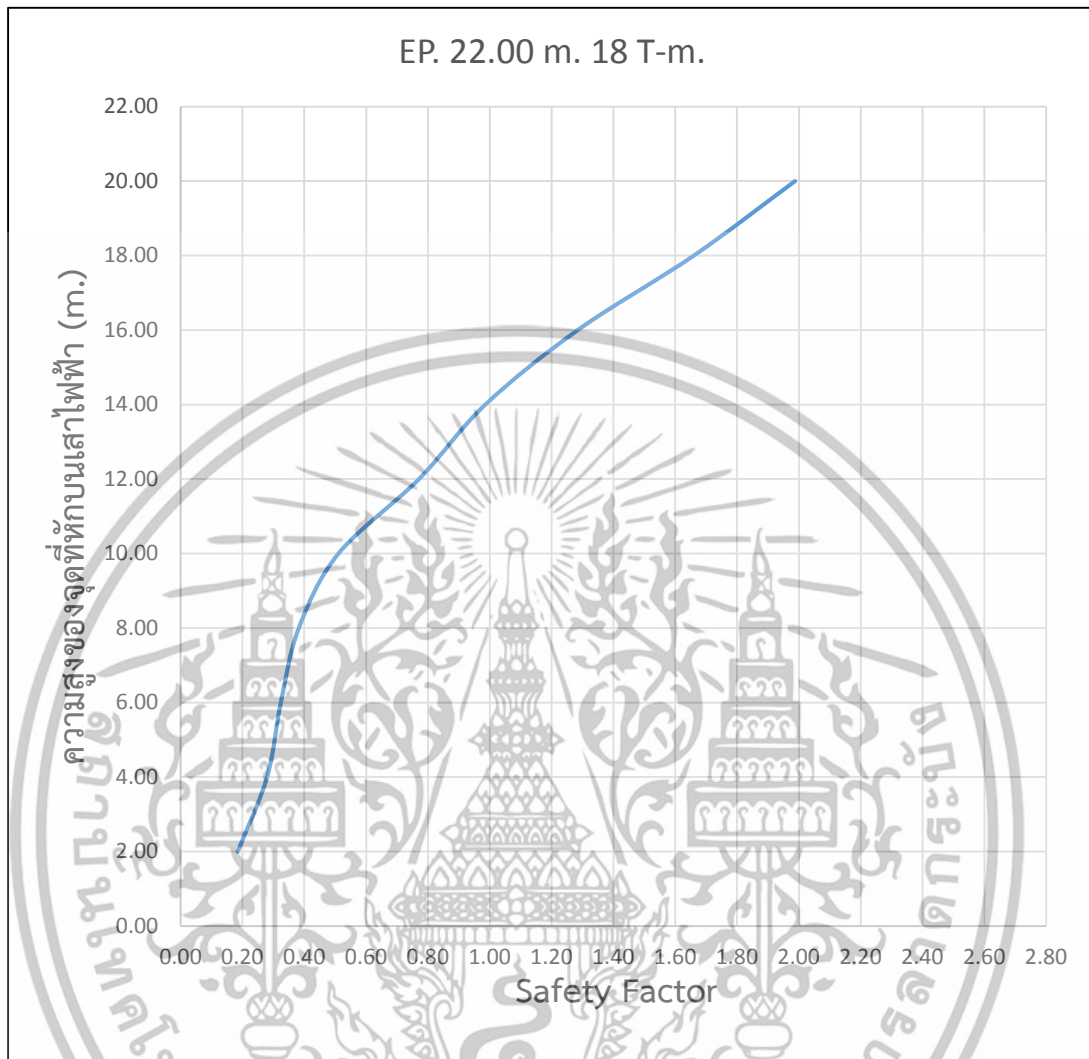
### 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.35 m. 6.5 T-m.



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 12.35 m. 6.5 T-m.

ที่ Safety Factor เท่ากับ 1 ความสูงของจุดหักบนเสาไฟฟ้าเท่ากับ 5.30 เมตร

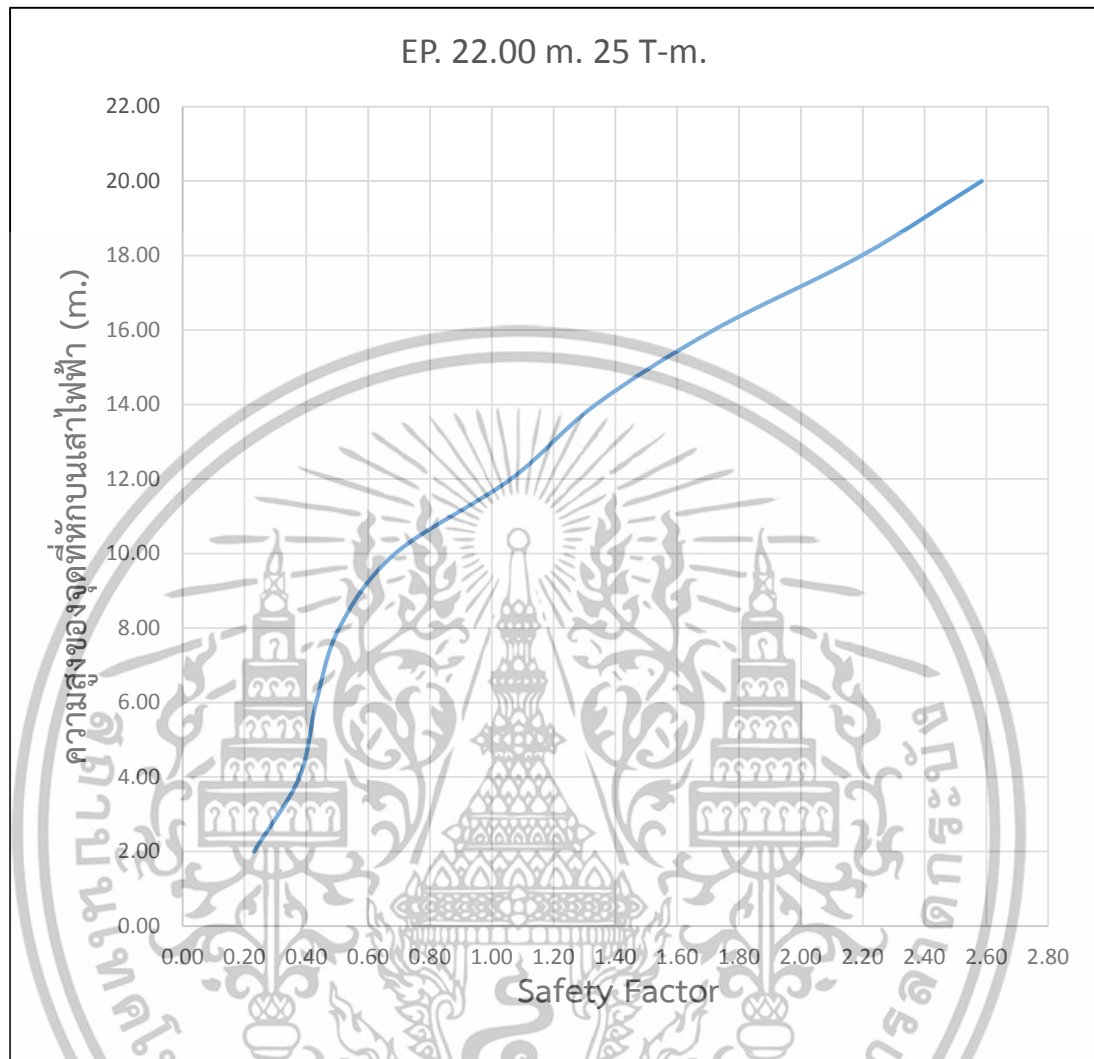
#### 4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 18 T-m.



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 18 T-m.

ที่ Safety Factor เท่ากับ 1 ความสูงของจุดหักบนเสาไฟฟ้าเท่ากับ 14.10 เมตร

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 25 T-m.



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของจุดที่หักบนเสาไฟฟ้ากับ Safety Factor ของเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 25 T-m.

ที่ Safety Factor เท่ากับ 1 ความสูงของจุดหักบนเสาไฟฟ้าเท่ากับ 11.70 เมตร

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เมื่อเสาไฟฟ้าต้นที่ 1 เกิดอุบัติเหตุที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้เสาไฟฟ้าหักโค่นลงทั้งต้น ส่งผลให้เกิดแรงดึงไปยังเสาไฟฟ้าต้นที่ 2 ซึ่งอยู่ถัดไป เสาไฟฟ้าต้นที่ 2 หักที่ตำแหน่งที่ได้ทำการเสริมกำลังจากโค่นเสา ส่งผลให้เกิดแรงดึงที่ไปยังเสาไฟฟ้าต้นที่ 3 โดยการวิเคราะห์ Safety Factor จะเกิดขึ้นที่เสาไฟฟ้าต้นที่ 3 และใช้แรงที่กระทำเนื่องจากการหักที่จุดเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าต้นที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อตำแหน่งที่หักของเสาไฟฟ้าต้นที่ 2 เลื่อนสูงขึ้นจากระดับพื้นดินทำให้ส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นที่ 3 น้อยลงจนทำให้เสาไฟฟ้าต้นที่ 3 สามารถรับแรงได้โดยไม่เกิดการวิบัติ โดยแสดงค่า Safety Factor เท่ากับ 1 หรือมากกว่า สามารถสรุปตำแหน่งความสูงเพื่อการเสริมกำลังบนเสาไฟฟ้าได้ดังนี้

1. เสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW. ควรเสริมกำลังให้จุดที่หักอยู่สูงกว่า 6.05 เมตร จากโค่นเสา คิดเป็น 50.42 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงเสาไฟฟ้า
2. เสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. 5 T-m. ควรเสริมกำลังให้จุดที่หักอยู่สูงกว่า 6.00 เมตร จากโค่นเสา คิดเป็น 50.00 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงเสาไฟฟ้า
3. เสาไฟฟ้า EP. 12.35 m. 6.5 T-m. ควรเสริมกำลังให้จุดที่หักอยู่สูงกว่า 5.30 เมตร จากโค่นเสา คิดเป็น 42.91 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงเสาไฟฟ้า
4. เสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 18 T-m. ควรเสริมกำลังให้จุดที่หักอยู่สูงกว่า 14.10 เมตร จากโค่นเสา คิดเป็น 64.09 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงเสาไฟฟ้า
5. เสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 25 T-m. ควรเสริมกำลังให้จุดที่หักอยู่สูงกว่า 11.70 เมตร จากโค่นเสา คิดเป็น 53.18 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงเสาไฟฟ้า

จากผลลัพธ์ที่ได้เราควรเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ หรือครึ่งหนึ่งของความสูงเสาไฟฟ้า นี้ถือเป็นหนึ่งในแนวทางการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้าเพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าหักโค่นล้มต่อเนื่อง ทั้งนี้ยังต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าในการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าในรูปแบบนี้ และต้องมีการทดสอบภาคสนามก่อนนำไปติดตั้ง หรือใช้งานจริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวอย่างการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท เสาไฟฟ้าที่มีการผลิตหรือติดตั้งไปแล้วจะใช้คาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ในการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าเพื่อกำหนดจุดหัก และเสาไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ผลิตจะเสริมกำลังโดยการใช้แผ่นเหล็กเสริมกำลังเสริมเข้าไปในเสาไฟฟ้า นอกจากนี้ควรพิจารณาวิเคราะห์โครงสร้างส่วนของฐานรากที่อยู่ต่ำกว่าระดับพื้นดินเพิ่มเติม

การป้องกันเสาไฟฟ้าหักโค่นล้มในแบบอื่นๆ เช่น การออกแบบวัสดุที่ใช้ทำรอยต่อที่ทำให้สายไฟหลุดออกจากโครงสร้างเสาไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดึงจากสายไฟที่มากพอจะทำให้เสาไฟฟ้าเกิดหักโค่นล้มเพื่อป้องกันการส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไป, การนำสายไฟร้อยท่อนลงดิน และการป้องกันทางด้านกรรจรเพื่อลดอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าเนื่องจากกรรจรหรือยานพาหนะอื่นๆ เป็นต้น



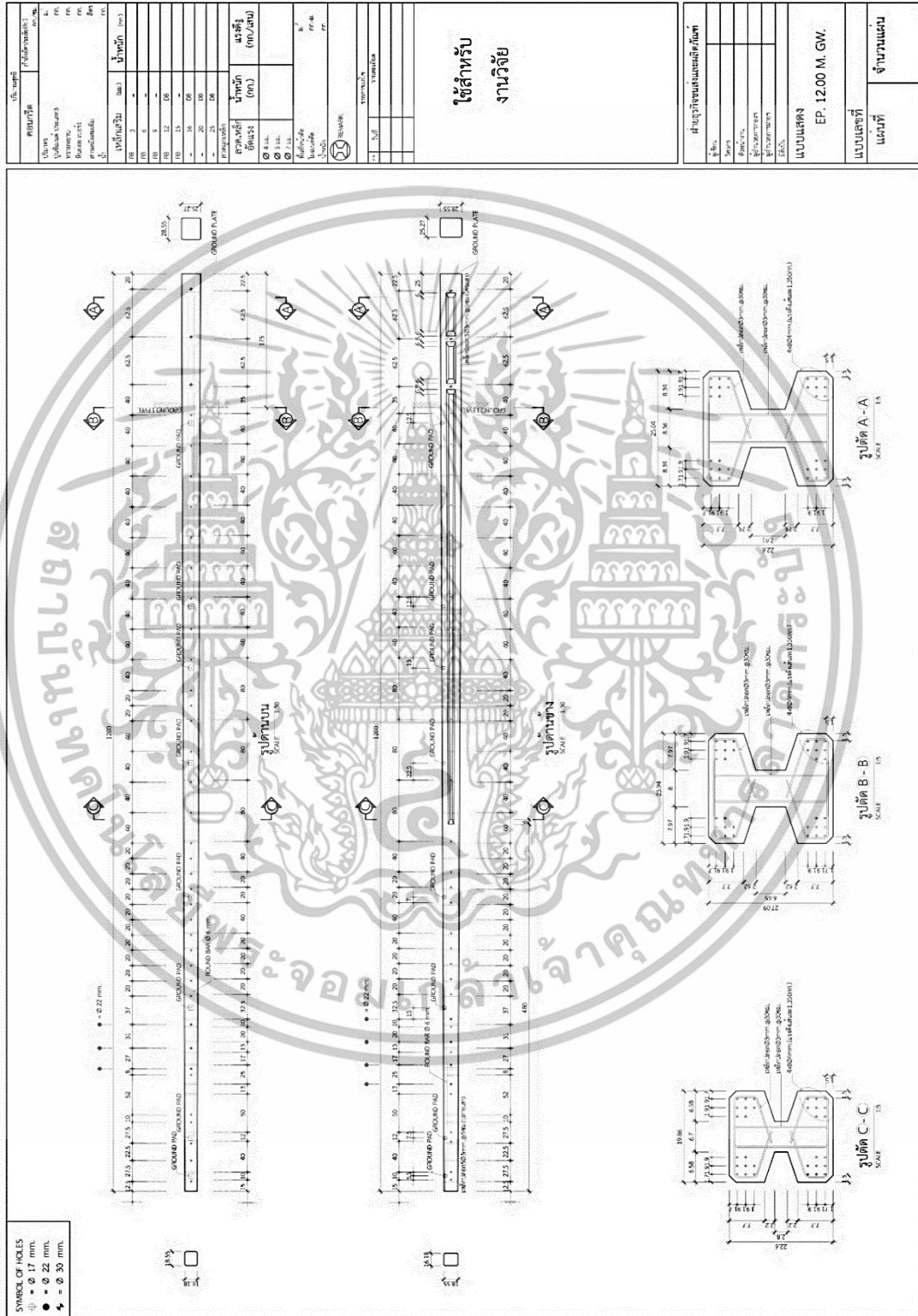
## เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Vivek, S. Sharma., P. Raychowdhury. and S. Ray-Chaudhri. "A study on failure mechanism of self-supported electric poles through full-scale field testing." **Engineering Failure Analysis.**, Vol.77, 2016. Pp. 102–117
- [2] Mehran Zeynalian., Mehrdad Zamani Khorasgani. "Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network." **Archives of Civil and Mechanical Engineering.**, Vol.18, 2018. Pp. 863-867



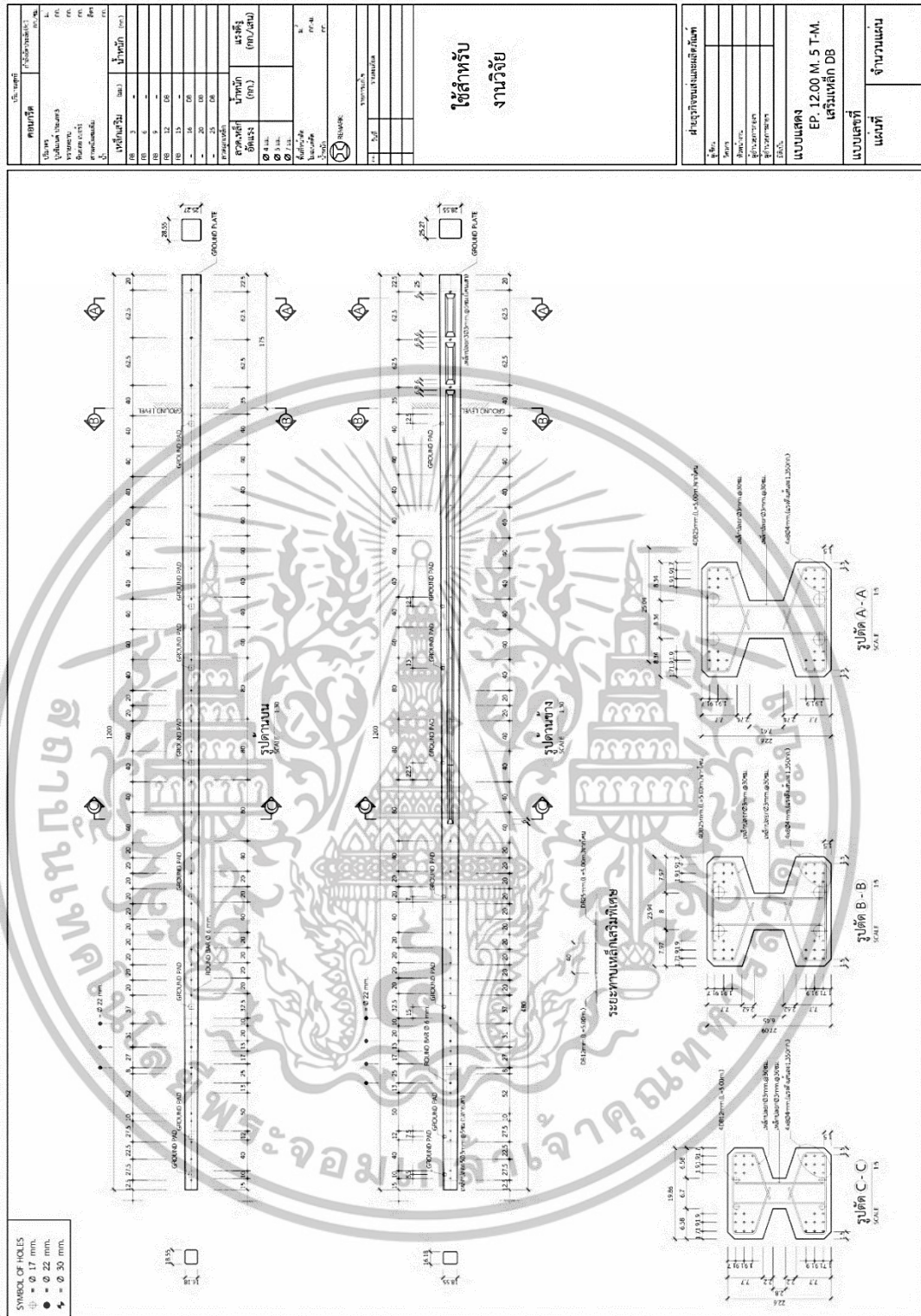
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
แบบมาตรฐานการก่อสร้างเสาไฟฟ้า



รูปที่ ก.1 แบบแสดง EP. 12.00 M. GW.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

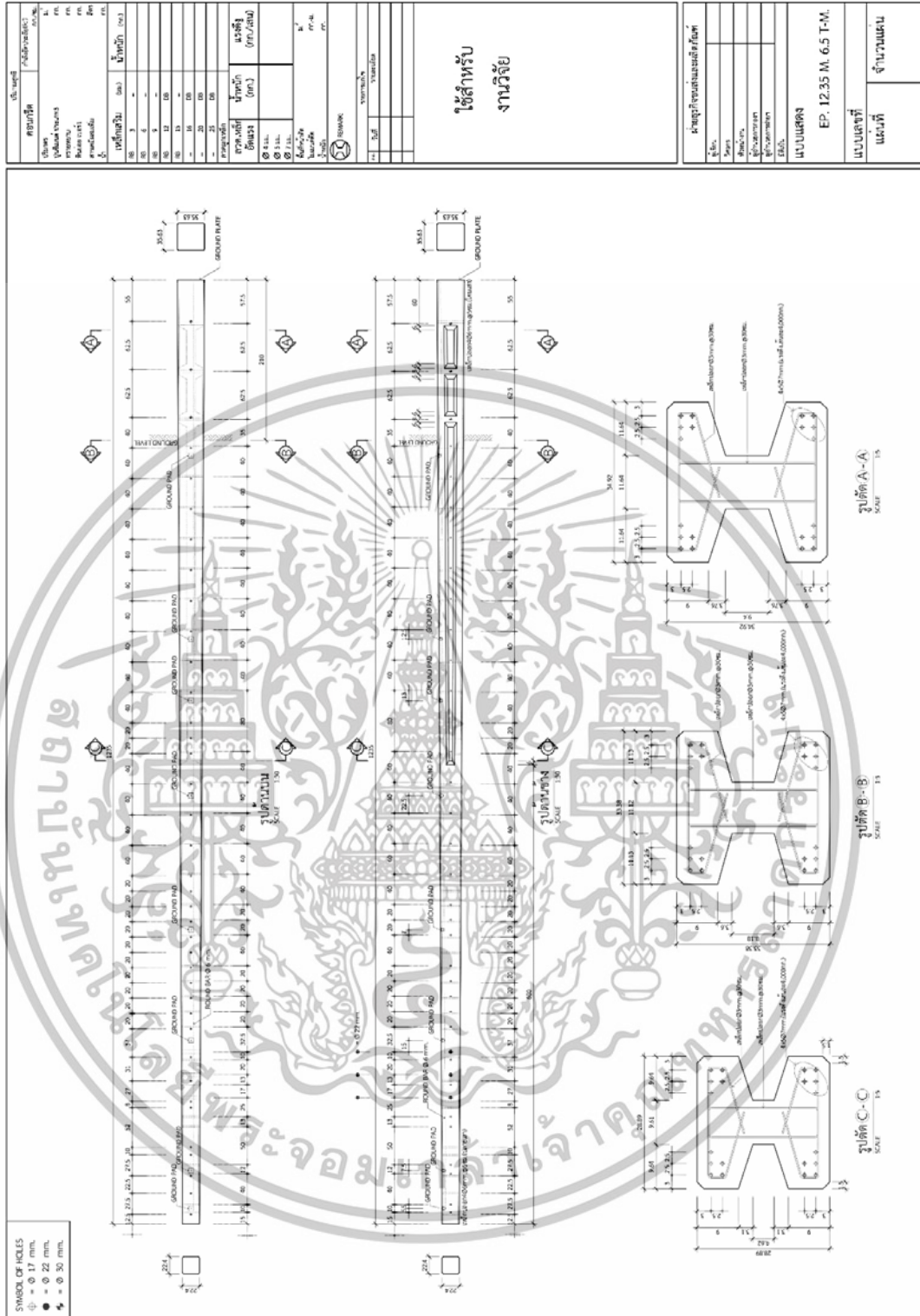


<b>ผู้จัดทำ</b> วิชา ภาควิชา คณะ มหาวิทยาลัย		วันที่ ปี
<b>ผู้รับใช้</b> วิชา ภาควิชา คณะ มหาวิทยาลัย		วันที่ ปี
ชื่อ เลขที่ ชั้นปี สาขา	ชื่อ เลขที่ ชั้นปี สาขา	ชื่อ เลขที่ ชั้นปี สาขา
<b>แบบแสดง</b> EP 12.00 M. 5 T-M. เสริมเหล็ก DB		<b>จำนวนแผ่น</b> จำนวน

ใช้สำหรับ  
งานวิจัย

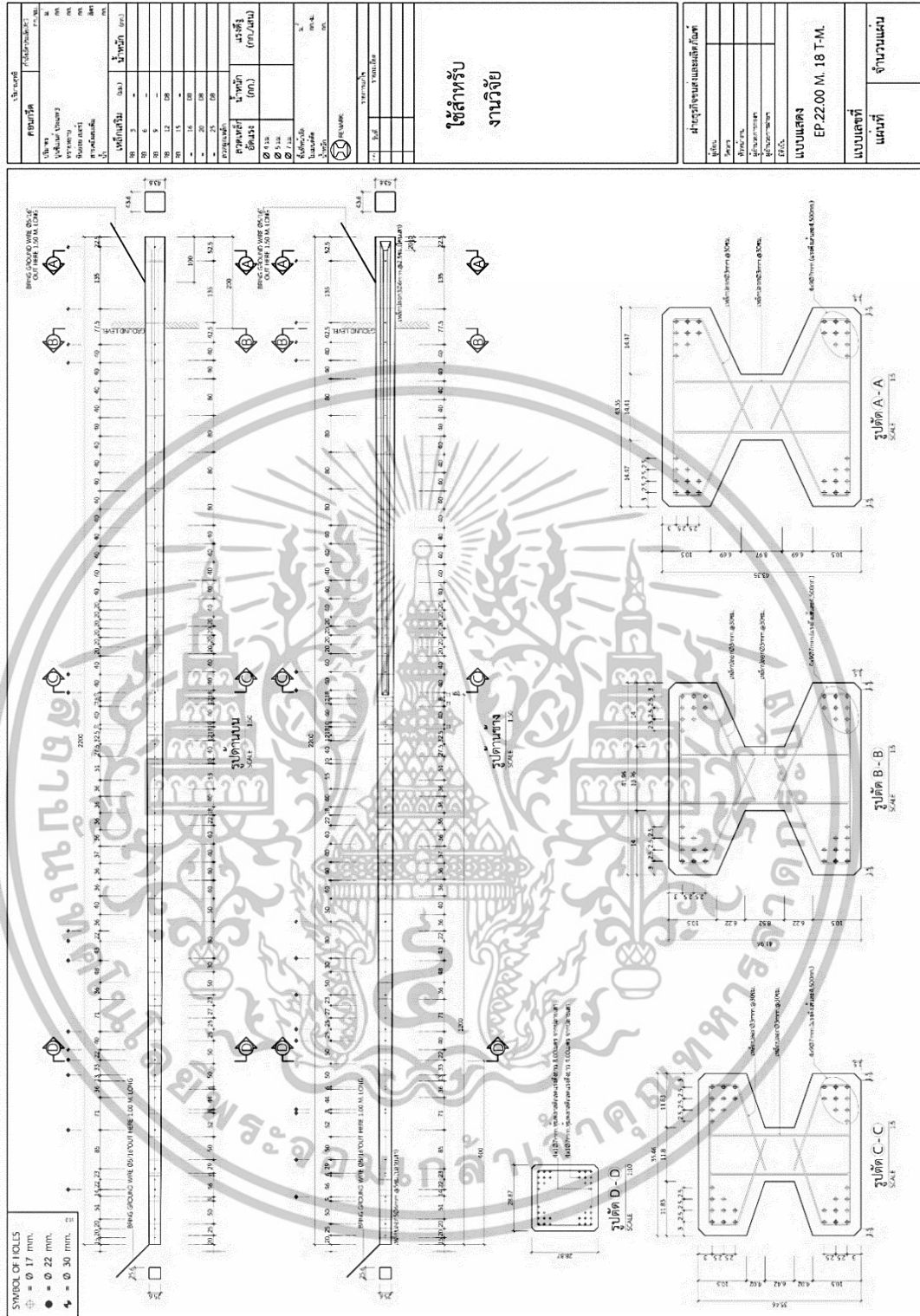
รูปที่ ก.2 แบบแสดง EP. 12.00 M. 5 T-M. เสริมเหล็ก DB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



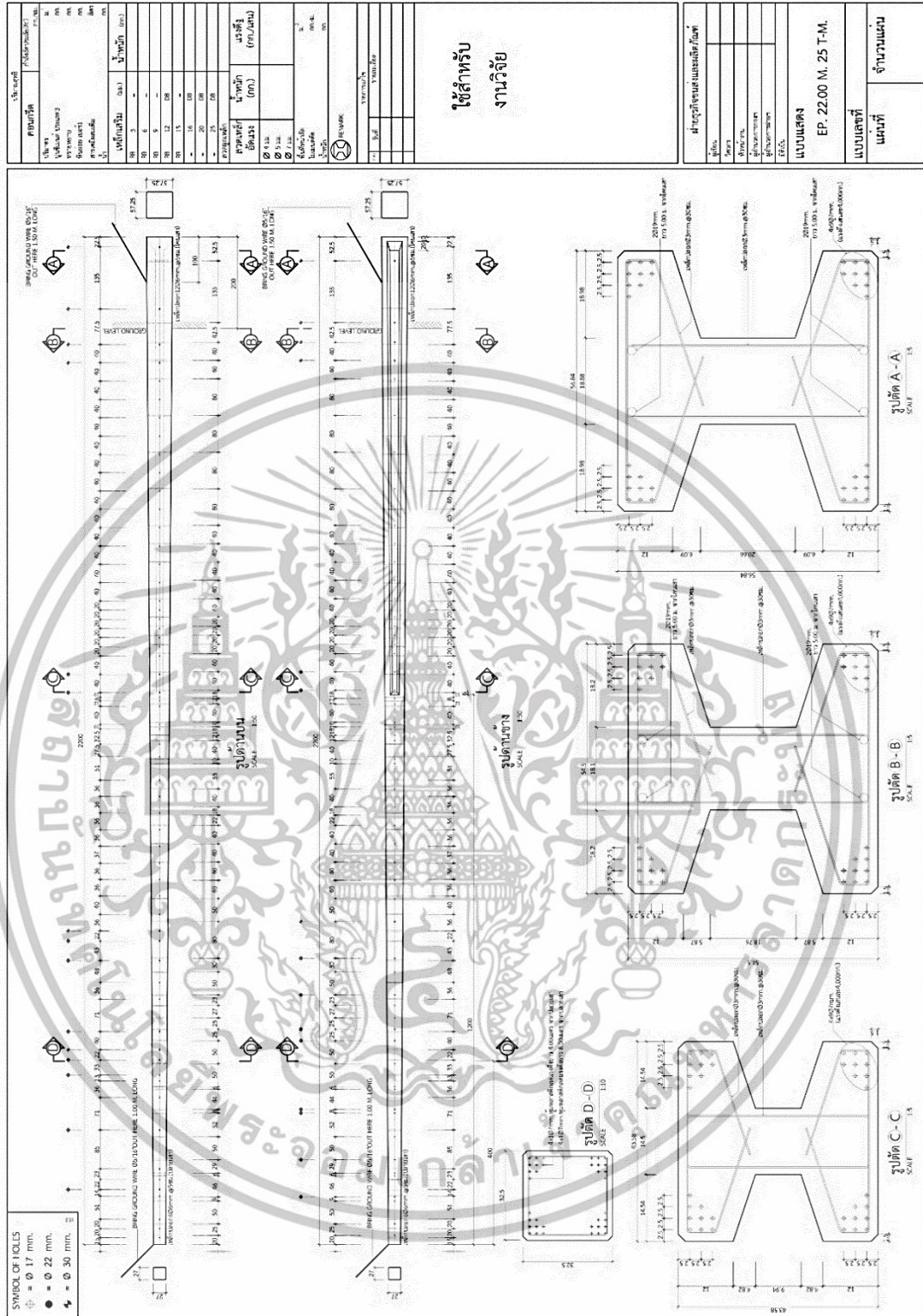
รูปที่ ก.3 แบบแสดง EP. 12.35 M. 6.5 T-M.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 แบบแสดง EP. 22.00 M. 18 T-M.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 แบบแสดง EP. 22.00 M. 25 T-M.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.  
ตารางแสดงผลวิเคราะห์เสาไฟฟ้า

ข.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. GW.

ตารางที่ ข.1 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
1.7500	0.4435
1.9636	0.4956
2.1771	0.4975
2.3906	0.5003
2.6042	0.5033
2.8177	0.5061
3.0313	0.5095
3.2448	0.5130
3.4584	0.5166
3.6719	0.5206
3.8855	0.5248
4.0990	0.5292
4.3125	0.5342
4.5261	0.5392
4.7396	0.5447
4.9532	0.5505
5.1667	0.5570
5.3803	0.5637
5.5938	0.5709
5.8074	0.5787
6.0209	0.5872
6.2344	0.5961
6.4480	0.6059
6.6615	0.6167
6.8751	0.6284
7.0886	0.6506
7.3022	0.7965
7.5157	0.8236
7.7293	0.8386
7.9428	0.8551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1564	0.8739
8.3699	0.8946
8.5834	0.9182
8.7970	0.9445
9.0105	0.9745
9.2241	1.0083
9.4376	1.0476
9.6512	1.0929
9.8647	1.1456
10.0783	1.2073
10.2918	1.2814
10.5053	1.3705
10.7189	1.4798
10.9324	1.6174
11.1460	1.7947
11.3595	2.0322
11.5731	2.3636
11.7870	2.8505
12.0000	3.0783

ตารางที่ ข.2 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
2.0000	0.5098
2.1771	0.5114
2.3906	0.5142
2.6042	0.5173
2.8177	0.5202
3.0313	0.5236
3.2448	0.5272
3.4584	0.5309
3.6719	0.5350
3.8855	0.5393
4.0990	0.5438
4.3125	0.5489
4.5261	0.5540
4.7396	0.5596
4.9532	0.5656

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1667	0.5722
5.3803	0.5790
5.5938	0.5864
5.8074	0.5943
6.0209	0.6030
6.2344	0.6121
6.4480	0.6221
6.6615	0.6331
6.8751	0.6450
7.0886	0.6678
7.3022	0.8175
7.5157	0.8453
7.7293	0.8605
7.9428	0.8772
8.1564	0.8964
8.3699	0.9174
8.5834	0.9412
8.7970	0.9680
9.0105	0.9983
9.2241	1.0325
9.4376	1.0724
9.6512	1.1181
9.8647	1.1714
10.0783	1.2337
10.2918	1.3085
10.5053	1.3981
10.7189	1.5080
10.9324	1.6459
11.1460	1.8230
11.3595	2.0593
11.5731	2.3873
11.7870	2.8653
12.0000	3.0783

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 3.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
3.0000	0.5866
3.2448	0.5910
3.4584	0.5951
3.6719	0.5995
3.8855	0.6042
4.0990	0.6091
4.3125	0.6146
4.5261	0.6202
4.7396	0.6263
4.9532	0.6328
5.1667	0.6400
5.3803	0.6474
5.5938	0.6554
5.8074	0.6640
6.0209	0.6735
6.2344	0.6833
6.4480	0.6941
6.6615	0.7060
6.8751	0.7190
7.0886	0.7442
7.3022	0.9108
7.5157	0.9413
7.7293	0.9575
7.9428	0.9752
8.1564	0.9955
8.3699	1.0177
8.5834	1.0429
8.7970	1.0711
9.0105	1.1031
9.2241	1.1390
9.4376	1.1807
9.6512	1.2284
9.8647	1.2838
10.0783	1.3483
10.2918	1.4252

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.5053	1.5168
10.7189	1.6281
10.9324	1.7664
11.1460	1.9417
11.3595	2.1718
11.5731	2.4837
11.7870	2.9239
12.0000	3.0783

ตารางที่ ข.4 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
4.0000	0.6857
4.3125	0.6942
4.5261	0.7003
4.7396	0.7069
4.9532	0.7140
5.1667	0.7218
5.3803	0.7299
5.5938	0.7386
5.8074	0.7479
6.0209	0.7582
6.2344	0.7688
6.4480	0.7806
6.6615	0.7935
6.8751	0.8074
7.0886	0.8354
7.3022	1.0218
7.5157	1.0555
7.7293	1.0726
7.9428	1.0912
8.1564	1.1125
8.3699	1.1359
8.5834	1.1624
8.7970	1.1919
9.0105	1.2253
9.2241	1.2628
9.4376	1.3062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.6512	1.3556
9.8647	1.4127
10.0783	1.4788
10.2918	1.5572
10.5053	1.6499
10.7189	1.7614
10.9324	1.8984
11.1460	2.0697
11.3595	2.2904
11.5731	2.5823
11.7870	2.9809
12.0000	3.0783

ตารางที่ ข.5 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 5.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
5.0000	0.8153
5.1667	0.8220
5.3803	0.8307
5.5938	0.8402
5.8074	0.8503
6.0209	0.8614
6.2344	0.8729
6.4480	0.8857
6.6615	0.8996
6.8751	0.9146
7.0886	0.9460
7.3022	1.1554
7.5157	1.1925
7.7293	1.2104
7.9428	1.2298
8.1564	1.2521
8.3699	1.2764
8.5834	1.3040
8.7970	1.3346
9.0105	1.3692
9.2241	1.4078
9.4376	1.4525

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.6512	1.5031
9.8647	1.5613
10.0783	1.6282
10.2918	1.7071
10.5053	1.7994
10.7189	1.9094
10.9324	2.0430
11.1460	2.2074
11.3595	2.4150
11.5731	2.6827
11.7870	3.0361
12.0000	3.0784

ตารางที่ ข.6 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
6.0000	0.9881
6.2344	1.0017
6.4480	1.0154
6.6615	1.0304
6.8751	1.0464
7.0886	1.0817
7.3022	1.3180
7.5157	1.3591
7.7293	1.3774
7.9428	1.3973
8.1564	1.4202
8.3699	1.4451
8.5834	1.4734
8.7970	1.5046
9.0105	1.5398
9.2241	1.5790
9.4376	1.6241
9.6512	1.6751
9.8647	1.7333
10.0783	1.7997
10.2918	1.8775
10.5053	1.9676

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.7189	2.0738
10.9324	2.2010
11.1460	2.3548
11.3595	2.5452
11.5731	2.7842
11.7870	3.0891
12.0000	3.0784

ตารางที่ ข.7 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 7.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
7.0000	1.2478
7.3022	1.5339
7.5157	1.5796
7.7293	1.5978
7.9428	1.6176
8.1564	1.6404
8.3699	1.6652
8.5834	1.6932
8.7970	1.7242
9.0105	1.7589
9.2241	1.7975
9.4376	1.8417
9.6512	1.8914
9.8647	1.9477
10.0783	2.0115
10.2918	2.0854
10.5053	2.1702
10.7189	2.2687
10.9324	2.3849
11.1460	2.5228
11.3595	2.6894
11.5731	2.8926
11.7870	3.1424
12.0000	3.0785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
8.0000	1.9001
8.1564	1.9158
8.3699	1.9387
8.5834	1.9650
8.7970	1.9938
9.0105	2.0261
9.2241	2.0618
9.4376	2.1027
9.6512	2.1484
9.8647	2.1998
10.0783	2.2576
10.2918	2.3239
10.5053	2.3990
10.7189	2.4850
10.9324	2.5849
11.1460	2.7010
11.3595	2.8381
11.5731	3.0003
11.7870	3.1927
12.0000	3.0785

ตารางที่ ข.9 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 9.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
9.0000	2.3881
9.2241	2.4149
9.4376	2.4475
9.6512	2.4839
9.8647	2.5246
10.0783	2.5699
10.2918	2.6217
10.5053	2.6795
10.7189	2.7448
10.9324	2.8193
11.1460	2.9043
11.3595	3.0021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.5731	3.1144
11.7870	3.2427
12.0000	3.0786

## ข.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.00 m. 5 T-m.

ตารางที่ ข.10 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 1.75 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
1.7500	0.4488
1.9636	0.5099
2.1771	0.5123
2.3906	0.5154
2.6042	0.5188
2.8177	0.5222
3.0313	0.5259
3.2448	0.5298
3.4584	0.5341
3.6719	0.5385
3.8855	0.5433
4.0990	0.5485
4.3125	0.5540
4.5261	0.5598
4.7396	0.5659
4.9532	0.5638
5.1667	0.5477
5.3803	0.5537
5.5938	0.5611
5.8074	0.5691
6.0209	0.5777
6.2344	0.5869
6.4480	0.5968
6.6615	0.6079
6.8751	0.6198
7.0886	0.6420
7.3022	0.7864
7.5157	0.8134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7293	0.8288
7.9428	0.8460
8.1564	0.8652
8.3699	0.8868
8.5834	0.9110
8.7970	0.9384
9.0105	0.9696
9.2241	1.0051
9.4376	1.0456
9.6512	1.0665
9.8647	1.1098
10.0783	1.1709
10.2918	1.2437
10.5053	1.3324
10.7189	1.4408
10.9324	1.5777
11.1460	1.7554
11.3595	1.9953
11.5731	2.3307
11.7870	2.8306
12.0000	3.0780

ตารางที่ ข.11 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
2.0000	0.5307
2.1771	0.5327
2.3906	0.5359
2.6042	0.5394
2.8177	0.5430
3.0313	0.5468
3.2448	0.5508
3.4584	0.5553
3.6719	0.5598
3.8855	0.5648
4.0990	0.5701
4.3125	0.5758
4.5261	0.5818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7396	0.5881
4.9532	0.5858
5.1667	0.5690
5.3803	0.5752
5.5938	0.5828
5.8074	0.5910
6.0209	0.5999
6.2344	0.6093
6.4480	0.6196
6.6615	0.6310
6.8751	0.6432
7.0886	0.6662
7.3022	0.8158
7.5157	0.8437
7.7293	0.8595
7.9428	0.8771
8.1564	0.8968
8.3699	0.9189
8.5834	0.9436
8.7970	0.9716
9.0105	1.0034
9.2241	1.0397
9.4376	1.0809
9.6512	1.1017
9.8647	1.1454
10.0783	1.2073
10.2918	1.2810
10.5053	1.3706
10.7189	1.4799
10.9324	1.6173
11.1460	1.7950
11.3595	2.0334
11.5731	2.3641
11.7870	2.8515
12.0000	3.0780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 3.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
3.0000	0.6098
3.2448	0.6148
3.4584	0.6197
3.6719	0.6247
3.8855	0.6301
4.0990	0.6359
4.3125	0.6422
4.5261	0.6487
4.7396	0.6556
4.9532	0.6528
5.1667	0.6338
5.3803	0.6405
5.5938	0.6489
5.8074	0.6578
6.0209	0.6674
6.2344	0.6776
6.4480	0.6887
6.6615	0.7011
6.8751	0.7143
7.0886	0.7396
7.3022	0.9057
7.5157	0.9363
7.7293	0.9531
7.9428	0.9718
8.1564	0.9926
8.3699	1.0161
8.5834	1.0423
8.7970	1.0719
9.0105	1.1055
9.2241	1.1437
9.4376	1.1870
9.6512	1.2071
9.8647	1.2520
10.0783	1.3161
10.2918	1.3920

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.5053	1.4837
10.7189	1.5946
10.9324	1.7329
11.1460	1.9092
11.3595	2.1423
11.5731	2.4582
11.7870	2.9093
12.0000	3.0781

ตารางที่ ข.13 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
4.0000	0.7215
4.3125	0.7315
4.5261	0.7387
4.7396	0.7463
4.9532	0.7427
5.1667	0.7206
5.3803	0.7279
5.5938	0.7370
5.8074	0.7467
6.0209	0.7573
6.2344	0.7685
6.4480	0.7806
6.6615	0.7941
6.8751	0.8085
7.0886	0.8369
7.3022	1.0239
7.5157	1.0578
7.7293	1.0757
7.9428	1.0956
8.1564	1.1178
8.3699	1.1427
8.5834	1.1705
8.7970	1.2018
9.0105	1.2373
9.2241	1.2775
9.4376	1.3230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.6512	1.3414
9.8647	1.3868
10.0783	1.4528
10.2918	1.5305
10.5053	1.6236
10.7189	1.7351
10.9324	1.8724
11.1460	2.0450
11.3595	2.2686
11.5731	2.5640
11.7870	2.9709
12.0000	3.0781

ตารางที่ ข.14 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 5.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
5.0000	0.8499
5.1667	0.8293
5.3803	0.8372
5.5938	0.8472
5.8074	0.8579
6.0209	0.8694
6.2344	0.8817
6.4480	0.8949
6.6615	0.9097
6.8751	0.9254
7.0886	0.9574
7.3022	1.1692
7.5157	1.2070
7.7293	1.2259
7.9428	1.2469
8.1564	1.2703
8.3699	1.2966
8.5834	1.3258
8.7970	1.3587
9.0105	1.3958
9.2241	1.4378
9.4376	1.4850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.6512	1.5002
9.8647	1.5450
10.0783	1.6121
10.2918	1.6904
10.5053	1.7835
10.7189	1.8937
10.9324	2.0275
11.1460	2.1930
11.3595	2.4030
11.5731	2.6727
11.7870	3.0308
12.0000	3.0782

ตารางที่ ข.15 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
6.0000	0.9995
6.2344	1.0139
6.4480	1.0283
6.6615	1.0443
6.8751	1.0612
7.0886	1.0973
7.3022	1.3367
7.5157	1.3786
7.7293	1.3982
7.9428	1.4200
8.1564	1.4442
8.3699	1.4714
8.5834	1.5016
8.7970	1.5355
9.0105	1.5737
9.2241	1.6168
9.4376	1.6650
9.6512	1.6750
9.8647	1.7177
10.0783	1.7845
10.2918	1.8619
10.5053	1.9529

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.7189	2.0594
10.9324	2.1870
11.1460	2.3422
11.3595	2.5351
11.5731	2.7759
11.7870	3.0849
12.0000	3.0782

ตารางที่ ข.16 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 7.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
7.0000	1.2564
7.3022	1.5452
7.5157	1.5916
7.7293	1.6115
7.9428	1.6335
8.1564	1.6580
8.3699	1.6855
8.5834	1.7159
8.7970	1.7501
9.0105	1.7884
9.2241	1.8315
9.4376	1.8794
9.6512	1.8812
9.8647	1.9195
10.0783	1.9840
10.2918	2.0580
10.5053	2.1443
10.7189	2.2439
10.9324	2.3615
11.1460	2.5019
11.3595	2.6726
11.5731	2.8798
11.7870	3.1365
12.0000	3.0783

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
8.0000	1.9463
8.1564	1.9635
8.3699	1.9897
8.5834	2.0188
8.7970	2.0513
9.0105	2.0878
9.2241	2.1286
9.4376	2.1737
9.6512	2.1602
9.8647	2.1890
10.0783	2.2473
10.2918	2.3135
10.5053	2.3896
10.7189	2.4762
10.9324	2.5766
11.1460	2.6938
11.3595	2.8330
11.5731	2.9962
11.7870	3.1908
12.0000	3.0783

ตารางที่ ข.18 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 9.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
9.0000	2.4742
9.2241	2.5097
9.4376	2.5468
9.6512	2.5077
9.8647	2.5194
10.0783	2.5651
10.2918	2.6167
10.5053	2.6754
10.7189	2.7409
10.9324	2.8157
11.1460	2.9012
11.3595	3.0005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.5731	3.1128
11.7870	3.2420
12.0000	3.0784

### ข.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 12.35 m. 6.5 T-m.

ตารางที่ ข.19 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 2.10 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
2.1000	0.4892
2.3136	0.6463
2.5271	0.6457
2.7406	0.6485
2.9542	0.6519
3.1677	0.6553
3.3813	0.6589
3.5948	0.6627
3.8084	0.6667
4.0219	0.6710
4.2355	0.6759
4.4490	0.6808
4.6626	0.6861
4.8761	0.6919
5.0897	0.6980
5.3032	0.7045
5.5168	0.7116
5.7303	0.7193
5.9439	0.7274
6.1574	0.7410
6.3710	0.8298
6.5845	0.9655
6.7981	0.9761
7.0116	0.9852
7.2251	0.9955
7.4387	1.0069
7.6522	1.0194
7.8658	1.0338

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.0793	1.0494
8.2929	1.0669
8.5064	1.0863
8.7200	1.1079
8.9335	1.1322
9.1471	1.1594
9.3606	1.1903
9.5742	1.2252
9.7877	1.2641
10.0013	1.3093
10.2148	1.3612
10.4284	1.4212
10.6419	1.4920
10.8555	1.5752
11.0690	1.6742
11.2826	1.7947
11.4961	1.9453
11.7097	2.1352
11.9232	2.3835
12.1370	2.7077
12.3500	2.7396

ตารางที่ ข.20 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 3.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
3.0000	0.7179
3.1677	0.7208
3.3813	0.7246
3.5948	0.7286
3.8084	0.7328
4.0219	0.7374
4.2355	0.7426
4.4490	0.7478
4.6626	0.7534
4.8761	0.7595
5.0897	0.7660
5.3032	0.7728
5.5168	0.7803

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7303	0.7884
5.9439	0.7970
6.1574	0.8117
6.3710	0.9087
6.5845	1.0579
6.7981	1.0689
7.0116	1.0783
7.2251	1.0888
7.4387	1.1005
7.6522	1.1133
7.8658	1.1281
8.0793	1.1441
8.2929	1.1621
8.5064	1.1820
8.7200	1.2041
8.9335	1.2290
9.1471	1.2567
9.3606	1.2882
9.5742	1.3239
9.7877	1.3633
10.0013	1.4091
10.2148	1.4614
10.4284	1.5217
10.6419	1.5924
10.8555	1.6751
11.0690	1.7726
11.2826	1.8903
11.4961	2.0360
11.7097	2.2170
11.9232	2.4496
12.1370	2.7469
12.3500	2.7396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
4.0000	0.8236
4.2355	0.8296
4.4490	0.8351
4.6626	0.8410
4.8761	0.8475
5.0897	0.8544
5.3032	0.8616
5.5168	0.8696
5.7303	0.8782
5.9439	0.8872
6.1574	0.9032
6.3710	1.0104
6.5845	1.1769
6.7981	1.1884
7.0116	1.1978
7.2251	1.2085
7.4387	1.2204
7.6522	1.2334
7.8658	1.2484
8.0793	1.2647
8.2929	1.2830
8.5064	1.3032
8.7200	1.3256
8.9335	1.3509
9.1471	1.3790
9.3606	1.4109
9.5742	1.4469
9.7877	1.4864
10.0013	1.5324
10.2148	1.5845
10.4284	1.6443
10.6419	1.7142
10.8555	1.7951
11.0690	1.8898
11.2826	2.0028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.4961	2.1411
11.7097	2.3101
11.9232	2.5230
12.1370	2.7888
12.3500	2.7397

ตารางที่ ข.22 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 5.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
5.0000	0.9569
5.3032	0.9674
5.5168	0.9757
5.7303	0.9848
5.9439	0.9942
6.1574	1.0117
6.3710	1.1305
6.5845	1.3168
6.7981	1.3287
7.0116	1.3380
7.2251	1.3486
7.4387	1.3604
7.6522	1.3732
7.8658	1.3883
8.0793	1.4045
8.2929	1.4228
8.5064	1.4430
8.7200	1.4654
8.9335	1.4906
9.1471	1.5187
9.3606	1.5504
9.5742	1.5861
9.7877	1.6251
10.0013	1.6704
10.2148	1.7215
10.4284	1.7799
10.6419	1.8476
10.8555	1.9254
11.0690	2.0155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.2826	2.1219
11.4961	2.2506
11.7097	2.4051
11.9232	2.5959
12.1370	2.8288
12.3500	2.7398

ตารางที่ ข.23 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
6.0000	1.1272
6.1574	1.1414
6.3710	1.2733
6.5845	1.4825
6.7981	1.4946
7.0116	1.5034
7.2251	1.5134
7.4387	1.5247
7.6522	1.5371
7.8658	1.5517
8.0793	1.5674
8.2929	1.5852
8.5064	1.6049
8.7200	1.6266
8.9335	1.6511
9.1471	1.6784
9.3606	1.7091
9.5742	1.7437
9.7877	1.7813
10.0013	1.8248
10.2148	1.8737
10.4284	1.9292
10.6419	1.9932
10.8555	2.0661
11.0690	2.1497
11.2826	2.2472
11.4961	2.3638
11.7097	2.5014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.9232	2.6678
12.1370	2.8667
12.3500	2.7399

ตารางที่ ข.24 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 7.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
7.0000	1.7286
7.2251	1.7378
7.4387	1.7478
7.6522	1.7587
7.8658	1.7720
8.0793	1.7862
8.2929	1.8024
8.5064	1.8204
8.7200	1.8403
8.9335	1.8629
9.1471	1.8879
9.3606	1.9162
9.5742	1.9481
9.7877	1.9823
10.0013	2.0221
10.2148	2.0664
10.4284	2.1164
10.6419	2.1739
10.8555	2.2385
11.0690	2.3118
11.2826	2.3962
11.4961	2.4957
11.7097	2.6109
11.9232	2.7470
12.1370	2.9066
12.3500	2.7400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.25 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
8.0000	2.0607
8.2929	2.0776
8.5064	2.0920
8.7200	2.1080
8.9335	2.1265
9.1471	2.1470
9.3606	2.1704
9.5742	2.1969
9.7877	2.2249
10.0013	2.2578
10.2148	2.2943
10.4284	2.3353
10.6419	2.3823
10.8555	2.4345
11.0690	2.4932
11.2826	2.5596
11.4961	2.6374
11.7097	2.7254
11.9232	2.8273
12.1370	2.9450
12.3500	2.7401

ตารางที่ ข.26 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 9.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
9.0000	2.4431
9.1471	2.4518
9.3606	2.4668
9.5742	2.4842
9.7877	2.5022
10.0013	2.5243
10.2148	2.5488
10.4284	2.5764
10.6419	2.6086
10.8555	2.6440
11.0690	2.6835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.2826	2.7278
11.4961	2.7799
11.7097	2.8376
11.9232	2.9033
12.1370	2.9797
12.3500	2.7402

#### ข.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 18 T-m.

ตารางที่ ข.27 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
2.0000	0.1846
2.4167	0.2451
2.8334	0.2450
3.2500	0.2453
3.6667	0.2458
4.0834	0.2462
4.5000	0.2468
4.9167	0.2473
5.3334	0.2480
5.7501	0.2489
6.1667	0.2498
6.5834	0.2508
7.0001	0.2520
7.4168	0.2534
7.8334	0.2548
8.2501	0.2564
8.6668	0.2582
9.0835	0.2602
9.5001	0.2624
9.9168	0.2777
10.3335	0.3539
10.7501	0.3563
11.1668	0.3588
11.5835	0.3615
12.0000	0.3648
12.4170	0.3685

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.8340	0.3727
13.2500	0.3773
13.6670	0.3828
14.0840	0.3890
14.5000	0.3962
14.9170	0.4043
15.3340	0.4136
15.7500	0.4242
16.1670	0.4364
16.5840	0.4506
17.0000	0.4673
17.4170	0.4869
17.8340	0.5100
18.2500	0.5377
18.6670	0.5717
19.0840	0.6136
19.5000	0.6663
19.9170	0.7347
20.3340	0.8269
20.7500	0.9564
21.1670	1.1520
21.5840	1.4776
22.0000	1.7758

ตารางที่ ข.28 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
4.0000	0.2794
4.5000	0.2801
4.9167	0.2807
5.3334	0.2815
5.7501	0.2825
6.1667	0.2835
6.5834	0.2845
7.0001	0.2858
7.4168	0.2873
7.8334	0.2889
8.2501	0.2907

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.6668	0.2926
9.0835	0.2949
9.5001	0.2972
9.9168	0.3148
10.3335	0.4019
10.7501	0.4045
11.1668	0.4072
11.5835	0.4101
12.0000	0.4136
12.4170	0.4176
12.8340	0.4222
13.2500	0.4271
13.6670	0.4331
14.0840	0.4398
14.5000	0.4475
14.9170	0.4563
15.3340	0.4664
15.7500	0.4779
16.1670	0.4910
16.5840	0.5064
17.0000	0.5244
17.4170	0.5454
17.8340	0.5703
18.2500	0.5999
18.6670	0.6359
19.0840	0.6803
19.5000	0.7357
19.9170	0.8068
20.3340	0.9016
20.7500	1.0326
21.1670	1.2260
21.5840	1.5356
22.0000	1.7759

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.29 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
6.0000	0.3239
6.5834	0.3255
7.0001	0.3269
7.4168	0.3286
7.8334	0.3303
8.2501	0.3322
8.6668	0.3344
9.0835	0.3368
9.5001	0.3394
9.9168	0.3596
10.3335	0.4599
10.7501	0.4626
11.1668	0.4655
11.5835	0.4686
12.0000	0.4724
12.4170	0.4766
12.8340	0.4816
13.2500	0.4868
13.6670	0.4933
14.0840	0.5006
14.5000	0.5089
14.9170	0.5184
15.3340	0.5292
15.7500	0.5416
16.1670	0.5558
16.5840	0.5723
17.0000	0.5916
17.4170	0.6141
17.8340	0.6406
18.2500	0.6720
18.6670	0.7102
19.0840	0.7568
19.5000	0.8144
19.9170	0.8878
20.3340	0.9843

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20.7500	1.1151
21.1670	1.3034
21.5840	1.5933
22.0000	1.7760

ตารางที่ ข.30 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
8.0000	0.3820
8.2501	0.3833
8.6668	0.3856
9.0835	0.3883
9.5001	0.3911
9.9168	0.4146
10.3335	0.5308
10.7501	0.5336
11.1668	0.5367
11.5835	0.5399
12.0000	0.5439
12.4170	0.5484
12.8340	0.5536
13.2500	0.5592
13.6670	0.5661
14.0840	0.5739
14.5000	0.5829
14.9170	0.5930
15.3340	0.6046
15.7500	0.6179
16.1670	0.6330
16.5840	0.6506
17.0000	0.6712
17.4170	0.6951
17.8340	0.7231
18.2500	0.7561
18.6670	0.7961
19.0840	0.8446
19.5000	0.9039
19.9170	0.9785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20.3340	1.0753
20.7500	1.2040
21.1670	1.3841
21.5840	1.6501
22.0000	1.7761

ตารางที่ ข.31 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 10.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
10.0000	0.5102
10.3335	0.6187
10.7501	0.6217
11.1668	0.6248
11.5835	0.6281
12.0000	0.6322
12.4170	0.6369
12.8340	0.6424
13.2500	0.6482
13.6670	0.6555
14.0840	0.6637
14.5000	0.6731
14.9170	0.6838
15.3340	0.6962
15.7500	0.7102
16.1670	0.7261
16.5840	0.7447
17.0000	0.7663
17.4170	0.7914
17.8340	0.8206
18.2500	0.8549
18.6670	0.8961
19.0840	0.9457
19.5000	1.0058
19.9170	1.0803
20.3340	1.1755
20.7500	1.2993
21.1670	1.4676
21.5840	1.7057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22.0000	1.7762
---------	--------

ตารางที่ ข.32 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 12.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
12.0000	0.7705
12.4170	0.7705
12.8340	0.7752
13.2500	0.7807
13.6670	0.7865
14.0840	0.7940
14.5000	0.8025
14.9170	0.8122
15.3340	0.8233
15.7500	0.8361
16.1670	0.8507
16.5840	0.8672
17.0000	0.8864
17.4170	0.9087
17.8340	0.9345
18.2500	0.9643
18.6670	0.9991
19.0840	1.0406
19.5000	1.0900
19.9170	1.1488
20.3340	1.2205
20.7500	1.3102
21.1670	1.4233
21.5840	1.5716
22.0000	1.7705

ตารางที่ ข.33 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 14.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
14.0000	0.9853
14.5000	0.9962
14.9170	1.0069
15.3340	1.0192
15.7500	1.0333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.1670	1.0493
16.5840	1.0680
17.0000	1.0896
17.4170	1.1146
17.8340	1.1433
18.2500	1.1765
18.6670	1.2157
19.0840	1.2619
19.5000	1.3158
19.9170	1.3804
20.3340	1.4593
20.7500	1.5557
21.1670	1.6773
21.5840	1.8319
22.0000	1.7765

ตารางที่ ข.34 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 16.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
16.0000	1.2840
16.5840	1.3049
17.0000	1.3231
17.4170	1.3441
17.8340	1.3682
18.2500	1.3959
18.6670	1.4286
19.0840	1.4667
19.5000	1.5103
19.9170	1.5615
20.3340	1.6226
20.7500	1.6950
21.1670	1.7831
21.5840	1.8893
22.0000	1.7766

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.35 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 18.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
18.0000	1.6596
18.2500	1.6689
18.6670	1.6878
19.0840	1.7100
19.5000	1.7349
19.9170	1.7641
20.3340	1.7988
20.7500	1.8390
21.1670	1.8868
21.5840	1.9418
22.0000	1.7767

ตารางที่ ข.36 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 20.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
20.0000	1.9872
20.3340	1.9855
20.7500	1.9847
21.1670	1.9864
21.5840	1.9889
22.0000	1.7768

ข.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า EP. 22.00 m. 25 T-m.

ตารางที่ ข.37 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ระดับพื้นดิน หรือความสูงเท่ากับ 2.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
2.0000	0.2306
2.4167	0.3320
2.8334	0.3304
3.2501	0.3298
3.6667	0.3291
4.0834	0.3286
4.5001	0.3279
4.9168	0.3264
5.3335	0.3241
5.7502	0.3238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1669	0.3237
6.5835	0.3236
7.0002	0.3238
7.4169	0.3241
7.8336	0.3244
8.2503	0.3249
8.6670	0.3256
9.0837	0.3265
9.5004	0.3277
9.9170	0.3494
10.3337	0.4584
10.7504	0.4597
11.1671	0.4582
11.5838	0.4569
12.0000	0.4564
12.4170	0.4558
12.8340	0.4562
13.2510	0.4573
13.6670	0.4584
14.0840	0.4606
14.5010	0.4637
14.9170	0.4678
15.3340	0.4729
15.7510	0.4792
16.1670	0.4873
16.5840	0.4974
17.0010	0.5097
17.4170	0.5246
17.8340	0.5433
18.2510	0.5666
18.6670	0.5959
19.0840	0.6334
19.5010	0.6830
19.9180	0.7497
20.3340	0.8432
20.7510	0.9824
21.1680	1.2099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21.5840	1.6353
22.0000	2.2398

ตารางที่ ข.38 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 4.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
4.0000	0.3781
4.5001	0.3772
4.9168	0.3754
5.3335	0.3729
5.7502	0.3725
6.1669	0.3724
6.5835	0.3723
7.0002	0.3724
7.4169	0.3727
7.8336	0.3730
8.2503	0.3735
8.6670	0.3743
9.0837	0.3753
9.5004	0.3766
9.9170	0.4019
10.3337	0.5285
10.7504	0.5299
11.1671	0.5280
11.5838	0.5264
12.0000	0.5256
12.4170	0.5248
12.8340	0.5250
13.2510	0.5260
13.6670	0.5271
14.0840	0.5293
14.5010	0.5325
14.9170	0.5369
15.3340	0.5424
15.7510	0.5491
16.1670	0.5579
16.5840	0.5688
17.0010	0.5823

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17.4170	0.5984
17.8340	0.6187
18.2510	0.6441
18.6670	0.6758
19.0840	0.7162
19.5010	0.7695
19.9180	0.8406
20.3340	0.9393
20.7510	1.0839
21.1680	1.3149
21.5840	1.7289
22.0000	2.2401

ตารางที่ ข.39 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 6.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
6.0000	0.4321
6.5835	0.4319
7.0002	0.4320
7.4169	0.4323
7.8336	0.4326
8.2503	0.4331
8.6670	0.4340
9.0837	0.4350
9.5004	0.4365
9.9170	0.4661
10.3337	0.6142
10.7504	0.6158
11.1671	0.6133
11.5838	0.6112
12.0000	0.6100
12.4170	0.6088
12.8340	0.6087
13.2510	0.6096
13.6670	0.6105
14.0840	0.6126
14.5010	0.6159
14.9170	0.6205

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.3340	0.6263
15.7510	0.6334
16.1670	0.6429
16.5840	0.6546
17.0010	0.6691
17.4170	0.6865
17.8340	0.7085
18.2510	0.7358
18.6670	0.7699
19.0840	0.8132
19.5010	0.8699
19.9180	0.9450
20.3340	1.0480
20.7510	1.1964
21.1680	1.4275
21.5840	1.8233
22.0000	2.2403

ตารางที่ ข.40 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 8.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
8.0000	0.5066
8.2503	0.5069
8.6670	0.5078
9.0837	0.5089
9.5004	0.5104
9.9170	0.5454
10.3337	0.7200
10.7504	0.7216
11.1671	0.7185
11.5838	0.7156
12.0000	0.7139
12.4170	0.7120
12.8340	0.7115
13.2510	0.7120
13.6670	0.7125
14.0840	0.7145
14.5010	0.7177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14.9170	0.7224
15.3340	0.7283
15.7510	0.7357
16.1670	0.7457
16.5840	0.7582
17.0010	0.7736
17.4170	0.7922
17.8340	0.8156
18.2510	0.8447
18.6670	0.8809
19.0840	0.9267
19.5010	0.9864
19.9180	1.0647
20.3340	1.1706
20.7510	1.3204
21.1680	1.5471
21.5840	1.9173
22.0000	2.2405

ตารางที่ ข.41 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 10.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
10.0000	0.6874
10.3337	0.8536
10.7504	0.8553
11.1671	0.8510
11.5838	0.8472
12.0000	0.8445
12.4170	0.8417
12.8340	0.8405
13.2510	0.8404
13.6670	0.8402
14.0840	0.8417
14.5010	0.8445
14.9170	0.8490
15.3340	0.8549
15.7510	0.8623
16.1670	0.8726

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.5840	0.8856
17.0010	0.9016
17.4170	0.9210
17.8340	0.9455
18.2510	0.9760
18.6670	1.0138
19.0840	1.0614
19.5010	1.1231
19.9180	1.2030
20.3340	1.3097
20.7510	1.4573
21.1680	1.6740
21.5840	2.0105
22.0000	2.2408

ตารางที่ ข.42 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 12.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
12.0000	1.0614
12.4170	1.0567
12.8340	1.0538
13.2510	1.0522
13.6670	1.0505
14.0840	1.0506
14.5010	1.0523
14.9170	1.0558
15.3340	1.0607
15.7510	1.0674
16.1670	1.0772
16.5840	1.0899
17.0010	1.1059
17.4170	1.1253
17.8340	1.1501
18.2510	1.1809
18.6670	1.2191
19.0840	1.2668
19.5010	1.3283
19.9180	1.4068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20.3340	1.5094
20.7510	1.6472
21.1680	1.8415
21.5840	2.1237
22.0000	2.2410

ตารางที่ ข.43 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 14.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
14.0000	1.3365
14.5010	1.3348
14.9170	1.3357
15.3340	1.3380
15.7510	1.3421
16.1670	1.3496
16.5840	1.3600
17.0010	1.3738
17.4170	1.3906
17.8340	1.4130
18.2510	1.4412
18.6670	1.4761
19.0840	1.5198
19.5010	1.5759
19.9180	1.6465
20.3340	1.7369
20.7510	1.8546
21.1680	2.0140
21.5840	2.2305
22.0000	2.2413

ตารางที่ ข.44 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 16.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
16.0000	1.7177
16.5840	1.7221
17.0010	1.7291
17.4170	1.7385
17.8340	1.7531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18.2510	1.7726
18.6670	1.7975
19.0840	1.8296
19.5010	1.8718
19.9180	1.9244
20.3340	1.9911
20.7510	2.0758
21.1680	2.1870
21.5840	2.3285
22.0000	2.2415

ตารางที่ ข.45 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 18.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
18.0000	2.1960
18.2510	2.1958
18.6670	2.1987
19.0840	2.2063
19.5010	2.2210
19.9180	2.2411
20.3340	2.2689
20.7510	2.3056
21.1680	2.3556
21.5840	2.4162
22.0000	2.2417

ตารางที่ ข.46 เมื่อเสาไฟฟ้าหักที่ความสูงเท่ากับ 20.00 เมตร จากโคนเสา

ระยะความสูง (เมตร)	Safety Factor
20.0000	2.5848
20.3340	2.5615
20.7510	2.5351
21.1680	2.5136
21.5840	2.4918
22.0000	2.2419

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธนีสร สถาพร  
วัน เดือน ปีเกิด 9 กุมภาพันธ์ 2536  
ที่อยู่ 1420 หมู่บ้านเสนาวิลล่า 84 ถนนแฮปปี้แลนด์  
แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240  
ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาโยธา (เกียรตินิยมอันดับ2)  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การออกแบบโครงสร้าง  
2.) การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์  
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย  
พ.ศ.2558 งานวิจัยหัวข้อ “ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับระยะห่างของเหล็กปลอก”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้