การทดสอบเสาไฟฟ้ากำลังต่ำที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP

A TEST OF LOW VOLTAGE UTILITY POLES STRENGTHENING BY USING STEEL PLATE AND CFRP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-M-093-152

การทดสอบเสาไฟฟ้ากำลังต่ำที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP

A TEST OF LOW VOLTAGE UTILITY POLES STRENGTHENING BY USING STEEL PLATE AND CFRP

มนตรี มั่นคงกิจ

MONTRI MONKONGKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-093-152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเสาไฟฟ้ากำลังต่ำที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP

A TEST OF LOW VOLTAGE UTILITY POLES STRENGTHENING BY USING STEEL PLATE AND CFRP

มนตรี มั่นคงกิจ

MONTRI MONKONGKIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-093-152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A TEST OF LOW VOLTAGE UTILITY POLES STRENGTHENING BY USING STEEL PLATE AND CFRP

MONTRI MONKONGKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEER

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-EN-M-093-152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2019
FACULTY OF ENGINEER
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดสอบเสาไฟฟ้ากำลังต่ำที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP
นักศึกษา	นายมนตรี มั่นคงกิจ
รหัสประจำตัว	60601220
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อัฏฐวิทย์ สุจริตพงศ์

บทคัดย่อ

เนื่องจากเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวงไม่สามารถต้านทาน/หยุดยั้งการหักโค่นแบบต่อเนื่องได้ โดยที่เมื่อเสาไฟฟ้าเกิดการวิบัติจากอุบัติเหตุ หรือจากภัยธรรมชาติแล้ว เสาไฟฟ้าต้นถัดมาไม่สามารถต้านทานน้ำหนักเสาไฟฟ้าต้นที่วิบัติก่อนหน้าได้ จึงทำให้เกิดการวิบัติแบบต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า เพื่อให้โคนเสาไฟฟ้าสามารถรับแรงดัดจากน้ำหนักเสาต้นที่วิบัติก่อนหน้าได้ และทำการทดลองเลื่อนจุดวิบัติขึ้นไปให้สูงขึ้นไปถึงจุดที่เมื่อเสาไฟฟ้าวิบัติแล้วน้ำหนักของเสาไฟฟ้าไม่ส่งผลไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไปให้วิบัติตาม โดยทำการเสริมกำลัง 2 วิธีคือ 1.) เสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตรไว้ด้านในเสาไฟฟ้าจากปลายเสาไฟฟ้าด้านล่าง สูงขึ้นมาถึงระยะอย่างน้อย 6.05 เมตร 2.) เสริมกำลังเสาไฟฟ้าด้วยการติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ CFRP ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 8 แผ่น จากปลายเสาด้านล่างขึ้นมาถึงระยะ 6.05 เมตรเป็นอย่างน้อย หลังจากนั้นทำการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 วิธี เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้หาจุดเสริมกำลังที่เหมาะสม และเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงเสาไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้านครหลวง

จากการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 วิธี ผลที่ได้คือจุดวิบัติของเสาไฟฟ้าจะอยู่เหนือจุดเสริมกำลัง และน้ำหนักของเสาไฟฟ้าที่วิบัติจะไม่ส่งผลกระทบถึงเสาไฟฟ้าต้นถัดไป ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้นที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงทราบวิธีการ, ขั้นตอนการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า และทราบถึงต้นทุนของการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าทั้ง 2 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A Test of Low Voltage Utility Poles Strengthening by using Steel Plate and CFRP
Student	Mr. Montri Monkongkit
Student ID.	60601220
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof Atavit Sujaritpong,Ph.D

ABSTRACT

Due to the concrete electric poles currently used in accordance with the Metropolitan Electricity Authority standard cannot resist the progressive collapse. The electric poles when it collapsed due to accident or natural disasters, then the next poles cannot resist the weight of the previous pole that causing progressive collapse.

Therefore, the study of strengthening of electric pole, so that the base of the pole can resist bending force from the weight of the previous failure pole. And move the failure point up to point that when the electric pole is broken, the weight of the pole won't affect to the next pole. By strengthening 2 ways, 1.) strengthening by steel plate size width 25 mm. thick 4.5mm. inside the pole from below rise to 6.05m. at least. 2.) strengthening by attaching 8 carbon fiber sheet CFRP 1.2mm. thick from bottom of the pole to 6.05m. at least. After that, the electric poles were tested to confirm the test results with the analysis result from finite element program that used to find the appropriate strengthening point. And were used to be the guideline for improving the electric poles for the Metropolitan Electricity Authority.

From the test of the electric poles that strengthening both methods. The result that the failure point is above the strengthening point. And the weight of the failure pole won't affect to the next pole. The test result is accordance with the assumptions derived from the analysis with the finite element program. Including how to know the procedure for strengthening the electric pole and know the cost of strengthening in both methods.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความกรุณาของท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านอาจารย์ ผศ. ดร. อัฏฐวิทย์ สุจริตพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณท่านอาจารย์ ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางข้อมูลต่างๆ และวัสดุที่ใช้ทดสอบ ที่การจัดงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จและลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority) ที่ให้ข้อมูลสนับสนุนการดำเนินการวิจัยนี้ รวมถึงพนักงานทุกท่านที่มาช่วยการทดสอบให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท Sika ที่ให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ CFRP และพนักงานของบริษัท Sika ทุกท่านที่ได้มาช่วยการติดตั้งแผ่น CFRP และให้คำปรึกษา จนการทดสอบสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อชี้แนะ กระทั่งในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกท่านที่ได้ทำการวิจัยครั้งนี้ร่วมกัน ที่ได้ให้คำแนะนำ ชี้แนะจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

มนตรี มั่นคงกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา 1

1.2 ปัญหางานวิจัย 2

1.3 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการศึกษา 2

1.4 ขอบเขตการศึกษา 2

1.5 ขั้นตอนการการศึกษา 2

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 แนวคิดของงานวิจัย 4

2.2 ชนิดของเสาไฟฟ้า คุณสมบัติของวัสดุและวัสดุเสริมกำลัง 5

2.2.1 คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า 5

2.2.2 คุณสมบัติคอนกรีต 5

2.2.3 คุณสมบัติลวดอัดแรงและเหล็กเสริมคอนกรีต 6

2.2.4 คุณสมบัติแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเสาไฟฟ้า 8

2.2.5 คุณสมบัติแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) 9

2.3 ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า 10

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 15

3.1 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการปักเสาพาดสายไฟฟ้า รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าคอนกรีต 15

3.1.1 ศึกษาข้อมูลมาตรฐานและคุณสมบัติเสาไฟฟ้า 17

3.1.2 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19

3.2 วิธีการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบเสริมแผ่นเหล็กภายใน 23

3.2.1 เตรียมแผ่นเหล็กเสริมกำลัง 23

3.2.2 การติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังเข้าไปในเสาไฟฟ้า 25

3.2.3 การเทคอนกรีตหล่อเสาไฟฟ้า 26

3.2.4 การบ่มคอนกรีต 26

3.3 วิธีการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า 27

3.3.1 การเตรียมเสาไฟฟ้า 27

3.3.2 การเตรียมเสาไฟฟ้าเพื่อติดตั้งแผ่น CFRP 27

3.3.3 การเตรียมพื้นที่ติดแผ่น CFRP 29

3.3.4 ผสมกาวและทากาวติดแผ่น CFRP 30

3.3.5 การติดตั้งแผ่น CFRP และการพัน CFRP 31

3.3.6 การบ่มแผ่น CFRP 32

3.4 การทดสอบเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง 32

3.4.1. การตรวจสอบเสาไฟฟ้าเบื้องต้น 32

3.4.2. การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ 32

3.4.3. การติดตั้งเสาไฟฟ้าเข้ากับแท่นทดสอบ 33

3.4.4. การวัดระยะติดตั้งเครื่องมือ 33

3.4.5. การเริ่มทดสอบ 34

3.4.6. การตรวจสอบรอยร้าวบนเสาไฟฟ้า 34

3.4.7. คลายแรงเครื่องไฮโดรลิก 35

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล 37

4.1 การทดสอบเสาไฟฟ้าที่มีการเริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายใน 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การทดสอบเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งแผ่นCFRP รอบเสา 40
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลัง 43
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาไฟฟ้าแบบเสริมกำลังทั้ง 2 แบบในเชิงวิศวกรรม 44
4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาไฟฟ้าแบบเสริมกำลังทั้ง 2 แบบในเชิงเศรษฐศาสตร์ 44
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ 46
5.1 สรุปผล 46
5.2 ข้อเสนอแนะ 46
บรรณานุกรม 48
ประวัติผู้เขียน 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า 5

2.2 แสดง Mix Design ที่ใช้ในการผลิตเสาไฟฟ้าในปัจจุบัน 5

2.3 แสดงค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดไม่คลายความเค้น 6

2.4 ชื่อ, ขนาดระบุและมวลระบุของเหล็กเส้นกลม 7

2.5 ชื่อ, ขนาดระบุและมวลระบุของเหล็กข้ออ้อย 7

2.6 ความต้านทานแรงดึง, ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความยืด 8

2.7 ความต้านทานแรงดึง, ความยืด 9

2.8 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลัง 10

4.1 การใส่แรงให้เสาไฟฟ้า การโก่งตัว แรงดัดที่โคนเสาของเสาไฟฟ้า 12.00ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) 38

4.2 การใส่แรงให้เสาไฟฟ้า การโก่งตัว แรงดัดที่โคนเสา และแรงดัดที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมกำลังของเสาไฟฟ้า 12.00ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) 38

4.3 การใส่แรงให้เสาไฟฟ้า การโก่งตัว แรงดัดที่โคนเสา และแรงดัดที่ปลายแผ่นCFRP เสริมกำลังของเสาไฟฟ้า 12.00 ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) 40

4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัว และ แรง ของเสาไฟฟ้า 3 ชนิด 42

4.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดัดที่โคนเสา และ แรง ของเสาไฟฟ้า 3 ชนิด 42

4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดัดที่ปลายวัสดุเสริมกำลัง และแรงของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 ชนิด 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการวิบัติของเสาไฟฟ้าเหนือจุดเสริมกำลัง	4
2.2	แสดงการเสริมกำลังโดยการเสริมแผ่นเหล็กเข้าไปในเสาไฟฟ้า	8
2.3	แสดงการเสริมกำลังโดยการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	9
2.4	แสดงแรงกระทำที่เกิดจากการเกิดโมเมนต์ดัด	11
3.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	16
3.2	แสดงขนาดตามมาตรฐานของเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)	17
3.3	แสดงหน้าตัดเสาที่ระดับต่างๆ ตามมาตรฐานของเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)	18
3.4	แสดงการจำลองเสาไฟฟ้าในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	19
3.5	ผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้า 12.00 เมตร 5ตัน-เมตร ที่ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆที่ระยะความสูงที่ 6.05 เมตร	20
3.6	แสดงการพันรอบด้วยวัสดุคอมโพสิตชนิด คาร์บอน หรือ CFRP ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	22
3.7	แสดงผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้า 12.00 ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่ทำการเสริมกำลังด้วย CFRP ความหนาต่างๆ ที่ระยะความสูง 6.05 ม.	22
3.8	แสดงการเตรียมแผ่นเหล็กขนาด กว้าง 25 มม หนา 4.5 มม.ยาว 6.00ม.และทำการเชื่อมให้แผ่นเหล็กติดกันเป็นฉาก โดยวิธีเชื่อมยาว 50 มม.เว้น 100 มม. ตลอดความยาว เพื่อให้แผ่นเหล็กติดกันเป็นอย่างดี	24
3.9	แสดงเหล็กเสริมหลักของเสาไฟฟ้าที่ทางการไฟฟ้านครหลวงจัดเตรียมไว้ให้ และการติดตั้งเหล็กเสริมกำลังเข้ากับเหล็กยืนเสาไฟฟ้า	25
3.10	แสดงการเทคอนกรีตหล่อเสาไฟฟ้า และเจาะรู	26
3.11	แสดงการลำเลียงเสาคอนกรีต	26
3.12	แสดงการเตรียมผิวเสาไฟฟ้าและผลิตภัณฑ์ของ SIKA 214-11 ที่ใช้อุดร่อง	27
3.13	แสดงการเตรียมผิวเสาไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์ของ Sika Body agent 32TH และรูปแสดงการเทวัสดุอุดร่องเสาไฟฟ้าเรียบร้อย และทำการทิ้งให้แห้ง 1 วัน แล้วทำการขัดตกแต่งผิวให้เรียบ เพื่อเตรียมให้พร้อมในการติดแผ่น CFRP	28
3.14	แสดงการเตรียมตำแหน่งการติดแผ่น CFRP และเตรียมแผ่น CFRP กาวติดแผ่น CFRP แผ่น CFRP Sikadur-30 และอุปกรณ์ทากาวที่แผ่น CFRP	29
3.15	แสดงการผสมส่วนผสมของกาว Sikadur-30 และการทาลงบนแผ่น CFRP และการติดแผ่น CFRP ลงบนเสาไฟฟ้า และตกแต่งให้เรียบร้อย	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.16	แสดงการติดตั้งแผ่น CFRP เรียบร้อยและพัน CFRP แบบผ้า	31
3.17	แสดงการตรวจสอบหน้าตัดเสาและการลำเลียงออกไปยังลานทดสอบ	32
3.18	แสดงลานทดสอบและการเตรียมอุปกรณ์ทดสอบเสาไฟฟ้า	32
3.19	แสดงการติดตั้งเสาไฟฟ้าเข้ากับแท่นทดสอบ	33
3.20	แสดงการวัดและกำหนดตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งกระบอกไฮโดรลิกและตำแหน่งติดตั้งไดนาโมมิเตอร์	33
3.21	แสดงการดันเสาไฟฟ้าด้วยกระบอกไฮโดรลิก	34
3.22	แสดงการตรวจหารอยร้าวที่เกิดขึ้นบนเสาไฟฟ้า	34
3.23	แสดงการคลายกระบอกไฮโดรลิกออกและตรวจหารอยร้าว	35
3.24	แสดงการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายในจนเกิดการวิบัติ และรูปแสดงการวัดค่าความโก่งตัวของเสาไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำขนาดต่างๆ	35
3.25	แสดงการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสา จนเกิดการวิบัติและรูปแสดงการวัดขนาดของแรงขณะเมื่อเสาเกิดการวิบัติ	36
4.1	การณ์แสดงการจำลองเสริมกำลังเสาไฟฟ้า ตำแหน่งยึดเสา ตำแหน่งแรงกระทำ	37
4.2	แสดงการเกิดการวิบัติของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใน	39
4.3	แสดงการเกิดรอยร้าวเบื้องต้นของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใน	39
4.4	แสดงการเกิดรอยร้าวเริ่มต้นของเสาไฟที่เสริมกำลังแบบติดแผ่น CFRP รอบเสา	41
4.5	แสดงการเกิดการวิบัติของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP	41
4.6	แสดงการหยุดการวิบัติของเสาไฟฟ้า	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

ข้อกำหนดและมาตรฐานของเสาไฟฟ้าแบบคอนกรีตอัดแรงก่อน (Pre-Stressed process) ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง จะแบ่งตามขนาดและประเภทของการใช้งานมีความยาว 6 เมตร ถึง 22 เมตรใช้สำหรับปักพาดสายส่งและสายป้อนทุกๆความยาว 40 และ 80 เมตร

การผลิตเสาไฟฟ้าโดยใช้คอนกรีตตามมาตรฐานอุตสาหกรรมด้วยเหตุผลที่ว่า คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถหล่อให้มีรูปร่าง,รูปทรง และขนาดตามต้องการได้ง่าย รวมถึงมีราคาถูก มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งที่ดี

คอนกรีตนั้นมีจุดด้อยตรงที่เป็นวัสดุเปราะ มีความสามารถในการรับแรงดึงได้ต่ำ และทนต่อแรงกระแทกได้น้อย ด้วยเหตุนี้เองทำให้ทางการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประสบปัญหาการหักโค่นของเสาไฟฟ้าจำนวนมาก โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยภายนอก เช่น ลมพายุกรรโชก, อุบัติเหตุรถชนเสาไฟฟ้า,รถเกี่ยวสายไฟฟ้า,กิ่งไม้หักทับเสาหรือสายไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้เกิดปัญหาไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและเกิดอันตรายต่อประชาชนทั้งชีวิตและทรัพย์สิน จากสาเหตุต่างๆที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตนั้นมีคุณสมบัติที่ไม่ดีพอในการรับแรงด้านข้างจึงต้องมีการปรับปรุง และเสริมกำลังให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเหนียวขึ้น เพื่อลดปัญหาจากอุบัติเหตุที่กล่าวมา

การหักโค่นของเสาไฟฟ้าจะส่งผลไปยังต้นข้างเคียง แบบต่อเนื่องและเป็นจำนวนมาก เกิดจากโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่โคนเสาไฟฟ้า เนื่องมาจากน้ำหนักของเสาไฟฟ้าต้นที่วิบัติก่อนหน้าคูณกับความสูงของเสาไฟฟ้าที่พ้นเหนือดิน หรือแรงกระชากที่สายไฟฟ้าคูณกับความสูงของเสาไฟฟ้าที่พ้นเหนือดิน ส่งผลทำให้เสาไฟฟ้าเกิดการหักโค่นแบบต่อเนื่องจากแรงกระทำดังกล่าว

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การทดสอบเสาไฟฟ้าที่ทำการเสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กด้านในเสาไฟฟ้า และการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าด้วยการติดตั้งแผ่น Fiber Reinforced Polymer ชนิด Carbon หรือ CFRP ซึ่งทั้ง 2 วิธีจะทำให้เสาไฟฟ้ามีความเหนียวและรับกำลังดัดได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ปัญหางานวิจัย

จากสาเหตุการหักโค่นของเสาไฟฟ้าแบบต่อเนื่องในข้างต้น ทำให้เกิดการศึกษาเรื่องการเสริมกำลังและการทดสอบเสาไฟฟ้าที่ทำการเสริมกำลัง เพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่หักโค่น การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังแบบแผ่นเหล็กด้านใน และเสริมแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้าจนถึงจุดที่จะลดน้ำหนักเสาไฟฟ้าได้มากพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อเสาต้นถัดไป และเปรียบเทียบผลทดสอบกับการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้า และเปลี่ยนตำแหน่งการวิบัติให้สูงขึ้นเพื่อลดน้ำหนักเสาไฟฟ้าต้นที่หักโค่น โดยการเสริมแผ่นเหล็กภายในเสา และการติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสา
2. ศึกษาการวิบัติของเสาไฟฟ้า และตำแหน่งวิบัติจากผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 แบบ
3. เพื่อทราบราคาของการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า
4. เพื่อเป็นแนวทางให้การไฟฟ้านครหลวงได้ทราบการถึงการปรับปรุง เสริมกำลังเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงให้ดีขึ้น

1.4. ขอบเขตการศึกษา

1. ทดสอบเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานการทดสอบของการไฟฟ้านครหลวง และ ACI.ชนิด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) กำลังต่ำตามมาตรฐานของ การไฟฟ้านครหลวง โดยเสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กด้านใน
2. ทดสอบเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานการทดสอบของการไฟฟ้านครหลวงและ ACI. ชนิด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) กำลังต่ำตามมาตรฐานของ การไฟฟ้านครหลวง โดยเสริมกำลังด้วยการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไว้รอบเสา
3. นำผลการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
4. ทำการประมาณต้นทุนและวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าของการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวเลือกในการทำการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

การทดสอบเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) กำลังต่ำที่เสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กภายในเสา และการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รอบเสา เพื่อเพิ่มความเหนียวให้เสาไฟฟ้า มีขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ศึกษาข้อกำหนดต่างๆ แบบเสาไฟฟ้าและมาตรฐานเสาไฟฟ้าคอนกรีต ที่ทางการไฟฟ้านครหลวงใช้อยู่ในปัจจุบันชนิด 12.00 เมตร กำลังต่ำ (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)
2. ศึกษาวัสดุ, คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาเสริมกำลัง ทั้งแผ่นเหล็กและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ รวมถึงการใช้งานและการติดตั้ง
3. ศึกษาวิธีการทดสอบเสาไฟฟ้าที่ทางการไฟฟ้านครหลวงใช้อยู่ในปัจจุบัน
4. นำผลการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ สรุปผล และวิเคราะห์ความคุ้มในการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า
5. สรุปผล วิเคราะห์ จัดทำรูปเล่ม และนำเสนอผลงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบแนวทางการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าทั้งเสาที่ผลิตใหม่ และเสาที่ปักใช้งานแล้ว และปรับปรุงคุณภาพเสาไฟฟ้าให้ดีขึ้น
2. ยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 แบบ ว่าผลลัพท์ของการวิเคราะห์กับทดสอบตรงกัน
3. ทราบว่าการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้าสามารถช่วยป้องกันการหักโค่นแบบต่อเนื่องได้จริง
4. ทราบราคาต้นทุนของการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าในแต่ละแบบ
5. ทราบข้อดี-ข้อเสียของการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าในแต่ละแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดของงานวิจัย

วัสดุที่แข็งจะทนต่อแรงกระแทกได้น้อย แต่วัสดุที่เหนียวจะมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทกได้มากกว่า โดยแรงกระแทกในทฤษฎีทางกลศาสตร์ นิยามว่า คือ แรงที่มีขนาดสูงสุดในระยะเวลาอันสั้น โดยที่ผลของแรงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัสดุหรือขนาดของแรงและความเร็วสัมพัทธ์ การต้านทานแรงกระแทกขึ้นอยู่กับโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ เมื่อเสาไฟฟ้าคอนกรีตเกิดแรงกระแทกจากอุบัติเหตุรถชนเสาไฟฟ้า เสาไฟฟ้าจะเกิดแรงเค้นในตำแหน่งที่เกิดการกระแทก และถ่ายแรงไปสู่ด้านตรงข้ามของเสาไฟฟ้าด้านที่ถูกชน เสาไฟฟ้าต้นถัดไปจะถูกแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเสาไฟฟ้าต้นที่หักโค่นส่งผ่านสายไฟฟ้าต่อไปยังต้นถัดไป การเสริมกำลังเสาไฟฟ้าทั้งแบบเสริมแผ่นเหล็กไว้ด้านในและแบบติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รอบเสา ล้วนแต่เป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับเสาไฟฟ้า โดยจุดที่ทำการเสริมกำลังนั้นได้มาจากการวิเคราะห์จากโปรแกรม ANSYS ดังนั้นการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าบริเวณจุดวิบัติทำให้น้ำหนักเสาไฟฟ้าต้นที่หักโค่นมีน้ำหนักลดลง ทำให้แรงที่ส่งถ่ายไปเสาไฟฟ้าต้นถัดไปลดลง และเสาไฟฟ้าจะหยุดการหักโค่นแบบต่อเนื่องในที่สุด

รูปที่ 2.1 แสดงการวิบัติของเสาไฟฟ้าเหนือจุดการเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชนิดของเสาไฟฟ้า คุณสมบัติของวัสดุและวัสดุเสริมกำลัง

2.2.1 เสาที่ใช้ทดสอบ คือ เสาคอนกรีตแบบคอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Process) ขนาดที่ใช้ 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ดัด 5 ตัน-เมตร) กำลังต่ำ ปักเสาทุกๆ 40 เมตร

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า

เสาไฟฟ้าอัดแรง (ม.)	ความสูงเสาจากพื้นดิน (ม.)	ระยะปักเสาในดิน (ม.)	ขนาดเสา		น้ำหนัก (กก.)
			ฐาน	ปลาย	
			กว้าง (ซม.)	กว้าง (ซม.)	
8.5	7.20	1.30	20.00	13.00	558
10	8.25	1.75	24.00	16.00	880
12	10.25	1.75	25.27	16.18	1280
14	12.00	2.00	28.00	17.50	1720
20	18.00	2.00	40.00	22.00	3515
22	20.00	2.00	43.60	25.60	5600

2.2.2 คุณสมบัติคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้สำหรับหล่อเสาไฟฟ้าจะใช้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน (fc') = 450 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร (ที่ 1 วันของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ fc' = 350 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร) โดยคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Ec) ซึ่งเป็นค่าการต้านทานการเสียรูปของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักมากระทำ โดยที่ ACI318M-05 ได้กำหนดความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไว้ดังนี้

$$E_C = 15{,}100\sqrt{fc'} \quad (ksc) \quad (2.1)$$

ตารางที่ 2.2 แสดง Mix Design ที่ใช้ในการผลิตเสาไฟฟ้าในปัจจุบัน

Cement Type III (kgs)	Sand (kgs)	Aggregates (kgs)	Water (Litres)	Admixtures (Litres)	Total (M3)
360	745	1145	140	3.8	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 คุณสมบัติลวดอัดแรงและเหล็กเสริมคอนกรีต ลวดอัดแรงใช้สำหรับคอนกรีตอัดแรง ซึ่งเป็นลวดที่มีคาร์บอนสูง ชนิดคลายความเค้น (Stress Relieved Wire) หมายถึงลวดดึงเย็นซึ่งผ่านขบวนการปรับคุณสมบัติวิธีใดวิธีหนึ่งตลอดความยาวของเส้น ดังต่อไปนี้

- นำลวดผ่านชุดตัดตรง แล้วอบร้อนระยะเวลาสั้น หรือ
- อบร้อนระยะเวลาสั้นในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาพให้ความเครียดตามแนวแกน

ขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.3

ลวดอัดแรงมีลักษณะตันกลมเกลี้ยง ขนาด 4,5,7 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดไม่คลายความเค้น

เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ มิลลิเมตร	ความทนแรงดึงระบุ[1] นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัดระบุ ตารางมิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ[2] ต่ำสุด		
			ค่าระบุ[3] กรัม	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน กรัม	แรงดึงสูงสุด[4] กิโลนิวตัน	แรงดึงพิสูจน์ ร้อยละ 0.1 กิโลนิวตัน	รัศมีการดัดโค้ง มิลลิเมตร
2.5	1 960	4.91	38.5	+ 1.25	9.62	7.7	7.5
2.5	1 860	4.91	38.5	+ 1.25	9.13	7.3	7.5
3	1 860	7.07	55.5	+ 1.5	13.1	10.5	7.5
3	1 770	7.07	55.5	+ 1.5	12.5	10.0	7.5
4	1 770	12.6	98.9	+ 2.0	22.3	17.8	10
4	1 670	12.6	98.9	+ 2.0	21.0	16.8	10
5	1 770	19.6	154	+ 3.1	34.7	27.8	15
5	1 670	19.6	154	+ 3.1	32.7	26.2	15
6	1 770	28.3	222	+ 3.7	50.1	40.1	15
6	1 670	28.3	222	+ 3.7	47.3	37.8	15
7	1 670	38.5	302	+ 4.3	64.3	51.4	20
7	1 570	38.5	302	+ 4.3	60.4	48.3	20
8	1 570	50.3	395	+ 5.9	79.0	63.2	20
8	1 470	50.3	395	+ 5.9	73.9	59.1	20

คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีใช้ทั้งแบบกลมและแบบข้ออ้อย โดยที่เหล็กกลมจะเป็นไปไปตามมาตรฐาน มอก.20-2543 ชั้นคุณภาพ SR-24 กำลังรับแรงดึง (fy) ไม่น้อยกว่า 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร (240 เมกะปาสคาล) เหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน มอก.24-2548 ชั้นคุณภาพ SD-40 กำลังรับแรงดึง (fy) ไม่น้อยกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร (390 เมกะปาสคาล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ชื่อ,ขนาดระบุและมวลระบุของเหล็กเส้นกลม

ชื่อขนาด	ขนาดระบุ		มวลระบุ กิโลกรัมต่อเมตร
	เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ มิลลิเมตร	พื้นที่ภาคตัดขวางระบุ ตารางมิลลิเมตร	
RB6	6	28.3	0.222
RB8	8	50.3	0.395
RB9	9	63.6	0.499
RB10	10	78.5	0.616
RB12	12	113.1	0.888
RB15	15	176.7	1.387

ตารางที่ 2.5 ชื่อ,ขนาดระบุและมวลระบุของเหล็กข้ออ้อย

ชื่อขนาด	ขนาดระบุ		มวลระบุ กิโลกรัมต่อเมตร
	เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ มิลลิเมตร	พื้นที่ภาคตัดขวางระบุ ตารางมิลลิเมตร	
DB6	6	28.3	0.222
DB8	8	50.3	0.395
DB10	10	78.5	0.616
DB12	12	113.1	0.888
DB16	16	201.1	1.578
DB20	20	314.2	2.466
DB22	22	680.1	2.984
DB25	25	490.9	3.853
DB28	28	615.8	4.834

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ความต้านทานแรงดึง,ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความยืด

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง MPa	ความต้านแรงดึงที่จุดคราก MPa	ความยืด %
SD 30	480	295	17
SD 40	560	390	15
SD 50	620	490	13

2.2.4 คุณสมบัติแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเสาไฟฟ้า แผ่นเหล็กเสริมกำลังใช้แผ่นเหล็กรูปพรรณมาตรฐาน มอก.1499-2541 ชั้นคุณภาพ SM-400 กำลังรับแรงดึง (fy) ไม่น้อยกว่า 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร หนา 4.50 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร เชื่อมเป็นรูปฉาก แล้วเสริมเข้าไปในหน้าตัดเสาทั้ง 4 มุม และ ตรงกลาง

รูปที่ 2.2 แสดงการเสริมกำลังโดยการเสริมแผ่นเหล็กเข้าไปในเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ความต้านทานแรงดึง,ความยืดของแผ่นเหล็กรูปพรรณ

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึงที่จุดครากต่ำสุด เมกะพาสคัล ความหนาของเหล็กแผ่น มิลลิเมตร				ความต้านแรงดึง เมกะพาสคัล	ความหนาของเหล็กแผ่น มิลลิเมตร	หมายเลขชิ้นทดสอบ ตาม JIS Z 2201	ความยืดต่ำสุด ร้อยละ
	ไม่เกิน 16	มากกว่า 16 ถึง 40	มากกว่า 40 ถึง 75	มากกว่า 75 ถึง 100				
SM 400 A						ไม่เกิน 5	5	23
SM 400 B	245	235	215	215	400 ถึง 510	มากกว่า 5 ถึง 16	1A	18
SM 400 C						มากกว่า 16 ถึง 50	1A	22
						มากกว่า 40	4	24

2.2.5 คุณสมบัติแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) เป็นแผ่นวัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีการเสริมด้วยเส้นใยที่มีความยาวมากกว่าความหนา โดยสามารถอ้างอิงไปยังมาตรฐาน มยผ.1508-51(2511) การประยุกต์ใช้งานในงานโครงสร้าง เช่น คอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP Composite Reinforced Concrete) มีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดจากส่วนประกอบทั้งหมด เป็นส่วนเสริมกำลังซึ่งรองรับโดยวัสดุเมทริกซ์ที่ทำให้มีเสถียรภาพ โดยปกติเส้นใยที่ต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักจะมีความแข็งแรง (Stiffness) และกำลังรับน้ำหนักสูงกว่าวัสดุเมทริกซ์ซึ่งใช้ กันทั่วไป วัสดุเส้นใยคาร์บอน กำลังรับแรงดึง 35,500 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร หนา 1.20 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร

รูปที่ 2.3 แสดงการเสริมกำลังโดยการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลัง

ชนิดเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมครอน)	ความถ่วงจำเพาะ	มอดุลัสแรงดึง กิกะปาสกาล (10^6 ปอนด์/ตร.นิ้ว)	กำลังรับแรงดึง กิกะปาสกาล (10^3 ปอนด์/ตร.นิ้ว)	ความเครียดที่จุดแตกหัก	สัมประสิทธิของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน 10^{-6}/°C	อัตราส่วนปัวซอง
เส้นใยแก้ว							
ชนิด E-Glass	10	2.54	72.4 (10.5)	3.45 (500.0)	4.8	5.0	0.2
ชนิด S-Glass	10	2.49	86.9 (12.6)	4.30 (625.0)	5.0	2.9	0.22
เส้นใยคาร์บอน							
PAN-Carbon T-300 [1]	7	1.76	231 (33.5)	3.65 (530)	1.4	-0.1 ถึง -0.5 (ตามยาว) 7 ถึง 12 (ตามรัศมี)	-0.2
AS [2]	7	1.77	220 (32)	3.1 (450)	1.2	-0.5 ถึง 1.2 (ตามยาว) 7 ถึง 12 (ตามรัศมี)	-
t-40 [1]	6	1.81	276 (40)	5.65 (820)	2.0	-	-
HSB [2]	7	1.85	344.5 (50)	2.34 (340)	0.58	-	-
Fortafil 3™ [3]	7	1.80	227 (33)	3.80 (550)	1.7	-0.1	-
Fortafil 5™ [3]	7	1.80	345 (50)	2.76 (400)	0.8	-	-
PITCH-Carbon							
P-555 [1]	10	2.0	380 (55)	1.90 (275)	0.5	-0.9 (ตามยาว)	-
P-100 [1]	10	2.16	758 (110)	2.41 (350)	0.32	-1.6 (ตามยาว)	-
เส้นใยอะรามิด							
Kevlar™ 49 [4]	11.9	1.45	131 (19)	3.62 (525)	2.8	-2.0 (ตามยาว) +59 (ตามรัศมี)	0.35
Twaron™ 1055 [5],[6]	12.0	1.45	127 (18)	3.6 (533)	2.5	-2.0 (ตามยาว) +59 (ตามรัศมี)	0.35

2.3 ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า

ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า ความสามารถในการรับแรงดัดของคอนกรีตอัดแรง (Bending Moment, B.M.) ซึ่งความหมายของ B.M. หมายถึงมีแรงกระทำต่ออุปกรณ์ที่ยึดอยู่กับเสาไฟฟ้าในลักษณะที่แรงกระทำนั้นพยายามทำให้เสาไฟฟ้าและอุปกรณ์นั้นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงที่มากระทำ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างแรงที่กระทำกับระยะในแนวตั้งฉากจากแนวแรงไปยังจุดรองรับ เป็นไปตามสมการที่ (2.2)

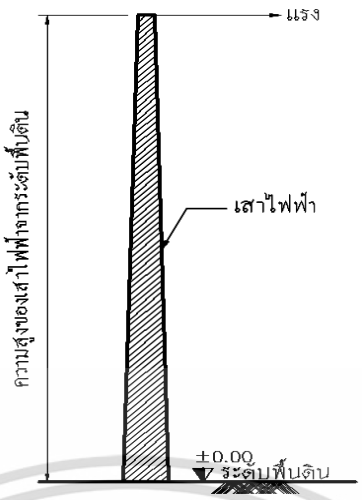
$$B.M. = F \times H \qquad (2.2)$$

โดยที่ B.M. = โมเมนต์ดัด กิโลกรัม-เมตร (kg-m)

F = แรงที่กระทำต่อวัตถุ กิโลกรัม (kgf)

H = ระยะห่างในแนวตั้งฉากจากจุดที่แรงกระทำไปยังจุดรองรับ เมตร (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงแรงกระทำที่เกิดจากการเกิดโมเมนดัด [1]

วัสดุแต่ละชนิดจะรับค่าแรงดัดสูงสุดได้ค่าหนึ่ง และวัสดุแต่ละชนิดจะรับแรงดัดได้ไม่เท่ากัน ถ้าหากแรงที่มากระทำทำให้เกิดแรงดัดมีค่าสูงเกินกว่าที่วัตถุนั้นจะรับได้ วัตถุนั้นก็จะเกิดการแตกหัก โดยในที่นี้ทางการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ได้ใช้เสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงมารับแรงดัดที่เกิดขึ้น โดยที่หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น กิโลกรัม-เมตร ทั้งนี้ค่าแรงดัดที่เกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. แรงดัดที่เกิดจากแรงดึงในสายไฟฟ้า ที่มีการยึดสายไฟฟ้าเข้ากับเสาไฟฟ้าหรือเกิดจากการพาดสายไฟฟ้าไม่เป็นแนวตรงทำให้เกิดแรงลัพธ์ที่กระทำตั้งฉากกับหน้าเสา เนื่องจากมุมการหย่อนของสายไฟฟ้า

2. แรงดัดที่เกิดจากแรงลมที่พัดมากระทำกับเสาไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า โดยที่จะเกิดเฉพาะในตอนที่มีแรงลมพัดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 นันทิกา นามวิจิตร. 2557. “**การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมโดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก**.” นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ได้ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก ได้ศึกษาและพบว่าถ้าหากมีการให้หน่วยแรงโอบรัดเสาคอนกรีตก่อนเกิดแรงกระทำในแนวแกน ผลการทดสอบพบว่าเสาคอนกรีตให้กำลังอัดสูงสุดและมีความเหนียวสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง และผลการทดสอบที่ได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI-318 โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบคือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก โดยการทดสอบเสาคอนกรีตกลมที่ได้รับหน่วยแรงโอบรัดก่อนมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง 50-70% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด $(f'_{\max})$ จากนั้นผลการทดสอบจะเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น โดยแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบก่อนเกิดการวิบัติคือ (1) Strain hardening (2) Elastic-perfectly plastic (3) Strain softening โดยการวิบัติจะเกิดแบบค่อยเป็นค่อยไป และเปลี่ยนรูปร่างสูงสุดได้ก่อนการเกิดการวิบัติ และมีความเหนียวสูงขึ้น โดยมีอัตรส่วนของกำลังรับแรงอัดของเสาเชิงประกอบตามมาตรฐาน ACI-318 $(P'_{\max,col} / P_{ACI})$ มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้นก่อนนำสมการไปใช้คำนวณ สมการของACI-318 ควรถูกปรับให้เหมาะสมในรูป $P_{ACI}^{proposed} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.4 A_s^{tube} f_y^{tube}$ โดยสมการดังกล่าวจะสามารถทำนายกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าความหนาของปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง $(0.05 f'_{co})$ เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาในขั้นต่อไป

2.4.2 ณัฏฐา สกานุพงษ์ และณัฐธยาน์ ก้อยชูสกุล และ ประภาทิพย์ โชคสกุลวงษ์. 2557. “**รูปแบบรอยร้าวและกำลังของคานคอนกรีต.**” กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศึกษารูปแบบรอยร้าว และกำลังของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการรับแรงของคอนกรีต และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการระหว่างตัวอย่างคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยมีปริมาณเส้นใย 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% ต่อปริมาตร จากผลการศึกษาทดสอบพบว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้น พบว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงในหน้าตัดคานเพิ่มขึ้น และแสดงให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและตำแหน่งของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคาน โดยคอนกรีตจะแตกร้าวมากขึ้นแต่เป็นการแตกร้าวในลักษณะของการกระจายรอยแตกเนื่องจากเส้นใยเหล็กจะช่วยในการกระจายแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ชูชัย สุจิวรกุล และวทัญญู ชุติคามี. 2548. “**ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติในการรับแรงดัดและแรงอัดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ.**” กรุงเทพฯ : เอกสารการประชุมวิชาการโยธา แห่งชาติครั้งที่ 11

ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงดัด และพฤติกรรมในการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตและการเพิ่มปริมาณการผสมเพิ่มของเส้นใยเหล็กแบบตะขอ ส่งผลต่อการรับแรงดัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็กสูงขึ้น ขนาดมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กส่งผลดีต่อการรับแรงดัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กที่สูงขึ้น ชิ้นส่วนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการดัด มีขนาด 10x10x40 ซม. โดยทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 30 ซม. ตัวแปรที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต ขนาดมวลรวมหยาบ ปริมาณเส้นใยเหล็กและขนาดเส้นใยเหล็กที่แตกต่างกัน

2.4.4 สุชาติ สุวิมลวรรณ. “**การศึกษาการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง.**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.

ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาไฟฟ้าขนาดความสูง 12.00 เมตร(กำลังรับโมเมนต์ 3,500 กิโลกรัม-เมตร) ความสูง 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5,000 กิโลกรัม-เมตร) ความสูง 12.35 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 6,500 กิโลกรัม-เมตร) ที่ทำการเสริมกำลังโดยการใช้แผ่น CFRP หนา 0.34 มิลลิเมตร สูง 6.00 เมตรพันรอบเสา ส่งผลให้กำลังในการรับแรงดึง และความเหนียวของเสาไฟฟ้าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น สามารถหยุดการหักโค่นต่อเนื่องได้

2.4.5 ธนิสร สถาพร. “**การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า.**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562.

ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าคอนกรีต โดยเสาไฟฟ้า EP. 12.00 ม. 5 ตัน-ม. ควรเสริมกำลังให้ตำแหน่งที่หักอยู่ที่ระดับสูงกว่า 6.00 ม.จากโคนเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 ณัฐพงศ์ จันทานานนท์. **“การศึกษาเสาไฟฟ้าโดยเพิ่มแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้ากำลังต่ำ.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562.

ได้ทำการศึกษาเสาไฟฟ้าโดยเพิ่มแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้ากำลังต่ำ ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาไฟฟ้าขนาดความสูง 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 3,500 กิโลกรัม-เมตร) เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร สูง 6.05 เมตร พฤติกรรมของเสาไฟฟ้าขนาดความสูง 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5,000 กิโลกรัม-เมตร) เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาด 12 มิลลิเมตร หนา 3.0 มิลลิเมตร สูง 6.00 เมตร และพฤติกรรมของเสาไฟฟ้าขนาดความสูง 12.35 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 6,500 กิโลกรัม-เมตร) เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาด 12 มิลลิเมตร หนา 3.0 มิลลิเมตร สูง 5.30 เมตร จะส่งผลให้กำลังรับแรงดึง และความเหนียวของเสาไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สามารถหยุดการวิบัติของเสาไฟฟ้าแบบต่อเนื่องได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมเสาไฟฟ้าที่ทำการเสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กภายในเสาไฟฟ้า และเสริมกำลังโดยใช้วัสดุ CFRP ติดตั้งรอบเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่องของเสาข้างเคียง จากแรงกระแทกที่มาจากอุบัติเหตุมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1 ที่ประกอบด้วยการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานและข้อกำหนด คุณสมบัติและลักษณะของเสาไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้ารวมถึงอุปกรณ์ที่จะติดตั้งอื่นๆ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุแผ่นเหล็กเสริมกำลัง และวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ ชนิดคาร์บอนหรือ CFRP ศึกษาข้อมูลการวิเคราะห์แบบจำลองเสาไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้เสาไฟฟ้าขนาดความยาว 12 เมตร, 3.5ตัน-เมตร 12 เมตร, 5ตัน-เมตร และ 12.35 เมตร, 6ตัน-เมตร เป็นตัวอย่างในการทำแบบจำลองและวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อดูความเค้นสูงสุดของวัสดุและอัตราส่วนความปลอดภัยของคอนกรีตในด้านที่รับกำลังอัดตามระยะความสูงของเสาไฟฟ้า โดยผลที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตเพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้า ทำการติดต่อกับการไฟฟ้านครหลวงเพื่อทำการขอซื้อเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ดัด 5 ตัน-เมตร) จำนวน 2 ต้น และติดต่อขอยืมสถานที่ในการทำการเสริมกำลังและการทดสอบเสาไฟฟ้า ทำการติดต่อบริษัท Sika เพื่อขอการสนับสนุนอุปกรณ์วัสดุและพนักงานเพื่อการติดตั้งแผ่น CFRP และทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาต้นทุนและความคุ้มค่าของการเสริมกำลัง ทำการสรุปผลการวิจัย

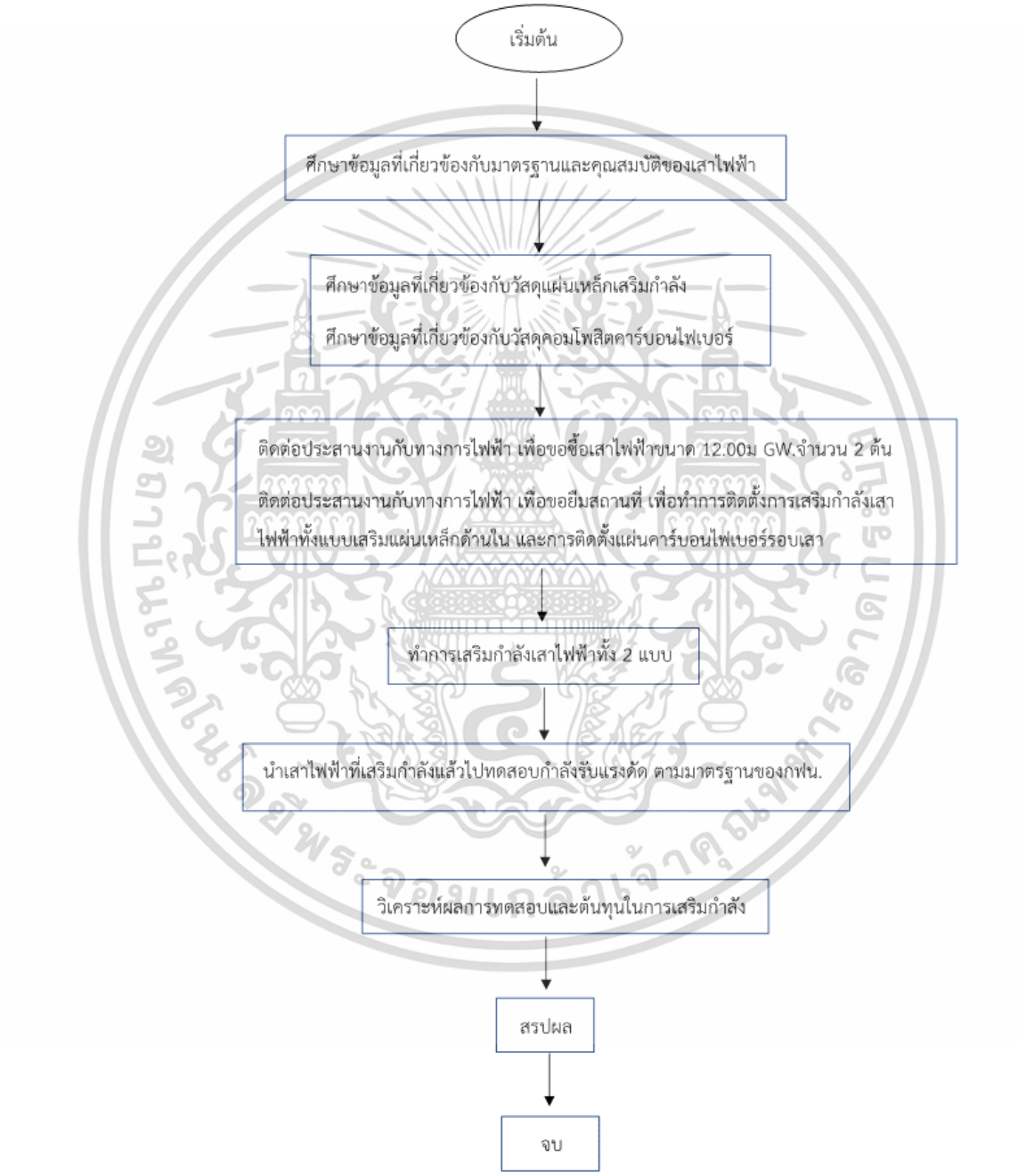
3.1 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการปักเสาพาดสายไฟฟ้ารวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าคอนกรีต

ศึกษาข้อมูลการปักเสาพาดสายของการไฟฟ้านครหลวงจากคู่มือการออกแบบและประมาณราคา พ.ศ. 2547 ของกองมาตรฐานการติดตั้งสายใน/สายนอกและความปลอดภัยการไฟฟ้านครหลวงและแบบก่อสร้างเสาไฟฟ้าจากกองผลิตภัณฑ์คอนกรีตของการไฟฟ้านครหลวง รวมถึงการออกสำรวจภาคสนามการปักเสาพาดสายที่การไฟฟ้านครหลวงที่ใช้ในปัจจุบัน

ศึกษาข้อมูลของวัสดุเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีต ทั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเสาคอนกรีตและแผ่นวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ CFRP ที่ติดตั้งภายนอกรอบเสาไฟฟ้าคอนกรีต โดยที่แผ่นเหล็กนั้นมีน้ำหนักที่สูง ผุกร่อนง่าย ต้านทานแรงดัดและแรงดึงได้ดี หาง่าย ราคาถูก ติดตั้งง่าย ส่วนแผ่น CFRP เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุผสมพอลิเมอร์ชนิด คาร์บอน โดยที่วัสดุ CFRP มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง ต้านทานการผุกร่อนได้ดี น้ำหนักเบา ดูดซับพลังงานได้สูง แต่มีราคาแพง รวมถึงต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้งมาติดตั้งจึงจะได้กำลังตามที่ระบุไว้

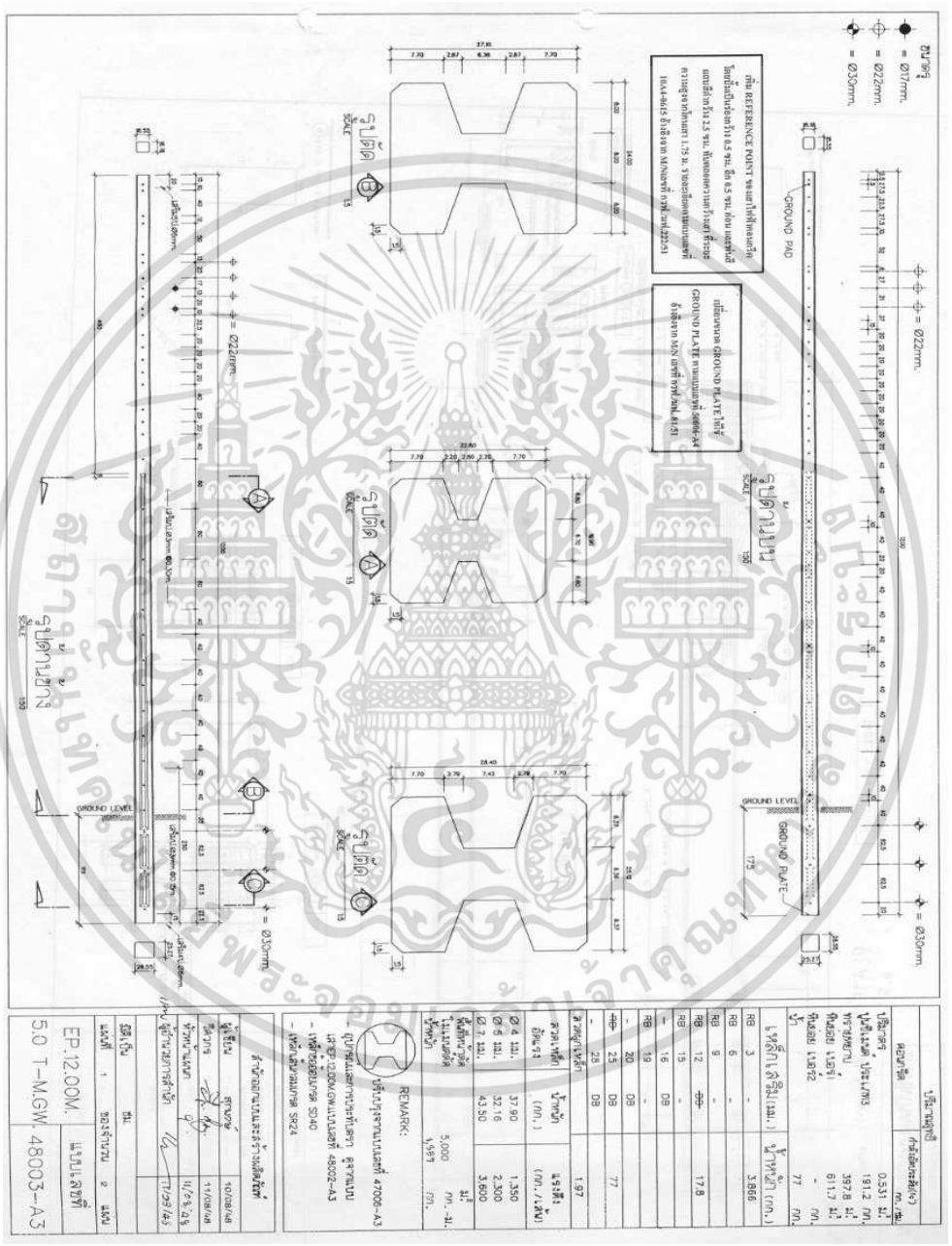


รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

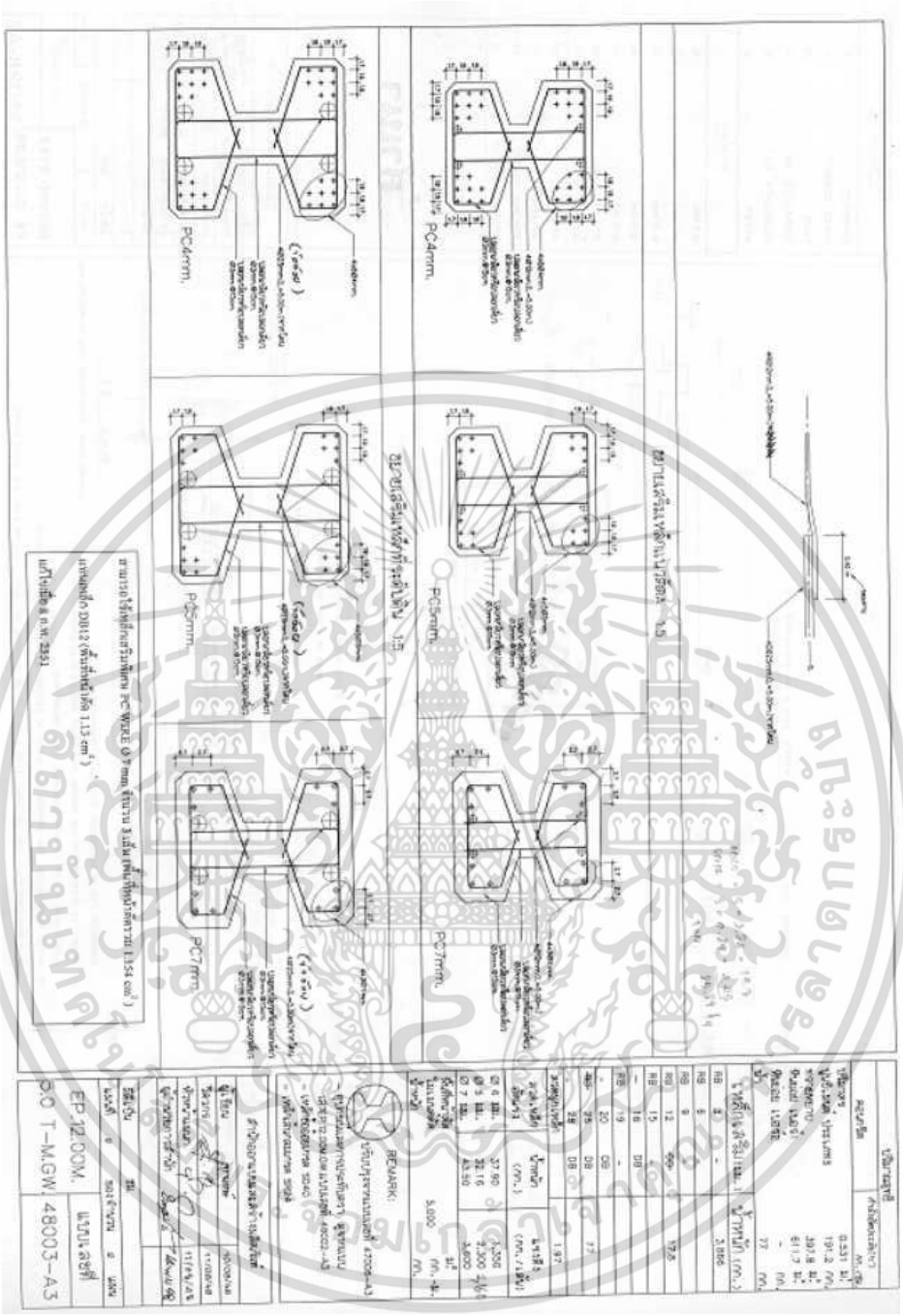
3.1.1 ศึกษาข้อมูลมาตรฐานและคุณสมบัติของเสาไฟฟ้า

ศึกษาข้อมูลมาตรฐานและคุณสมบัติของเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยจะศึกษาเน้นไปที่ข้อมูลของเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดตามมาตรฐานของเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงหน้าตัดเสาตามมาตรฐานของเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร(กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) [2]

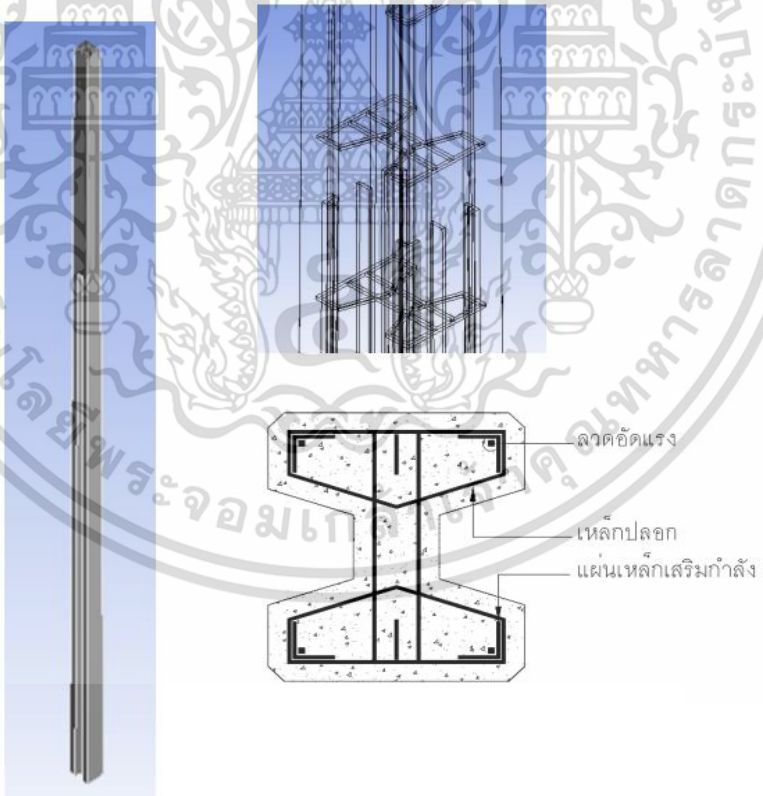
ทำการศึกษาแบบเสาไฟฟ้า และทำการศึกษาวัสดุของเสาไฟฟ้า ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงศึกษาข้อมูลของวัสดุเสริมกำลังทั้งแผ่นเหล็ก และวัสดุคอมโพสิตชนิดคาร์บอน CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

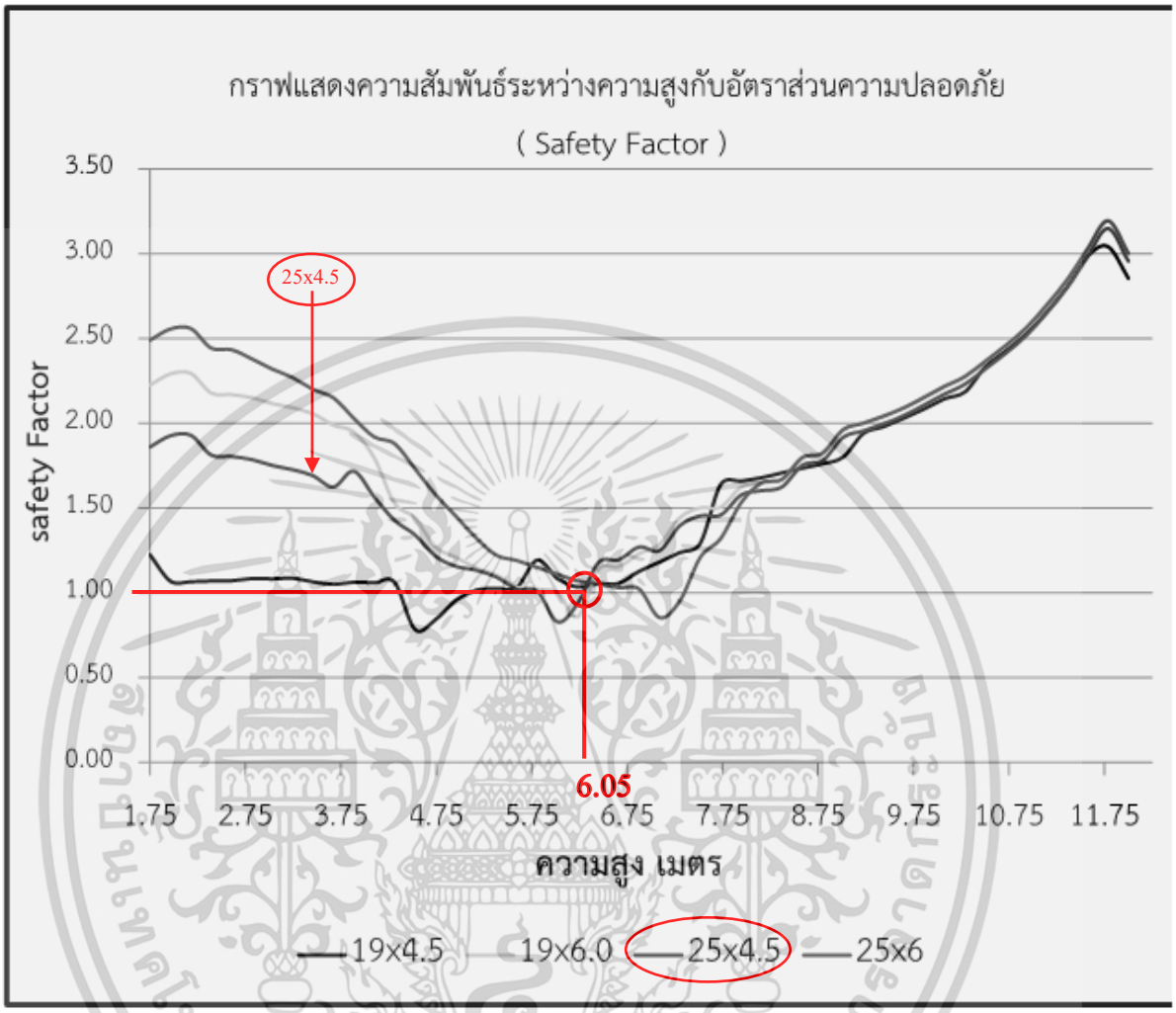
ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ทั้งการเสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในเสาไฟฟ้า และแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า

1. งานวิจัยของนาย ณัฐพงศ์ จันทานานนท์, 2562 การศึกษาเสาไฟฟ้าโดยเพิ่มแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายในเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้ากำลังต่ำ ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ด้วยการจำลองเสาไฟฟ้าในโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์และคำนวณความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาจุดวิบัติที่จะทำให้เสาไฟฟ้าหักลงและดึงเสาต้นข้างเคียงลงมาด้วย และทำการวิเคราะห์การเสริมกำลัง โดยวิธีการเสริมแผ่นเหล็กเข้าไปในเสาไฟฟ้า หาขนาดแผ่นเหล็กที่เพียงพอในการหยุดการวิบัติแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 แสดงการจำลองเสาไฟฟ้าในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้า 12.00ม (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆ ที่ระยะความสูงที่ 6.05 ม. [3]

ผลจากการวิเคราะห์จะทำโดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress, σ_{max}) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองเสาไฟฟ้าเทียบกับค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุ (S_{limit}) โดยจะเกิดการหักต่อเมื่อค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุที่รับได้ ดังสมการที่ (3-1) และสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนความปลอดภัย (SAFETY FACTOR, F.S.) ได้ดังสมการที่ (3-2) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{max} \geq S_{limit} \quad (3\text{-}1)$$

และอัตราส่วนความปลอดภัย Factor of Safety คือ

$$F.S. = S_{limit}/\sigma_{max} \quad (3\text{-}2)$$

โดยมีเป้าหมายในการออกแบบคือ

$$S_{limit}/\sigma_{max} > 1 \quad (3\text{-}3)$$

โดยที่

σ_{max} = Maximum Stress (Pa)

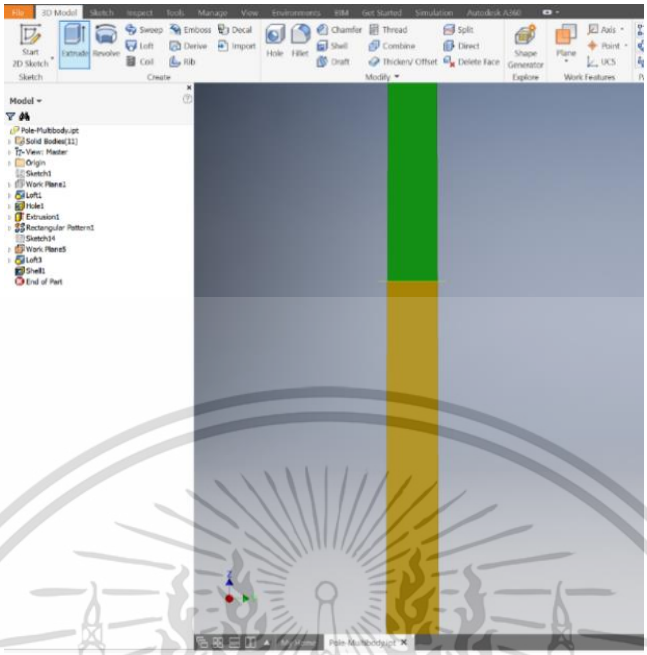
S_{limit} = Limit Stress ของวัสดุ (Pa)

F.S. = Factor of Safety

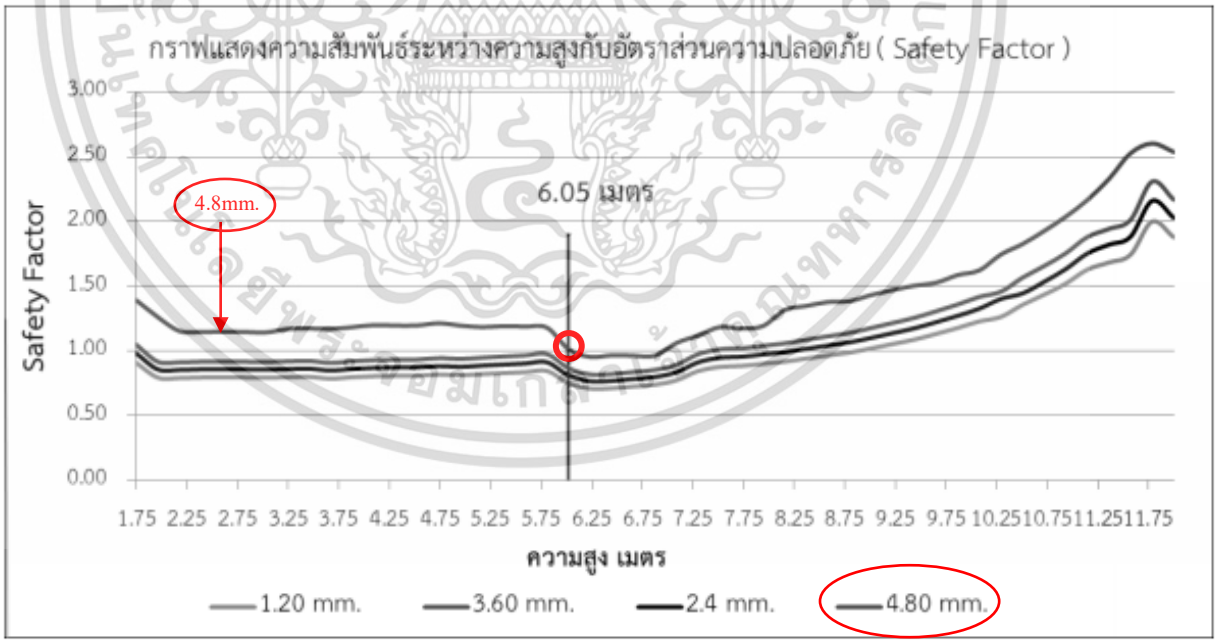
สรุปผลจากงานวิจัยชิ้นนี้ การเสริมกำลังเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5,000 กิโลกรัม-เมตร) จะต้องทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร จำนวน 10 แผ่น โดยทำการเว้นระยะจากฐานเสาด้านล่างขึ้นมา 50 เซนติเมตร เพื่อป้องกันแผ่นเหล็กเมื่อเทคอนกรีตหล่อเสาไฟฟ้าแล้วแผ่นเหล็กเกินออกมาจากเสา ผลที่ได้จากการเสริมแผ่นเหล็กจะเห็นได้จากกราฟว่า เสริมแผ่นเหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร จำนวน 10 แผ่นนี้จะทำให้เกิด SAFETY FACTOR = 1.0 เสาไฟฟ้าจะไม่เกิดการวิบัติ

2. งานวิจัยของนาย สุชาติ สุวิมลวรรณ, 2561 การศึกษาการเสริมกำลัง ด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้าเพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง ศึกษาพฤติกรรมของเสาไฟฟ้าขนาดความสูง 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่ทำการเสริมกำลังโดยการติดตั้งแผ่น CFRP ไว้รอบเสา และทำการการจำลองเสาไฟฟ้าในโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์และคำนวณความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาจุดวิบัติที่จะทำให้เสาไฟฟ้าหักลงและดึงเสาต้นข้างเคียงลงมาด้วย และทำการวิเคราะห์การเสริมกำลัง โดยวิธีการติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า หาขนาดแผ่น CFRP ที่เพียงพอในการหยุดการวิบัติแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงการพันรอบด้วยวัสดุคอมโพสิตชนิด คาร์บอน หรือ CFRP ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [4]



รูปที่ 3.7 แสดงผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้า 12.00ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่ทำการเสริมกำลังด้วย CFRP ความหนาต่างๆ ที่ระยะความสูง 6.05ม. [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวิเคราะห์จะทำโดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress, σ_{max}) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองเสาไฟฟ้าเทียบกับค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุ (S_{limit}) โดยจะเกิดการหักต่อเมื่อค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุที่รับได้ ดังสมการที่ (3-1) และสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนความปลอดภัย (SAFETY FACTOR, F.S.) ได้ดังสมการที่ (3-2) ดังนี้

$$\sigma max \geq Slimit \qquad (3\text{-}1)$$

และอัตราส่วนความปลอดภัย Factor of Safety คือ

$$F.S. = Slimit / \sigma max \qquad (3\text{-}2)$$

โดยมีเป้าหมายในการออกแบบคือ

$$Slimit / \sigma max > 1 \qquad (3\text{-}3)$$

โดยที่

σ_{max} = Maximum Stress (Pa)

S_{limit} = Limit Stress ของวัสดุ (Pa)

F.S. = Factor of Safety

สรุปผลจากงานวิจัยชิ้นนี้ การเสริมกำลังเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) จะต้องทำการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่มีความหนา 1.40 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร จำนวน 4 แผ่น ในแต่ละทิศทาง (1.2x4 = 4.80 มิลลิเมตร) โดยทำการเว้นระยะจากฐานเสาด้านล่างขึ้นมา 20 เซนติเมตร เพื่อสำหรับเป็นจุดที่ใช้วางเสาไฟฟ้าให้อยู่เหนือพื้นเพื่อทำการติดตั้งแผ่น CFRP ได้สะดวก ผลที่ได้จากการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จะเห็นได้จากกราฟว่า เสริมแผ่น CFRP หนา 4.80 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร จำนวน 4 แผ่นในแต่ละทิศทาง นี้จะทำให้เกิด SAFETY FACTOR = 1.0 เสาไฟฟ้าจะไม่เกิดการวิบัติ

3.2 วิธีการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบเสริมแผ่นเหล็กภายใน

ขั้นตอนการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในเสา

3.2.1 เตรียมแผ่นเหล็กเสริมกำลัง หลังจากทำการติดต่อขอซื้อเสาไฟฟ้าและ ขอยืมสถานที่กับทางการไฟฟ้านครหลวงแล้วนั้น ก็ทำการเตรียมแผ่นเหล็กเสริมกำลัง ขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร จำนวน 10 แผ่น นำมาเชื่อมติดกันและติดตั้งเข้าไปภายในเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 แสดงการเตรียมแผ่นเหล็กขนาด กว้าง 25 มม. หนา 4.50 มม. ยาว 6.00 ม. และทำการเชื่อมให้แผ่นเหล็กติดกันเป็นฉาก โดยใช้วิธีเชื่อมยาว 50 มม. เว้น 100 มม. ตลอดความยาว เพื่อให้แผ่นเหล็กยึดติดกันได้อย่างดี

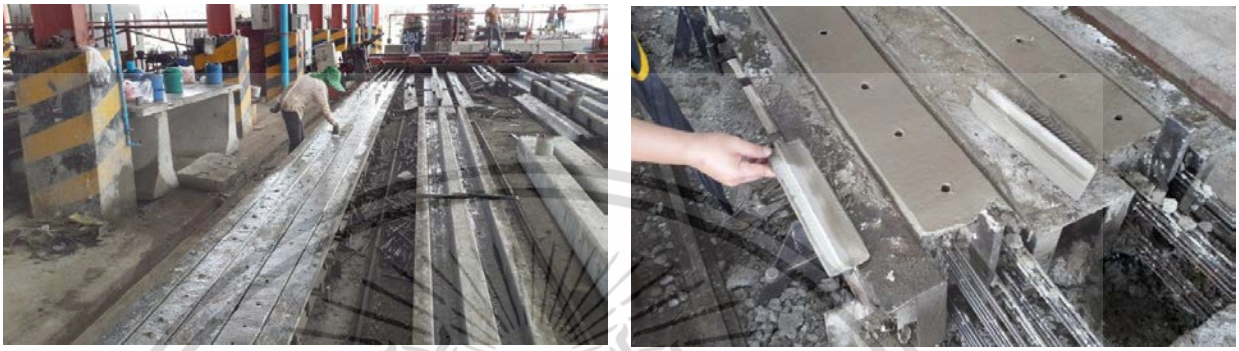
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.การติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังเข้าไปในเสาไฟฟ้า ทางการไฟฟ้านครหลวงทำการเตรียมลวดอัดแรงแบบอัดแรงก่อน (Pre-Stress) และเหล็กเสริมหลักของเสาไฟฟ้าตามแบบมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง และทำการติดตั้งแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ทำการเชื่อมติดกันแล้วเข้าไปในเหล็กเสริมเสาไฟฟ้าที่ได้เตรียมรอไว้โดยใช้ลวดมัดติดเข้าไปกับเหล็กยืนของเสา

รูปที่ 3.9 แสดงเหล็กเสริมหลักของเสาไฟฟ้าที่ทางการไฟฟ้านครหลวงจัดเตรียมไว้ให้ และแสดงการติดตั้งเหล็กเสริมกำลังเข้ากับเหล็กยืนเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.การเทคอนกรีตหล่อเสาไฟฟ้า ทางการไฟฟ้านครหลวงทำการเทคอนกรีต รวมถึงทำการเจาะรูบนเสาไฟฟ้าเพื่อสำหรับติดตั้งอุปกรณ์สายไฟฟ้า หลังจากนั้นทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 7 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบ



รูปที่ 3.10 แสดงการเทคอนกรีตหล่อเสาไฟฟ้า และเจาะรู

3.2.4.การบ่มคอนกรีต เมื่อบ่มจนครบกำหนดระยะเวลา 7 วัน ทำการแกะแบบหล่อเสาไฟฟ้า และทำการลำเลียงเสาไฟฟ้าไปยังบริเวณทดสอบ เป็นอันเสร็จสิ้นการเตรียมเสาไฟฟ้าเสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายใน

รูปที่ 3.11 แสดงการลำเลียงเสาคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า

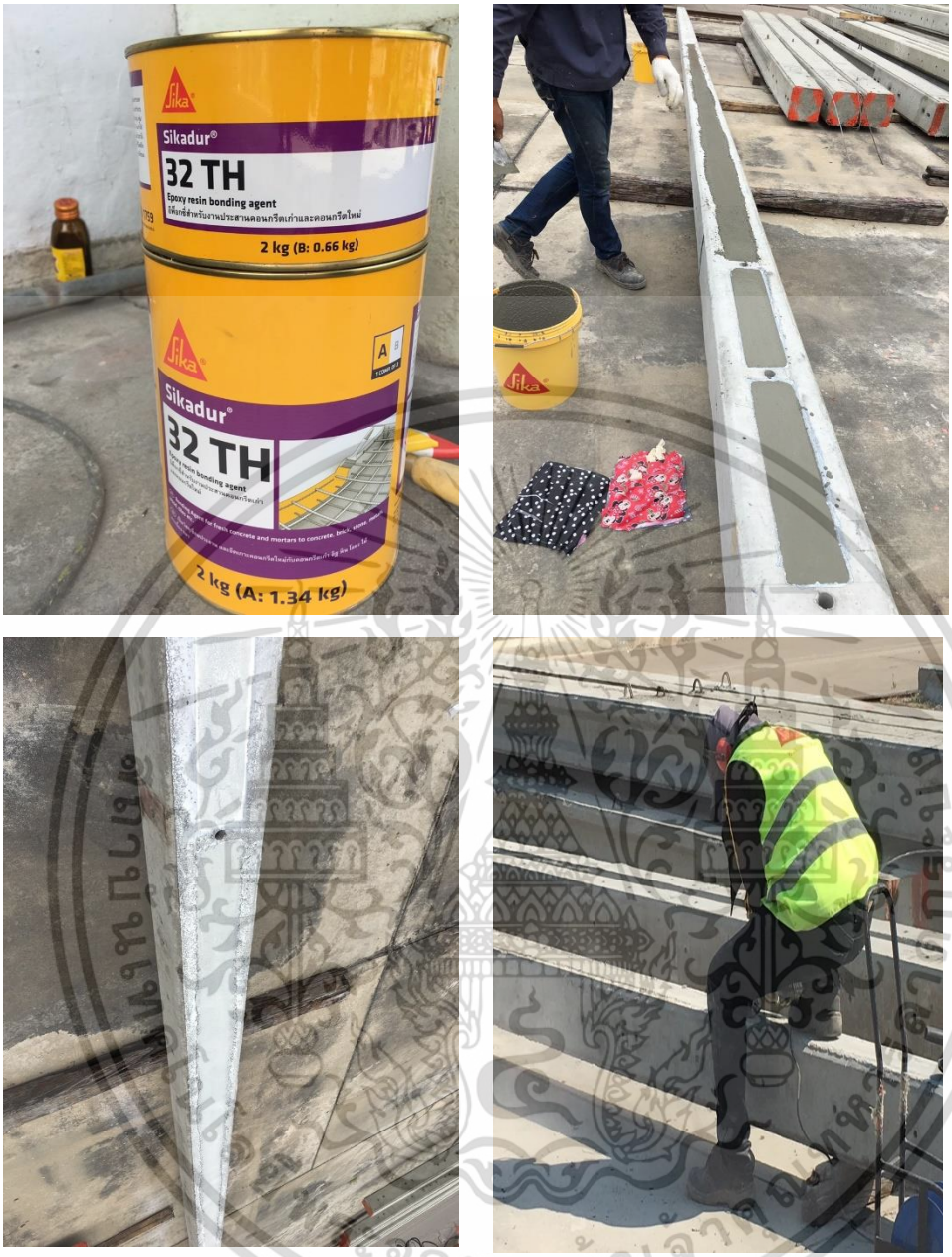
ขั้นตอนการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า

3.3.1. การเตรียมเสาไฟฟ้า หลังจากติดต่อขอซื้อเสาไฟฟ้ากับทางการไฟฟ้านครหลวง การหล่อเสาไฟฟ้าที่ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้ เสาไฟฟ้าจะหล่อตามปกติตามมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวงจนถึงการบ่มให้ครบ 7 วันจึงเริ่มทำการลำเลียงเสาไฟฟ้าออกจากโรงผลิตเพื่อติดตั้งแผ่น CFRP

3.3.2. การเตรียมเสาไฟฟ้าเพื่อติดตั้งแผ่น CFRP ทำการขัดตกแต่งผิวเสาไฟฟ้าให้เรียบ เพื่อเตรียมการเทปูนอุดร่องเสาไฟฟ้าและเพื่อติดตั้งแผ่น CFRP โดยการอุดร่องเสาไฟฟ้าใช้ผลิตภัณฑ์ของ Sika 214-11 ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 70 เมกกะปาสคาล ที่ 7 วัน (713 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร) และใช้เหล็กกลมขนาด 6 มิลลิเมตร ชั้นมาตรฐาน SR-24 เพื่อใช้เป็นวัสดุยึดเหนี่ยวระหว่างเสาไฟฟ้ากับวัสดุอุดร่อง และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเสากับวัสดุอุดร่องด้วย Body Agent 32TH เพื่อให้วัสดุ 2 ชนิดยึดกันได้อย่างดี โดยทำการอุดร่องเสาไฟฟ้าให้ครบ 4 ด้านสูง 6 เมตร

รูปที่ 3.12 แสดงการเตรียมผิวเสาไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์ของ Sika 214-11 ที่ใช้อุดร่อง

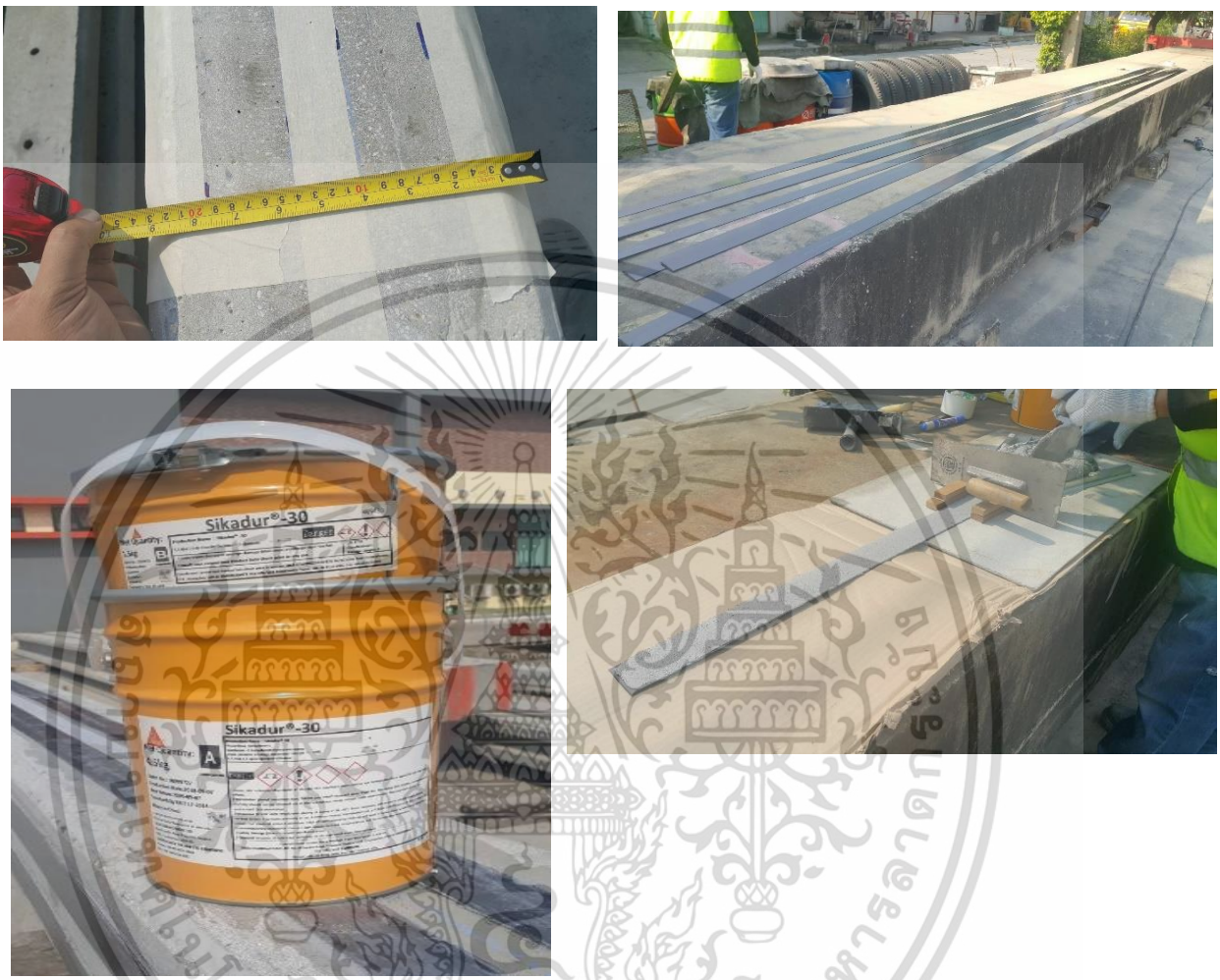
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงการเตรียมผิวเสาไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์ของ Sika Body Agent 32TH รูปแสดงการเทวัสดุอุดร่องเสาไฟฟ้าเรียบร้อย และทำการทิ้งให้แห้ง 1วัน แล้วทำการขัดตกแต่งผิวให้เรียบเพื่อเตรียมพร้อมในการติดแผ่น CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

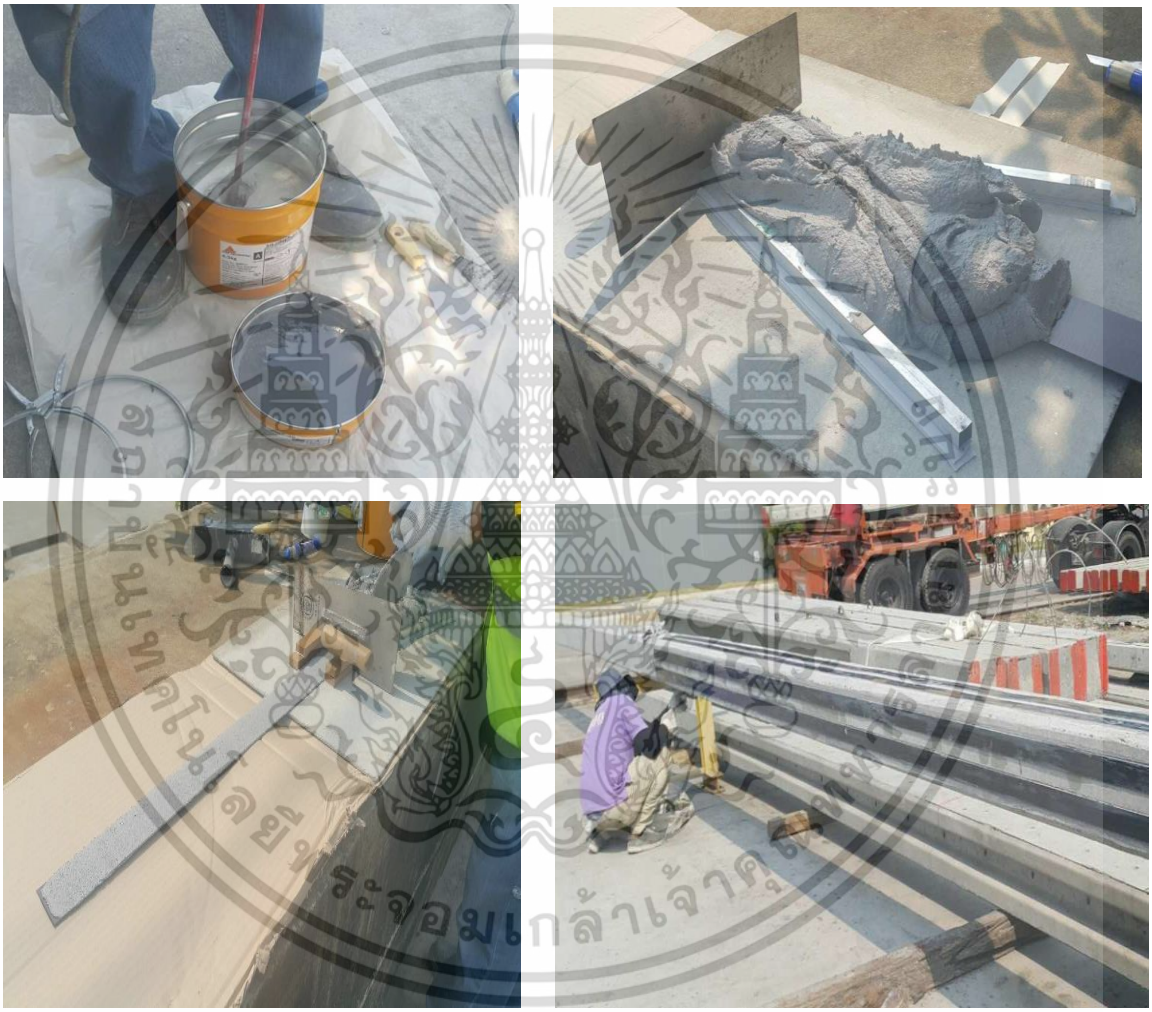
3.3.3. การเตรียมพื้นที่ติดแผ่น CFRP ทำการเตรียมพื้นที่ที่จะติดแผ่น CFRP บริเวณผิวเสาไฟฟ้าทั้ง 4 ด้าน เตรียมแผ่น CFRP กาวติดแผ่น CFRP Sikadur-30 อุปกรณ์ทากาวแผ่น CFRP



รูปที่ 3.14 แสดงการเตรียมตำแหน่งการติดแผ่น CFRP และเตรียมแผ่น CFRP กาวติดแผ่น CFRP Sikadur-30 และอุปกรณ์ทากาวที่แผ่น CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4. ผสมกาวและทากาวติดแผ่น CFRP ทำการผสมกาวติดแผ่น CFRP ให้เข้ากัน และทากาวบนแผ่น CFRP จากนั้นนำมาติดกับเสาไฟฟ้าและทำการตกแต่งให้เรียบร้อย โดยติดเว้นจากโคนเสาด้านล่างขึ้นมา 200 มิลลิเมตร เพื่อเว้นไว้สำหรับเป็นจุดรองรับเสาไฟฟ้า และติดแผ่น CFRP ให้สูงขึ้นมถึงระยะ 6.05 เมตร จากโคนเสาด้านล่างตามการวิเคราะห์จากโปรแกรม จากนั้นทำการพันรอบแผ่น CFRP ทั้งด้านบนสุดของแผ่น CFRP และด้านล่าง CFRP ที่สูงจากโคนเสาด้านล่างขึ้นมา 1.70 เมตร โดยแผ่น CFRPแบบผ้าโดยมีระยะการพันสูง 500 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 แสดงการผสมส่วนผสมของกาว Sikadur-30 และการทาลงบนแผ่น CFRP และการติดแผ่น CFRP ลงบนเสาไฟฟ้า และตกแต่งให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5. การติดตั้งแผ่น CFRP และการพันCFRP เมื่อติดตั้งแผ่น CFRP ลงบนเสาไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการพัน CFRP แบบผ้าที่ด้านบนและด้านล่างของเสาไฟฟ้าระยะการพันสูง 500 มิลลิเมตร หลังเสร็จการติดตั้งทำการพักไว้ 1-7 วัน เพื่อให้กาวแห้งแล้วนำมาทดสอบ

รูปที่ 3.16 แสดงการติดตั้งแผ่น CFRP เรียบร้อยและพัน CFRP แบบผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6. การบ่มแผ่นCFRP เมื่อครบกำหนดระยะเวลาบ่มคอนกรีตให้ได้กำลังตามที่ต้องการแล้ว ทำการแกะแบบและลำเลียงเสาไฟฟ้าไปยังบริเวณที่ทดสอบ

3.4 ขั้นตอนการทดสอบเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง

ขั้นตอนการทดสอบเสาไฟฟ้า ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง

3.4.1 การตรวจสอบเสาไฟฟ้าเบื้องต้น ตรวจสอบหน้าตัด ความยาว อัตราความโค้ง ว่าเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดพร้อมบันทึกรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการทดสอบ

รูปที่ 3.17 แสดงการตรวจสอบหน้าตัดเสา และการลำอียงออกไปลานทดสอบ

3.4.2 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ จัดอุปกรณ์สถานที่ทดสอบให้เหมาะสมกับขนาดเสาไฟฟ้า โดยชุดการทดสอบประกอบด้วย แท่นยึดแม่แรงและเสาไฟฟ้า ล้อเลื่อนรองรับเสาไฟฟ้า แม่แรงไฮโดรลิก ขนาด 20ตันและ 50ตัน ไดนาโมมิเตอร์สำหรับอ่านค่าแรงดึง

รูปที่ 3.18 แสดงลานทดสอบและการเตรียมอุปกรณ์ทดสอบเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3. การติดตั้งเสาไฟฟ้าเข้ากับแท่นทดสอบ นำเสาไฟฟ้าที่จะทดสอบมาวางบนชุดล้อเลื่อน โดยให้โคนเสาไฟฟ้าวางบนชุดล้อเลื่อนที่ติดตั้งกับแท่นทดสอบ

รูปที่ 3.19 แสดงการติดตั้งเสาไฟฟ้าเข้ากับแท่นทดสอบ

3.4.4. การวัดระยะติดตั้งเครื่องมือ วัดระยะจุดที่จะทำการทดสอบหาค่าโมเมนต์ดัด ที่กำหนดไว้ตามแบบมาตรฐาน แล้วนำกระบอกไฮโดรลิกวางไว้ตรงตำแหน่งที่จะทดสอบ จากโคนเสาด้านล่างขึ้นมา 1.75 เมตร ด้านบนเสาไฟฟ้าติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ เพื่อวัดแรงดึง จากตำแหน่งยอดเสาลงมา 400มิลลิเมตร

รูปที่ 3.20 แสดงการวัดและกำหนดตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งกระบอกไฮโดรลิกและตำแหน่งติดตั้งไดนาโมมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5. การเริ่มทดสอบ เปิดเครื่องไฮโดรลิกดันเสาไฟฟ้าที่ทดสอบอ่านค่าแรงดึงที่ไดนาโมมิเตอร์จนถึงแรงดึงที่คำนวณได้

รูปที่ 3.21 แสดงการดันเสาไฟฟ้าด้วยกระบอกไฮโดรลิก

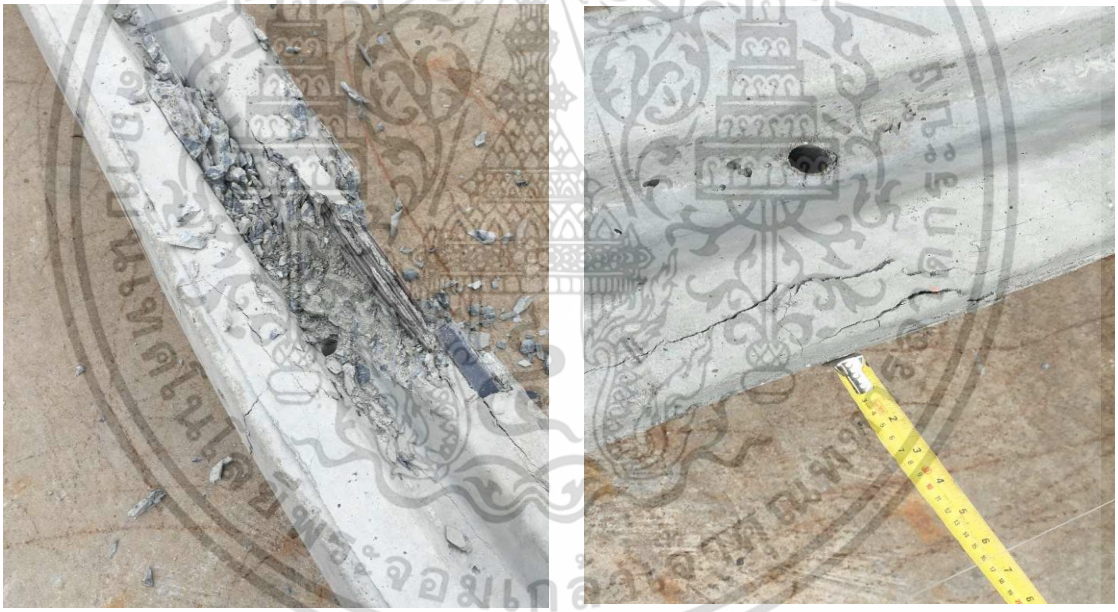
3.4.6. การตรวจสอบรอยร้าวบนเสาไฟฟ้า เสาไฟฟ้าตรวจสอบว่าเสาไฟฟ้าที่ทดสอบว่าปรากฏรอยร้าวหรือไม่ บันทึกผลการทดสอบลงในแบบฟอร์ม

รูปที่ 3.22 แสดงการตรวจหารอยร้าวที่เกิดขึ้นบนเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7 คลายแรงเครื่องไฮโดรลิกพร้อมทั้งตรวจสอบว่าเสาไฟฟ้ามีรอยร้าวเพิ่มหรือไม่

รูปที่ 3.23 แสดงการคลายกระบอกไฮโดรลิกออก และตรวจหารอยร้าว



รูปที่ 3.24 แสดงการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายในจนเกิดการวิบัติ และรูปแสดงการวัดค่าความโก่งตัวของเสาไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.25 แสดงการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสา จนเกิดการวิบัติ และรูปแสดงการวัดขนาดของแรงขณะเมื่อเสาเกิดการวิบัติ

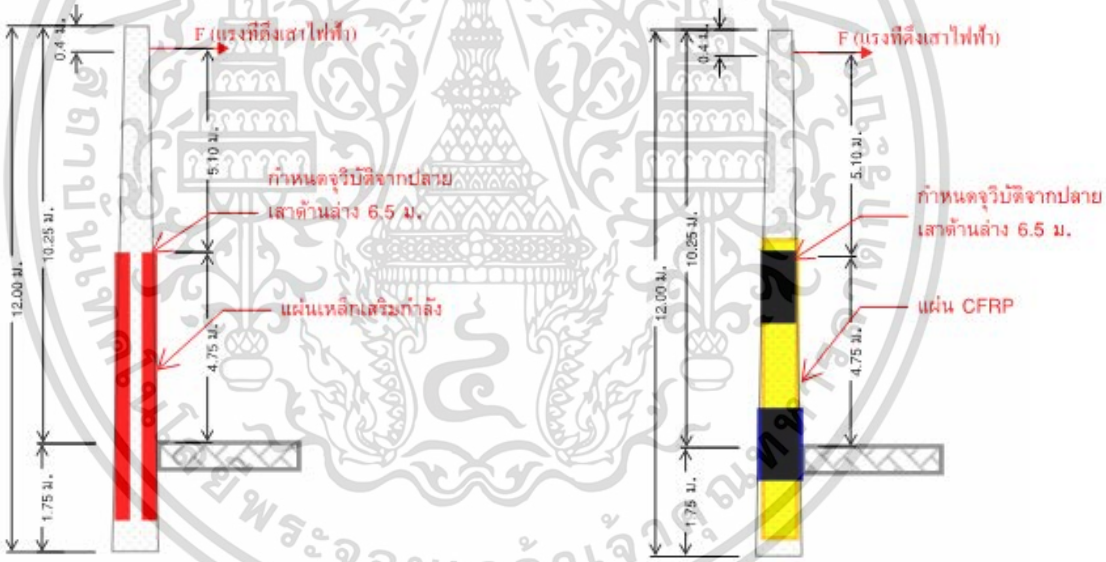
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์จะใช้ค่าจากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSYS ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบและยืนยันสมมติฐานเกี่ยวกับการเสริมกำลังทั้งแบบแผ่นเหล็กเสริมภายใน และแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า

4.1 การทดสอบเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายใน

การทดสอบเสาไฟฟ้าที่ไม่ได้เสริมกำลังจะสามารถรับแรงที่ใช้ทดสอบได้อยู่ที่500 กิโลกรัม ทำให้เกิด แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 5,000 กิโลกรัม-เมตร ทำให้เกิดการแตกร้าว ทางการไฟฟ้านครหลวงจะถือว่าเสาไฟฟ้าไม่สามารถรับแรงได้อีก และทำการทดสอบเสาไฟฟ้าเสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในเสา



รูปที่ 4.1 แสดงการจำลองเสริมกำลังเสาไฟฟ้า ตำแหน่งยึดเสา ตำแหน่งแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การใส่แรงให้เสาไฟฟ้า การโก่งตัว แรงดัดที่โคนเสาของเสาไฟฟ้า 12.00ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)

ใส่แรงครั้งที่	แรง (กก.)	การโก่งตัว (ซม.)	แรงดัดที่โคนเสา (กก.-ม.)
1	520	12 (Crack)	520x9.85 = 5,122

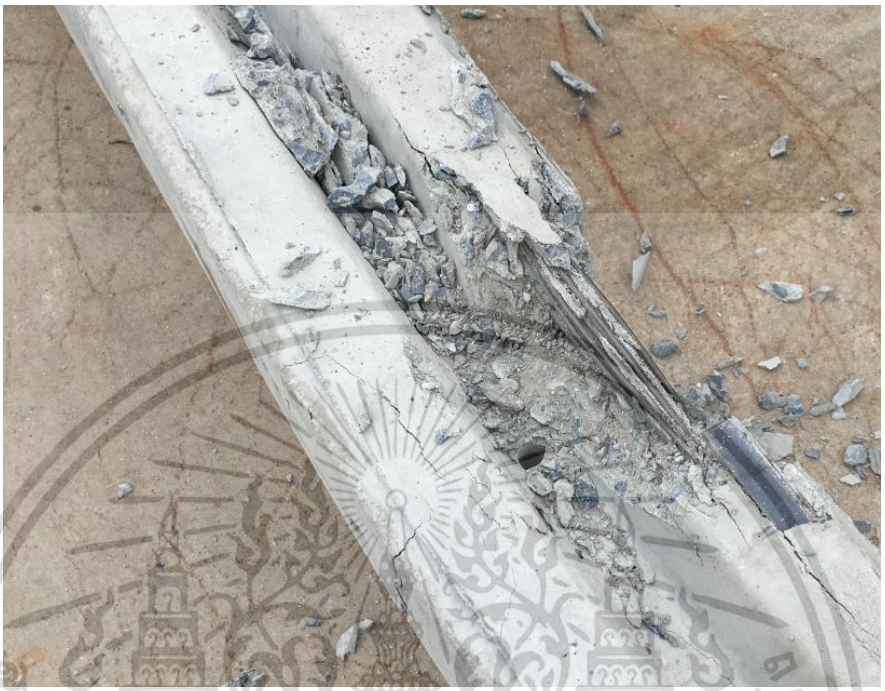
ตารางที่ 4.2 การใส่แรงให้เสาไฟฟ้า การโก่งตัว แรงดัดที่โคนเสา และแรงดัดที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมกำลังของเสาไฟฟ้า 12.00ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)

ใส่แรงครั้งที่	แรง (กก.)	การโก่งตัว (ซม.)	แรงดัดที่โคนเสา (กก.-ม.)	แรงดัดที่ปลายแผ่นเหล็ก (กก.-ม.)
1	500	8.5	500x9.85 = 4,925	500x5.1 = 2,550
2	700	16 (Crack)	700x9.85 = 6,895	700x5.1 = 3,570
3	740	Fail	740x9.85 = 7,290	740x5.1 = 3,774

การทดสอบเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 ม.(กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่ไม่มีการเสริมกำลัง จะทำการให้แรงดันที่ปลายเสา 1 ครั้ง จนเสาเกิดรอยร้าววัดค่าแรงได้ที่ 520 กิโลกรัม นำมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดที่โคนเสาได้ 5,122 กิโลกรัม-เมตร ส่วนการทดสอบเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายใน ครั้งที่ 1 ใส่แรง 500 กิโลกรัม เสาจะโก่งตัวที่ 8.5 เซนติเมตร แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 4,925 กิโลกรัม-เมตร แรงดัดที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมกำลัง 2,550 กิโลกรัม-เมตร ครั้งที่ 2 ใส่แรงถึง 700 กิโลกรัม เสาไฟฟ้าจะเกิดการโก่งตัว 14 เซนติเมตรและเกิดรอยร้าวเริ่มต้น แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 6,895 กิโลกรัม-เมตร แรงดัดที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมกำลัง 2,550 กิโลกรัม-เมตร ครั้งที่ 3 ใส่แรงถึง 740 กิโลกรัม แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 7,290 กิโลกรัม-เมตร แรงดัดที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมกำลัง 3,774 กิโลกรัม-เมตร ทำให้เสาไฟฟ้าเกิดการวิบัติซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเสาไฟฟ้าที่ไม่ได้เสริมกำลังแล้ว เสาที่เสริมกำลังสามารถรับแรงได้มากขึ้นอีกประมาณ 180 กิโลกรัม และทำให้เกิดการโก่งตัวที่น้อยกว่า การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิบัติของเสาไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเหนือแผ่นเหล็กเสริมกำลังซึ่งตรงกับสมมติฐานที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4.2 แสดงการเกิดการวิบัติของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใน

รูปที่ 4.3 แสดงการเกิดรอยร้าวเบื้องต้นของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสา

ทำการทดสอบเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่เสริมกำลังแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสา

ตารางที่ 4.3 การใส่แรงให้เสาไฟฟ้า การโก่งตัว แรงดัดที่โคนเสา และแรงดัดที่ปลายแผ่นCFRPเสริมกำลังของเสาไฟฟ้า 12.00 ม. (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร)

ใส่แรงครั้งที่	แรง (กก.)	การโก่งตัว (ซม.)	แรงดัดที่โคนเสา (กก.-ม.)	แรงดัดที่ปลายแผ่น CFRP (กก.-ม.)
1	500	5	500x9.85 = 4,925	500x5.1 = 2,550
2	800	15 (Crack)	800x9.85 = 7,880	800x5.1 = 4,080
3	1,350	Fail	1,350x9.85= 13,297.50	1,350x5.1 = 6,885

ผลการทดสอบของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่พันด้วยวัสดุ CFRP พบว่าครั้งที่ 1 ใส่แรงที่ 500 กิโลกรัม เสาจะโก่งตัวที่ 5 เซนติเมตร แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 4,925 กิโลกรัม-เมตร แรงดัดที่ปลายแผ่น CFRP อยู่ที่ 2,550 กิโลกรัม-เมตร ครั้งที่ 2 ใส่แรง 800 กิโลกรัม เสาโก่งตัว 15 เซนติเมตร และเกิดการร้าวเริ่มต้น แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 7,880 กิโลกรัม-เมตร แรงดัดที่ปลายแผ่น CFRP อยู่ที่ 4,080 กิโลกรัม-เมตร ครั้งที่ 3 ใส่แรง 1,350 กิโลกรัม เสาเกิดการวิบัติ แรงดัดที่โคนเสาอยู่ที่ 13,297.50 กิโลกรัม-เมตร แรงดัดที่ปลายแผ่น CFRP อยู่ที่ 6,885 กิโลกรัม-เมตร การโก่งตัวของเสาเสริมกำลังด้วย CFRP จะเกิดน้อยสุด และการวิบัติของเสาไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นที่จุดเหนือบริเวณการเสริมแผ่น CFRP ตรงกับสมมติฐานที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

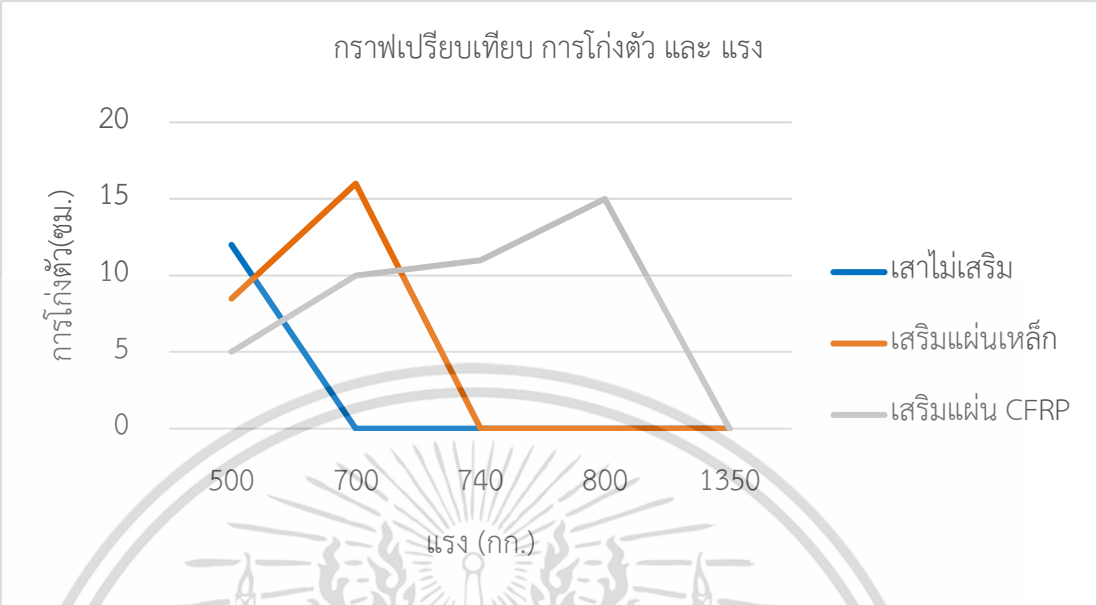
รูปที่ 4.4 แสดงการเกิดรอยร้าวเริ่มต้นของเสาไฟที่เสริมกำลังแบบติดแผ่น CFRP รอบเสา

รูปที่ 4.5 แสดงการเกิดการวิบัติของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP

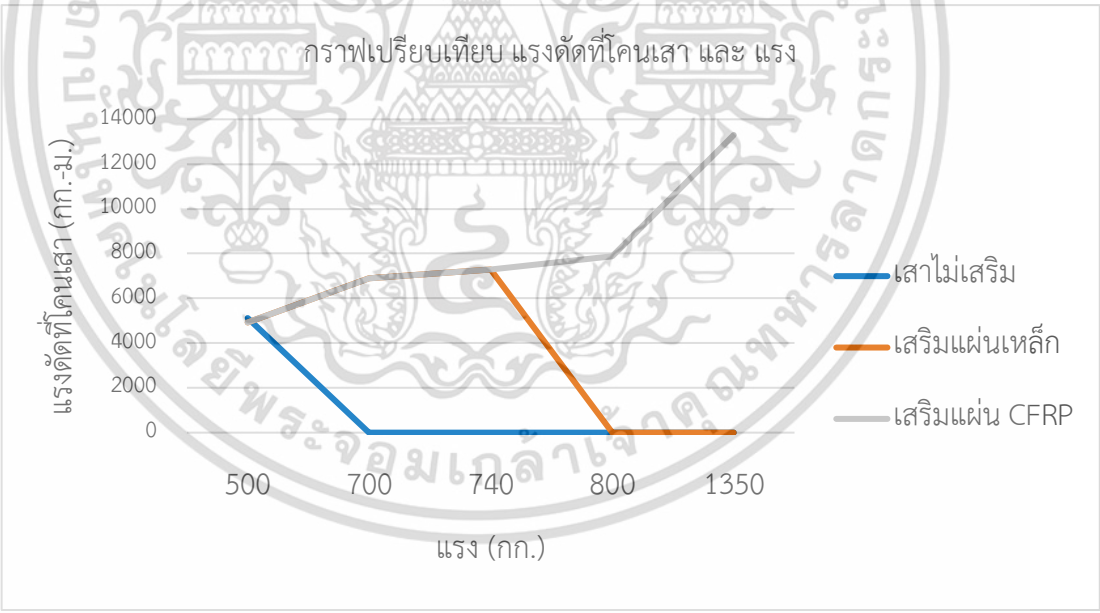
ผลวิเคราะห์ผลการทดสอบระหว่างเสาไฟฟ้า 3 ชนิด คือ 1.ไม่มีการเสริมกำลัง 2.เสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายใน 3.เสริมกำลังแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัว และ แรง ของเสาไฟฟ้า 3 ชนิด

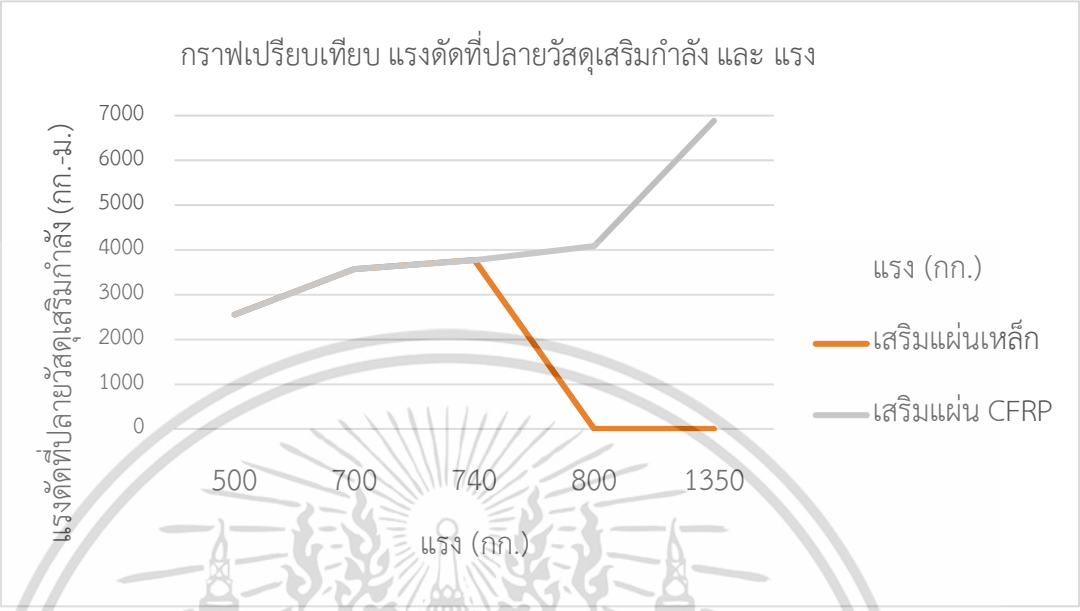


ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดัดที่โคนเสา และ แรง ของเสาไฟฟ้า 3 ชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแรงดัดที่ปลายวัสดุเสริมกำลัง และแรงของเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังทั้ง 2 ชนิด



4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลัง

จากผลการเปรียบเทียบ แรง การโก่งตัว และ แรงดัด ของเสาไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด

1. จากตารางที่ 4.4 เสาไฟฟ้าที่ไม่มีการเสริมกำลังจะเกิดการโก่งตัวมากที่สุด ส่วนเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายใน การโก่งตัวจะดีขึ้นประมาณ 41% เสาไฟฟ้าที่ติดตั้งแผ่น CFRP การโก่งตัวดีขึ้นประมาณ 71% สรุปได้ว่าเสาที่เสริมกำลังทำให้เสาไฟฟ้ามีความเหนียวมากขึ้น
2. จากตารางที่ 4.5 เสาไฟฟ้าที่ไม่มีการเสริมกำลังจะสามารถรับแรงดัดที่โคนเสาได้ถึงประมาณ 5,000 กิโลกรัม-เมตร เสาที่เสริมกำลังแบบแผ่นเหล็กภายในรับแรงดัดได้มากขึ้น 38% ถึงจะเริ่มมีรอยร้าวเริ่มต้น เสาที่เสริมกำลังแบบติดตั้งแผ่น CFRP สามารถรับแรงดัดที่โคนเสาได้มากขึ้น 57% สรุปได้ว่าเสาที่เสริมกำลังจะสามารถย้ายจุดวิบัติให้สูงขึ้นตามที่วิเคราะห์ไว้จากงานวิจัยก่อนหน้า
3. จากตารางที่ 4.6 เสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลังทั้ง 2 ชนิดสามารถรับแรงดัดและจะเกิดการวิบัติที่บริเวณเหนือการเสริมกำลัง จะสามารถทำให้หยุดการวิบัติแบบต่อเนื่องได้ เนื่องจากน้ำหนักของเสาไฟฟ้าที่หักโค่นลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาไฟฟ้าแบบเสริมกำลังทั้ง 2 แบบ ในเชิงวิศวกรรม

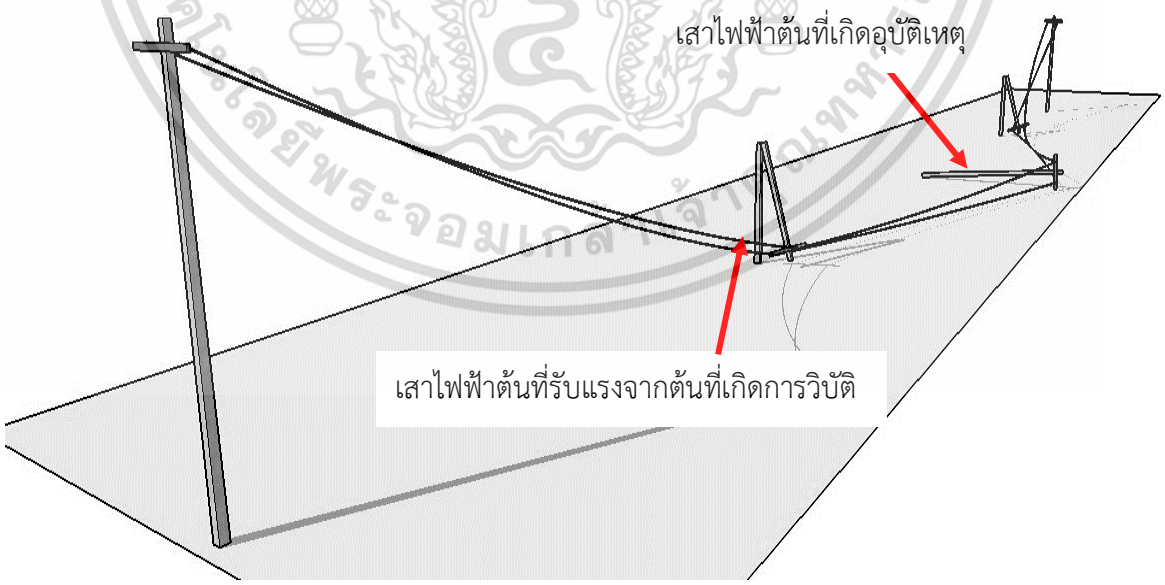
จากการวิบัติของเสาไฟฟ้าเมื่อเสาไฟฟ้าประสบอุบัติเหตุ เสาไฟฟ้าหักโค่นโดยมีน้ำหนักจากตัวเสาไฟฟ้าเองที่เป็นแรงดึงผ่านสายไฟฟ้าถ่ายไปยังเสาไฟฟ้าข้างเคียงทั้ง 2 ด้าน น้ำหนักเสาไฟฟ้าขนาด 12.00 เมตร มีน้ำหนัก 1,280 กิโลกรัม ถ่ายไปยังต้นข้างเคียง 2 ด้านจะเกิดแรงดึงที่ปลายเสาไฟฟ้าข้างเคียง ต้นละ 1,280/2 = 640 กิโลกรัม ความสูงจากฐานรองรับถึงจุดพาดสายไฟ 9.85 เมตร เกิดแรงดัดที่โคนเสา 640x9.85 = 6,304 กิโลกรัม-เมตร

ถ้าเป็นเสาไฟฟ้าที่ไม่ได้เสริมกำลังจะสามารถรับแรงดัดที่โคนเสาได้ 5,122 กิโลกรัม-เมตร ในกรณีนี้เสาไฟฟ้าจะเกิดการวิบัติต่อเนื่อง

แต่ถ้าเป็นเสาไฟฟ้าที่ทำการเสริมกำลัง แรงดัดที่โคนเสา ที่เสาไฟฟ้าสามารถรับได้น้อยที่สุดเท่ากับ 7,290 กิโลกรัม-เมตร กรณีนี้เสาไม่เกิดการวิบัติที่โคนเสา แต่จุดวิบัติของเสาไฟฟ้าจะถูกเลื่อนไปอยู่ด้านบนวัสดุเสริมกำลัง

เสาไฟฟ้าเหนือวัสดุเสริมกำลังจะมีความยาวอยู่ที่ 5.50 เมตร รับน้ำหนักจากต้นที่เกิดการวิบัติ 640 กิโลกรัม ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่ปลายวัสดุเสริมกำลัง 640x5.1= 3,264 กิโลกรัม-เมตร ซึ่งจากการทดสอบปลายวัสดุเสริมกำลังสามารถรับแรงดัดได้ 3,570 กิโลกรัม-เมตร มากกว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น ดังนั้นเสาไฟฟ้าต้นถัดมาสามารถหยุดการวิบัติแบบต่อเนื่องได้

ในกรณีเกิดเสาไฟฟ้าหักพร้อมกัน 2 ต้น น้ำหนักเสาไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังต้นถัดไป 1,280 กิโลกรัม เกิดโมเมนต์ดัดที่ปลายวัสดุเสริมกำลัง 1,280x5.1 = 6,528 กิโลกรัมเมตร และเกิดการวิบัติก่อนที่จะส่งถ่ายโมเมนต์ดัดไปยังโคนเสา และน้ำหนักเสาที่วิบัติบนปลายวัสดุเสริมกำลัง 640 กิโลกรัม จะถูกส่งผ่านไปต้นถัดไปและจะไม่เกิดการวิบัติแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.6 แสดงการหยุดการวิบัติของเสาไฟฟ้า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาไฟฟ้าแบบเสริมกำลังทั้ง 2 แบบ ในเชิงเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ประเมินค่าใช้จ่ายของการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) โดยที่ไม่คิดราคาเสาไฟฟ้า

4.5.1 การเสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในเสาไฟฟ้า จำนวนแผ่นเหล็กที่ใช้ 10 เส้น ราคา 47 บาท/กิโลกรัม (ค่าวัสดุและค่าติดตั้ง) แผ่นเหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 4.5 มิลลิเมตร ยาว 6.00 เมตร มีน้ำหนัก 5.3 กิโลกรัม/เมตร ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังต่อต้น 47x10x5.3 = 2,500 บาท/ต้น

4.5.2 การเสริมกำลังแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า จะมีราคาดังนี้

ปูนเกราต์ 410 บาท/ถุง 6 ถุง/ต้น = 410x6 = 2,460 บาท

Bonding agent 850 บาท/ชุด 2 ชุด/ต้น = 850x2 = 1,700 บาท

ราคาแผ่น CFRP =5,000 บาท/เส้น 8เส้น/ต้น = 5,000x8 = 40,000 บาท

รวมค่าใช้จ่ายในการเสริมกำลังต่อต้น 44,160 บาท/ต้น

จะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังแบบใช้แผ่นเหล็กเสริมด้านใน จะมีราคาถูกกว่าเสริมกำลังแบบแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ CFRP และยังสามารถหยุดการหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าที่ทำการปักใช้งานแล้ว เสาต้นที่ปักใช้งานแล้วจะเสริมกำลังได้แค่วิธีติดแผ่น CFRP ไว้รอบเสาเท่านั้น แต่การติดตั้งนั้นจะต้องมีราคาของการค้ำยันและการขุดดินเพิ่มเข้ามาอีก ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น หรืออาจจะต้องทำการป้องกันอย่างอื่นทดแทนการเสริมกำลัง เช่น ทำรั้วกันรถชน หรือ ทำให้เสาสามารถหักเป็นท่อนๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิเคราะห์

5.1 สรุปผล

จากผลการทดสอบเสาไฟฟ้าคอนกรีตในระบบ 12.00 เมตร (กำลังรับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร) ที่เสริมกำลังด้วยการเสริมแผ่นเหล็กภายใน และเสริมกำลังแบบ CFRP รอบเสา พบว่าผลที่ได้จากการเสริมกำลังทั้ง 2 ชนิดนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้ตรงกัน คือสามารถเลื่อนจุดวิบัติจากที่โคนเสาไฟฟ้าไปยังบริเวณเหนือวัสดุเสริมกำลังได้ ทำให้ผลกระทบจากน้ำหนักเสาไฟฟ้าส่วนที่วิบัติไม่ส่งผลถึงต้นถัดไป และสามารถหยุดการวิบัติแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าได้

ในส่วนความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อเสริมกำลังนั้น การเสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในเสาไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าการเสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP มาก วัสดุหาง่ายในท้องตลาด ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้ง แต่จะต้องติดตั้งกับเสาไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ทำการหล่อขึ้นรูป

การเสริมกำลังแบบติดแผ่น CFRP นั้นจะสามารถติดตั้งได้ทั้งเสาไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ปักใช้งาน และเสาไฟฟ้าที่ได้ปักใช้งานแล้ว แต่จะต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญในการติดตั้งแผ่น CFRP เท่านั้น เพราะมีรายละเอียดในการติดตั้งสูง และในกรณีที่เสริมกำลังเสาไฟฟ้าที่ปักใช้งานแล้ว จำเป็นจะต้องมีการขุดดินและการค้ำยันเสาไฟฟ้าในระหว่างช่วงการเสริมกำลัง ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น

จากผลสรุปที่ได้มา ได้ทำการส่งไปให้กับการไฟฟ้านครหลวงเพื่อหาข้อสรุปและแนวทางการเสริมกำลังในขั้นตอนต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ทั้งการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในและการเสริมกำลังแบบติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า ทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถช่วยหยุดการวิบัติแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าได้ แต่มีข้อกำหนดต่างๆอีกมากมายดังข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 สำหรับเสาไฟฟ้าที่ทำการปักลงดินแล้ว การเสริมกำลังจะมีข้อจำกัดโดยวิธีการเสริมกำลังแบบเสริมแผ่นเหล็กภายในไม่อาจทำได้ แต่สามารถทำได้โดยการติดตั้งแผ่น CFRP รอบเสาไฟฟ้า แต่การอุดร่องเสาไฟฟ้าเพื่อเตรียมติดตั้งแผ่น CFRP ทำได้ยากเนื่องจากพฤติกรรมของคอนกรีตจะไหลลงสู่ที่ต่ำทำให้การอุดร่องทำได้ยาก และต้องทำการขุดรอบเสาไฟฟ้าและค้ำยันเสาไฟฟ้าเพื่อติดแผ่น CFRP ลงไปลึกกว่าระดับดิน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ศึกษาการป้องกันเสาไฟฟ้าที่ทำการปักลงดินและใช้งานแล้ว โดยวิธีอื่น เช่น การติดตั้งโครงเหล็กป้องกันอุบัติเหตุ หรือ ติดตั้งเสาเหล็กรอยเสาไฟฟ้าป้องกันอุบัติเหตุ

5.2.3 ทำการทดสอบเสาไฟฟ้าขนาดอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.4 การศึกษาหาวิธีเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้าด้วยวัสดุอื่นๆ เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

การไฟฟ้านครหลวง. ฝ่ายธุรกิจขนส่งและผลิตภัณฑ์. 2560. **“คำแนะนำแบบมาตรฐานเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (GW), 12.00 เมตร (5T-m.) และ 12.35 เมตร (6T-m) ของ กฟน.**

การไฟฟ้านครหลวง. กองมาตรฐานการติดตั้งสายใน/สายนอกและความปลอดภัย. 2547. **คู่มือการออกแบบและประมาณราคา**. ม.ป.ท. : ม.ป.ป.

กระทรวงมหาดไทย. กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2551. **“มยผ. 1508-51. มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย.”** กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. กรุงเทพฯ :

นันทิกา นามวิจิตร. 2557. **“การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมโดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก**.” นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ณัฏฐา สกานุพงษ์ และณัฐธยาน์ ก้อยชูสกุล และ ประภาทิพย์ โชคสกุลวงษ์. 2557. **“รูปแบบรอยร้าวและกำลังของคานคอนกรีต.”** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชูชัย สุจิวรกุล และวทัญญู ชุติคามี. 2548. **“ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติในการรับแรงดัดและแรงอัดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ.”** กรุงเทพฯ : เอกสารการประชุมวิชาการโยธา แห่งชาติครั้งที่ 11

สุชาติ สุวิมลวรรณ. **“การศึกษาการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.

ธนิสร สถาพร. **“การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่ยของเสาไฟฟ้า.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562.

ณัฐพงศ์ จันทานานนท์. **“การศึกษาเสาไฟฟ้าโดยเพิ่มแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายใน เพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้ากำลังต่ำ.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562.

ACI COMMITTEE 318. 2004. **“BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE (ACI318-05) AND COMMENTARY (ACI318R-05).”** USA.:

James F. Wilson. **“...Failure of Flawed Utility Poles in wind Gusts.” Journal of Mechanical Design**, ฉบับที่ 132, พฤศจิกายน 2553, หน้า 111006-1. USA.:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[1] ธนิสร สถาพร. 2562. **“การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า.”** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] การไฟฟ้านครหลวง. 2560. **“คำแนะนำแบบมาตรฐานเสาไฟฟ้า 12.00 เมตร (GW), 12.00 เมตร (5T-m.) และ 12.35 เมตร (6T-m) ของ กฟน.”** กรุงเทพฯ :

[3] ณัฐพงศ์ จันทานานนท์. 2562. **“การศึกษาเสาไฟฟ้าโดยเพิ่มแผ่นเหล็กเสริมกำลังภายใน เพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้ากำลังต่ำ.”** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] สุชาติ สุวิมลวรรณ. 2561. **“การศึกษาการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง.”** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายมนตรี มั่นคงกิจ
วัน เดือน ปีเกิด	21 ตุลาคม 2529 กรุงเทพฯ
ที่อยู่	51 ถ.จักรพงษ์ แขวงชนะสงคราม เขตพระนคร กรุงเทพฯ 10200

ประวัติการศึกษา	2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก และ เหล็กรูปพรรณ 2.) การเขียนแบบ 2D 3.) การใช้โปรแกรมออกแบบโครงสร้างทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2562	นำเสนองานวิจัยเรื่อง “การทดสอบเสาไฟฟ้ากำลังต่ำที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภาย และเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP” งานประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 14 ณ โรงแรม วรวนา หัวหิน วันที่ 6-8 มีนาคม 2562
พ.ศ.2560-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรโครงสร้าง บริษัท ออเรคอน คอนซัลติ้ง (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ.2554-2560	ตำแหน่งวิศวกรโครงสร้าง บริษัท ไทยทาเคนาคา สากลก่อสร้าง จำกัด
พ.ศ.2553-2554	ตำแหน่งวิศวกรโครงสร้าง บริษัท แอดว้านซีวิล กรุ๊ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้