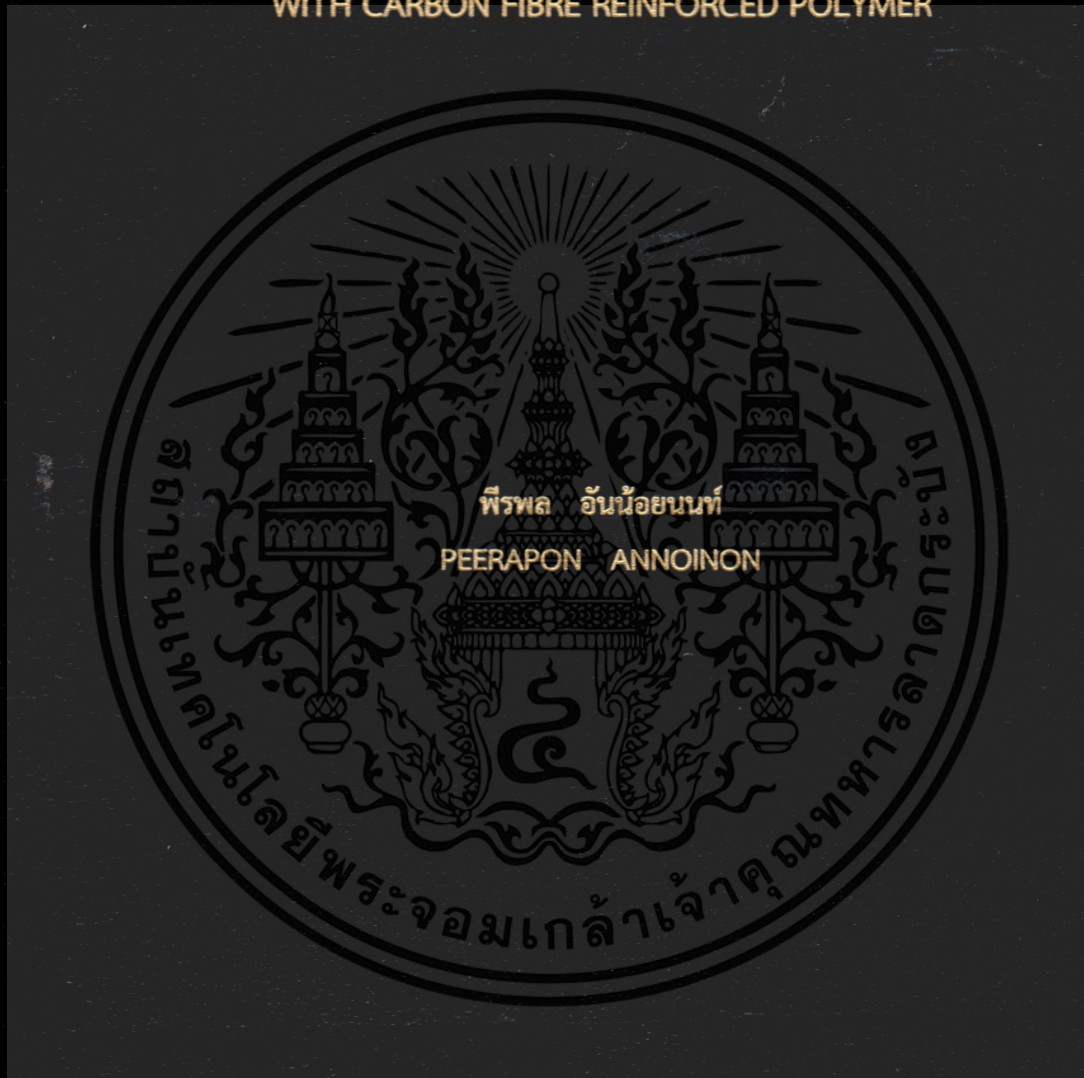


การศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าด้วยวัสดุ
คอมโพสิตเสริมเส้นใย

A STUDY ON STRENGTHENING MODEL OF ELECTRICAL POLES
WITH CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-093-119

การศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าด้วยวัสดุ
คอมโพสิตเสริมเส้นใย

A STUDY ON STRENGTHENING MODEL OF ELECTRICAL POLES
WITH CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-093-119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON STRENGTHENING MODEL OF ELECTRICAL POLES
WITH CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER



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

2018

KMITL-2018-EN-M-093-119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย
Thesis Title The Study on Strengthening Model of Electrical Poles with Carbon Fibre Reinforced Polymer
นักศึกษา นายพีรพล อ้นน้อยนนท์
รหัสประจำตัว 56601226
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-093-119

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	
รศ.สุวัฒน์ ถิระเศรษฐ์	
รศ.ดร.คมสัน มาลีสี	
ดร.อภิญญาวิทย์ สุจริตพงศ์	
ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อผู้ที่เกี่ยวข้องกับการนำใบนี้ไปใช้
ณ วันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย
นักศึกษา	นายพีรพล อ้นน้อยนนท์
รหัสประจำตัว	56601226
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

บทคัดย่อ

จากรายงานสถิติอุบัติเหตุในปัจจุบัน หลายครั้งพบว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) เกิดการโค่นล้มแบบต่อเนื่องจำนวนหลายต้นจากอุบัติเหตุต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีตนั้นมีจุดด้อยคือเป็นวัสดุแข็งเปราะ มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำและทนทานต่อแรงกระทำที่จำกัด น้ำหนักของเสาไฟฟ้าเหนือบริเวณที่หักโค่นจะทำให้เกิดแรงดึงกระทำในเสาไฟฟ้าในต้นข้างเคียง ทำให้เกิดการโค่นล้มแบบต่อเนื่อง ดังนั้นการลดน้ำหนักของเสาไฟฟ้าเหนือบริเวณที่หักโค่น จะทำให้แรงดึงกระทำที่เกิดขึ้นในเสาไฟฟ้าต้นข้างเคียงลดลง และสามารถลดการหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าต้นข้างเคียงได้ การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นของเสาไฟฟ้าจากตำแหน่งใกล้ฐานเสาให้สูงขึ้นไปเพื่อทำให้น้ำหนักของเสาไฟฟ้าเหนือบริเวณที่หักโค่นลดลง โดยการนำวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์(CFRP) ในการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงในตำแหน่งของแรงเค้นสูงสุด โดยการวิเคราะห์จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาความหนาของการพัน CFRP ที่จะสามารถรับแรงเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ และบังคับให้เสาไฟฟ้าหักในตำแหน่งที่ต้องการ โดยผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินกำลังรับแรงดึงในวัสดุ CFRP ในขณะที่ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) ที่วิเคราะห์ในด้านกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งการหักโค่นของเสาไฟฟ้า มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 1 ที่ตำแหน่งใกล้ฐานและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยลดต่ำกว่า 1 เหนือระยะการพันวัสดุ CFRP ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งการหักโค่นของเสาไฟฟ้าที่เคลื่อนตัวอยู่ในตำแหน่งที่คาดการณ์ โดยผลการวิจัยนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการป้องกันเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ทำการปักเสापาดสายแล้ว เพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่หักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าข้างเคียงจากแรงกระทำดังกล่าวต่อไป

Thesis	A study on strengthening model of electrical poles with Carbon Fibre Reinforced Polymer
Student	Mr.Peerapon Annoinon
Student ID.	56601226
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Arthit Petchsasithon

ABSTRACT

Based on the statistically accidental reports, many cases of prestressed concrete electric poles which are manufactured following the Metropolitan Electricity Authority (MEA) standards were found to be collapsed continuously from the several accidents. This is due to the poor properties of concrete as a brittle material and low tensile strength which limit the impact resistance. The weight of concrete pole beyond the failure will cause the tensile force to the adjacent poles. To minimize the weight of these failure poles were therefore considered to decrease these impact forces to the adjacent poles and could prevent the consecutive damage. This research was emphasized on the reposition of failure zone from the pole base to the position beyond by the application of carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) to strengthen the location of maximum stress was expected. The finite element analysis was introduced to analyze the amount numbers of wrapping of CFRP in order to control the desired point of failure. The result of stress analysis showed the occurred stress value within the tensile strength of CFRP material while the result of safety factor which was analyze at the compression zones of concrete showed the value higher than 1 at the ground level as expected and lower than 1 beyond the position of CFRP wrapping. The study results will be introduced as a guideline to prevent the consecutive damage for the existing prestressed concrete electric poles respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะในการแก้ปัญหา ให้ข้อมูลต่างๆ ที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จ และลุล่วงด้วยดี ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority) ที่ให้ข้อมูลสนับสนุนการดำเนินการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ กรรมการสอบหัวข้อและโครงสร้างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พีรพล อ้นน้อยนนท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และก๊อปปี้หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แนวคิดของงานวิจัย	5
2.2 ชนิดของเสาไฟฟ้า การติดตั้งและข้อมูลของเสาไฟฟ้า	6
2.3 มาตรฐานการทำฐานเสา	7
2.4 มาตรฐานคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเสาไฟฟ้า	8
2.4.1 คอนกรีต	8
2.4.2 เหล็กลวด	8
2.4.2.1 ชนิดของลวด	9
2.4.2.2 รูปแบบของลวด	10
2.5 ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า	10
2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	12
2.6.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์	13
2.6.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด	13
2.6.3 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และการกระจัด	13
2.6.4 หาสติฟเนสเมทริกซ์และสมการของเอลิเมนต์	14
2.6.5 หาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	14
2.6.6 หาการกระจัดของระบบ	15
2.6.7 การหาค่าความเครียดและความเค้น	15
2.6.8 การตีความผลลัพธ์	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP)	16
2.7.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite)	16
2.7.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์เมทริกซ์	16
2.7.3 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน	22
2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
3.1 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการปฏิกเสภาพตสายไฟฟ้า	37
3.2 วิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม	38
3.3 การสร้างแบบจำลองทางโครงสร้างเสาไฟฟ้า	39
3.3.1 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม Inventor	39
3.3.2 การสร้างแบบจำลอง	42
3.3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ANSYS	53
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล	60
4.1 ผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	62
4.2 ผลวิเคราะห์ Safety Factors Path ใน ANSYS ในการวิเคราะห์ Post-Cracking ของเสาไฟฟ้า	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์	69
5.1 สรุปผล	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า	7
2.2 ตารางแสดง Mix Design ที่ใช้ในการผลิตเสาไฟฟ้าในปัจจุบัน	8
2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุง พื้นที่หน้าตัดระบุง มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดไม่ คลายความเค้น	9
2.4 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุง พื้นที่หน้าตัดระบุง มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดคลาย ความเค้น	10
2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใย	21
2.6 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของเส้นใยภายใต้แรงดึง	22
2.7 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลังที่มีในท้องตลาด	24
2.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวแกนของวัสดุต่างๆ	29
3.1 ตารางแสดงระยะการติดด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่น ในแบบจำลองเสาไฟฟ้า	51
3.2 แสดงแรงอัดและแรงดันทันข้างที่ใช้ในการวิเคราะห์	53
3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง	54
4.1 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่ ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 4.8 mm.	62
4.2 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่ ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 6.0 mm.	62
4.3 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่ ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 7.0 mm.	63
4.4 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m) ที่ติดด้วย แผ่น CFRP หนา 6.0 mm.	63
4.5 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m) ที่ติดด้วย แผ่น CFRP หนา 7.0 mm.	63
4.6 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m) ที่ติดด้วย แผ่น CFRP หนา 8.4 mm.	64
4.7 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 22 เมตร 18 ตัน-เมตร.....	65
4.8 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 22 เมตร 25 ตัน-เมตร	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแสดงความเค้นเนื่องจากแรงกระทำที่บริเวณปลายเสา5
2.2	แรงกระทำการเกิดโมเมนต์11
2.3	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย18
2.4	รูปแสดงการเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆ ในการสร้างแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง19
2.5	รูปแสดงพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ21
2.6	รูปแสดงกระบวนการม้วนเส้นใย (Filament Winding Process)25
2.7	รูปแสดงกระบวนการรีดเส้นใย (Pultrusion Process)26
2.8	รูปแสดงกระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ (Vacuum Compaction Process).....27
3.1	รูปแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย37
3.2	แสดงถึงวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม38
3.3	แสดงการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Inventor39
3.4	รูปแสดงหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์40
3.5	รูปแสดงการปรับแต่ง Option ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์41
3.6	รูปแสดงเครื่องมือพื้นฐานในการเขียนภาพ 2 มิติ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์42
3.7	รูปแสดงการวาดรูปฐานเสาไฟฟ้า 2 มิติ44
3.8	รูปแสดงคำสั่งที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ44
3.9	รูปแสดง Planes สำหรับระดับของส่วนประกอบในเสาไฟฟ้า.....45
3.10	รูปแสดงคำสั่ง Loft ในการ Sketch แบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า 3 มิติ45
3.11	รูปแสดงการสร้าง Chamfer ที่ขอบของเสาไฟฟ้า46
3.12	รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้า46
3.13	รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้าในการสร้างร่องของเสา47
3.14	รูปแสดงภาพ Plane View หลังจาก Mirror ร่องของโมเดลเสาไฟฟ้า47
3.15	รูปแสดงภาพ View ของเหล็กเสริมหลักในโมเดลเสาไฟฟ้า48
3.16	รูปแสดงภาพเหล็กปลอกและระยะจากฐานเสา48
3.17	รูปแสดงภาพเหล็กปลอกรูปทรงสี่เหลี่ยมจากรยะ Plane ตามแบบ49
3.18	รูปแสดงรูปแสดงระยะเหล็กปลอกแบบสี่เหลี่ยม49
3.19	รูปแสดงภาพตัดที่ Plan ของการเสริมเหล็กในแบบจำลองเสาไฟฟ้า49
3.20	รูปแสดงการการติดด้วยแผ่น CFRP โดยรอบของเสาไฟฟ้า50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 รูปแสดงการกำหนดความหนาของวัสดุ CFRP ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset	50
3.22 รูปแสดงการสร้างตุ้มคอนกรีตหุ้มเสาและวัสดุ CFRP ที่ตำแหน่ง Ground Level ของเสา.....	51
3.23 รูปแสดงตุ้มคอนกรีตที่ได้	52
3.24 รูปแสดงการสร้าง Split ผิวที่ตุ้มคอนกรีตสำหรับการกำหนด Support ในการวิเคราะห์	52
3.25 แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ANSYS	53
3.26 แสดงหน้าต่างการ Input ข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์	54
3.27 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ	55
3.28 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Model	55
3.29 แสดงการกำหนดตำแหน่งของการใช้งานคำสั่ง Path	56
3.30 แสดงแบ่ง Mesh ด้วย Program Control ที่ 10 มม.	56
3.31 แสดงการกำหนด Support	57
3.32 แสดงแรงอัดของลวดอัดแรงที่หน้าตัดเสาไฟฟ้า	57
3.33 แสดงแรงดัดข้างที่ปลายเสาไฟฟ้า	58
3.34 แสดงการกำหนดค่า Stress Limit	58
4.1 รูปแสดงผล Displacement ในเสาไฟฟ้า	61
4.2 รูปแสดงความเค้นสูงสุดที่ปลายเสาไฟฟ้า	61
4.3 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (18T-m.)	67
4.4 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m.)	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานอุตสาหกรรมมีการใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามที่ต้องการได้ และไม่ถูกจำกัดเหมือนวัสดุอื่น นอกจากนี้คอนกรีตยังเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งในเรื่องราคาและมีความสามารถในการรับกำลังจากสภาพแวดล้อม และพฤติกรรมรับแรงที่เกิดขึ้นจากการปะทะสายไฟจากแรงลมที่จะพัดโยกเสา และสายไฟให้แกว่ง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงและโมเมนต์ดัดขึ้นในเสาไฟฟ้า

การไฟฟ้านครหลวงนั้นจะมีข้อกำหนดมาตรฐานของการผลิตเสาไฟฟ้าคอนกรีตทั้งแบบเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Process) และเสาคอนกรีตแรงเหวี่ยง (Spun Process) โดยมีขนาดและการแบ่งประเภทของเสาตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งมีความยาวของเสาไฟฟ้าตั้งแต่ 6 เมตรขึ้นไป จนถึงความยาว 22 เมตร เช่น เสาขนาด 18, 20 และ 22 เมตร ใช้สำหรับรับสายส่ง 69 kV และ 115 kV มีระยะปักเสาพาดสายทุก 80 เมตร เสาขนาด 12, 12.35 เมตร ใช้สำหรับรับสายปอน 12 kV และ 24 kV มีระยะปักเสาพาดสายทุก 40 เมตร เป็นต้น

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของคอนกรีตยังมีจุดด้อยตรงที่เป็นวัสดุเปราะ มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำและทนต่อการกระแทกที่จำกัด ดังเห็นได้จากในช่วงหลายปีที่ผ่านมามีการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประสบปัญหาจากเสาไฟฟ้าหักโค่นหรือล้มในแต่ละเหตุการณ์มีจำนวนหลายต้น โดยพบว่ามีสาเหตุหลักที่ทำให้เสาไฟฟ้าหักโค่นหรือล้มนั้นส่วนใหญ่มาจากการปัจจัยภายนอกที่มากกว่า เช่น อุบัติเหตุรถชนเสาไฟฟ้า รถเกี่ยวสายไฟฟ้าหรือสายสื่อสาร และต้นไม้ล้มทับเสาหรือสายไฟฟ้า ตามลำดับ ส่งผลกระทบให้เสาไฟฟ้าเกิดการหักโค่นหรือล้มในต้นที่ถูกแรงกระทำโดยตรง และหักโค่นหรือล้มแบบต่อเนื่องในเสาไฟฟ้าต้นที่อยู่ข้างเคียงเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง โดยในแต่ละเหตุการณ์ ผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟน. ได้รับความเดือดร้อน ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นระยะเวลาาน และเกิดอันตรายต่อประชาชนทั่วไปจากเสาไฟฟ้าที่หักโค่นหรือล้ม ทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน หรือกรณีไฟไหม้จากการที่ไฟฟ้าลัดวงจรเกิดขึ้น เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีผลมาจากการที่กำลังและคุณสมบัติด้านความเหนียวของคอนกรีตไม่เพียงพอต่อการต้านทานการหักโค่นหรือล้มของเสาไฟฟ้า จึงเป็นที่มาของการศึกษาเพื่อการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า ด้วยการเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังและพฤติกรรมความเหนียวให้กับคอนกรีต เพื่อลดปัญหาต่างๆ ดังที่กล่าวมา โดยการหักหรือโค่นล้มของเสาไฟฟ้าข้างเคียงแบบต่อเนื่องจำนวนมากนี้ ส่วนใหญ่เกิดจากการหักโค่นของเสาในตำแหน่งใกล้ฐานที่เกิดโมเมนต์สูงสุดจากแรงกระทำ ทำให้น้ำหนักของเสาไฟฟ้าที่หักโค่นแต่ละต้นเพิ่มแรงกระทำในสายเคเบิลไฟฟ้า โดยแรงกระทำนี้มีทิศทางลงในแนวตั้งและจะแปรผันตรงกับจำนวน ตำแหน่งที่หัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค่นและน้ำหนักของเสาไฟฟ้า การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเป้าหมายไปที่การลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นหรือล้มต่อนื่อง จากแรงกระทำดังกล่าว

ในปัจจุบันการใช้วัสดุกรรมซ่อมแซมและเสริมกำลังภายนอกโดยใช้คอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Polymer) ชนิด Carbon หรือ CFRP ติดตั้งบนผิวของโครงสร้างคอนกรีตเพื่อเป็นการเสริมกำลังโครงสร้าง เพิ่มสมรรถนะในการรับแรง (Load Capacity) หรือการใช้งานได้ (Serviceability) กำลังเป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก CFRP มีข้อดีหลายประการ เช่น มีกำลังรับแรงดึงสูง ขนาดบาง และน้ำหนักวัสดุเบา หรืออัตราส่วนระหว่างกำลังและน้ำหนักที่สูง (Strength-to-Weight Ratio) มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง, อีกทั้ง CFRP ยังช่วยเสริมความแข็งแกร่ง (Stiffness), เพิ่มความคงทน (Durability) และ CFRP มีความยืดหยุ่นสามารถเข้ากับรูปร่างของโครงสร้างได้, ไม่เป็นสนิม, ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และติดตั้งได้ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกรวดเร็วทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานในส่วนอื่นๆ เช่น การเสริมกำลังของคานด้านทานแรงดัดนั้น โดยส่วนใหญ่จะมีการติดตั้ง CFRP ที่ผิวคานด้านที่รับแรงดึง (Tension Face) โดยใช้วัสดุยึดประสาน (Adhesive) เช่น อีพ็อกซี่ ซึ่ง CFRP นั้น จะช่วยทำให้กำลังด้านทานแรงดัดและความแข็งแกร่งของคานเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเสริมกำลังเสาจะใช้การโอบรัดด้วย CFRP รอบโครงสร้างเสา โดย CFRP จะทำงานเมื่อโครงสร้างเสากเกิดการขยายตัว ทั้งนี้ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง CFRP และค่าแรงงานมีราคาสูง อีกทั้ง CFRP ช่วยให้กำลัง ความแข็งแกร่ง และความคงทนของโครงสร้างเพิ่มขึ้น เหมาะแก่การนำมาใช้เสริมกำลังเสาไฟฟ้าคอนกรีต

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเพื่อเป้าหมายการลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นหรือล้มอย่างต่อนื่อง จากแรงกระทำดังที่กล่าวมาโดยมุ่งเน้นการใช้วัสดุเพื่อเพิ่มความเหนียวหลังจากการหักโค่นเพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่หักโค่นให้ไกลจากโคนเสาออกไป ด้วยการใช้ CFRP ในการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าที่มีการปักเสาพาดสายอยู่แล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นจากใกล้ฐานให้อยู่สูงขึ้นไป
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรม Post-cracking และตำแหน่งการหักของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจากผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. เพื่อหาความหนาของ CFRP ที่ใช้ในการเสริมกำลัง
4. เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าคอนกรีตต้นที่ตั้งอยู่
5. เพื่อลดจำนวนการหักโค่นต่อนื่องของเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. การศึกษานี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยของ ธนิสร สถาพร “การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการ เสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า”

2. ศึกษาแบบจำลองการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้า โดยการใช้ CFRP แบบแผ่น (Plate) ที่มีทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยแบบทิศทางเดียวติดรอบเสาไฟฟ้า โดยให้ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยขนานกับความยาวของเสาไฟฟ้า เพื่อให้เสาไฟฟ้าเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นจากใกล้ฐานให้อยู่สูงขึ้น

3. การศึกษานี้จะใช้แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงแบบ (Pre-stressed Process) ความยาว 22 เมตร ความสามารถในการรับแรงดัด 18 และ 25 ตัน-เมตร สำหรับสายป้อน 12 kV และ 24 kV ที่มีขนาดตามมาตรฐานของ กฟน. เพื่อเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาไฟฟ้า

4. การศึกษาจะพิจารณาส่วนโครงสร้างที่อยู่เหนือพื้นระดับผิวดิน โดยกำหนดให้ส่วนที่อยู่ในดินหรือส่วนปักฝังมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการหักโค่นหรือล้ม

5. การวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะแรงที่เกิดจากการกระทบในเสาไฟฟ้าคอนกรีตเท่านั้น ไม่รวมถึงแรงลม น้ำหนักบรรทุกจากการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนเสาไฟฟ้า เช่น การติดตั้งหม้อแปลงชนิดแขวนบนเสาไฟฟ้า หรือการติดตั้งคอนสายด้านเดียวของสายป้อนและสายส่ง เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้า โดยการใช้ CFRP แบบผ้า (Fabric) เพื่อให้เสาไฟฟ้าเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นจากใกล้ฐานให้อยู่สูงขึ้น เพื่อลดจำนวนการหักโค่นหรือล้มต่อเนื่อง โดยการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในโปรแกรม ANSYS โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม ANSYS แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุ และชนิดของอิเลเมนต์ที่เหมาะสม
2. ศึกษาแบบมาตรฐานและข้อกำหนดของเสาไฟฟ้าคอนกรีต ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

3. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ CFRP ที่มีใช้อยู่ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และวิธีการติดตั้งในโครงสร้างคอนกรีตต่างๆ ตามมาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย มยผ.1508-51 [2551]

4. สร้างแบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้าขนาดตามมาตรฐานของ กฟน. เพื่อการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้น และสร้างแบบจำลองเสาที่ใช้วัสดุ CFRP เสริมกำลังจากตำแหน่งฐานเสาจนถึงระดับความสูงที่กำหนด เพื่อทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะเกิดการหักโค่นในเสาไฟฟ้าคอนกรีต โดยเลือกใช้เสาไฟฟ้าขนาดความยาว 22 เมตร ความสามารถในการรับแรงดัด 18 และ 25 ตัน-เมตร เป็นแบบจำลองในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วิเคราะห์แบบจำลองเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลังด้วยการติด CFRP แบบแผ่นที่ผิวของเสาไฟฟ้า ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
6. สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

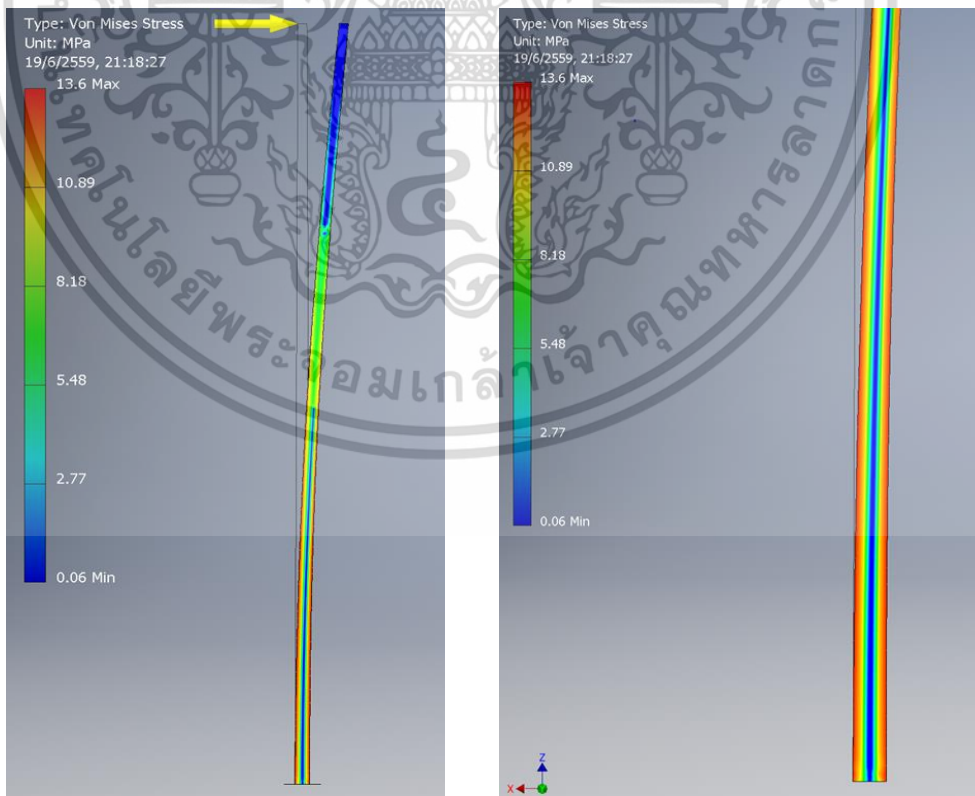
1. ได้ทราบคุณสมบัติของวัสดุ CFRP แบบแผ่น (Plate) ที่ใช้ในการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าคอนกรีต
2. ได้ทราบถึงตำแหน่งการหักโค่นของเสาไฟฟ้าที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แล้วจะไม่ส่งผลให้เกิดการหักโค่นแบบต่อเนื่องกับเสาไฟฟ้าตอนข้างเคียง
3. ได้ทราบถึงแนวทางในการปรับปรุงการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีตในต้นที่ตั้งอยู่ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติกำลังต้านทานต่อความเค้นที่เกิดจากแรงที่ส่งถ่ายมาจากเสาไฟฟ้าในต้นที่เกิดการหักโค่นจากอุบัติเหตุรถชนหรือธรรมชาติต่างๆ และเปลี่ยนตำแหน่งของความเค้น (Stress) ให้เกิดในตำแหน่งที่สูงขึ้นไปในเสาไฟฟ้า ที่จะสามารถลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่หักโค่นได้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดของงานวิจัย

แรงกระแทก (Impact Load) ในทางกลศาสตร์ คือ แรงที่มีขนาดสูงในระยะเวลาสั้นๆ ผลของแรงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัตถุหรือขนาดของแรงและความเร็วสัมพัทธ์ วัสดุที่เปราะกว่าก็จะเกิดการแตกหัก ตามผลของแรงที่เกิด การต้านทานแรงกระแทกขึ้นอยู่กับโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่แข็งแรงจะทนต่อแรงกระแทกน้อยกว่า วัสดุยืดหยุ่นจะทนต่อแรงกระแทกได้ดี การวิบัติหรือแตกร้าวก็จะเกิดในตำแหน่งที่ถูกแรงกระแทกมากที่สุด ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต หากเกิดแรงกระแทกจากอุบัติเหตุรถชน พฤติกรรมของเสาจะเกิดแรงเค้นในตำแหน่งที่เกิดแรงกระแทกและถ่ายเทแรงไปสู่ด้านตรงข้ามของเสา ในขณะที่เสาไฟฟ้าต้นตอเนื่อง จะถูกส่งถ่ายแรงมาจากเสาไฟฟ้าต้นที่หักโค่น โดยสายไฟฟ้าที่พาดเสาแต่ละต้น ในตำแหน่งต่างๆ ของการปักเสापาดสาย ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ในลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดโมเมนต์ในตำแหน่งฐานสามารถอธิบายได้จากหัวข้อที่ 2.5



รูปที่ 2.1 รูปแสดงความเค้นเนื่องจากแรงกระทำที่บริเวณปลายเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ชนิดของเสาไฟฟ้า การติดตั้งและข้อมูลของเสาไฟฟ้า

เสาที่ใช้ในการติดตั้งเสาไฟฟ้ามืออยู่ 2 ชนิด คือ เสาไม้ (Wood Pole) และเสาคอนกรีต (Concrete pole) เสาไม้ปัจจุบันได้เลิกใช้ไปแล้วเนื่องจากเพราะหายาก ส่วนเสาคอนกรีต (Concrete pole) มีข้อกำหนดมาตรฐานของการผลิตเสาไฟฟ้าคอนกรีตทั้งแบบเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Process) และเสาคอนกรีตแรงเหวี่ยง (Spun Process) โดยเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ กฟน. ผลิตมีขนาดตั้งแต่ 6 เมตร ไปจนถึง 22 เมตร เสาไฟฟ้าแต่ละขนาดจะมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันออกไป โดยเสาขนาด 18, 18.50, 20, 22 เมตร ใช้สำหรับรับสายส่ง 69 kV และ 115 kV มีระยะปักเสา 80 เมตร เสาขนาด 12, 14 เมตร ใช้สำหรับรับสายป้อน 12 kV และ 24 kV เสาขนาด 12.35 เมตร ใช้สำหรับทำนั้งร้าน Concrete รับหม้อแปลง เสาขนาด 10.50 เมตร เป็นเสานั้งร้านสำหรับ Network transformer โดยเฉพาะ พขล. เสาขนาด 10 เมตร ใช้สำหรับ Line Pole ในเขต Network area สำหรับเป็น Line pole และ Service pole ระหว่างเสาแรงดันปานกลางหรือในที่ต่ำหรือเสาข้ามถนน เสาขนาด 8.50 เมตร ใช้สำหรับ Line Pole และ Service Pole ถ้า Line pole ระยะช่วงเสาไม่ควรเกิน 35 เมตร (30-35 เมตร) และเสาขนาด 6 เมตร ใช้สำหรับเป็น Service pole แรงต่ำ คุณสมบัติของเสาไฟฟ้าแบ่งตามความยาวแสดงในตาราง 2.1

ระยะ Span ในการปักเสา เสาแรงสูงตามปกติไม่ควรเกิน 40 เมตร และเสาแรงต่ำ ตามปกติไม่ควรเกิน 30 เมตร ในบางกรณีระยะ Span ก็อาจจะยาวกว่าปกติได้ เช่น กีดขวางประตูบ้านทางเข้าออก (ไม่ควรเกิน 45 เมตร) กรณีปักเสาในคลองหรือแม่น้ำ ให้ใช้ Span ไม่เกิน 80 เมตรได้ โดยจะต้องพาดสายแรงสูงขนาด 2-35 mm² และสามารถติดตั้งหม้อแปลง และ/หรือพาดสายแรงต่ำได้ ในกรณีที่จะต้องพาดสายเป็นระบบ 3 เฟส และขนาดของสายไม่เกินขนาด 185 mm² จะต้องปักเสาแซมเป็น Mid Span คือ 40 เมตร ทั้งนี้ ปัจจุบันสายแรงกลางชนิดเปลือยทุกขนาด ไม่มีการออกแบบติดตั้งในระบบจำหน่าย

ในกรณีทางโค้ง Maximum Line Angle สำหรับการพาดสาย (35 mm² ไม่เกิน 60°, 70 mm² A ไม่เกิน 35°, 105 mm² ไม่เกิน 26°, 185 mm² A ไม่เกิน 18°) เกินกว่าที่กำหนดไว้ตลอด Span ลงเป็น 40 เมตร ทั้งนี้ จะต้องคำนึงถึง Bending Moment หรือความมั่นคงของเสาดวย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า

เสาไฟฟ้าอัด แรง (ม.)	ความสูงเสา จากพื้นดิน (ม.)	ระยะปัก เสาในดิน (ม.)	ขนาดเสา		น้ำหนัก (กก.)	โมเมนต์ ที่รับได้ (ตัน-ม.)
			ฐาน	ปลาย		
			กว้าง (ซม.)	กว้าง (ซม.)		
8.5	7.20	1.30	20.00	15.00	585	2.0
8.5	7.20	1.30	28.00	21.62	1,200	4.5
12	10.25	1.75	25.27	16.18	1,280	3.5
12	10.25	1.75	25.27	16.18	1,357	5.0
12.35	10.25	2.10	35.63	22.40	2,319	6.5
14	12.00	2.00	28.00	17.50	3,975	10.0
22	20.00	2.00	43.60	25.60	5,850	18.0
22	20.00	2.00	57.25	27.00	8,410	25.0

2.3 มาตรฐานการทำฐานเสา

โดยทั่วไปการทำฐานเสาจะทำ ในกรณีที่จะมีการติดตั้งหม้อแปลง โดยมีหลักเกณฑ์ในการเลือกใช้ฐานเสาซึ่งจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของหม้อแปลงเป็นเกณฑ์ ข้อเสนอแนะในการเลือกฐานเสา มีดังนี้

2.3.1 ฐานเสา 12 เมตร เพื่อรับหม้อแปลง 3 x 75 kVA หรือดินแข็ง รับน้ำหนักได้ 2,000 Kg. (สร้างคอนกรีตเสา)

2.3.2 ฐานเสา 12 เมตร เพื่อรับหม้อแปลง 3 x 75 kVA, 225 kVA หรือ 2 x 100 kVA ดินอ่อน รับน้ำหนักได้ 1,800 kg. (สร้างคอนกรีตเสา)

2.3.3 ฐานเสา 12 เมตร เพื่อรับหม้อแปลง 3 x 75 kVA, 225 kVA หรือ 2 x 100 kVA รับน้ำหนัก ได้ 1,500 Kg. (เสริมทำเสาที่ปักไว้แล้ว)

2.3.4 Key pole สำหรับนั่งฐานหม้อแปลง (รับน้ำหนักไม่เกิน 3 ตัน)

2.3.5 ฐานเสานั่งฐานหม้อแปลง 4.5 ตัน ดินอ่อน (รถเข็นปฏิบัติงานได้ถึงที่)

2.3.6 เสาหม้อแปลง 6.5 ตัน ดินแข็ง (รถเข็นปฏิบัติงานได้ถึงที่)

2.3.7 ฐานเสานั่งฐานหม้อแปลง 6.5 ตัน ดินอ่อน (เข็นปฏิบัติงานได้ถึงที่) เพื่อสะดวกในการเลือกใช้งานหม้อแปลง

สำหรับการทำฐานเสาในน้ำ ตามปกติพยายามหลีกเลี่ยงเนื่องจากทำได้ลำบากการบำรุงรักษา ภายหลังทำได้ไม่สะดวก ในกรณีที่จำเป็นต้องทำหรือหลีกเลี่ยงไม่ได้ ก็มีรายละเอียดดังนี้ ฐานเสานั่งฐานหม้อแปลงรับน้ำหนักหม้อแปลงได้ไม่เกิน 4.5 ตันต่อต้น เป็นฐานเสาชนิดไข Stub คู่ ฐานเสาหม้อแปลงขนาด 3 x 50 kVA ถึง 3 x 75 kVA ไข Stub คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 มาตรฐานคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเสาไฟฟ้า

วัสดุหลักที่ใช้ทำเสาไฟฟ้าประกอบไปด้วยคอนกรีต และเหล็กลวด สำหรับคอนกรีตต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่สำคัญที่มีผลต่อการศึกษา ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำ โดยจะมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ACI 318M-05 สำหรับเหล็กลวดที่ใช้ต้องเป็นเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง ซึ่งหมายถึงลวดที่ทำขึ้นโดยวิธีดึงเย็นเหล็กลวดคาร์บอนสูง ลวดดึงเย็นคือลวดลักษณะตัน ทำจากเหล็กลวดโดยการดึงเย็นผ่านตายหรือลูกกลิ้ง ในการผลิตเหล็กลวดต้องนำลวดผ่านชุดตัดตรง แล้วอบร้อนระยะเวลาสั้น หรืออบร้อนระยะเวลาสั้นในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาพให้ความเครียดตามแนวแกนขนาด โดยมีการกำหนดมาตรฐานการผลิตลวดสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางระบุขนาดต่างๆ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะต่ำสุด ทั้งสำหรับลวดชนิดไม่คลายความเค้น และชนิดที่คลายความเค้น

2.4.1 คอนกรีต

คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตที่มีผลต่อการศึกษา ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำ โดยจะมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ACI 318M-05 ได้กำหนดความสัมพันธ์เพื่อหาโมดูลัสของคอนกรีตโดย มีสมการดังนี้

$$E_c = \omega_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2.1)$$

สำหรับคอนกรีตมวลธรรมดา โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดง Mix Design ที่ใช้ในการผลิตเสาไฟฟ้าในปัจจุบัน

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

2.4.2 เหล็กลวด

ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง หมายถึง ลวดที่ทำขึ้นโดยวิธีดึงเย็นเหล็กลวดคาร์บอนสูง ลวดดึงเย็น คือลวดลักษณะตัน ทำจากเหล็กลวดโดยการดึงเย็นผ่านตายหรือลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.1 ลวดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดไม่คลายความเค้น (non – stress relieved or mild coil wire) หมายถึง ลวดซึ่งอยู่ในสภาพที่ได้จากการดัดเย็น มีสารหล่อลื่นที่ใช้ในการดัดเย็นหล่อเหลืออยู่ที่ผิว ขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.3

2. ชนิดลวดคลายความเค้น (stress relieved wire) หมายถึงลวดดัดเย็นซึ่งผ่านกระบวนการปรับคุณสมบัติวิธีใดวิธีหนึ่งตลอดความยาวของเส้น ดังต่อไปนี้

นำลวดผ่านชุดตัดตรง แล้วอบร้อนระยะเวลาสั้น หรืออบร้อนระยะเวลาสั้นในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาพให้ความเครียดตามแนวแกนขนาด ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดไม่คลายความเค้น

เส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุ มิลลิเมตร	ความทนแรงดึงระบุ ¹⁾ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัดระบุ ตารางมิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด		
			ค่าระบุ ³⁾ กรัม	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน กรัม	แรงดึงสูงสุด ⁴⁾ กิโลนิวตัน	แรงดึงพิสูจน์ร้อยละ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดคลายความเค้น

เส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุ มิลลิเมตร	ความหนาแรง ดึงระบุ ¹⁾ นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัด ระบุ ตาราง มิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ ²⁾ ต่ำสุด			
			ค่าระบุ ³⁾ กรัม	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน กรัม	แรงดึง สูงสุด ⁴⁾ กิโลนิวตัน	แรงดึงพิสูจน์		รัศมีการคดโค้ง มิลลิเมตร
						ร้อยละ ⁴⁾⁽⁵⁾ 0.1 กิโลนิวตัน	ร้อยละ ⁴⁾⁽⁶⁾ 0.2 กิโลนิวตัน	
4	1 770	12.6	98.9	± 2.0	22.3	18.5	19.0	10
4	1 670	12.6	98.9	± 2.0	21.0	17.5	17.9	10
5	1 770	19.6	154	± 3.1	34.7	28.8	29.5	15
5	1 670	19.6	154	± 3.1	32.7	27.2	27.8	15
6	1 770	28.3	222	± 3.7	50.1	41.6	42.6	15
6	1 670	28.3	222	± 3.7	47.3	39.3	40.2	15
7	1 670	38.5	302	± 4.3	64.3	53.4	54.7	20
7	1 570	38.5	302	± 4.3	60.4	50.1	51.3	20
8	1 670	50.3	395	± 5.9	84.0	69.7	71.4	20
8	1 570	50.3	395	± 5.9	79.0	65.6	67.1	20
9	1 470	63.6	499	± 7.2	93.5	74.8	76.7	25
10	1 570	78.5	617	± 8.6	123	98.6	101	25
10	1 470	78.5	617	± 8.6	115	92.3	94.3	25
12.2	1 570	117	918	± 10.5	184	147	151	30
12.2	1 470	117	918	± 10.5	172	138	141	30

2.4.2.2 รูปแบบของลวดแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

1. แบบเกลี้ยง (plain wire) หมายถึง ลวดที่มีผิวตามที่ได้จากสายที่ใช้ดึง มีพื้นที่ภาคตัดขวางสม่ำเสมอ ลักษณะผิวและแนวแกนไม่เปลี่ยนแปลงเป็นคาบตลอดความยาว
2. แบบมีรอยย้า (indented wire) หมายถึง ลวดซึ่งผิวมีรอยย้าเป็นระยะเท่าๆ กันตลอดความยาว
3. แบบหยัก (crimped wire) หมายถึง ลวดที่เปลี่ยนแปลงแนวแกนอย่างสม่ำเสมอในระนาบเดียวหรือในรูปของเกลียว ซึ่งเกิดขึ้นโดยกรรมวิธีทางกลหลังการดึงเย็น
4. แบบมีบั้ง (chevron) คล้ายกับแบบหยัก ทั้งนี้การใช้งานของลวดทั้งสองแบบเหมือนกันทุกประการ เพราะมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันรวมทั้งสามารถใช้อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ร่วมกัน ได้ตามปกติ

2.5 ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า

ความสามารถในการรับแรงดัด (bending moment : B.M.) ของเสาคอนกรีตอัดแรง ที่มีการติดตั้งสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ บนเสาไฟฟ้า ซึ่งความหมายของ B.M. จะหมายถึงเมื่อมีแรงลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

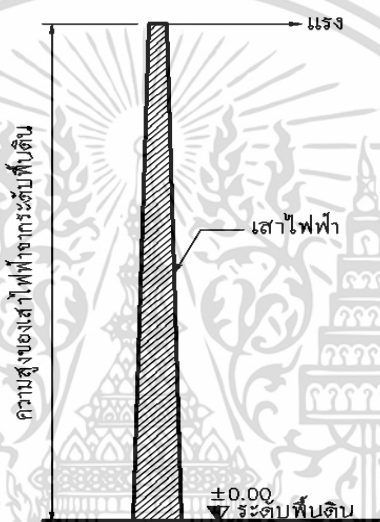
กระทำต่อวัสดุที่ยึดอยู่กับที่ในลักษณะที่แรงนั้นพยายามทำให้วัตถุนั้นหมุนไปตามทิศทางของแรงที่มากระทำ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างแรงที่กระทำกับระยะห่างในแนวตั้งฉากจากแนวแรงไปยังจุดหมุน เป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$\text{B.M.} = F \times S \quad (2.3)$$

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

F = แรงที่กระทำต่อวัตถุ กิโลกรัม (kgf)

S = ระยะห่างในแนวตั้งฉากจากจุดที่แรงกระทำไปยังจุดหมุน เมตร (m)



รูปที่ 2.2 แรงกระทำการเกิดโมเมนต์

โดยทั่วไปวัตถุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการรับ B.M. ไม่เท่ากัน ซึ่งวัตถุจะสามารถรับค่า B.M. ได้สูงสุดอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าหากแรงที่มากระทำทำให้เกิด B.M. มีค่าสูงเกินกว่าที่วัตถุนั้นจะรับได้ วัตถุนั้นก็จะเกิดการแตกหักหรือร้าวซึ่งขึ้นอยู่กับว่าจะเป็วัตถุชนิดใด ในที่นี้ กพน. ได้ใช้เสาคอนกรีตอัดแรงเป็นตัวรับ B.M. ที่เกิดขึ้น โดยความสามารถในการรับ B.M. ของเสาคอนกรีตมีหน่วยเป็น ตัน-เมตร หรือ กิโลกรัม-เมตร (1 ตัน-เมตร เท่ากับ 1,000 กิโลกรัม-เมตร) ทั้งนี้ค่า B.M. ที่เกิดขึ้นกับเสาไฟฟ้าจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. B.M. ที่เกิดจากแรงดึงในสายไฟ จะเกิดขึ้นในกรณีที่สายไฟมีการเข้าปลายสายที่เสาต้นสุดท้ายโดยไม่มีสายยึดโยง หรือเกิดจากการพาดสายไฟฟ้าไม่เป็นแนวตรงทำให้เกิดแรงลัพธ์ตั้งฉากกับหน้าเสาเนื่องจากมุมเบี่ยงเบนของสายไฟ
2. B.M. ที่เกิดจากแรงลม โดยจะเกิดเฉพาะเวลาที่มลมพัดมาปะทะกับเสาไฟฟ้าหรือสายไฟฟ้ารวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ ด้วยที่ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้าง เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างตัวอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น นอกจากนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิตยศาสตร์ การใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น แรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไปที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถจะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง แต่โครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน จึงทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญ หรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ แต่การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบเช่นวิธีทั่วไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์ แล้วนำมารวมเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ

เราสามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง เช่น หาค่าแรง ค่าโมเมนต์ ความเค้น ความเครียด เป็นต้น ในที่นี้จะเน้นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาโครงสร้างของเสาไฟฟ้า

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธีคือ วิธียืดหยุ่น (flexibility method) และวิธีสติฟเนส (stiffness method) วิธีแรกสามารถจะหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาโดยอาศัยสมการสมดุลของแรงและสมการเงื่อนไขการกระจัด (compatibility equation) และวิธีที่สองจะสามารถหาการกระจัดที่สมมติขึ้นโดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อหรือที่ขอบบริเวณที่สัมผัสกันไม่ว่าก่อนหรือหลังถูกน้ำหนักกระทำ ยังคงมีความต่อเนื่องเหมือนเดิม ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดก็สามารถจะหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น นิยมใช้วิธีสติฟเนสหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถจะหาสมการสมดุลและหาผลเฉลยได้สะดวกกว่าโดยไม่ต้องเลือกเงื่อนไขของการกระจัด โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวก็นิยมใช้วิธีสติฟเนส รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยเลือก ใช้รูปแบบการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยสมการไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิธีสติฟเนสด้วย

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือจะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งเรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ หรือเส้นขอบผิวของเอลิเมนต์ โดยอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง เราสามารถหาสติฟเนสของความเค้น - ความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่างๆ ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อแข็ง, โครงข้อหมุน, โครงสร้างเสาไฟฟ้า และโครงสร้างอื่นๆ นั้นมีขั้นตอนต่างๆ ไปดังนี้

2.6.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิม คือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจำเป็นต้องแทนด้วย เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจนทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง และอาจทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าความสามารถของคอมพิวเตอร์ไม่สามารถคำนวณละเอียดได้เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างของโครงสร้าง แรงการกระทำ และแรงลมที่กระทำ เป็นต้น รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการคือ อาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดมิติเดียว, สองมิติ, สามมิติหรือ เอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร

2.6.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

จะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันคือ พอลิโนเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจเป็นพอลิโนเมียลกำลังหนึ่ง, กำลังสอง, กำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเรขาคณิตก็สามารถเลือกใช้ได้แต่ไม่เป็นที่นิยม ทั้งนี้เพราะพอลิโนเมียลฟังก์ชันให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า ฟังก์ชันการกระจัดที่เลือกใช้จะต้องทำให้ผลเฉลยที่ความต่อเนื่องทั้งภายในเอลิเมนต์และแบบจำลองของระบบ

2.6.3 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และการกระจัด

การหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดและความเครียดกับการกระจัด ในกรณีของปัญหามิติเดียว การยืดตัว u ของเอลิเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น ทิศทาง x จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด ϵ_x ในกรณีที่ ϵ_x มีค่าน้อย, $\epsilon_x = du/dx$ และถ้าวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น, จากกฎของฮุก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดคือ $\sigma_x = E\epsilon_x$ ซึ่ง คือความเค้นในทิศทาง x และ E คือค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น ผลเฉลยของการกระจัด, ความเค้น, ความเครียดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องแม่นยำเพียงใด ย่อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เป็นสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 ทาสติฟเนสเมทริกซ์และสมการของเอลิเมนต์

การหาสติฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์และสมการของแรงของแต่ละเอลิเมนต์สามารถทำได้หลายวิธี

1. วิธีสมดุลโดยตรง (direct equilibrium method)

วิธีสมดุลโดยตรงนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เราสามารถหาสติฟเนสเมทริกซ์และสมการของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้หาสติฟเนส เมทริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์เสา, คอนสาย และสายไฟฟ้า เป็นต้น

2. วิธีงานหรือพลังงาน (work or energy method)

โดยอาศัยหลักของงานสมมติ (principle of virtual work), หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy) และทฤษฎีของคลาสติเกเลียโน (castigliano's thorem) ก็สามารถหาสมการของเอลิเมนต์และหาสติฟเนสของเอลิเมนต์สองและสามมิติ ได้โดยสะดวก สำหรับวิธีของงานสมมตินั้นสามารถใช้หาสติฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิดและวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดและทฤษฎีคลาสติเกเลียโน ใช้หาสติฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามทั้งสามหลักการ สามารถหาสติฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นได้เหมือนกัน แต่ในนี้จะเน้นการหาสติฟเนสของเอลิเมนต์ โดยอาศัยหลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด เพราะเป็นหลักการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงยืดหยุ่น

โดยอาศัยวิธีใดวิธีหนึ่งเราจะได้สมการสมดุลของแรงในเทอมของสติฟเนสเมทริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์สมการดังกล่าว สามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\{f\} = [k] \{u\}$$

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยที่ $\{f\}$ คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ

$[k]$ คือ สติฟเนสของเอลิเมนต์

$\{u\}$ คือ การกระจัดที่จุดต่อ

n คือ จำนวนของระดับความเป็นอิสระ

2.6.5 หาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จากการรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ในหัวข้อที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 เข้าด้วยกัน ด้วยวิธีซ้อนทับ หรือวิธีสตีเฟนส์โดยตรง โดยอาศัยหลักของการสมดุลของแรงที่จุดต่อเอลิเมนต์ และการต่อเนื่องของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้เขียนในรูปเมทริกซ์ ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\{F\} = [K] \{u\}$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยที่ {F} คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ
 [K] คือ สตีเฟนส์ของเอลิเมนต์รวมของระบบ
 {u} คือ เมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบ
 n คือ จำนวนของระดับความเป็นอิสระ

ซึ่งอาจจะทราบค่าบางค่าและไม่ทราบบางค่า เนื่องจากเมทริกซ์ [K] ในสมการที่ (2.5) เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ทั้งนี้เพราะตัวกำหนดเท่ากับศูนย์จึงไม่สามารถหาค่า {u} โดยตรงจากสมการ จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) หรือเงื่อนไขบังคับ (constraints) หรือจุดรองรับ (supports) เพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์ [K] ในสมการ (2.5) นั้นไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐานและสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

2.6.6 หากการกระจัดของระบบ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบหรือเงื่อนไขบังคับ ลงในสมการ (2.5) แล้วเราสามารถหาการกระจัด u_1, u_2, \dots, u_n ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตหรืออาจจะหาการกระจัด {u} โดยใช้วิธีของเกาส์ (gauss's elimination method) หรือวิธีสมมติ (iteration method) การกระจัด {u} อาจหาได้โดยการคูณสมการ (2.5) ด้วย $[K]^{-1}$ โดยตลอด

2.6.7 การหาค่าความเครียดและความเค้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างนอกจากต้องการทราบการกระจัดแล้วยังต้องการทราบค่าความเค้น, ความเครียด, โมเมนต์ และแรงตามแนวแกน ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น ปัญหามิติเดียว ถ้าทราบค่าการกระจัด u ก็สามารถหาความเครียดจาก $\epsilon_x = du/dx$ และหาความเค้นจาก $\sigma_x = E \epsilon_x$ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.8 การตีความผลลัพธ์

จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในขั้นต้นก็จะสามารถทราบได้ว่าที่จุดใดของเอลิเมนต์หรือบริเวณใดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนมีการกระจัดสูง เกิดโมเมนต์ดัด หรือแรงตามแนวแกนได้ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะหรือมิติของโครงสร้างได้

2.7 วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP)

2.7.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite)

คอมโพสิต (Composite) เป็นระบบของวัสดุที่ประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งมีการเชื่อมประสานวัสดุดังกล่าวเข้าไว้ด้วยกัน วัสดุคอมโพสิตในเอกสารนี้ หมายถึง เมทริกซ์ (Matrix) ของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย หรือวัสดุเสริมกำลังอื่นๆ ซึ่งมีความยาวมากกว่าความหนาอย่างชัดเจน วัสดุคอมโพสิต หรือ พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย สามารถอธิบายให้ชัดเจนมากขึ้นด้วยการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้าง เช่น คอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP Composite Reinforced Concrete) ต้องมีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดจากส่วนประกอบทั้งหมดเป็นส่วนเสริมกำลังอย่างต่อเนื่องซึ่งรองรับโดยวัสดุเมทริกซ์ที่ทำให้มีเสถียรภาพ โดยปกติเส้นใยที่ต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักจะมีความแข็งแรง (Stiffness) และกำลังรับน้ำหนักสูงกว่าวัสดุเมทริกซ์ซึ่งใช้ กันทั่วไป เช่น พอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต (Thermosetting Polymers) อย่างไรก็ตาม ถ้าเส้นใยไม่ ต่อเนื่อง ปริมาณเส้นใยควรมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร จากส่วนผสมทั้งหมด เพื่อให้มีผลอย่าง มีนัยสำคัญในการเสริมกำลัง วัสดุคอมโพสิตที่จะกล่าวถึงในบทนี้ จะเป็นระดับโครงสร้างหลัก (Macrostructural Level) โดย มีรายละเอียดเกี่ยวกับ รูปแบบทางโครงสร้างของหน้าตัดรวม และส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิตซึ่ง รวมถึง เรซินเมทริกซ์ (Matrix Resins) และเส้นใยที่ใช้เสริมกำลัง (Reinforcing Fibers) เนื้อหาในบทนี้ ยังให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสารผสมเพิ่ม (Additives) และตัวเติม (Fillers) รวมทั้งข้อพิจารณาใน กระบวนการผลิตและวัสดุที่มีผลกระทบต่อ การออกแบบ สมรรถนะของวัสดุคอมโพสิต ขึ้นอยู่กับ วัสดุที่ใช้ผลิต การจัดเรียงตัวของส่วนรับกำลังหลัก ของวัสดุ (เส้นใยเสริมกำลัง) และอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ (Interaction between Fibers and Matrix) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP Matrix Composite) ได้แก่ คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย ทิศทางการวางเส้นใย (Fiber Orientation) ความยาว รูปร่าง และส่วนประกอบของเส้นใย คุณสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์เรซิน และการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้น ใยและเมทริกซ์

2.7.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

ความสำคัญของพอลิเมอร์เมทริกซ์ บทบาทของเมทริกซ์พอลิเมอร์ ได้แก่ การทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างเส้นใยเสริมกำลังและ โครงสร้างโดยรวม และป้องกันเส้นใยจากสภาวะแวดล้อม และความเสียหายเชิงกลต่างๆ ซึ่งเทียบได้ กับคอนกรีต ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงเฉือนระหว่างชั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

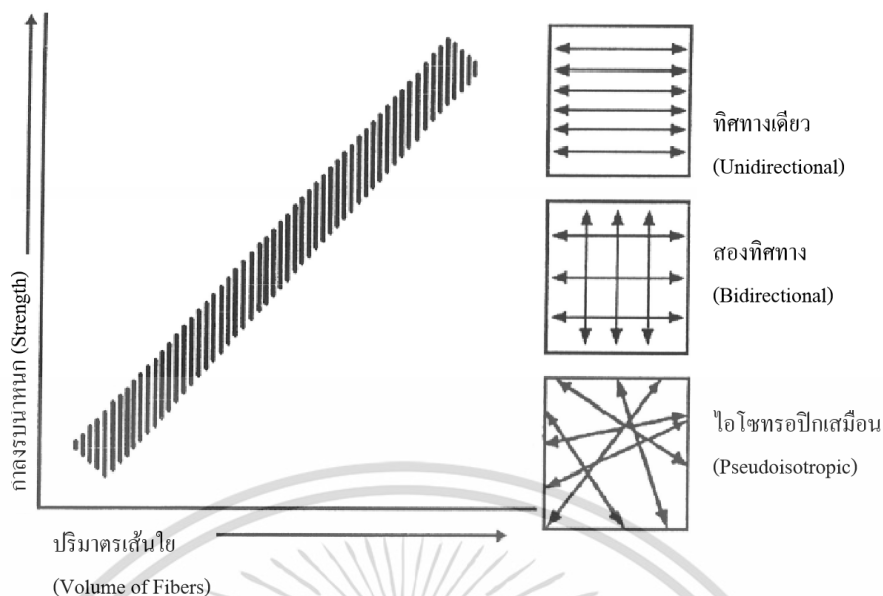
(Interlaminar Shear) เป็นข้อพิจารณาสำคัญในการออกแบบโครงสร้างภายใต้แรงดัด (Bending Loads) และแรงเฉือนในระนาบ (In-Plane Shear) มีความสำคัญกับโครงสร้างภายใต้แรงบิด (Torsional Loads) ซึ่งคุณสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์มีผลกระทบต่อกำลังของวัสดุคอมโพสิตในการรับแรงเฉือนระหว่างชั้นและแรงเฉือนในระนาบ นอกจากนี้เรซินเมทริกซ์ยังมีส่วนช่วยค้ำยันทางด้านข้าง เพื่อป้องกันเส้นใยโก่งคาะ (Buckling) ขณะรับแรงอัดอีกด้วย ด้วยเหตุผลข้างต้น เนื้อหาในส่วนนี้จึงเน้นหนักไปทางด้านเรซินเมทริกซ์ ซึ่งมีได้มุ่งหมายเพื่อลดบทบาทความสำคัญ of เส้นใยในการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุเสริมกำลังคอมโพสิตใดๆ แต่เพื่อให้มีความเข้าใจในบทบาทของเมทริกซ์พอลิเมอร์ต่อสมรรถนะ โดยรวมของวัสดุคอมโพสิต และส่งเสริมให้เกิดความสมดุลในการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต

เส้นใยเสริมกำลังสำหรับวัสดุคอมโพสิต (Reinforcing Fibers for Structural Composites) เส้นใยหลักที่ใช้กันในห้องตลาดสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาซึ่งรวมถึงคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด รูปแบบของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ใช้กันมากในงานโครงสร้างมักจะเป็นแบบแผ่นเสริมกำลัง (Laminate) แผ่นเสริมกำลังทำขึ้นโดยการเรียงซ้อนของเส้นใย และเมทริกซ์ชั้นบางๆ หลายชั้นรวมกันจนได้ความหนาที่ ต้องการ การควบคุมทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย (Fiber Orientation) ในแต่ละชั้นและลำดับ ของการเรียงซ้อนชั้นต่างๆ จะทำให้ได้คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพตามที่ต้องการ วัสดุคอมโพสิตจะเป็นส่วนผสมระหว่างวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าซึ่งมีการแยกกันได้อย่าง ชัดเจน และสามารถระบุขอบเขตของวัสดุแต่ละชนิดได้ วัสดุจะถูกผสมเข้าด้วยกัน และจุดสัมผัส ระหว่างวัสดุ เช่น ผิวดมผัสนระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ มักจะมีการปรับสภาพผิวด้วยสารเชื่อมต่อ (Coupling Agent) เพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ และสมรรถนะด้านอื่นๆ

สมรรถนะของวัสดุคอมโพสิต ขึ้นอยู่กับ วัสดุที่ใช้ การจัดเรียงเส้นใยหลักที่ใช้ในการรับแรง และอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างวัสดุที่ใช้ ปัจจัยหลักที่กระทบต่อสมรรถนะของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ได้แก่ ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย (Fiber Orientation) ความยาว รูปร่างและอัตราส่วนผสมของเส้นใย คุณสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์เรซิน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

การจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectional or One-Dimensional Fiber Arrangement) จะทำให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะทำให้เกิดกำลังรับน้ำหนักและมอดุลัสสูงสุดในทิศทางตามแกนของเส้นใย การจัดเรียงเส้นใยแบบระนาบ (Planar Arrangement) เป็นการจัดเรียงเส้นใยสองมิติและมีกำลังรับน้ำหนักแตกต่างกันในทุกทิศทาง เทียบกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย การเรียงเส้นใยแบบสามมิติจะทำให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย มีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิกแต่กำลังรับน้ำหนักจะน้อยกว่าการจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียว คุณสมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่จัดเรียงตัวใน ทิศทางที่พิจารณาดังแสดงในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

ข้อพิจารณาเกี่ยวกับเส้นใย คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยขึ้นอยู่กับทิศทางในการวัด เทียบกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย กำลังรับแรงดึงและมอดุลัสแรงดึงของแผ่นเสริมกำลังชนิดเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectionally Reinforced Laminate) จะมีค่าสูงสุดเมื่อตรวจวัดในทิศทางตามยาวของเส้นใย ในกรณีตรวจวัดในทิศทางอื่นคุณสมบัติดังกล่าวจะมีค่าลดลง และสำหรับคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ จะขึ้นอยู่กับทิศทางการตรวจวัดเช่นเดียวกับกำลังรับ

แรงดึงและมอดุลัส เหล็กจะมีจุดคดง (Yielding) และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก หรือมีความเหนียวภายใต้แรงกระทำ สำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยโดยส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงอีลาสติก ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Nature) ของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยจะทำให้เกิดกลไกสำหรับการดูดซับพลังงานได้สูงกว่าในระดับไมโครสเกล (Micro Scale) เมื่อเทียบกับกระบวนการคดงของเหล็ก (Metallic Yielding Process) แผ่นเสริมกำลังคอมโพสิตจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยขึ้นอยู่กับชนิดและความรุนแรงของแรงกระทำภายนอก วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยหลายชนิดจะมีค่าความหน่วงสูง (High Damping) ลักษณะเช่นนี้ทำให้เพิ่มการดูดซับพลังงานสั่นไหว และลดการถ่ายแรงกระทำสู่อาคารข้างเคียง พฤติกรรมด้านนี้ของวัสดุคอมโพสิตจะมีความสำคัญกับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา (เช่น สะพาน ทางหลวง เป็นต้น) ซึ่งจะอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกชั่วคราวและมีช่วงเวลาที่ได้รับแรงกระทำสั้นกว่ากรณีรับน้ำหนักบรรทุกแบบคงที่ (Sustained Excessive Loading)

ความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และเส้นใยเสริมกำลัง เมทริกซ์จะทำหน้าที่เป็นแบบและ

ป้องกันเส้นใยจากสถานะแวดล้อมภายนอก สมรรถนะทางเคมี สมรรถนะทางด้านอุณหภูมิ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมรรถนะทางไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับชนิดของ เมทริกซ์เรซินที่เลือกใช้งาน แต่เมทริกซ์เรซินยังมีหน้าที่อื่นๆ ได้แก่ ทำหน้าที่รักษาตำแหน่ง ของเส้นใย และในขณะที่รับน้ำหนักเมทริกซ์เรซินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและกระจาย หน่วยแรงเข้าไปสู่เส้นใยซึ่งมีมอดูลัสสูงกว่า โดยทั่วไปเมทริกซ์จะมีการยึดตัวที่จุดแตกหัก (Breaking Point) มากกว่าเส้นใย ทั้งนี้เมทริกซ์ไม่ควรเกิดการหดตัวมากนัก ในขณะที่บ่มเพื่อ หลีกเลี่ยงความเครียดภายในเส้นใยเสริมกำลัง ถ้าผู้ออกแบบมีความต้องการวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก อาจพิจารณาเลือกใช้ ทิศทางการเรียงเส้นใยและรูปแบบการวางเส้นใยแบบทิศทางเดียวที่เหมาะสม หากมีความ ต้องการต่างไปจากนี้อาจจำเป็นต้องพิจารณาเลือกหน้าตัดให้เหมาะสม ทั้งนี้จะทำได้ในขนาด จำกัดในกรณีที่ไม่เสริมเส้นใยในทิศทางแกนสั้น หรือกรณีที่ไม่มีการจัดเรียงเส้นใยใหม่

การเสริมเส้นใยในทิศทางแกนสั้นหรือการจัดเรียงเส้นใยใหม่จะลดความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีผลกระทบต่อความคุ้มค่าในการใช้งาน ทั้งนี้ สำหรับชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนอาจต้องจัดเรียงเส้นใยสั้นเพิ่มเติมเพื่อเสริมกำลังให้ ชิ้นรูปเป็นสามมิติ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบควอไซโอไอโซทรอปิก (Quasi-Isotropic) ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิกดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆ ในการสร้างแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง

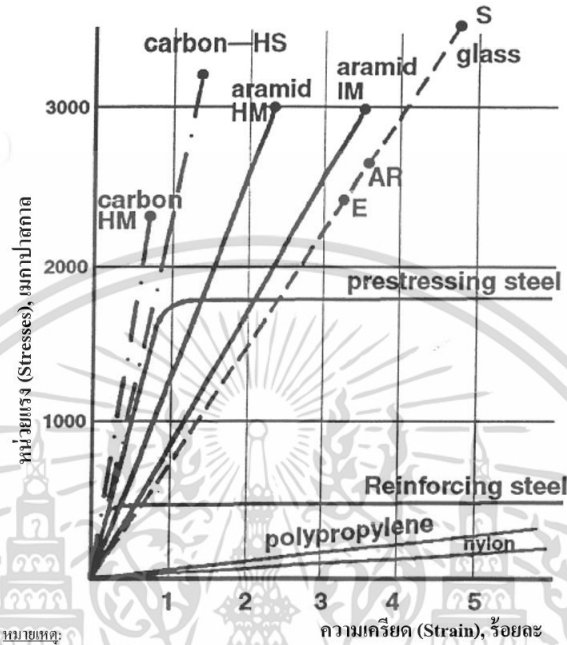
ผลกระทบของความยาวเส้นใยต่อคุณสมบัติของแผ่นเสริมกำลัง ตำแหน่งการวางเส้นใยมีผลมาจากทั้งกรณีเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fibers) และเส้นใยสั้น (Short Fibers) นอกจากนี้ที่กล่าวไปข้างต้นโดยนัยทางโครงสร้างผู้ออกแบบอาจพบข้อจำกัด ของชิ้นส่วนหรือข้อจำกัดในกระบวนการผลิต และอาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัด หรือรูปร่างของหน้าตัดวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ความหลากหลายของผู้ผลิตเส้นใยต่อเนื่อง อาจทำให้เป็นไปได้ที่จะควบคุมเส้นใยให้มีหน่วยแรงเท่าๆกันตลอดความยาวขณะขึ้นรูป ชิ้นส่วนโดยที่ไม่ใช้มาตรการอื่นเป็นพิเศษ การยึดเหนี่ยวบริเวณรอยต่อวัสดุคอมโพสิต เสริมเส้นใยมีความต้านทานต่อหน่วยแรงสูงกว่าวัสดุตั้งต้นเดิมเนื่องจากเมทริกซ์และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยจะมีการกระจายหน่วยแรงภายใต้แรงกระทำภายนอก การกระจายของหน่วย แรงในโครงสร้างคอมโพสิตขึ้นอยู่กับธรรมชาติและประสิทธิภาพของแรงยึดเหนี่ยว อาจต้องพิจารณาถึงกระบวนการทางเคมีและเชิงกลที่ใช้กันได้กับสภาพทางโครงสร้างที่กำหนด สารเชื่อมต่ออาจใช้เพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างเส้นใยเสริมกำลังและเมทริกซ์ ทั้งนี้รอยต่อระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มักจะเป็นการถ่ายแรงเฉือนเมื่อวัสดุคอมโพสิต อยู่ภายใต้แรง กระทำ ข้อพิจารณาในการออกแบบ การออกแบบโครงสร้างและชิ้นส่วนคอมโพสิตเสริมเส้นใยไม่สามารถทำเป็นตัวอย่าง สำเร็จรูปได้ถึงแม้ว่า ได้ทำการวิเคราะห์หน่วยแรง (Classical Stress Analysis) และวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีราคาสูงเมื่อเทียบตามน้ำหนัก อย่างไรก็ตามมักมีราคาไม่ต่างจากวัสดุอื่นมากนักเมื่อเทียบตามกำลังรับน้ำหนักที่รับได้ (เช่น บาทต่อหนึ่งหน่วยกำลังรับน้ำหนักที่รับได้) มอดูลัสของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยจะต่ำกว่า วัสดุที่ใช้กันทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญยกเว้นกรณีเส้นใยคาร์บอนชนิดมอดูลัสสูง ดังนั้น ผู้ออกแบบควรต้องคำนึงถึงรูปร่าง การคัดเลือกเส้นใย การวางเส้นใย หรือการผสมกับเส้นใย อื่นๆ ในการออกแบบด้วย ข้อควรพิจารณาสำหรับการออกแบบโดยทั่วไปมีรายละเอียดดังนี้ วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก และสามารถจัดวางทิศทางให้ตรงตาม ทิศทางการรับน้ำหนักที่ต้องการได้ การออกแบบมีอิสระค่อนข้างมาก มีความหลากหลายของความหนาและรูปร่างของชิ้น ส่วนประกอบซึ่งสามารถขึ้นรูปให้เป็นชิ้นส่วนตามที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบทั่วไป วัสดุคอมโพสิตมีกำลังรับแรงดึงสูงมาก แต่มีสติฟเนสค่อนข้างต่ำ ยกเว้นในกรณีเสริมเส้นใยคาร์บอน ดังนั้น ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงผลของแรงกระแทกและความเปราะของระบบ ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบมีรายละเอียดต่อไปนี้ ออกแบบให้มีสติฟเนส (Stiffness) มากที่สุดโดยใช้ปริมาณวัสดุน้อยที่สุด ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิกของวัสดุและทิศทางการวางตัวของเส้นใย แต่ต้องระมัดระวังให้กระบวนการผลิตเข้ากันได้กับวัสดุที่ออกแบบ ใช้ประโยชน์จากขอบเขตสูงสุดของความเครียดของแผ่นเสริมกำลัง การยึดตัวของเรซิน เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกเมทริกซ์เรซินสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามต้องระวังผลกระทบเนื่องจากรอยร้าวจากหน่วยแรง และการกัดกร่อนทางเคมีหรือ โดยสภาวะแวดล้อม ซึ่งอาจลดสมรรถนะในระยะยาว และอาจจำเป็นต้องออกแบบโดย เพื่อความปลอดภัยมากขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถทนต่อผลกระทบจากการคืบ (Creep) การ แตกร้าว การบ่ม (Aging) และสารละลายที่เป็นอันตราย (Deleterious Solution) เป็นต้น ต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านการคืบ และความล้า (Fatigue) ของแผ่นเสริมกำลังภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent Loads)

การพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติที่ยอมรับได้ เมทริกซ์ควรจะสามารถรับความเครียดได้สูงกว่าเส้นใยเสริมกำลัง พลังงานที่สะสมไว้ที่จุดแตกหัก (Energy Stored at Failure) ซึ่งเป็นพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรง ควรจะมีค่ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เนื่องจากเป็นสิ่ง ที่แสดงถึงความเหนียวของคอมโพสิต (Toughness) ดังรายละเอียดข้างต้น ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงสำหรับ เส้นใย ต้องพิจารณาเส้นใยแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมโครงสร้างเพื่อให้มี ระยะยืดและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงตามที่ต้องการ รูปแสดง ช่วงของคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ



รูปที่ 2.5 รูปแสดงพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใย

หัวข้อพิจารณา	เส้นใยคาร์บอน	เส้นใยแก้ว	เส้นใยอะรามิด
การทนกรด/ด่าง	ทนทานมาก	ไม่ทน	ไม่ทน
การยืด/หดตัวตามอุณหภูมิ	เกือบไม่ยืด/หด (ทำให้หน่วยแรงยืดเหนียวสูง)	ใกล้เคียงคอนกรีต	เกือบไม่ยืด/หด (ทำให้หน่วยแรงยืดเหนียวสูง)
การนำไฟฟ้า	นำไฟฟ้าได้ดี	เป็นฉนวน	เป็นฉนวน
ทนการกระแทก	ต่ำ	สูง	สูง
การวิบัติจากการลื่นและความล้า(Fatigue)	ทนทานมาก	ทนทานต่ำ	ทนทานต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของเส้นใยภายใต้แรงดึง

ชนิดของเส้นใย	มอดุลัสยืดหยุ่น (กิกะปาสกาล)	กำลังรับแรงดึง (เมกะปาสกาล)	ความเครียดประลัยขั้นต่ำ (%)
เส้นใยคาร์บอน			
เอนกประสงค์	220-240	2050-3790	1.2
กำลังสูง	220-240	3790-4820	1.4
กำลังสูงมาก	220-240	4820-6200	1.5
มอดุลัสสูง	340-520	1720-3100	0.5
มอดุลัสสูงมาก	520-690	1380-2400	0.2
เส้นใยแก้ว			
เอนกประสงค์	69-72	1860-2680	4.5
กำลังสูง	86-90	3440-4140	5.4
เส้นใยอะรามิด			
เอนกประสงค์	69-83	3440-4140	2.5
ประสิทธิภาพสูง	110-124	3440-4140	1.6

2.7.3 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน

เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers) เส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในท้องตลาดผลิตได้จาก 3 แหล่ง ได้แก่ น้ำมันดิน (Pitch) พอลิอะครีโลไนทริล (Polyacrylonitrile: PAN) และเรยอน (Rayon) คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้าง โมเลกุล และระดับของความบกพร่อง (Degree of Freedom from Defects) การขึ้นรูปของเส้นใย คาร์บอนต้องผลิตภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส (1,830 องศาฟาเรนไฮต์) ณ อุณหภูมินี้ เส้นใยสังเคราะห์โดยส่วนใหญ่จะหลอมเหลวและกลายเป็นไอ อย่างไรก็ตามอะคริลิกจะไม่หลอมเหลวและไม่กลายเป็นไอและโครงสร้างโมเลกุลจะรักษาสภาพอยู่ขณะทำปฏิกิริยาคาร์บอนเซชันภายใต้อุณหภูมิสูง (High-Temperature Carbonization) เส้นใยคาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยชนิด I ชนิดมอดุลัสสูง (High Modulus Type I) และเส้นใยชนิด II ชนิดกำลังสูง (High Strength Type II) ความแตกต่างของคุณสมบัตินี้ระหว่างเส้นใยชนิด I และชนิด II เกิดมาจากความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย (Fiber Microstructure)

คุณสมบัตินี้เกิดมาจากการเรียงตัวของโครงข่ายเป็นชั้นแบบกราฟีนหรือรูปหกเหลี่ยม (Graphene [Hexagonal] Layer Network) ซึ่งมักพบในกราไฟต์ (Graphite) ถ้าชั้นเหล่านี้เรียงตัวกันเป็นชั้นสามมิติ จะเรียกว่า กราไฟต์ แต่ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นแต่ละชั้นต่ำและเกิดเป็นชั้นสองมิติจะเรียกว่า คาร์บอน เส้นใยคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นการจัดเรียงสองมิติ เส้นใยคาร์บอนชนิดมอดุลัสสูงซึ่งมีค่ามอดุลัสถึงประมาณ 200 กิกะปาสกาล (30×10^6 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว) ต้องประกอบด้วยชั้นกราฟีนแข็งเรียงตัวในทิศทางขนานกับแกนของเส้นใย เรยอนและสารตั้งต้นน้ำมันดินแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Pitch Precursor) จะใช้ในการผลิต เส้นใยคาร์บอนมอดุลัสต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ประมาณ 50 กิกะปาสกาล หรือ 7×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในขณะที่กรณี PAN และสารตั้งต้นน้ำมันดินเหลวเนื้อผลึก (Liquid Crystalline Pitch Precursor) จะใช้ในการผลิตเส้นใยคาร์บอนมอดุลัสสูง โดยกระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้อุณหภูมิเกิน 800 องศาเซลเซียส (1400 องศาฟาเรนไฮต์) มอดุลัสของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นโดยการให้ความร้อนจาก 1000 ถึง 3000 องศาเซลเซียส (1830 ถึง 5430 องศาฟาเรนไฮต์) ผลของกระบวนการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ กำลังของ เส้นใยจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส (2730 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับ PAN และเส้นใย

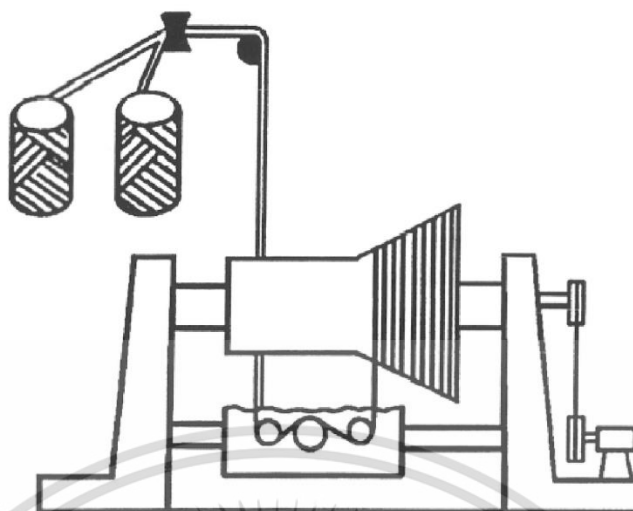
จากสารตั้งต้นของน้ำมันดิน (Pitch Precursor Fiber) แต่จะเพิ่มขึ้นสำหรับเส้นใยซึ่งผลิตจากสารตั้งต้น ของน้ำมันดินชนิดเมโซเฟส (Mesophase or Anisotropic Pitch Precursor Fiber) การเรียงตัวตามแนวแกนที่ต้องการของชั้นกราฟีนในเส้นใยคาร์บอนจะเป็นตัวกำหนดค่ามอดุลัส ของเส้นใย เส้นใยตามแนวแกนและเส้นใยตามแนวรัศมีและช่องว่างจะมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของ เส้นใย การเรียงตัวของชั้นกราฟีนที่ผิวเส้นใยจะช่วยเพิ่มกำลังและลดการตึงผิว (Wetting) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ เส้นใยคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกับเรซินได้ค่อนข้างยากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยมอดุลัสสูง การปรับปรุงผิวเพื่อเพิ่มกลุ่มสารเคมีที่มีความไวต่อปฏิกิริยา (และบางครั้งเพื่อทำให้ผิวเส้นใยหยาบขึ้น) ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับวัสดุเมทริกซ์เรซินบางชนิด การขนส่งเส้นใยคาร์บอนมักจะมีการปรับปรุงผิวเพื่อป้องกันการขัดถู (Abrasive) การจับต้อง (Handling) และทำให้มีการยึดเหนี่ยวได้กับเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีค่าใกล้เคียงกับกำลังของเมทริกซ์เรซิน สำหรับ เส้นใยมอดุลัสต่ำ อย่างไรก็ตามสำหรับเส้นใยมอดุลัสสูงซึ่งผลิตจาก PAN มีค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าเมทริกซ์เรซินอย่างเห็นได้ชัด ความเสียหายของเส้นใยมอดุลัสสูงจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิว เช่นเดียวกับบอระฆามิต รูปแบบของเส้นใยคาร์บอนในท้องตลาด เส้นใยคาร์บอนในท้องตลาดจะอยู่ในรูปแบบโทว์ (Tow)1 หรือมัดของเส้นใย (Bundles of Parallel Fibers) จำนวนเส้นใยในแต่ละโทว์ประมาณ 1000 ถึง 200000 เส้นใย เส้นใย คาร์บอนอาจผลิตในรูปแบบพรีเพรก หรือแผ่นเสริมกำลังทิศทางเดียว (Unidirectional Tow Sheet) คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยคาร์บอนมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลังที่มีในท้องตลาด

ชนิดเส้นใย	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมครอน)	ความถ่วงจำเพาะ	มอดุลัสแรงดึง กิกะปาสกาล (10 ⁶ ปอนด์/ตร.นิ้ว)	กำลังรับแรงดึง กิกะปาสกาล (10 ³ ปอนด์/ตร.นิ้ว)	ความเครียดที่จุดแตกหัก	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน 10 ⁻⁶ /°C	อัตราส่วนบัวของ
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 ^{TM 3)}	7	1.80	227 (33)	3.80 (550)	1.7	-0.1	-
Fortafil 5 ^{TM 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 ^{TM 49} ⁴⁾	11.9	1.45	131 (19)	3.62 (525)	2.8	-2.0 (ตามยาว) +59 (ตามรัศมี)	0.35
Twaron ^{TM 1055} ^{5),6)}	12.0	1.45	127 (18)	3.6 (533)	2.5	-2.0 (ตามยาว) +59 (ตามรัศมี)	0.35

กระบวนการในการขึ้นรูปการวางเส้นใยสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของกระบวนการผลิต ได้แก่ การม้วนเส้นใย (Filament Winding) เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยต่อเนื่องในรูปสเตรนด์ซึ่งขนานกันหรือเชือกเส้นใย (Parallel Strand or Rovings) แขนในเรซินเมทริกซ์ และม้วนเข้าด้วยกันด้วยแกนหมุนรูปทรงกระบอก (Rotating Cylinder) เชือกเส้นใยซึ่งแขนในเรซินแล้วจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าและด้านข้างตลอดความยาวของแกนหมุน เพื่อให้ได้ความหนา มุมของการม้วน (Wind Angle) และปริมาณของเส้นใยตามที่ต้องการ วัสดุจะได้รับการบ่มที่แกนหมุน และจะนำออกในภายหลัง แสดงดังรูปที่ 2.6 ท่อ ท่อรับแรงบิด กล้องเก็บจรวด ขวดรับแรงดัน ถังเก็บเก็บ และส่วนลำตัวของเครื่องบิน (Airplan Fuselages) มักจะใช้วิธีการนี้ในการผลิต ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างพื้นผิว ที่หมุน และเชือกเส้นใย และเมทริกซ์ จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ อาจมีการวางเส้นใยเพิ่มเติมโดยการเพิ่มเส้นใยสั้นๆ หรือ วัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มความหนาและมีราคาต่ำลง วัสดุพวกพอลิเอสเทอร์ ไวนิลเอสเทอร์ และอีพอกซีมักใช้เป็นเมทริกซ์ในการผลิต

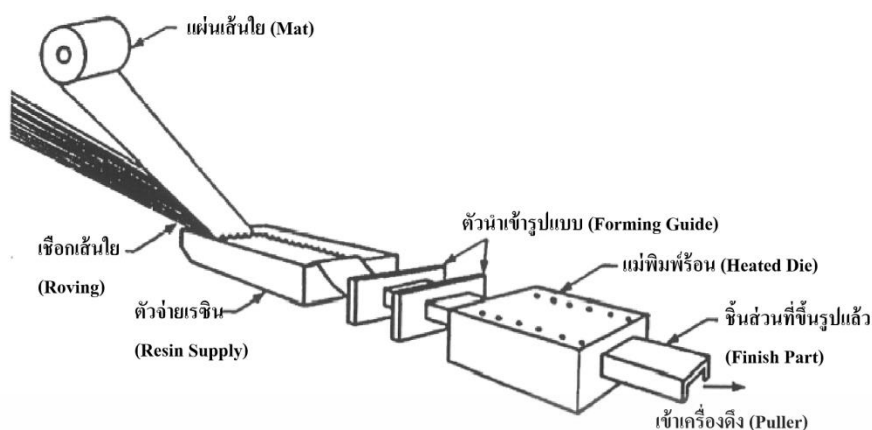
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 รูปแสดงกระบวนการม้วนเส้นใย (Filament Winding Process)

การรีดเส้นใย (Pultrusion): กระบวนการนี้สามารถผลิตเส้นใยต่อเนื่องซึ่งมีหน้าตัดคงที่ได้โดยไม่จำกัดความยาวโดยจำกัดด้วยเหตุผลด้านการขนส่งและการก่อสร้างเท่านั้น กระบวนการรีดเส้นใยทำโดยใช้เส้นใยต่อเนื่องผ่านชุดของครีล (Creel) เชือกเส้นใยที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตจะถูกดึงผ่านเมทริกซ์เรซิน ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารทำให้แข็งตัว และสารผสมเพิ่มอื่นๆ เรซินเหลวส่วนเกินจะถูกขจัดออกและส่งคืนกลับไปยังอ่างในขณะที่เชือกเส้นใยที่ชุ่มด้วยเรซิน แล้วจะถูกส่งเข้าสู่แม่พิมพ์สำหรับรีดเส้นใย (Pultrusion Die) แม่พิมพ์เหล่านี้ส่วนใหญ่มีความยาวประมาณ 0.9 ถึง 1.3 เมตร (36 ถึง 48 นิ้ว) และให้ความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าหรือโดยน้ำมันร้อน ในบางกรณีอาจใช้เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio-Frequency [RF] Preheat Cabinet) เพื่อให้ง่ายต่อการบ่มชิ้นส่วนที่มีความหนาแน่นมาก ลักษณะกระบวนการทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปแล้วสามารถผลิตได้ประมาณ 0.9 เมตรต่อนาที (36 นิ้วต่อนาที) หน้าตัดที่หนาหรือรูปร่างซับซ้อนจะต้องใช้เวลาในการบ่มให้สมบูรณ์มากกว่าหน้าตัดบาง กระบวนการรีดเส้นใยมักใช้เรซินชนิดพอลิเอสเตอร์เรซิน และไวนิลเอสเตอร์เป็นเมทริกซ์หลักในการผลิต ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยวิธีการนี้ได้แก่ แท่งสำหรับสูบน้ำมัน (Oil Well Sucker Rods) เเทนดอน (Tendons) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงทั้งชนิดอัดแรงก่อนและอัดแรงหลัง อุปกรณ์ดิ่งแบบสำหรับคอนกรีต (Concrete Formties) ชิ้นส่วนของเครื่องขุดเจาะน้ำมัน โรงงานผลิตสารเคมี ลูกกรง (Gratings) วัสดุเคลือบผิวราว (Third Rail Cover) เพลารถยนต์ (Automobile Drive Shaft) สมอยึดดิน (Ground Anchor) และไทแบ็ก (Tie Back) เช็มพิต (Sheet Piling) และชิ้นส่วนกรอบหน้าต่าง

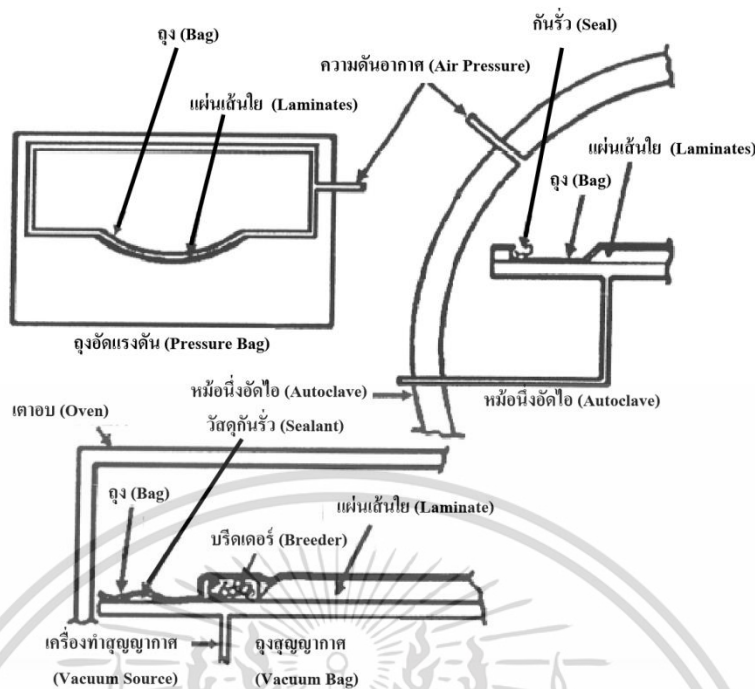
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 รูปแสดงกระบวนการรีดเส้นใย (Pultrusion Process)

กระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ (Vacuum Compaction Processes): กลุ่มของกระบวนการผลิตแบบนี้ใช้ความดันบรรยากาศในการผลิตโดยการดูดอากาศที่กักเก็บไว้ออกเพื่อให้เกิดแรงอัดและทำให้แผ่นเส้นใยซึ่งยังไม่บ่มเกิดความแน่น กระบวนการผลิตบางรูปแบบเส้นใยจะถูกแช่ในเรซินก่อนที่จะวางลงในแบบหล่อเป็นชั้นตั้งแต่หนึ่งชั้นขึ้นไป แผ่นฟิล์มปิดผิวยืดได้ (Coving Sheet of Stretchable Film) จะถูกวางลงบนแผ่นเส้นใยและยึดให้แน่นกับแบบหล่อ หลังจากนั้นใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศทำให้เกิดภาวะสุญญากาศใต้บริเวณที่ปิดด้วยแผ่นฟิล์ม ทำให้แผ่นฟิล์มกดตัวลงบนแผ่นเส้นใยเพื่อทำให้แผ่นเส้นใยแน่น อากาศภายในจะถูกกำจัดออกจากรอยต่อระหว่างชั้นของเส้นใย ถ้ามีการให้ความร้อนเมทริกซ์เรซินก่อนด้วยวิธีการที่เหมาะสม (เช่น ตะเกียงอินฟราเรดแบบหล่อให้ความร้อน หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Steam Autoclave) เป็นต้น) ความหนืดของเรซินจะลดต่ำลง เพิ่มความหนาแน่นของเรซินก่อนที่เรซินจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นโดยกระบวนการบ่ม กระบวนการผลิตอื่นๆ อาจใช้สุญญากาศในการอัดเส้นใยแห้งให้แน่นในแบบหล่อ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เรซินไหลเข้าสู่ช่องว่างที่เป็นสุญญากาศระหว่างเส้นใย ซึ่งค่อนข้างทำได้ ยากในทางปฏิบัติ มีการปรับปรุงวิธีการนี้เพื่อให้เรซินไหลเข้าสู่กลุ่มเส้นใยที่อัดแล้ว วิธีการโดยส่วนมากที่ใช้ประโยชน์จากการกระจายของเรซิน และวิธีโพสิทีฟสปেসซิง (Positive Spacing Method) เพื่อควบคุมการยึดตัวของฟิล์มจากการจับยึดให้เรซินไหลเข้ามาก่อน การบ่มเรซินสามารถทำได้โดยวิธีการเดียวกับที่กล่าวข้างต้น ปัจจุบันมีการใช้วิธีการนี้สำหรับแบบหล่อขนาดใหญ่ โดยไม่จำเป็นต้องมีการบีบอัดแบบหล่อ และเป็นเครื่องมือที่ใช้งานเพียงด้านเดียว (Single-Sided Tool) กระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปแสดงกระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ (Vacuum Compaction Process)

กระบวนการแบบหล่อประกบ (Matched Mold Processes): ระบบนี้สามารถใช้ในการผลิตวัสดุได้หลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามมีลักษณะเฉพาะดังนี้ แบบหล่อเป็นตัวกำหนดรูปร่างและความหนาของชิ้นส่วน ดังนั้นจึงสามารถผลิตชิ้นส่วน แต่ละชิ้นได้หลายครั้ง ในกรณีส่วนใหญ่จะหมายถึงการบีบอัดของบางแบบ มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดที่สามารถบีบอัดได้ พื้นที่ราบ และช่องเปิดในทางปฏิบัติ แรงที่บีบอัดจะขึ้นอยู่กับระบบวัสดุที่ผลิตโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.21 ถึง 6.21 เมกาปาสกาล (30 ถึง 900 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) การหล่อเรซิน (Resin Transfer Molding: RTM) ใช้แรงบีบอัดอยู่ในช่วงค่าต่ำ แต่การหล่อแผ่นเส้นใยประกอบ (Sheet Molding Compound) อาจต้องใช้แรงบีบอัดสูงขึ้น โดยทั่วไประบบนี้จะใช้เส้นใยสั้นๆ ในการผลิตเป็นกลุ่มเส้นใยสามมิติทำให้ มีคุณสมบัติเป็นแบบควอไซโอโทรอปิก และมีค่าน้อยกว่ากลุ่มเส้นใยต่อเนื่องแบบแอนไอโซโทรอปิก คุณสมบัติเชิงกลและวิธีการทดสอบ (Mechanical Properties and Test Method) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของแท่ง FRP (FRP bars) หรือเทนดอน FRP (FRP Tendons) ได้แก่ (1) แท่ง FRP มีลักษณะเป็นแอนไอโซโทรอปิก (Anisotropic) โดยมีแกนหลัก (Strong Axis) เป็นแกนตามยาวของแท่ง FRP และ คุณสมบัติเชิงกลของ FRP ของแต่ละผู้ผลิตมีความ หลากหลายและแตกต่างกันมากซึ่งแตกต่างจากเหล็ก

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของ FRP ได้แก่ ปริมาตรของเส้นใยและเรซิน ชนิดของเส้นใยและเรซิน ทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Fiber Orientation) ผลกระทบทางมิติ (Dimensional Effects) และการควบคุมคุณภาพในการผลิต นอกจากนี้ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยอาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆเช่นเดียวกับวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป เช่น ผลจากประวัติและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเวลาของการรับน้ำหนักบรรทุก อุณหภูมิ และ ความชื้น มาตรฐานการทดสอบทั่วไปพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ประเมินคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานก่อสร้างทั่วไป เช่น เหล็ก คอนกรีต เป็นต้น แต่อาจไม่สามารถใช้สำหรับการทดสอบ FRP ได้

นอกจากนี้การใช้งานวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยในงานโครงสร้างยังอยู่ในระยะเริ่มต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบสภาพ น้ำหนักบรรทุกแท้จริงเพื่อปรึกษาผู้ผลิตในการประเมินลักษณะเฉพาะของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการใช้งานข้างต้น ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ค่าความถ่วงจำเพาะของแท่ง FRP และกลุ่มเส้นใย FRP อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 ซึ่งเบากว่า เหล็กประมาณ 4 เท่า เนื่องจากน้ำหนักเบาทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและจัดเก็บ รวมถึงลดเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บ การขนย้ายและการติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้าง เทียบกับเหล็กเสริม ทั่วไป และข้อได้เปรียบนี้ควรคำนึงถึงในการประเมินราคาเพื่อเลือกวัสดุที่ใช้ การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion) คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุคอมโพสิตชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยเหล็กเสริมทำหน้าที่ เสริมกำลังรับน้ำหนักและคอนกรีตทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ และพฤติกรรมภายใต้หน่วยแรง เนื่องจากความร้อนของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าใกล้เคียงกันทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แตกต่างไม่มากนัก

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (Linear Coefficient of Thermal Expansion) ของคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 6×10^{-6} ถึง 11×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส (4×10^{-6} ถึง 6×10^{-6} ต่อองศาฟาเรนไฮต์) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุ FRP มีค่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) แท่ง FRP และกลุ่มเส้นใย FRP จะรับแรงจนถึงจุดประลัยโดยไม่มีพฤติกรรมของจุดคลาก (Yielding) คุณสมบัติของ FRP ซึ่งครอบคลุมวัสดุ FRP บางส่วนที่ใช้กันทั่วไปในท้องตลาด เปรียบเทียบกับเหล็กเสริมและลวดอัดแรง (Steel Tendons) โดย คุณสมบัติเชิงกลของ FRP ประเมินจากคุณสมบัติในทิศทางตามยาว (Longitudinal Axis or Strong Axis)

กำลังรับแรงดึงของแท่ง FRP ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งแตกต่างจากกรณี เหล็กเสริม ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายของหน่วยแรงไม่เท่ากันทั้งหน้าตัด (Shear Lag) ทำให้ เส้นใยซึ่งอยู่บริเวณช่วงกลางหน้าตัดจะมีหน่วยแรงน้อยกว่าเส้นใยที่อยู่บริเวณขอบ เป็นเหตุให้ค่ากำลังรับน้ำหนักและประสิทธิภาพในการรับแรงลดลงในแท่ง FRP ที่มี ขนาดใหญ่ เช่น วัสดุเสริมกำลังชนิดเส้นใยแก้ว (GFRP) ซึ่งผลิตโดยผู้ผลิตหนึ่งจากประเทศ สหรัฐอเมริกา มีช่วงของกำลังรับแรงดึงประมาณ 480 เมกาปาสกาล (70 กิโลปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว) สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.7 มิลลิเมตร (No.9) ถึง 890 เมกาปาสกาล (130 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร เทนดอน FRP (FRP Tendon) บางครั้งสามารถสร้างจากสแตนด์เส้นใยแก้วชนิด S-2 Glass หรือ แท่งเส้นใยคาร์บอนจากกระบวนการรีด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 4 มิลลิเมตร (0.125 ถึง 0.157 นิ้ว) ซึ่งกำลังรับแรงดึงประลัยของเทนดอนเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับ ลวดอัดแรง สำหรับเทนดอนเส้นใยแก้ว (GFPR Tendons) กำลังรับแรงดึงประลัยมี ค่าประมาณ 1380 ถึง 1724 เมกาปาสกาล (200 ถึง 250 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในขณะที่เทนดอนเส้นใยคาร์บอน (CFPR Tendons) มีค่าอยู่ในช่วง 1862 ถึง 2070 เมกาปาสกาล (270 ถึง 300 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) มอดูลัสแรงดึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Tensile Elastic Modulus) ตามตารางที่ 2.8 ซึ่งให้เห็นว่ามอดูลัสแรงดึงของแท่ง GFRP มีค่าประมาณร้อยละ 25 ของ เหล็ก มอดูลัสของเทนดอน CFRP มีค่าสูงกว่ามอดูลัสของแท่ง GFRP

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวแกนของวัสดุต่างๆ

คุณสมบัติ	เหล็ก เสริม	ลวดพัน เกลียว	แท่ง GFRP	เทนดอน (Tendons)		
				GFRP	CFRP	AFRP
กำลังรับแรงดึง, เมกาปาสกาล (กิโลปอนด์/ตร.นิ้ว)	483-690 (70-100)	1379-1862 (200-270)	517-1207 (75-175)	1379-1724 (200-250)	165-2410 (240-350)	1200-2068 (170-300)
กำลังรับแรงคลาก, เมกาปาสกาล (กิโลปอนด์/ตร.นิ้ว)	276-414 (40-60)	1034-1396 (150-203)	ไม่สามารถหาจุดคลากได้			
มอดูลัสแรงดึง, กิกะปาสกาล (10^6 ปอนด์/ตร.นิ้ว)	200 (29)	186-200 (27-29)	41-55 (6-8)	48-62 (7-9)	152-165 (22-24)	50-74 (70-110)
ความเครียดดึงที่จุดประลัย, มม./มม.	>0.10	>0.04	0.035-0.05	0.03-0.045	0.01-0.015	0.02-0.026
กำลังรับแรงอัด, เมกาปาสกาล (กิโลปอนด์/ตร.นิ้ว)	276-414 (40-60)	ไม่มี	310-482 (45-70)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจาก อุณหภูมิ, 10 ⁻⁶ ต่อองศาเซลเซียส (10 ⁻⁶ ต่อองศาฟาเรนไฮต์)	11.7 (6.5)	11.7 (6.5)	9.9 (5.5)	9.9 (5.5)	0.0 (0.0)	-1.0 (-0.5)
ความถ่วงจำเพาะ	7.9	7.9	1.5-2.0	2.4	1.5-1.6	1.25

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) แท่ง FRP จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ากำลังรับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากความยุ่งยากในการ ทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยภายใต้แรงอัดตามแนวแกน ให้ความความแม่นยำ การจับยึด และวิธีการจัดตำแหน่ง รวมถึงเสถียรภาพของเส้นใย อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของวัสดุ คอมโพสิต FRP ไม่ใช่คุณสมบัติหลักในการประยุกต์ใช้งานโดยส่วนใหญ่ กำลังรับแรงอัด ขึ้นอยู่กับลักษณะแท่งเสริมกำลังว่าเป็นแบบเรียบหรือมีสัน (Rib) ด้วย กำลังรับแรงอัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 317 ถึง 470 เมกาปาสกาล(46 ถึง 68 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับแท่งเสริมกำลัง GFRP ที่มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 552 ถึง 896 เมกาปาสกาล (80 ถึง 130 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) กำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแท่งเสริมกำลังมีกำลังรับแรงดึงสูงขึ้น มอดูลัสแรงอัด (Compressive Elastic Modulus) ความแข็งเกร็งด้านแรงอัด (Compressive Stiffness) ของแท่งเสริมกำลัง FRP ขึ้นอยู่กับ ขนาด ชนิด การควบคุมคุณภาพในการผลิต และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ แท่งตัวอย่างซึ่งแตกต่างจากความแข็งเกร็งด้านแรงดึง โดยทั่วไปมอดูลัสแรงอัดจะมีค่าต่ำกว่า มอดูลัสแรงดึง จากผลการทดสอบตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยเส้นใยแก้วต่อเนื่องชนิด E-Glass ร้อยละ 55 ถึง 60 โดยปริมาตรในเมทริกซ์ของไวนิลเอสเตอร์ หรือไอโซพทาสิกเรซิน จะมีค่ามอดูลัสอยู่ในช่วง 34 ถึง 48 กิกะปาสกาล (5000 ถึง 7000 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ผู้ผลิตอื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานว่ามีมอดูลัสแรงอัดของเส้นใยมีค่าประมาณ 34 กิกะปาสกาล (5000 กิโล ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 77 ของค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุเดียวกัน

กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) โดยทั่วไปกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุคอมโพสิตมีค่าต่ำมาก เช่น แท่ง FRP สามารถตัดขาด ด้วยเลื่อยธรรมดาโดยง่ายในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของเส้นใย ข้อด้อยนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการวางแท่ง FRP ในทิศทางที่แรงกระทำเกิดตามแนวแกน การทดสอบแรงเฉือนสามารถ ทดสอบโดยวิธีการ Isoipescu Test ซึ่งพัฒนาขึ้นและใช้ทดสอบคุณสมบัติด้านแรงเฉือนของแท่งเดือย FRP (FRP Dowel Bars) เป็นจำนวนมากกว่า 200 ตัวอย่าง การคืบและความเสียหายจากการคืบ (Creep and Creep Rupture) เส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนมีความทนทานต่อการคืบสูง ในขณะที่เกิดการคืบอาจมี ปัญหาต่อเรซินโดยส่วนใหญ่

ดังนั้นการเรียงตัวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยเป็นปัจจัยที่มีผล อย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะต่อการคืบของแท่งเสริมกำลังหรือเทนดอน มีรายงานการศึกษา กับแท่ง GFRP คุณภาพสูง พบว่าความเครียดที่เกิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคืบมีค่าประมาณร้อยละ 3 ของค่าความเครียดอีลาสติกเริ่มต้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกและสภาพแวดล้อมซึ่งเป็นอันตราย แท่ง FRP หรือเทนดอนซึ่งอยู่ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่อาจเกิดความเสียหายอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่ง ที่เรียกว่าเวลาของความคงทน (Endurance Time) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความเสียหายจากการคืบ (Creep Rupture) ซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุทุกชนิดรวมถึงเหล็ก ไม่วั้นแม้แต่ลวดอัดแรง (Steel Prestressing Strands) สำหรับเหล็กสามารถทนแรงดึงที่ประมาณร้อยละ 75 ของกำลังรับแรง ดึงประลัยโดยไม่เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงดึง หรือเกิดความเสียหาย

ในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงดึงที่กระทำกับกำลังรับแรงดึงในระยะสั้นของ FRP เพิ่มขึ้น เวลาของความ คงทนจะลดลง มีการทดสอบการคืบของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว (GFPR Composites) ขนาดหน้าตัดต่างๆ ในประเทศเยอรมัน พบว่าความเสียหายจากการคืบจะไม่เกิดขึ้นถ้าหน่วย แรงกระทำมีค่าไม่เกินร้อยละ 60 ของค่ากำลังรับแรงระยะสั้น สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหน่วยแรงกระทำที่มีค่าเกินกว่านี้มักไม่มีความจำเป็น เนื่องจากหน่วยแรงกระทำในวัสดุเสริมกำลังมักมีค่าไม่เกินร้อยละ 60 อย่างไรก็ตามควร ระมัดระวังการใช้งานวัสดุคอมโพสิต FRP สำหรับกรณีเทนดอนที่ใช้อัดแรง และต้อง ระมัดระวังปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ความชื้น ซึ่งทำให้สูญเสียสมรรถนะต่อการคืบและลด ระยะเวลาของความคงทนลง

การทดสอบได้กระทำโดยให้น้ำหนักทดสอบเป็นร้อยละ 50 ของค่ากำลังรับน้ำหนักประลัย และแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ ทดสอบระยะสั้น (48 ชั่วโมง) และทดสอบระยะ ยาว (1 ปี) และทำการทดสอบกับเทนดอน GFRP และเทนดอน CFRP ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า แท่งตัวอย่างมีการคืบเพียงเล็กน้อย มอดูลัสแรงดึงและกำลังรับแรงดึงประลัยภายหลังจากการ ทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญความล้า (Fatigue) แท่ง FRP มีความทนทานต่อความล้าที่ดี ผลงานวิจัยส่วนมากได้ทำการทดสอบเส้นใยที่มี ค่ามอดูลัสสูง (เช่น อะรามิต และคาร์บอน) ภายใต้แรงดึงเป็นวัฏจักรซึ่งใช้กับยานอวกาศ ระหว่างการทดสอบได้ให้แรงกระทำถึง 10 ล้านรอบ พบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมโพสิตชนิดคาร์บอน-อีพอกซี มีกำลังรับความล้าได้ดีกว่าเหล็ก ในขณะที่กำลังรับความล้าของคอมโพสิตชนิดเส้นใยแก้วจะมีค่าต่ำกว่าเหล็กในกรณีอัตราส่วนหน่วยแรงเดียวกันต่ำ (Low Stress Ratio)

งานวิจัยโดย Porter et al, 1993 แสดงว่าแท่งเดือย GFPR มีความต้านทานต่อความล้าดีภายใต้แรงเฉือนกระทำเป็นวัฏจักรถึง 10 ล้านรอบ นอกจากนี้มีงานวิจัยศึกษาแท่ง GFPR ซึ่งใช้สำหรับงานอัดแรง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เป็นวัฏจักรโดยมีหน่วยแรงสูงสุด 496 เมกะปาสกาล (72 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และมีช่วงค่าหน่วยแรง (Stress Range) 345 เมกะปาสกาล (50 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าแท่ง GFPR สามารถทนน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า 4 ล้านรอบ ก่อนจะเกิดความเสียหายบริเวณตำแหน่งจับยึดเทนตอน CFRP มีความทนทานต่อความล้าที่ดี โดยทำการทดสอบความล้าภายใต้แรงดึง เพียงอย่างเดียวถึง 2 ล้านรอบ หน่วยแรงเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบมีค่าประมาณร้อยละ 60 ของกำลังรับแรงดึงเฉลี่ย โดยมีค่าหน่วยแรงต่ำสุดและสูงสุดเป็นร้อยละ 55 และ 64 ของกำลังรับแรงดึง ปล่อยให้ตามลำดับ พบว่ามอดูลัสของเทนตอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ช่วงเวลาที่แรงกระทำ และประวัติการรับน้ำหนัก อุณหภูมิ และความชื้น ปัจจัยเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกันและยากที่จะ ประเมินผลกระทบของแต่ละปัจจัยในขณะที่รักษาปัจจัยอื่นให้คงที่ ความชื้น วัสดุคอมโพสิตที่มีการดูดซึมความชื้นมากเกินไปจะทำให้สูญเสียกำลังรับน้ำหนักและความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ การดูดซึมความชื้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเรซิน และทำให้เกิดการบวมและการบดองของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตจะต้องประเมินภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันกับที่วัสดุใช้งาน อย่างไรก็ตามมีเรซินบางประเภทซึ่งมีความต้านทานความชื้นซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่คาดว่าจะต้องสัมผัสความชื้น ตลอดเวลา ในเขตหนาวจะต้องพิจารณาผลของการละลาย-การแข็งตัวของน้ำ (Freeze-Thaw Cycle) ประกอบด้วย ไฟและอุณหภูมิ วัสดุคอมโพสิตหลายชนิดมีคุณสมบัติดีเยี่ยมภายใต้อุณหภูมิสูง วัสดุคอมโพสิตโดยส่วนใหญ่จะไม่ถูกเผาไหม้โดยง่าย อุณหภูมิสูงจะมีผลต่อเรซินมากกว่าเส้นใย เรซินซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากจะสามารถติดไฟได้ และมีผลงานวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อพัฒนาเรซินชนิดทนไฟ

การทดสอบในประเทศเยอรมันได้แสดงให้เห็นว่าแท่งเส้นใยแก้วชนิด E-Glass มีกำลังรับน้ำหนักเหลือร้อยละ 85 ของกำลังรับน้ำหนัก ภายใต้อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (570 องศาฟาเรนไฮต์) โดยมีหน่วยแรงทดสอบประมาณร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงดึง ในขณะที่สมรรถนะดังกล่าวดีกว่าเหล็กอัดแรง แต่กำลังรับน้ำหนักจะลดลงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียง เหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปัญหาของไฟสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมวัสดุคอมโพสิต FRP แตกต่างจากกรณีวัสดุ คอมโพสิตได้รับเพลิงไหม้โดยตรง ในกรณีนี้คอนกรีตจะทำหน้าที่ป้องกัน FRP จากการ สัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิภายในชั้นส่วนสูงขึ้น คุณสมบัติเชิงกลของ FRP จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นแนะนำให้ผู้ใช้ตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับ สมรรถนะของระบบ FRP และเรซินที่อุณหภูมิสูงในกรณีที่มีโอกาสเกิดเพลิงไหม้ได้มาก วัสดุอัดตราไวโอเลต วัสดุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมโพสิตสามารถถูกทำลายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเมื่อรับแสงอาทิตย์โดยตรง รังสี เหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ ถึงแม้ว่าปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการผสมสารผสมเพิ่มเติมที่เหมาะสมเข้าไปในเรซิน แต่ความเสียหายแบบนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วน FRP ซึ่งใช้เสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตซึ่ง ไม่สัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง

การกัดกร่อนเหล็กเสริมและการขยายตัวของวัสดุเป็นเหตุให้เกิดรอยร้าวและคอนกรีตหลุด ร่อนออกมาซึ่งจะช่วยเร่งให้เกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้น ข้อดีหลักของวัสดุคอมโพสิต คือ จะไม่เกิดการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามวัสดุคอมโพสิตอาจเกิดความเสียหายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่รุนแรง แห่ง GFPR มีความทนทานต่อกรดสูงแต่จะเสื่อมสภาพได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ เป็นต่าง ได้มีการวิจัยการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงโดยเสริมสเตรนด์ชนิด เส้นใยแก้ว-อีพอกซี บางชนิดในคอนกรีตและทดสอบภายใต้การจำลองการขึ้นลงของระดับ น้ำเกลือ (Salt Water Tidal Simulation) พบว่าเมื่อได้รับน้ำมากขึ้นจะสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก [Sen et al. 1993] ถึงแม้ว่าการทดสอบนี้จะใช้ได้ไม่ได้ในกรณีทั่วไป แต่มีข้อบ่งชี้ถึงความสำคัญ ของการเลือกระบบเส้นใยและเรซินที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถทนต่อสารเคมีได้เป็นส่วน ใหญ่

การเร่งบ่ม (Accelerated Aging) ความต้องการประเมินความทนทานของวัสดุคอมโพสิตให้รู้ผลในเวลาอันสั้นสำหรับข้อมูล สภาพอากาศในระยะยาว ทำให้จำเป็นต้องสร้างวิธีการวิเคราะห์ในลักษณะเร่งการบ่มเพื่อ ทำนายความทนทานของวัสดุคอมโพสิตภายใต้สภาพแวดล้อมรุนแรง การวิจัยโดย Pilkington Bros. [Procter et al. 1982] แสดงให้เห็นว่าการทำนายการบ่มในระยะยาวโดยทดสอบใน ระยะเวลาสั้นๆภายใต้อุณหภูมิสูงมีผลสอดคล้องกับการบ่มจากสภาพอากาศจริง จากงานวิจัย เหล่านี้จึงมีการพัฒนาสมการขึ้นสองสมการเพื่อใช้ประเมินการเร่งบ่มของวัสดุคอมโพสิต สมการแรกใช้ประเมินปัจจัยความเร่ง (Acceleration Factor) จากอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีภายใต้สภาพอากาศเฉพาะ สมการที่สองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในอ่างทดสอบ (Bath Temperature) และจำนวนวันที่ใช้ในการเร่งบ่มต่อจำนวนวันในอ่างทดสอบ [Lorenz 1993, Porter et al. 1992] โดยใช้สมการทั้งสองสามารถประเมินการเร่งบ่มของแท่งเดียวของเส้นใย แก้วชนิด E-Glass เคลือบด้วยไวนิลเอสเทอร์เรซินและบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) เป็นเวลา 9 สัปดาห์ แท่งตัวอย่างถูกบ่มในน้ำ ปูนขาว (Lime) และอ่าง น้ำเกลือ พบว่าคาบของการเร่งบ่มมีค่าประมาณ 63.3 วันภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) ในสารละลายโดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพภายใต้อ่างทดสอบปูนขาว การเร่งบ่มนี้เทียบเท่ากับอายุการใช้งานประมาณ 50 ปี กลไกการจับยึด (Gripping Mechanism)

การออกแบบและการพัฒนาระบบการจับยึด (Gripping System) ที่เหมาะสมกับแท่ง FRP สำหรับ การทดสอบการรับแรงดึง และในกรณีประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงก่อน (Prestressed) หรืออัดแรงภายหลัง (Post-tensioned) เป็นปัญหาหลักสำหรับผู้วิจัยและผู้ใช้งาน เนื่องจากแท่งเสริมกำลัง FRP และเทนดอน FRP มีกำลังรับแรงในทิศทางตามขวางต่ำ แรงซึ่งเกิดจาก

การจับยึดสามารถทำให้เกิดความเสียหายเฉพาะแห่ง (Local Failure) ของ FRP บริเวณตำแหน่งจับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึด นอกจากนี้การเพิ่มความยาวในการจัดยึดเพื่อลดหน่วยแรงในบริเวณตำแหน่งจับยึดไม่เหมาะสม ในทาง ปฏิบัติสำหรับกรณีส่วนใหญ่ ตัวจับยึดชนิดใช้ซ้ำได้ (Re-Usable Grips) คิดค้นโดย GangaRao and Fuza (1992) ประกอบด้วย แผ่นเหล็ก 2 แผ่นขนาด 178x76x19 มิลลิเมตร (7.0x3.0x0.75 นิ้ว) และเขาระ่องรูปโค้งเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม (Semi-Circular Groove) โดยมี เส้นผ่านศูนย์กลางของร่องมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ แท่ง FRP ที่จะทดสอบ 3 มิลลิเมตร (0.12 นิ้ว) ทฤษฎีละเอียดเปียกนอกเหนือจากสารเคลือบชนิดทรายผสมอีพอกซีจะใช้เพื่อปิดร่อง แผ่นเหล็ก ทั้ง สองจะนำมายึดเข้าด้วยกันที่แต่ละด้านของแท่งทดสอบ วางตัวจับยึดในตัวจับ (Jaw) ของเครื่อง ทดสอบ (Universal Testing Machine)

โดยทั่วไประหว่างการทดสอบจะมีการขยับเลื่อนของแท่งทดสอบได้ เล็กน้อย แต่ข้อจำกัดนี้ไม่มีผล อย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำการทดสอบแท่งทดสอบจนเสียหาย ตามรายงานการวิจัยพบว่าตัวจับยึดนี้ สามารถใช้สำหรับการจับยึดแท่งเสริมกำลัง FRP ได้เป็นอย่างดี โดยมีการประยุกต์ใช้ยึดสลักเกลียว กำลังสูง 6 ตัวเข้ากับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่น 1 ชุด [Chen et al. 1992] วิธีการให้หน่วยแรงเคเบิล FRP โดยใช้ชัค (Chuck) 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร (0.6 นิ้ว) ได้ถูกพัฒนาขึ้น [Iyer and Anigol 1991] โดยติดตั้งชัคที่ปลายทั้งสองด้านเพื่อให้เคเบิลมีกำลัง รับน้ำหนักเต็มที่ มีงานวิจัย ซึ่งพัฒนาการจับยึดแท่ง FRP โดยการเชื่อมประสานเข้ากับท่อทองแดงด้วยอีพอกซี [Porter et al. 1992] การทดสอบแรงดึงของแท่ง FRP โดยการใช้ตัวจับยึดลักษณะนี้เพื่อลดความเสียหายของแท่ง FRP พบว่าแท่งตัวอย่างทดสอบมากกว่า 200 ตัวอย่างสามารถทดสอบได้อย่าง สมบูรณ์โดยให้มี ระยะห่างระหว่างตัวจับยึดมากพอ และค่ากำลังรับแรงดึงที่ทดสอบได้มีค่าสอดคล้อง กับกำลังรับแรง ดึงในทางทฤษฎี ทั้งนี้อยู่ในระหว่างการวิจัยเพื่อใช้ตัวจับซึ่งทำจากท่อเหล็กตีเกลียว ภายในและเชื่อม ประสานด้วยอีพอกซีชนิดเดียวกัน 1 ชุด (chuck) หมายถึง แผ่นกลมมีเกลียวสำหรับจับวัตถุที่จะต้อง กลิ้ง หรือเครื่องจับดอกสว่าน หรือเครื่องจับวัตถุ

2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิตชัย ไกรนา, 2552 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย ปริมาณ เส้นใย และกำลังอัดของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังในการรับแรงดึง และความเหนียวของคอนกรีตสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น จะทำให้เส้นใยเหล็กแบบตะขอมีประสิทธิภาพใน การทำงานที่สูงขึ้นด้วย

ชูชัย สุจิรวงศ์ และ วทัญญู ชุตติคามิ, 2549 ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกำลังดัด และพฤติกรรม ในการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ การดัด มีขนาด 10x10x40 ซม. โดยทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 30 ซม. ตัว แปรที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต ขนาดมวลรวมหยาบ ปริมาณเส้นใยเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขนาดเส้นใยเหล็กที่แตกต่างกัน จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตและการเพิ่มปริมาณการผสมเพิ่มของเส้นใยเหล็กแบบตะขอ ส่งผลต่อการรับแรงดัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็กสูงขึ้น ขนาดมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กส่งผลที่ดีต่อการรับแรงดัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กที่สูงขึ้น

ณัฐธา สกานพงษ์ ณัฐธยาน์ ก้อยชูสกุล และ ประภาทิพย์ โชคสกุลวงศ์, 2557 ศึกษารูปแบบรอยร้าว และกำลังของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยการพัฒนาแบบจำลองการรับแรงของคอนกรีต ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ที่มีปริมาณเส้นใย 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% โดยปริมาตร จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นจะพบว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะเพิ่มมากขึ้น และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและตำแหน่งของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานได้ โดยคอนกรีตจะแตกร้าวมากขึ้นแต่เป็นการแตกร้าวในลักษณะของการกระจายรอยแตกเนื่องจากเส้นใยเหล็กจะช่วยในการกระจายแรง

ธนีสร สถาพร, 2561 ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า โดยจะมุ่งเน้นศึกษาวิธีที่จะลดผลกระทบจากการหักโค่นล้มของเสาไฟฟ้าให้มีจำนวนน้อยลงที่สุด โดยมีแนวคิดในการกำหนดตำแหน่งของจุดที่เกิดการหักบนเสาไฟฟ้าให้สูงกว่าการหักโค่นที่ระดับพื้นดินจะสามารถช่วยลดแรงที่กระทำต่อเสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ เมื่อเสาไฟฟ้าต้นที่เกิดอุบัติเหตุหักโค่นลง และส่งแรงไปยังเสาไฟฟ้าต้นที่อยู่ข้างๆ ทั้ง 2 ด้าน เสาไฟฟ้าทั้ง 2 ต้น จะได้รับแรงกระทำ และหักที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ด้วยการเสริมกำลัง จะสามารถช่วยลดการหักโค่นไปสู่เสาไฟฟ้าต้นถัดไปได้ โดยมีระยะความสูงของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร ที่มีกำลังรับโมเมนต์ 18 และ 25 ตัน-เมตร ที่หักลงมาแล้วจะไม่ทำให้เกิดการหักโค่นแบบต่อเนื่องไปยังเสาข้างเคียง คือ 14.1 และ 11.7 เมตร ตามลำดับ

นันทิกา นามวิจิตร, 2557 ได้ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนภายใต้แรงกระทำในแนวแกนเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ที่ได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 และเพื่อใช้เป็นข้อมูล ในการเสนอสมการ การออกแบบที่เหมาะสมของเสาประเภทดังกล่าว ตัวแปรหลักที่ใช้ ในการศึกษาประกอบด้วย กำลังอัดประลัยคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง การศึกษาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมทรงกระบอกที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ผลทดสอบให้กำลังอัดสูงสุด และความเหนียวสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก โดยมีพฤติกรรมภายใต้แรงกดอัดเป็นแบบเชิงเส้นตรงถึง 50-70% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด (f'_{max}) จากนั้น ผลการทดสอบมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น โดยสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบคือ (1) Strain hardening (2) Elastic-perfectly plastic และ (3) Strain softening และการวิบัติจะเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้สูงก่อนเกิด การวิบัติจากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าคุณสมบัติของปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร และมีการให้ หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง ($0.05 f'_{co}$) เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสม ในการนำไปศึกษา ขั้นต่อไป จากการศึกษาตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน พบว่าตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรง มีค่าถึง 60-70% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ($P'_{max.col}$) จากนั้น ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น โดยสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบจะมีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป และมีความเหนียวสูงเพิ่มขึ้นก่อนการวิบัติ โดยมีอัตราส่วนของกำลังรับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายโดยสมการออกแบบกำลังรับแรงกดอัด เสาเชิงประกอบตามมาตรฐานของ ACI Committee 318 ($P'_{max.col} / P_{ACI}$) มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 จึงควรถูกปรับให้เหมาะสมในรูป $P_{ACI}^{proposed} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.4 A_s^{tube} f_y^{tube}$ ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาได้อย่างเหมาะสม

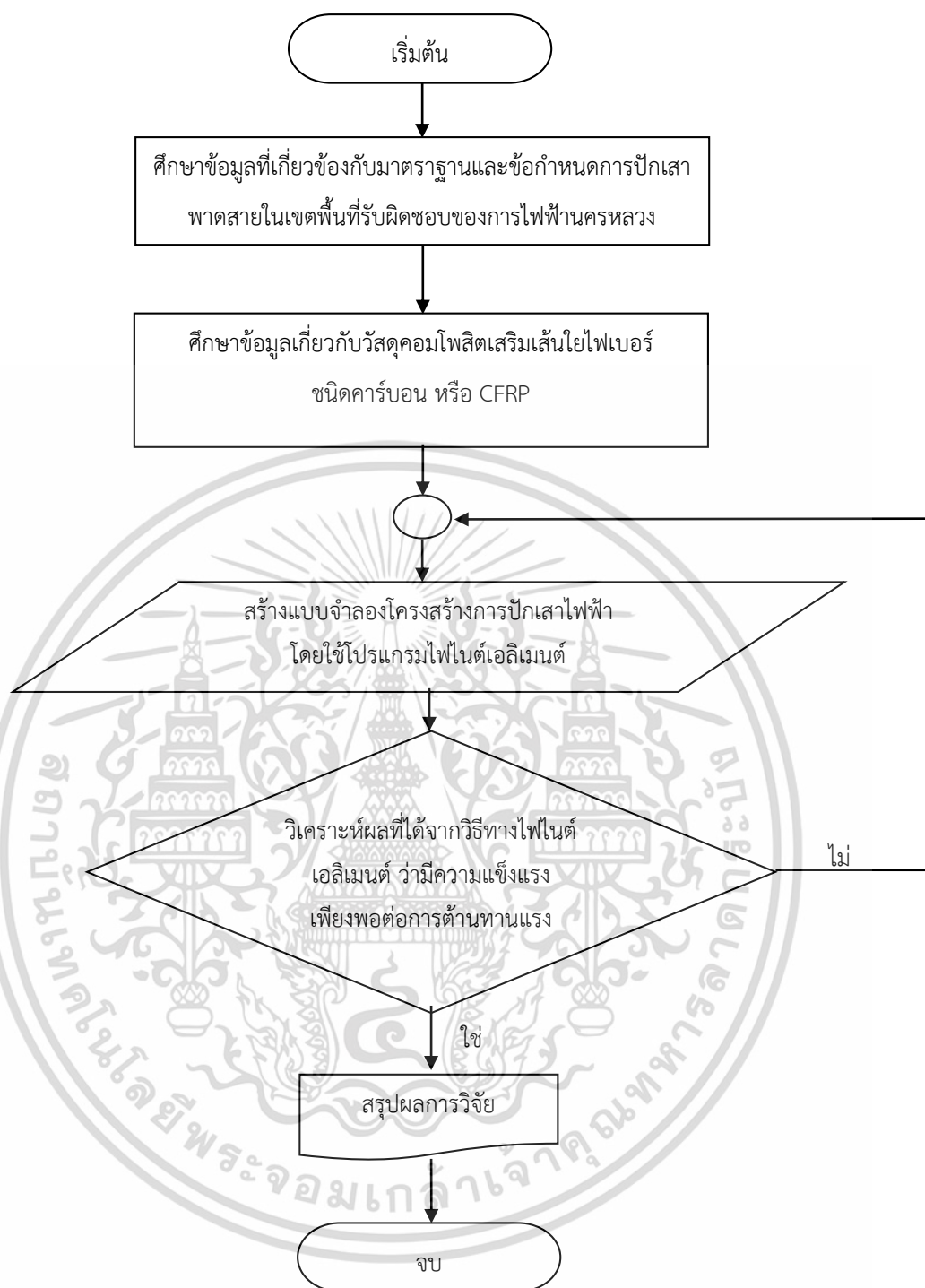
ศราวุธ แสนเสน, 2549 ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการใช้เส้นใยเหล็กแบบตะขอ ที่มีต่อกำลังดัด และพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเส้นใยเหล็กแบบตะขอที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะการดัดที่ปลายสองจุด ความยาว 35 มม. อัตราความชะลูดเท่ากับ 65 ขึ้น ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการดัดมีขนาด 0.10x0.15x1.30 ม. โดยทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ที่มีความยาวช่วงทดสอบเท่ากับ 1.50 ม. ขึ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแรงอัดมีขนาดเท่ากับ 0.15x0.15x0.15 ม. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ (1) กำลังอัดที่ใช้เท่ากับ 300 กก. และ 400 กก. (2) ปริมาณการผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ เท่ากับ 0% 0.5% และ 1.0% โดยปริมาณของคอนกรีต (3) ปริมาณการเสริมเส้นใยเหล็ก คือ 2-RB 12 มม. และ 2-RB 15 มม. จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต การเพิ่มปริมาณการผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ และเพิ่มปริมาณการเสริมเหล็กส่งผลให้กำลังรับโมเมนต์ดัด และความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรงขึ้น จะทำให้เส้นใยเหล็กแบบตะขอมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการเสริมกำลังด้วยการใช้วัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่องของเสาข้างเคียง จากแรงกระทำที่มีจากอุบัติเหตุรถชนนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1 ที่ประกอบด้วยการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับกฎเกณฑ์ มาตรฐานและข้อกำหนด ลักษณะของเสาไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้ารวมถึงอุปกรณ์ที่จะติดตั้งอื่นๆ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุ CFRP สร้างแบบจำลองเสาไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้รูปแบบการปักเสาพาดสายจริง โดยใช้เสาไฟฟ้าขนาดความยาว 22 เมตร ความสามารถในการรับแรงดัด 18 และ 25 ตัน-เมตร เป็นตัวอย่างในการทำแบบจำลองและวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุเทียบกับความเค้นที่ยอมให้ของคอนกรีตในด้านที่รับกำลังอัดตามระยะความสูงของเสาไฟฟ้า โดยผลที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงเพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าข้างเคียงจากแรงกระทำ และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการโปรแกรม และสรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 รูปแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวกับการปกเสาพาดสายไฟฟ้า

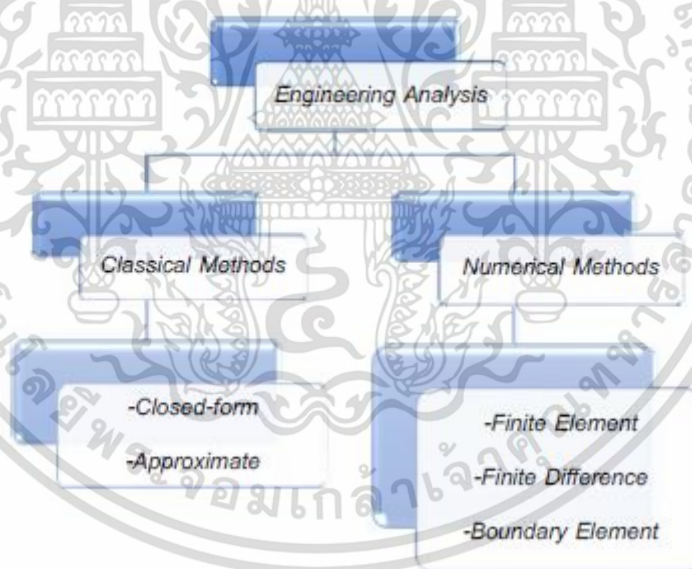
ทำการศึกษาข้อมูลการปกเสาพาดสายของการไฟฟ้านครหลวงจากคู่มือการออกแบบและประมาณราคา พ.ศ. 2547 ของกองมาตรฐานการติดตั้งสายใน/สายนอกและความปลอดภัยการไฟฟ้านคร รวมถึงการออกสำรวจภาคสนามของการปกเสาพาดสายที่การไฟฟ้านครหลวงที่ใช้ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตตามมาตรฐานของ กพน. การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเรื่องการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Polymer) ชนิด Carbon หรือ CFRP ในการเสริมกำลังเพื่อเพิ่ม (Stiffness) ความเหนียวให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงในตำแหน่งของแรงเค้นสูงสุด เนื่องจากวัสดุ CFRP ดังกล่าวมีอัตราส่วนของกำลังวัสดุต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง โดยจะนำมาใช้ในการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าโดยการติดแผ่น CFRP เข้ากับเสาไฟฟ้า ในตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์สูงสุดทำให้เสามีกำลังรับแรงกระแทกและแรงจากด้านข้าง

3.2 วิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม

วิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมมีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับปัญหา, ความยากง่ายของแต่ละวิธีและขั้นตอน, ความสะดวกและรวดเร็วเพื่อให้ทันตามความต้องการ เป็นต้น วิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งที่น่ามาวิเคราะห์ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม จากรูปที่ 3.2 แสดงวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม



รูปที่ 3.2 แสดงถึงวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม

รูปแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาในลักษณะต่างๆ ได้มีการพัฒนาแบบก้าวกระโดด มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีมาวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อศึกษาพฤติกรรมในการรับแรง และหาค่าการเคลื่อนตัวหรือหารูปแบบของความเสียหายในโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่มีความซับซ้อนที่ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีปกติ จึงมีการนำเทคโนโลยีที่สำคัญอย่างวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับโครงสร้างที่จะวิเคราะห์ วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการหาคำตอบ ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

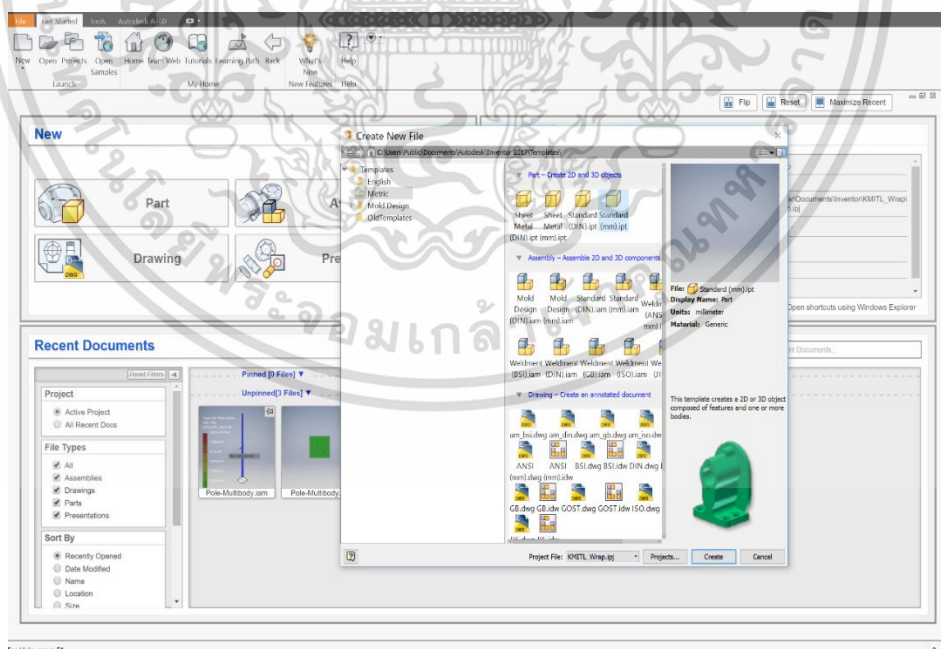
ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น SAP 2000 , ETABS Abaqus และ ANSYS เป็นต้น ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีการแบ่งชิ้นส่วนของโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (Element) โดยในแต่ละ Element มีการกระจายของแรงภายใน (Internal Forces) ได้แก่ แรงเฉือน (Shear) หรือแรงดัด (Moment), ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จะมีค่าแตกต่างกันตามตำแหน่งขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ และรูปแบบโครงสร้าง เป็นต้น Element แยกออกไปตามจำนวนของจุดต่อ (Node) การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์ที่สะดวก รวดเร็ว ค่อนข้างถูกต้อง แม่นยำ และค่าใช้จ่ายไม่สูง อีกทั้งปัญหาทางด้านวิศวกรรมในปัจจุบันใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากโปรแกรมมาตรฐานวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้กับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะมีการพัฒนาอย่างมากและกว้างขวาง

3.3 การสร้างแบบจำลองทางโครงสร้างเสาไฟฟ้า

ในการศึกษานี้ ได้ใช้โปรแกรมที่ Inventor ในการสร้างแบบจำลองทางโครงสร้าง ส่วนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะใช้โปรแกรม ANSYS

3.3.1 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม Inventor

เริ่มต้นการสร้างแบบจำลองด้วยการเปิดโปรแกรม Inventor จากนั้นเลือกเมนู File | New หรือเลือก New Project โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง New ดังในรูปที่ 3.3



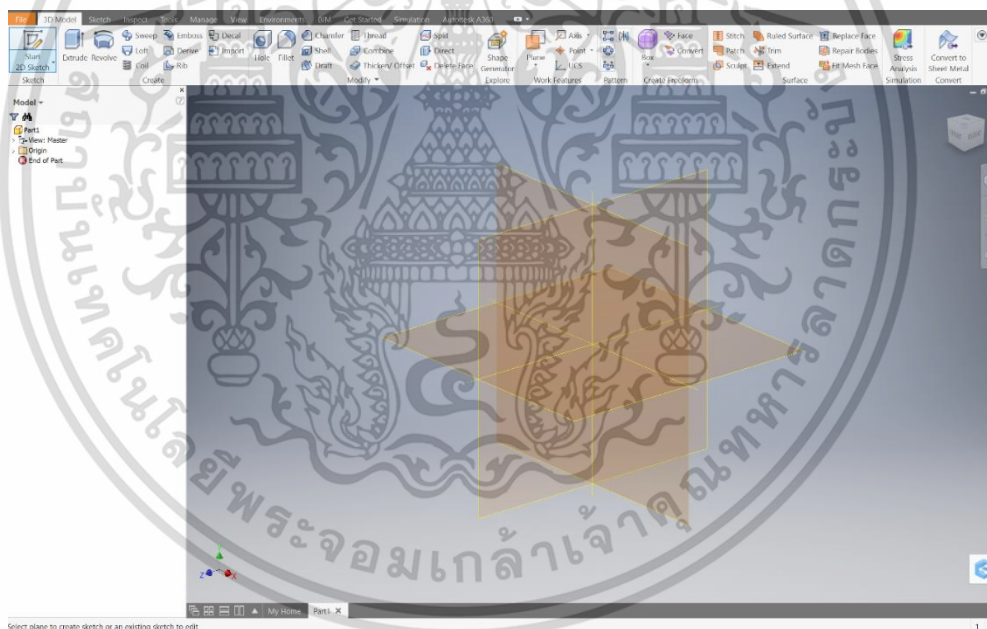
รูปที่ 3.3 แสดงการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Inventor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project เป็นไอคอนที่คลิกเมื่อต้องการสร้างโปรเจ็คใหม่หรือเชื่อมต่อกับโปรเจ็คเก่าที่ได้ถูกสร้างไว้แล้วในโปรแกรมเพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งที่บันทึกจัดเก็บไฟล์งานที่เป็นโปรเจ็คเดียวกัน เนื่องจากการผลิต ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยชิ้นส่วนประกอบจำนวนมากมาประกอบรวมกัน จึงจำเป็นต้องใช้ทีมงานจำนวนมากในการออกแบบและเขียนแบบแต่ละชิ้นส่วนแล้วนำมาประกอบรวมกันภายหลังการทำโปรเจ็คหรือกำหนดตำแหน่งที่บันทึกจัดเก็บไฟล์งานที่เป็นโปรเจ็คเดียวกัน จึงมีความสะดวกสำหรับทีมงานแต่ละทีม

การสร้าง New Project

1. เรียกหน้าต่าง Project โดยไปที่ Get Started Tab >> Launch Panel >> Project
2. คลิกที่ New เพื่อสร้าง Project ใหม่
3. เลือก New Single User Project
4. ตั้งชื่อและกำหนด Workspace แล้วกด Finish
5. กด Apply แล้วกด Done



รูปที่ 3.4 รูปแสดงหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ส่วนประกอบของหน้าต่างโปรแกรม Inventor แสดงดังรูปที่ 3.3 มีส่วนประกอบดังนี้

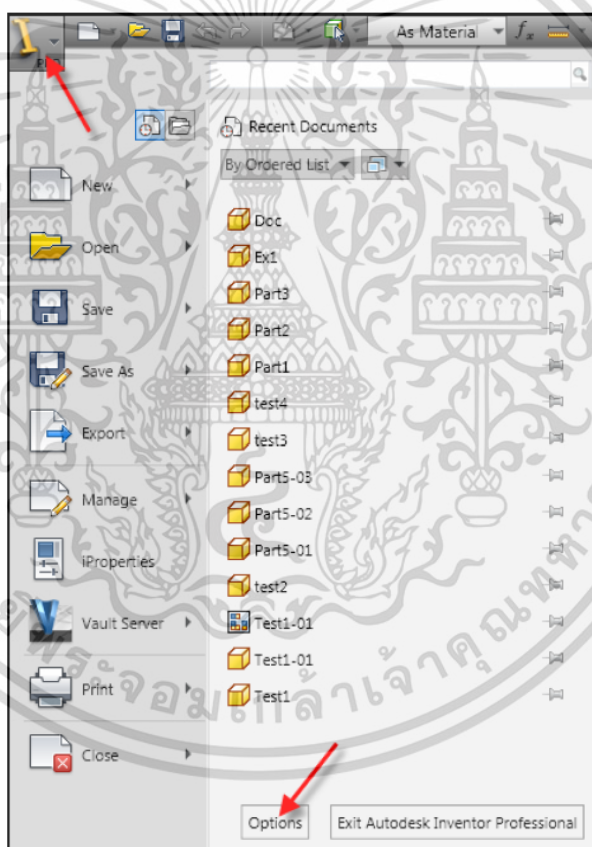
- เมนู (Main Menu) เป็นแถบคำสั่งที่เรียกใช้งาน โดยใช้เมาส์เลือกจะแสดงชื่อ
- ทูลบาร์ (Toolbar) ทูลบาร์ที่อยู่ถัดลงมาจากเมนู และที่อยู่ในแนวตั้งทางด้านซ้าย ซึ่งสามารถกดเข้าออกได้ ใช้ในการสั่งคำสั่งที่ซับซ้อน เพื่อความสะดวกในการทำงานโปรแกรม โดยเราสามารถกำหนดได้เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมนวินโดว์ (Main Window) เป็นพื้นที่ใหญ่ที่สุดบริเวณกลางหน้าจอ ใช้แสดงแบบจำลองและผลการคำนวณ
- เพจคอนโทรล (Page Control) เป็นชุดแถบด้านข้างซ้ายของเมนวินโดว์มีสองแถวคือแต่ละหน้าหลักจะแยกออกเป็นหน้าย่อย ใช้ทำงานเฉพาะอย่าง การเรียงหน้าหลักและหน้าย่อยจะเป็นไปตามลำดับการทำงาน
- มุมมอง (View Orientation) เป็นพื้นที่ทางขวาของหน้าจอ แสดงมุมมองและควบคุมหน้าการทำงานของโปรแกรม หรือรายการต่างๆ ตามลักษณะการทำงาน

1. การปรับแต่ง Option ต่างๆ

การปรับแต่ง Option ต่างๆให้ใช้งานง่ายขึ้นและตามความเหมาะสมหรือความชอบของผู้ใช้สามารถทำได้ดังนี้ไปที่ Application Menu >> Option



รูปที่ 3.5 รูปแสดงการปรับแต่ง Option ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

การปรับเปลี่ยนมุมมองด้วย View Orientation



Free Orbit: การหมุนเปลี่ยนมุมมอง โดยคลิกที่ View Cube ค้างไว้แล้วหมุนเปลี่ยนวิวท์หรือคลิก Free Orbit (f4) ที่ Navigation bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Isometric View: การเปลี่ยนมุมมองให้กลับมาเป็น Isometric View (f6) หรือ คลิกที่ Home View ที่ View Cube



Selection View: การเลือกมุมมองต่างๆจาก View Cube



Zoom: สามารถย่อหรือขยายงานใน Graphic Window ได้โดย คลิก คำสั่งที่ Navigation bar หรือ ที่ Wheel ของเมาส์



Pan: การลากวัตถุไปมาใน Graphics Window



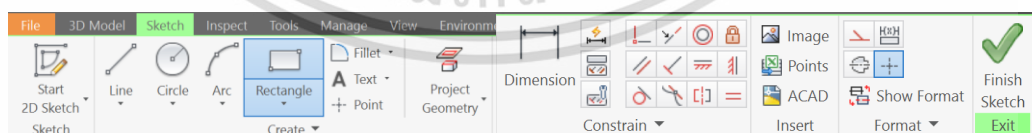
View Face: คำสั่งที่เลือกโดยผิวแล้วสำหรับปรับการแสดงใน Graphics Window ให้แสดงที่ผิวนั้นๆ

2. Basic 2D Sketch

Sketch Tab ประกอบด้วย Panel ที่สำคัญสำหรับการ Sketch ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย

1. Draw Panel เป็นที่รวมคำสั่งในการสร้างเส้นต่างๆ เช่น Line, Circle เป็นต้น
2. Pattern Panel เป็นที่รวมคำสั่งสำหรับการ Pattern
3. Modify Panel เป็นที่รวบรวมคำสั่งสำหรับแก้ไข Sketch เช่น Move, Trim เป็นต้น
4. Constrain เป็นที่เก็บคำสั่งในการกำหนดความสัมพันธ์ของเส้นต่างๆใน Sketch เช่น

Coincident, Parallel เป็นต้น



รูปที่ 3.6 รูปแสดงเครื่องมือพื้นฐานในการเขียนภาพ 2 มิติ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.2 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถทำได้สองวิธีด้วยกัน คือ

- ใช้ไฟล์คำสั่ง (command file) ไฟล์คำสั่งคือไฟล์ข้อความบรรจุข้อมูลโครงสร้าง โดยจะเป็นคำสั่ง ในภาษาที่เข้าใจง่ายตามรูปแบบของโปรแกรม ผู้ใช้สามารถสร้างไฟล์นี้ได้โดยใช้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิตีเตอร์ทั่วไป โดยระหว่างใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ผู้ใช้งานสามารถเปิดไฟล์คำสั่งขึ้นมาตรวจสอบและแก้ไขได้

- ใช้การสร้างแบบโต้ตอบเชิงกราฟฟิก วิธีการสร้างแบบกราฟฟิกจะใช้เครื่องมือทางกราฟฟิกในโหมดสร้างโมเดล และกำหนดข้อมูลเช่น คุณสมบัติวัสดุ, ค่าคงที่ต่างๆ, น้ำหนักบรรทุก และอื่นๆ โดยขณะที่สร้างโมเดลนั้นไฟล์คำสั่งก็จะถูกสร้างขึ้นโดยอัตโนมัติอยู่เบื้องหลังซึ่งผู้ใช้สามารถเปิดดูได้ตลอดเวลาเช่นกัน

เตรียมสร้างฐานเสาและปลายเสาไฟฟ้า 2 มิติ เพื่อขึ้นรูปโครงสร้าง 3 มิติของเสาไฟฟ้า

Sketch ที่สามารถใช้คำสั่ง Loft ได้จะต้องเป็นรูปปิด

1. ไปที่ Get Started Tab >> Launch Panel >> New
2. เลือก Standard.ipt >> คลิก OK
3. ไปที่ Model Tab >> Sketch Panel >> Create 2D Sketch เลือกที่ Plan XY ที่อยู่ใน

Browser

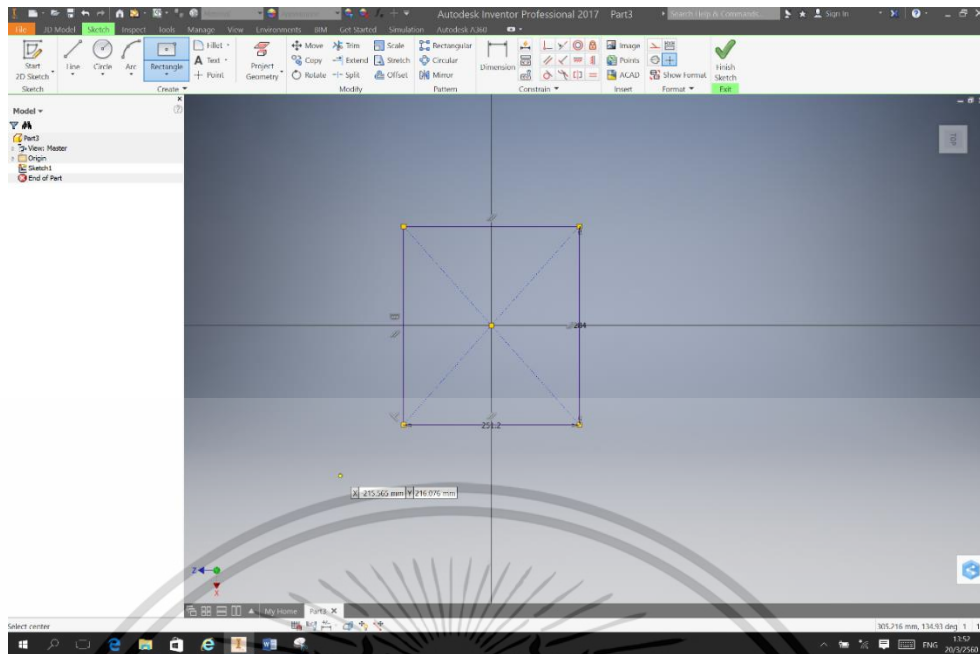
4. ที่ Sketch Tab >> Draw Panel >> Rectangles
5. คลิกกำหนดจุดเริ่มต้น แล้วกำหนดขนาดของสี่เหลี่ยมคือ 25.27x28.55 cm. เป็นฐานเสา

ไฟฟ้า (เปลี่ยนด้านโดยการกด Tab ที่คีย์บอร์ด)

6. ไปที่ Sketch Tab >> Draw Panel >> Project Geometry จากนั้นเลือกที่ XY Axis
7. ไปที่ Sketch Tab >> Constrain Panel >> Confident Constrain
8. จากนั้น เลื่อนเมาส์ไปที่บริเวณกลางเส้นจะประกฎจุดสี่เหลี่ยมขึ้นหมายถึงกึ่งกลางของเส้นแล้ว

คลิกเลือก

9. จากนั้นให้คลิกเส้นแกนที่โปรเจคมาจากข้อ 6 ทำทั้งแกน X และแกน Y
10. ไปที่ Sketch Tab >> Exit Panel >> Finish Sketch
11. ไปที่ Application Menu >> Save
12. คลิก OK จะได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7

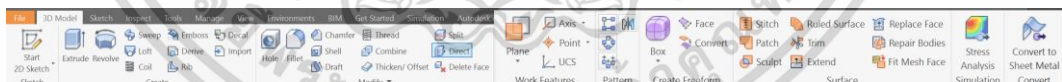


รูปที่ 3.7 รูปแสดงการวาดรูปฐานเสาไฟฟ้า 2 มิติ

การขึ้นรูปแบบจำลองสามมิติ

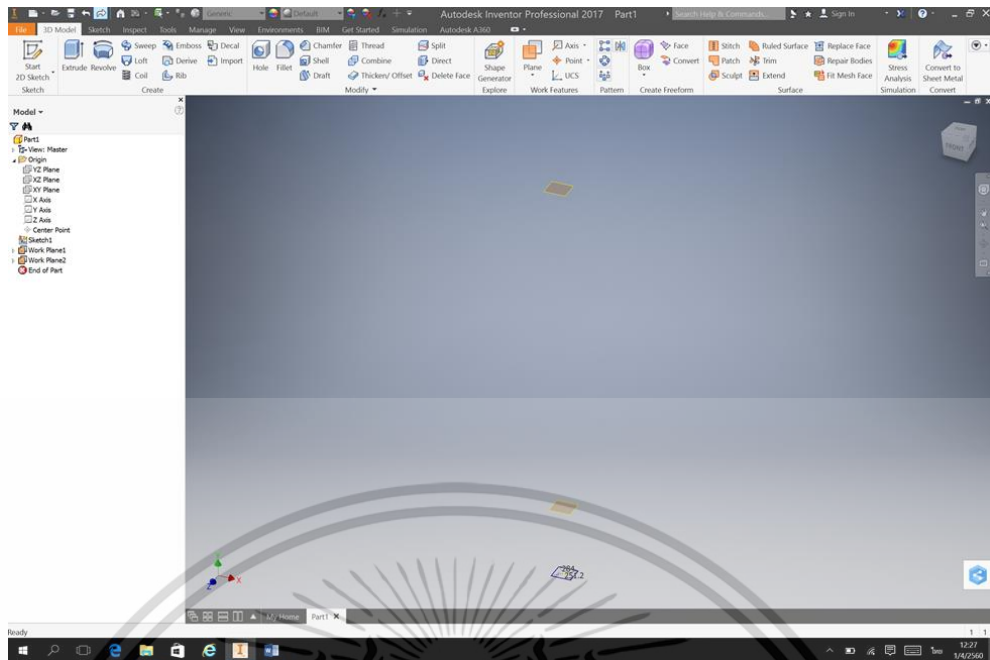
เมื่อวาดรูปฐานเสาและปลายเสาไฟฟ้าเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ การสร้าง 2D Sketch ให้เป็น 3D Model แล้วได้เตรียม Sketch สำหรับสร้างเสาไฟฟ้า

1. ไปที่ 3D Model >> Plane >> Offset from Plane
2. เลือก Plane ฐานเสาไฟฟ้าถึงปลายเสาไฟฟ้า
3. ไปที่ Model Tab >> Loft เพื่อสร้าง Solid ของเสา
4. คลิก OK จะได้ดังแสดงในรูปที่ 3.10

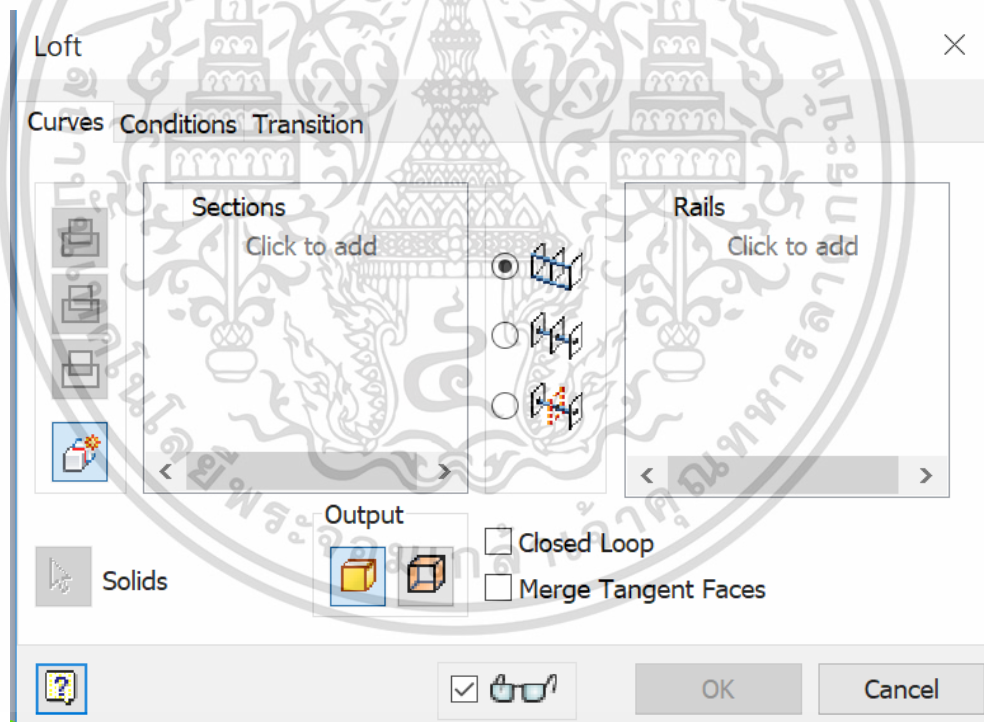


รูปที่ 3.8 รูปแสดงคำสั่งที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

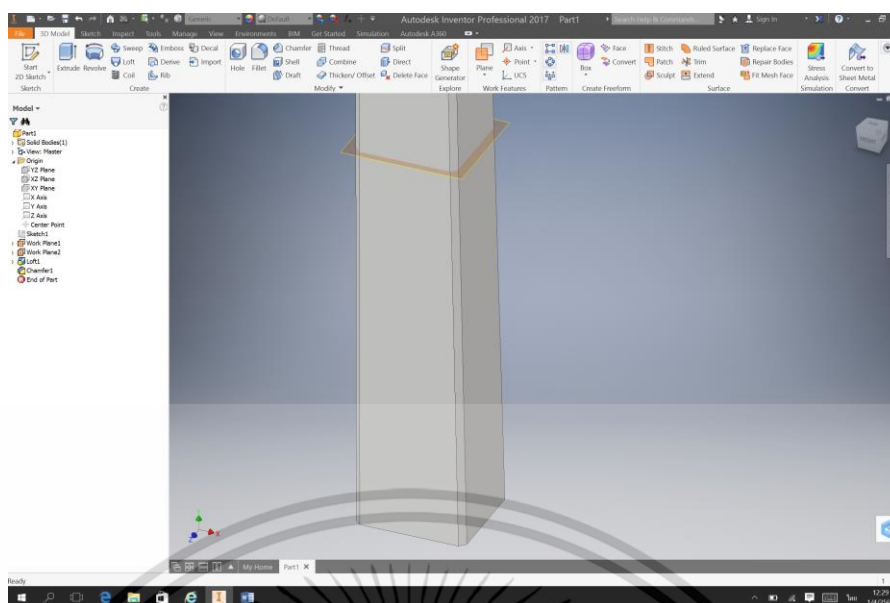


รูปที่ 3.9 รูปแสดง Planes สำหรับระดับของส่วนประกอบในเสาไฟฟ้า

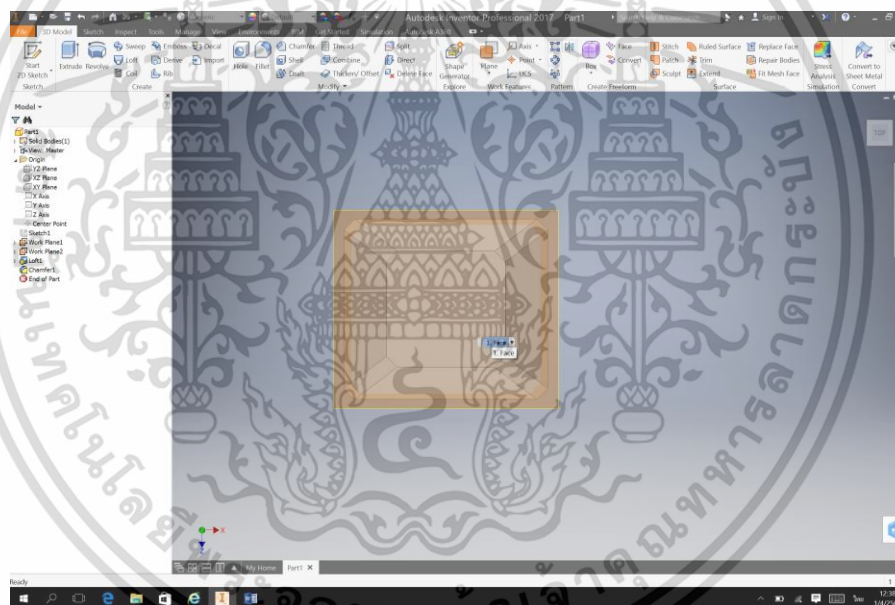


รูปที่ 3.10 รูปแสดงคำสั่ง Loft ในการ Sketch แบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 รูปแสดงการสร้าง Chamfer ที่ขอบของเสาไฟฟ้า

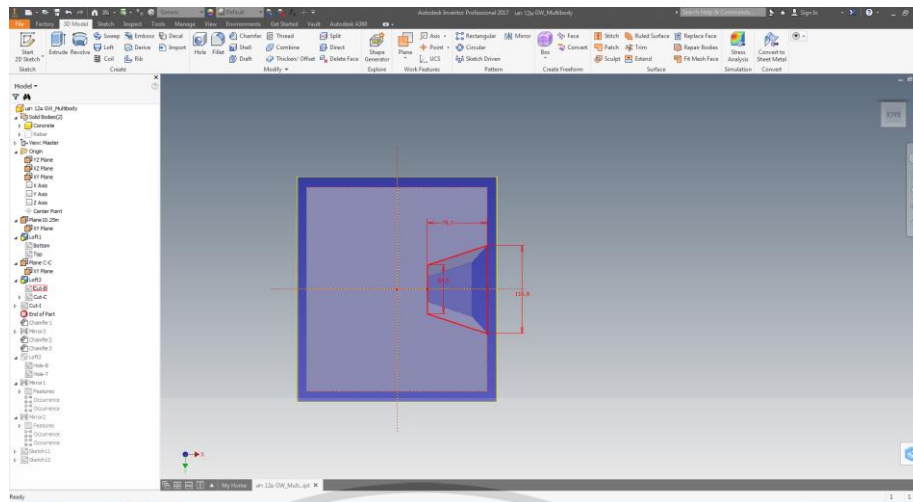


รูปที่ 3.12 รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้า

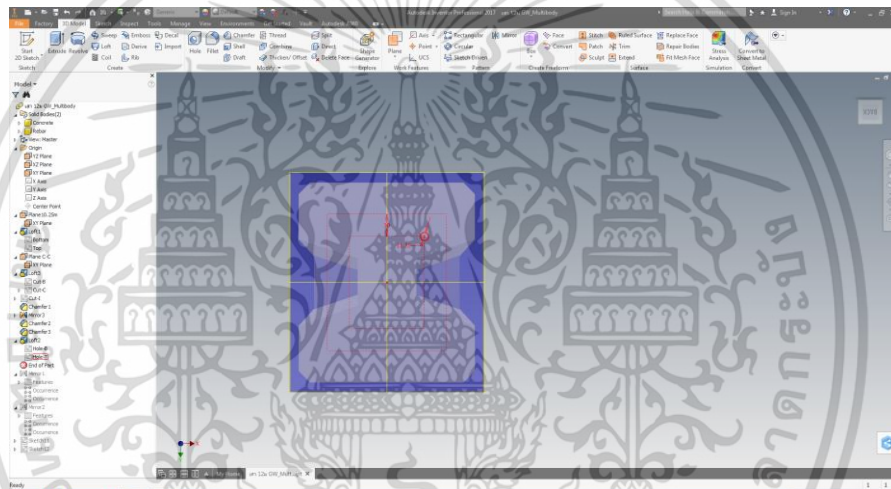
การสร้างร่องคอนกรีตในเสาไฟฟ้า

สร้างร่องของเสาไฟฟ้าด้วยคำสั่ง Loft Cut และ Mirror เพื่อให้ได้ร่องในด้านตรงข้ามของเสาดังรูปที่ 3.13 และ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้าในการสร้างร่องของเสา

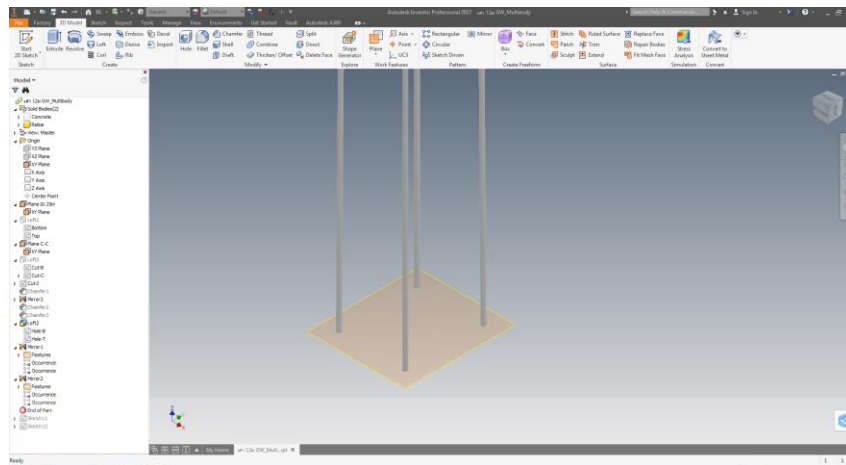


รูปที่ 3.14 รูปแสดงภาพ Plane View หลังจาก Mirror ร่องของโมเดลเสาไฟฟ้า

การใส่เหล็กเสริมในเสาไฟฟ้า

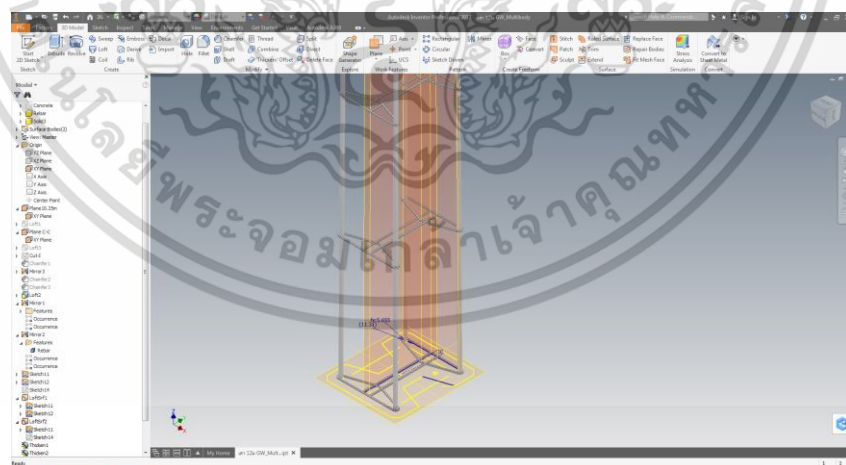
สร้างเหล็กเสริมหลัก โดยเปิด Plane XY Axis แล้วทำการวาดวงกลมของเส้นเหล็กเสริมที่ฐานและปลายของเสาไฟฟ้า แล้วใช้คำสั่ง Loft เพื่อสร้าง Solid ของเหล็กเสริมไปที่ปลายเสาไฟฟ้า เมื่อแล้วเสร็จจะได้ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



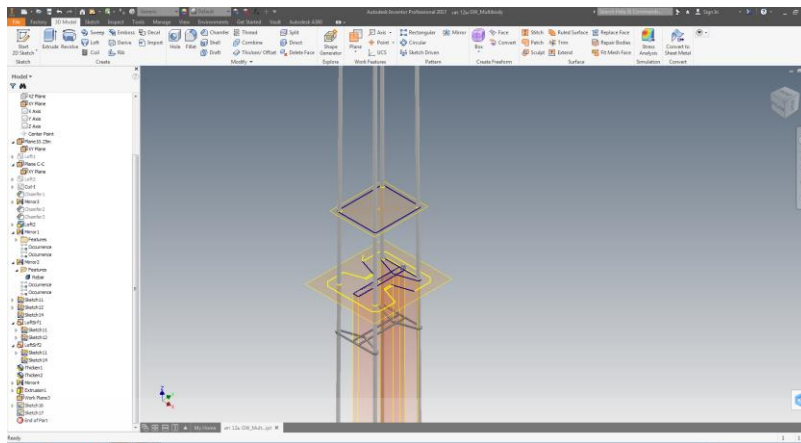
รูปที่ 3.15 รูปแสดงภาพ View ของเหล็กเสริมหลักในโมเดลเสาไฟฟ้า

เหล็กปลอกของเสาไฟฟ้ามี 2 ลักษณะ ที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมประกอบและรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.16 และ 3.17 ที่ฐาน การสร้างเริ่มวาดรูปทรงแบบแรกของเหล็กปลอกจากฐานเสาและที่ Plane ที่กำหนดไว้ตามแบบมาตรฐานของ กฟน. กำหนดความหนาของเหล็กปลอกด้วยคำสั่ง Thicken/Offset สร้างสี่เหลี่ยมตามระยะของเหล็กปลอกและใช้คำสั่ง Loft Cut เพื่อให้ได้ระยะเหล็กปลอกตามแบบมาตรฐาน เมื่อแล้วเสร็จจะได้ดังรูปที่ 3.16 และจาก Plane ในระยะที่กำหนดขึ้นไป วาดสี่เหลี่ยมรอบเหล็กเสริมแบบที่ 2 ที่ Plane นี้และที่ปลายเสา กำหนดความหนาของเหล็กปลอกด้วยคำสั่ง Thicken/Offset สร้างสี่เหลี่ยมตามระยะของเหล็กปลอกอีกครั้งและใช้คำสั่ง Loft Cut เพื่อตัด Solid ออกให้เกิดระยะของเหล็กปลอกตามรูปที่ 3.16, 3.17 และ 3.18

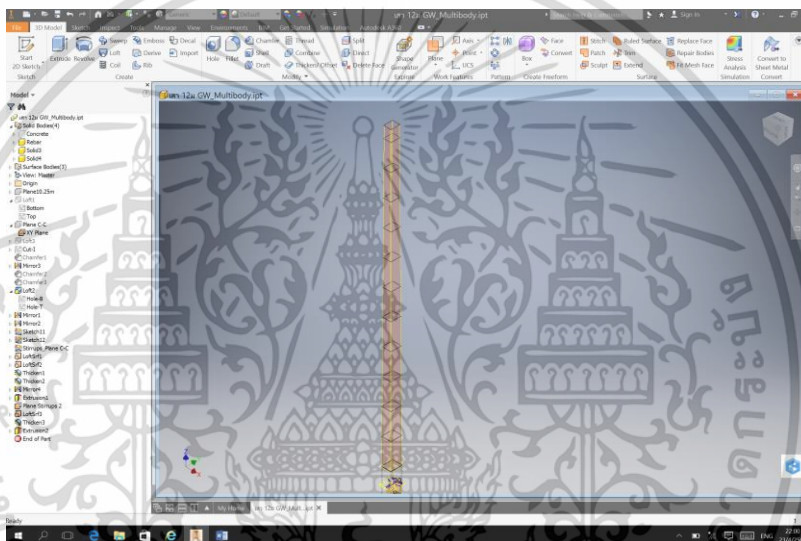


รูปที่ 3.16 รูปแสดงภาพเหล็กปลอกและระยะจากฐานเสา

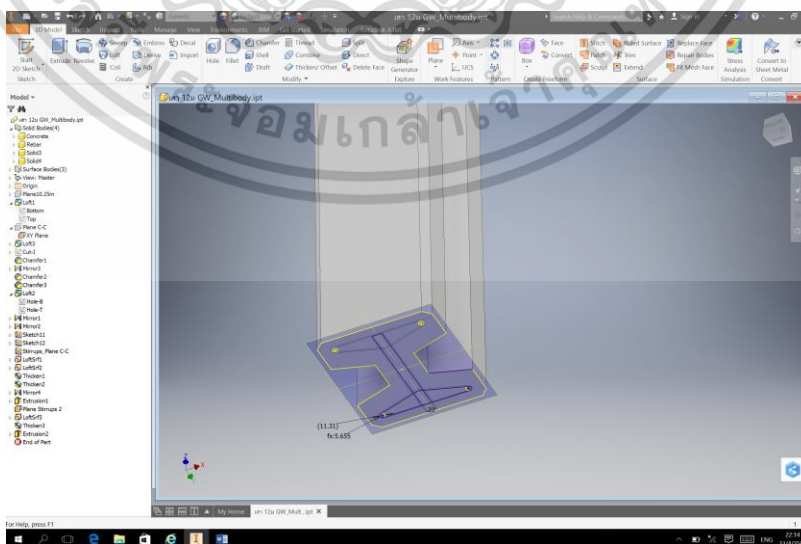
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 รูปแสดงภาพเหล็กปลอกรูปทรงสี่เหลี่ยมจากระยะ Plane ตามแบบ



รูปที่ 3.18 รูปแสดงรูปแสดงระยะเหล็กปลอกแบบสี่เหลี่ยม

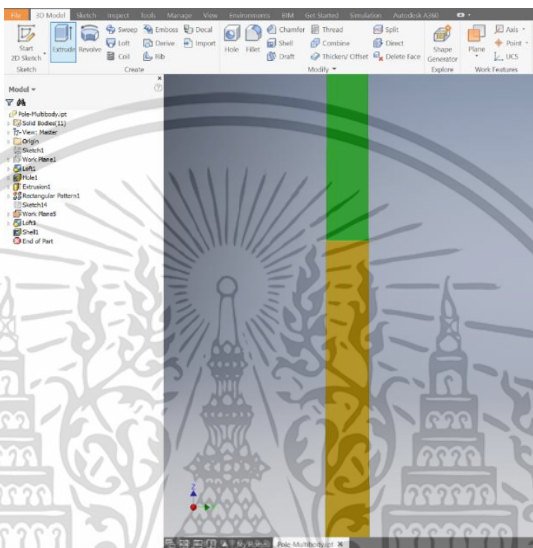


รูปที่ 3.19 รูปแสดงภาพตัดที่ Plan ของการเสริมเหล็กในแบบจำลองเสาไฟฟ้า

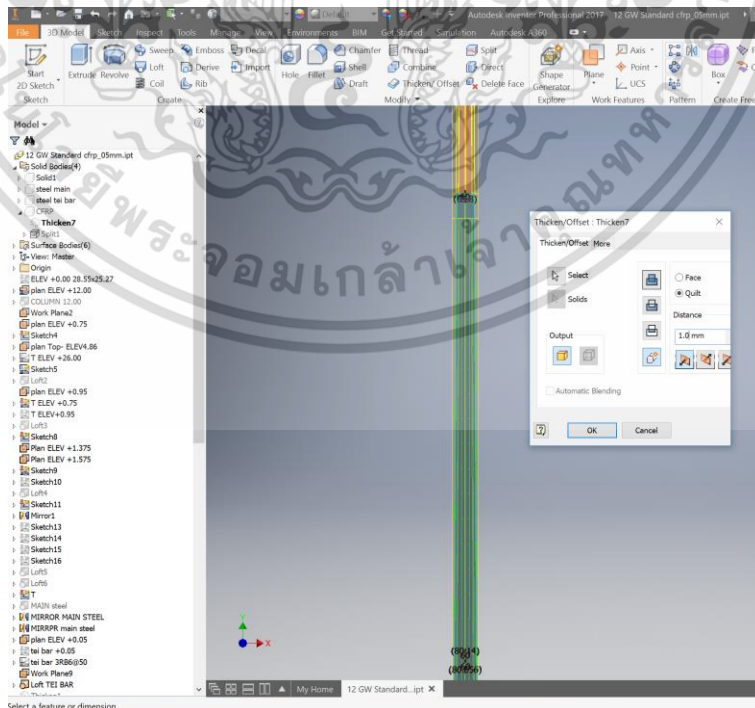
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดด้วยแผ่น CFRP โดยรอบของเสาไฟฟ้า

กลับไปเปิด Plane XY Axis เช่นเดียวกับการใส่เหล็กเสริม แล้ววาดสี่เหลี่ยมที่ฐานเสาและที่ Plane ที่กำหนดตามความสูงในการพันวัสดุ CFRP ใช้คำสั่ง Loft ดังแสดงในรูปที่ 3.9 กำหนดความหนาของวัสดุ CFRP ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset เมื่อเสร็จแล้วให้ปรับระดับ Plane XY ไปที่ระดับที่เราต้องการสิ้นสุดการติดแผ่น CFRP เมื่อแล้วเสร็จตามที่ต้องการแล้ว จะได้โมเดลดังรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 รูปแสดงการการติดด้วยแผ่น CFRP โดยรอบของเสาไฟฟ้า



รูปที่ 3.21 รูปแสดงการกำหนดความหนาของวัสดุ CFRP ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset

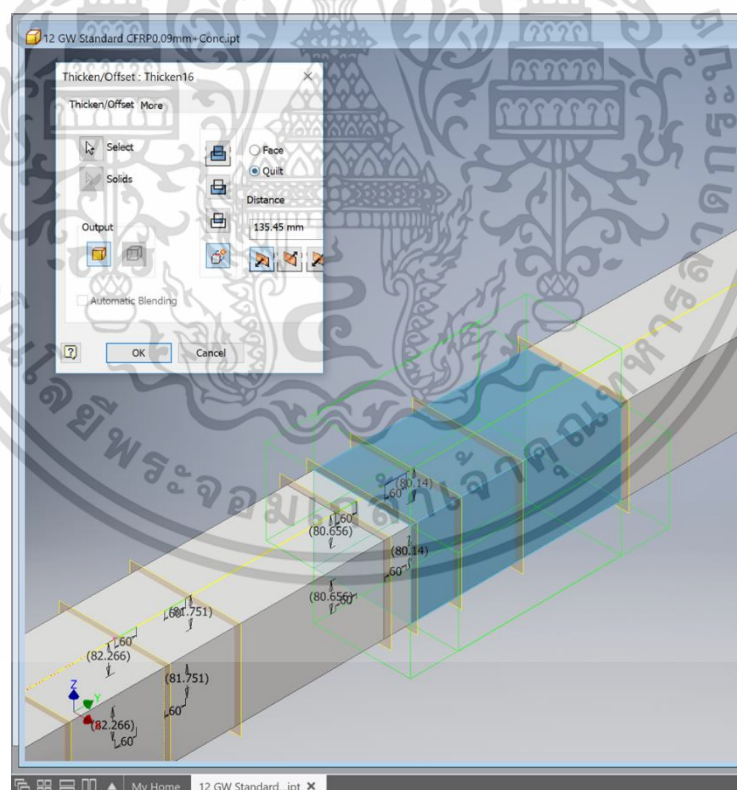
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงระยะการติดด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่น ในแบบจำลองเสาไฟฟ้า

เสาไฟฟ้าอัดแรง (ม.)	ระยะปักเสาในดิน (ม.)	ขนาดเสา		ระยะการพัน CFRP (ม.)	โมเมนต์ ที่รับได้ (ตัน-ม.)
		ฐาน	ปลาย		
		กว้าง (ซม.)	กว้าง (ซม.)		
22	2.00	43.60	25.60	14.1	18.0
22	2.00	57.25	27.00	11.7	25.0

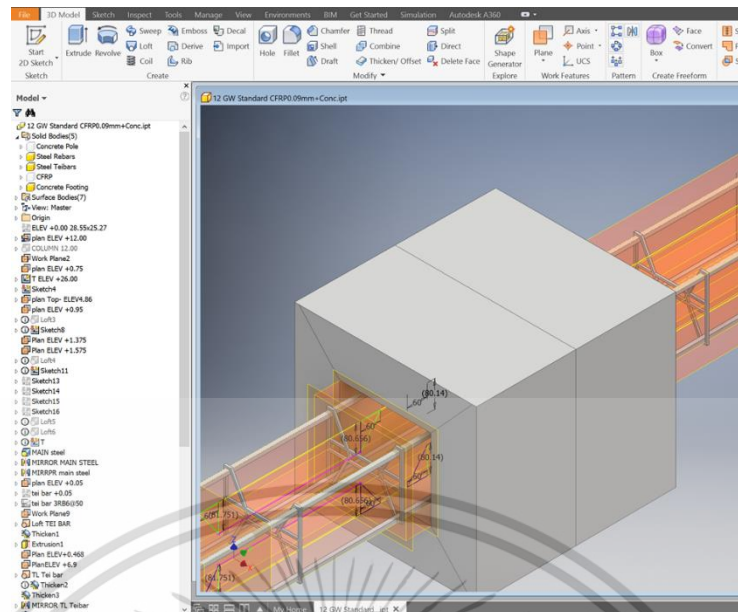
การสร้างตอมคอนกรีต (Footing concrete) ที่ตำแหน่ง Ground Level ของเสาไฟฟ้า

ที่ Plane XY Axis ตำแหน่ง Ground Level ของเสา สร้าง Plane Offset ที่ +/- 300mm คลิกขวาที่ Plane ที่กำหนด คลิก Create Sketch แล้ววาดสี่เหลี่ยมที่ Plane ทั้งสองที่ Offset มา จากนั้นใช้คำสั่ง Loft ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และ 3.23 เพื่อสร้าง Solid Surface ระหว่าง Sketch และกำหนดความหนาของของตอมคอนกรีตนี้ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset โดยเลือกความหนาที่ 135.45 ซม. เมื่อเสร็จแล้วให้กด OK



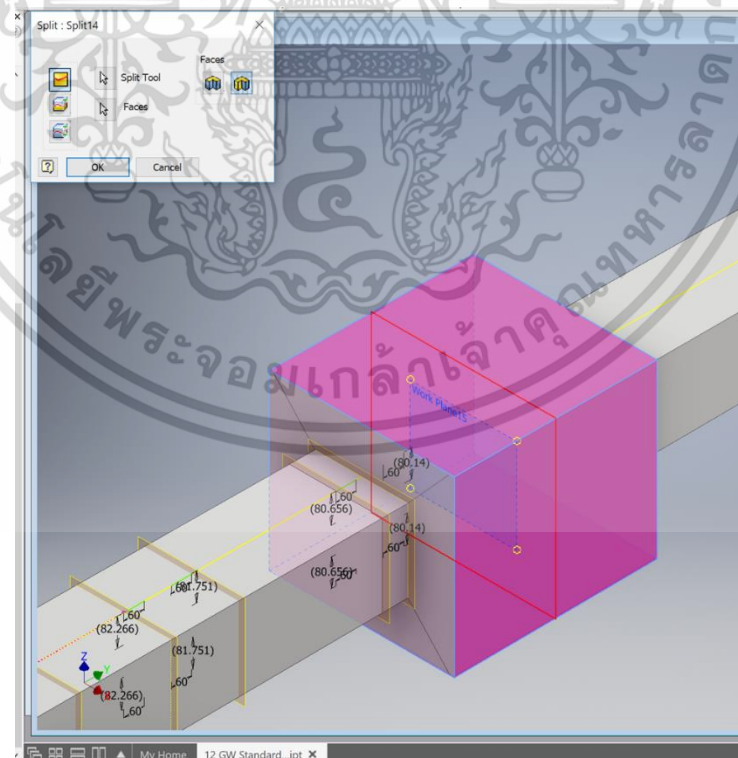
รูปที่ 3.22 รูปแสดงการสร้างตอมคอนกรีตหุ้มเสาและวัสดุ CFRP ที่ตำแหน่ง Ground Level ของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 รูปแสดงตุ้มคอนกรีตที่ได้

การ Split ผิวของตุ้มคอนกรีต (Footing concrete) สำหรับการกำหนด Support ในการวิเคราะห์
 ที่ Menu Modify ให้เลือกคำสั่ง Split แล้วเลือก Plane ที่ต้องการ Split จากนั้นเลือกที่ผิว
 ของตุ้มคอนกรีตทั้ง 4 ด้าน และกด OK ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 รูปแสดงการสร้าง Split ผิวที่ตุ้มคอนกรีตสำหรับการกำหนด Support ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

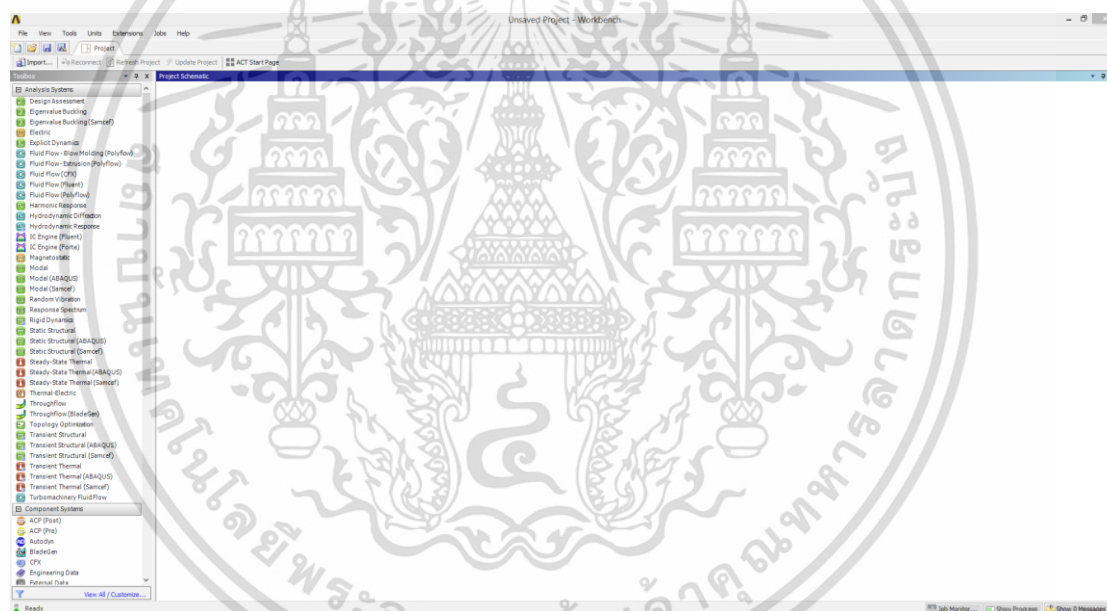
3.3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ANSYS

แบบจำลองทางโครงสร้างที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Inventor จะต้องถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงแรงอัดและแรงดัดที่ใช้ในการวิเคราะห์

เสาไฟฟ้า อัดแรง (m.)	หน้าตัดล่าง	หน้าตัดบน	แรงกระจาย ใต้เสา (Mpa)	แรงกระจาย บนเสา (Mpa)	แรงดัดข้าง ที่ปลายเสา (N)
	กว้างxยาว (cm.)	กว้างxยาว (cm.)			
22	43.35x43.35	35.46x35.46	8.357	24.241	44,689
22	56.84x56.84	43.58x43.58	4.308	19.371	47,605

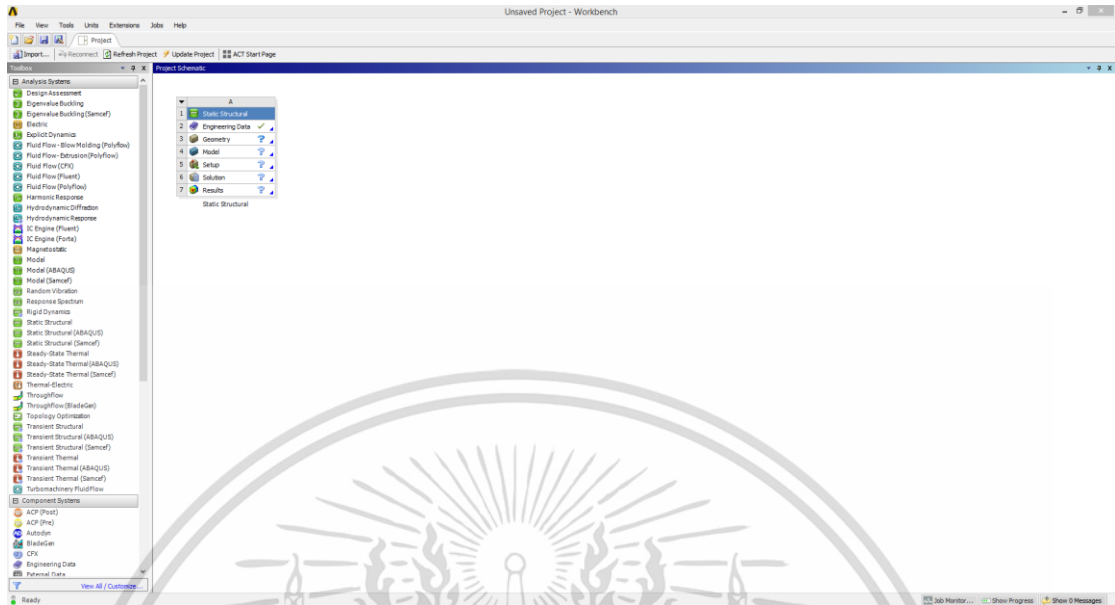
1. เปิดโปรแกรม ANSYS เพื่อเริ่มต้นการทำงาน



รูปที่ 3.25 แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ANSYS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คลิกเลือกระบบการวิเคราะห์แบบ Static Structural



รูปที่ 3.26 แสดงหน้าต่างการ Input ข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

3. ทำการ Import File ที่สร้างแบบจำลองโครงสร้างจากโปรแกรม Inventor เข้ามายังโปรแกรม ANSYS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์
4. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Concrete	-	-	44.1	31,412.6	2,400	0.18
PC.Wire	1323.9	1569.1	-	169,655.0	7,850	0.3
Rebar	392.3	559	-	200,055.7	7,850	0.3
Stirrup	58.8	95.6	-	50,013.9	7,850	0.3
CFRP	-	3481.4	-	230,460.0	1,800	0.145

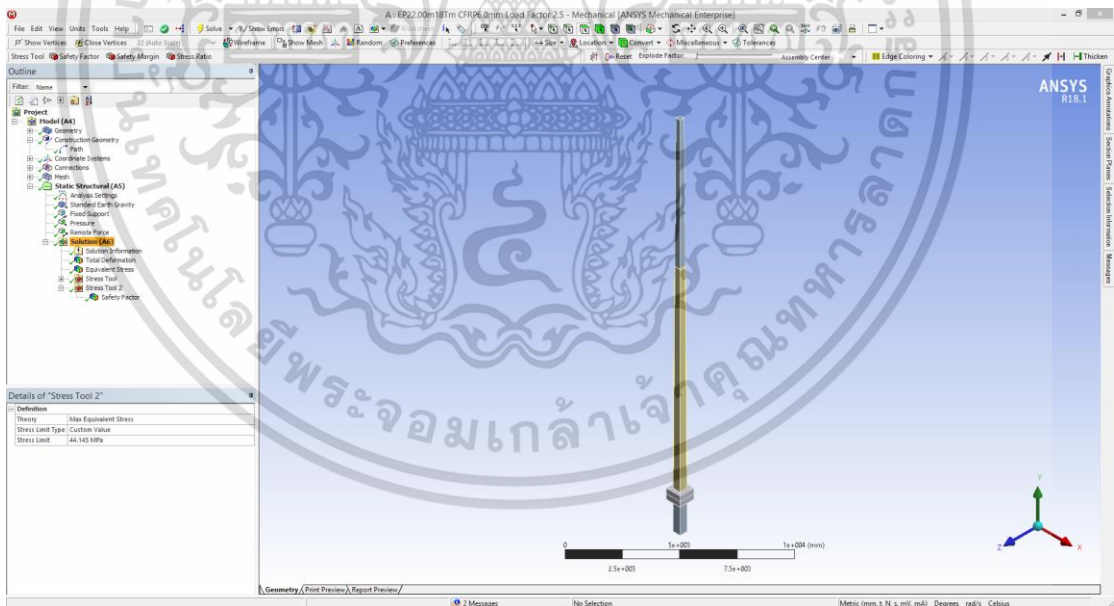
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	CFRP			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Concrete			General_Materials.xml	
5	Rebar			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
6	Wire			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 4: Concrete					
	A	B	C	D	E
1	Property		Value	Unit	
2	Material Field Variables		Table		
3	Density	2400		kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
8	Young's Modulus	3.1413E+10		Pa	
9	Poisson's Ratio	0.18			
10	Bulk Modulus	1.6361E+10		Pa	
11	Shear Modulus	1.331E+10		Pa	
12	Tensile Yield Strength	0		Pa	
13	Compressive Yield Strength	0		Pa	
14	Tensile Ultimate Strength	5.3817E+06		Pa	
15	Compressive Ultimate Strength	4.413E+07		Pa	

รูปที่ 3.27 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

5. ไปยังหน้า Model เพื่อตั้งค่าต่างๆสำหรับการวิเคราะห์

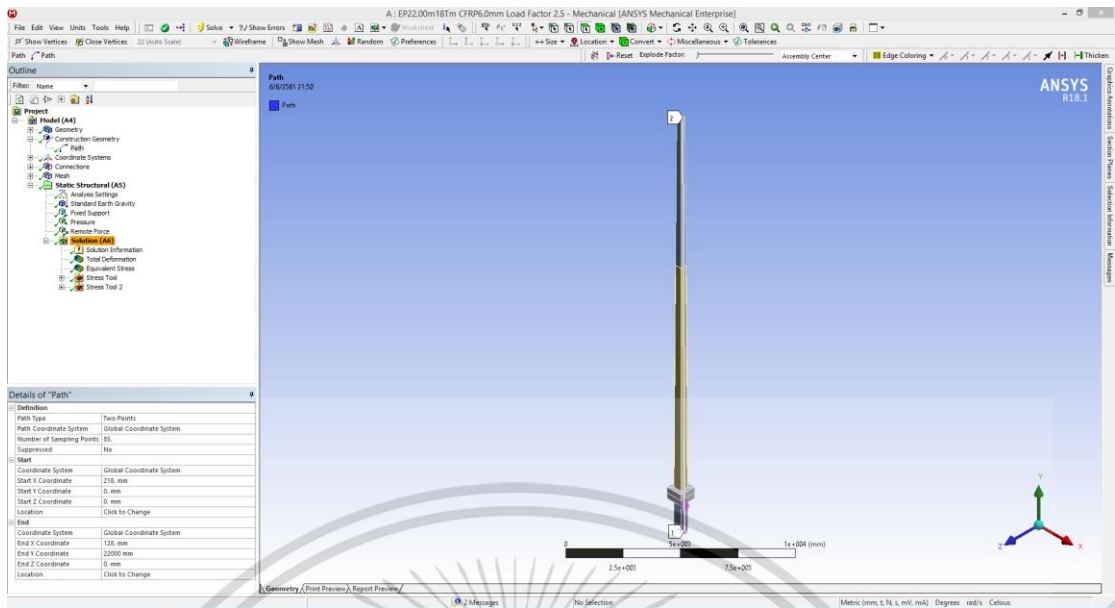


รูปที่ 3.28 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Model

6. เปลี่ยนวัสดุให้ตรงกับการใช้งาน โดยไปที่ Geometry

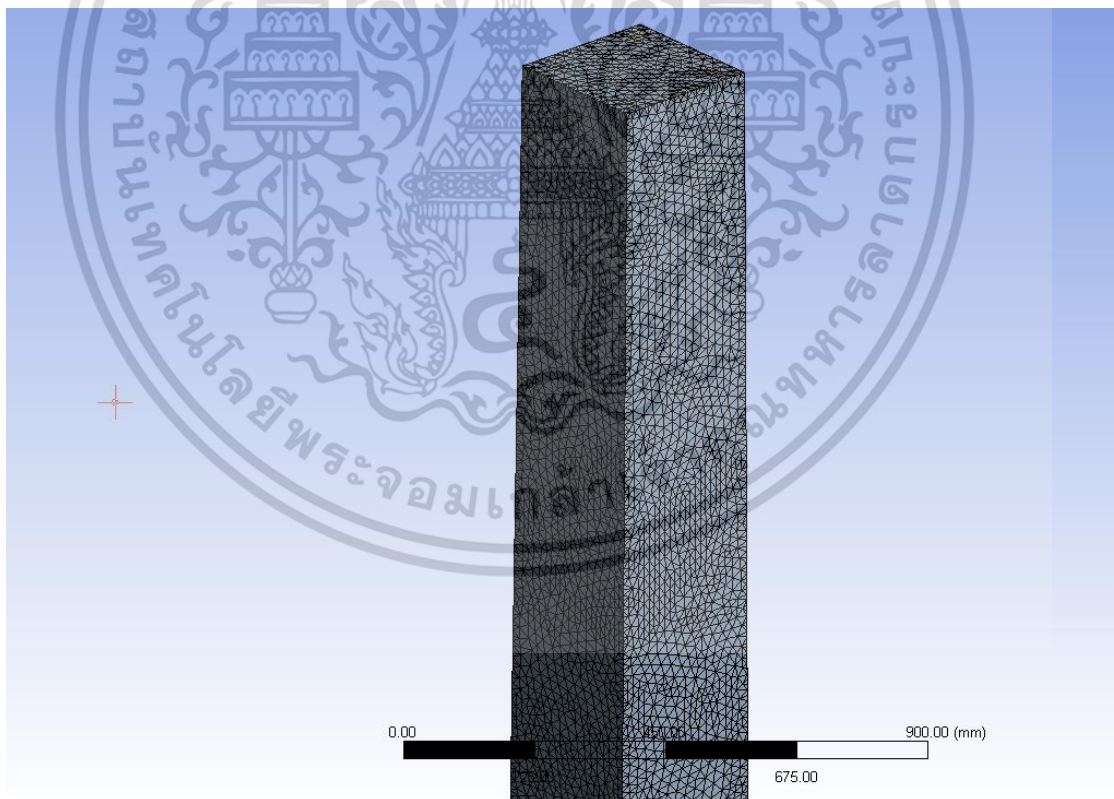
7. ไปยัง Construction Geometry แล้วเลือก Path เพื่อทำการตรวจสอบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวด้านรับแรงอัด ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แสดงการกำหนดตำแหน่งของการใช้งานคำสั่ง Path

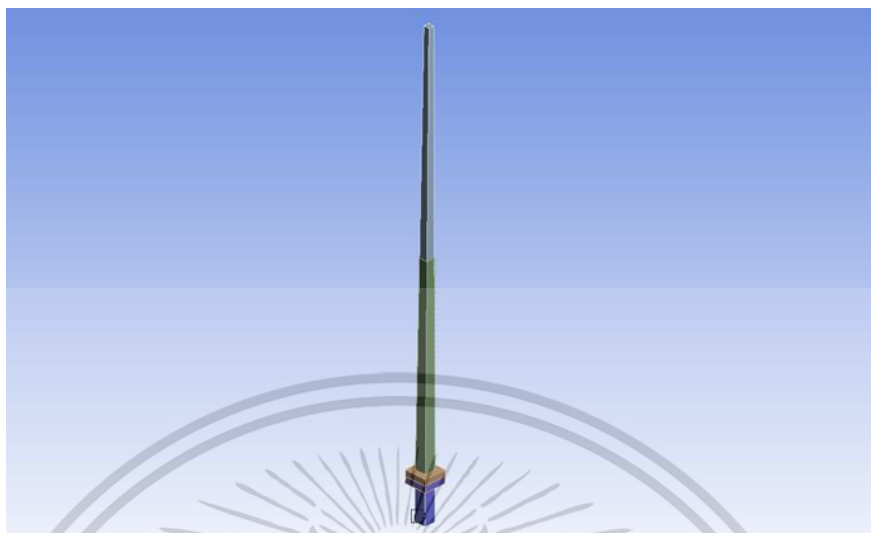
8. ทำการแบ่ง Element เพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดขนาดของ Element ให้มีขนาด 10 มม.



รูปที่ 3.30 แสดงแบ่ง Mesh ด้วย Program Control ที่ 10 มม.

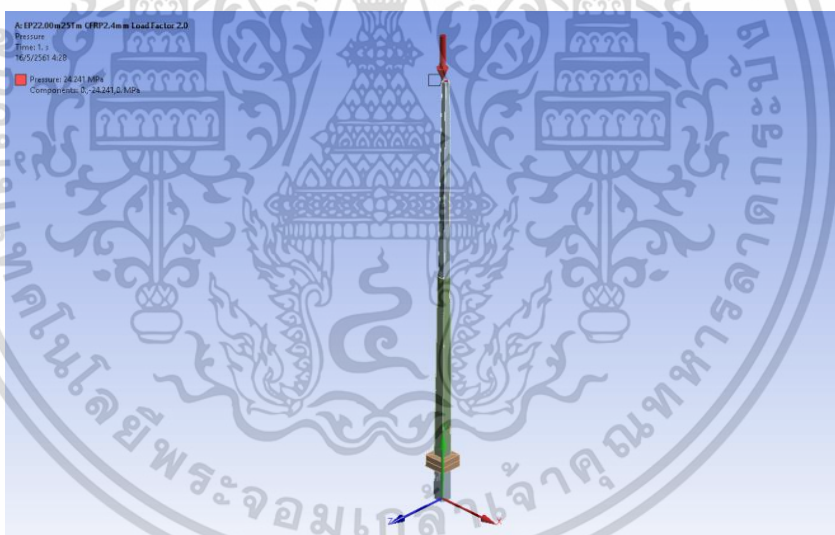
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กำหนดจุดรองรับที่ฝังอยู่ใต้ระดับพื้นดินให้เป็นแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.31 แสดงการกำหนด Support

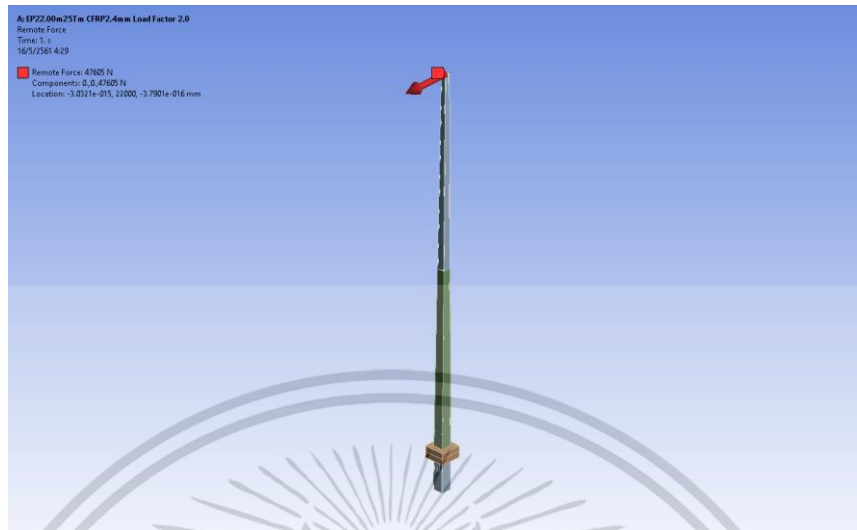
10. ใส่แรงอัดลวดอัดแรงที่บริเวณหน้าตัดของเสาไฟฟ้า



รูปที่ 3.32 แสดงแรงอัดของลวดอัดแรงที่หน้าตัดเสาไฟฟ้า

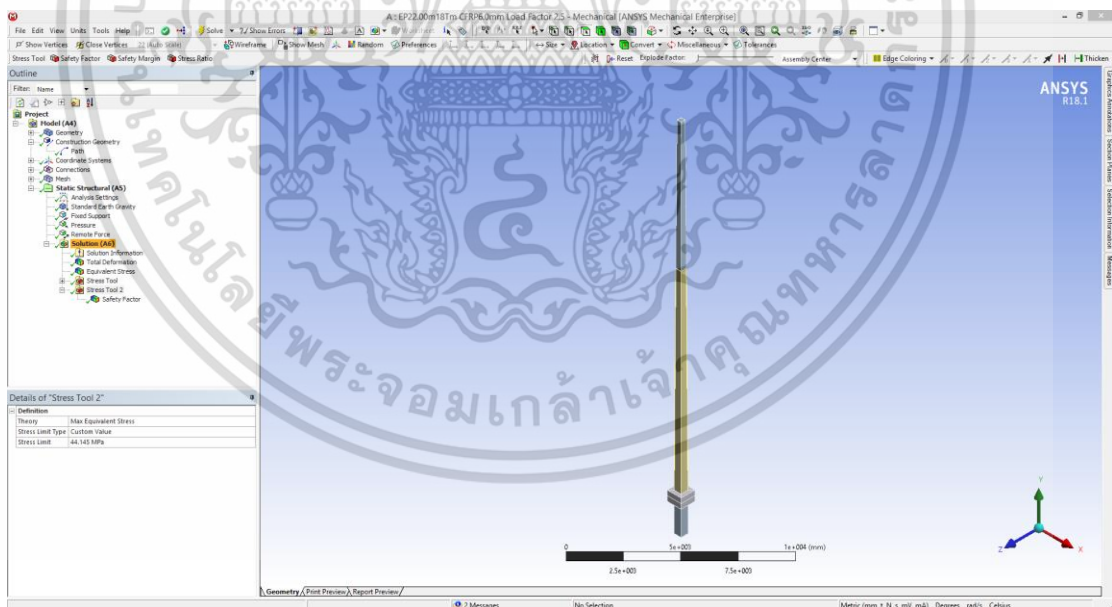
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ใส่แรงด้านข้างที่ปลายของเสาไฟฟ้า



รูปที่ 3.33 แสดงแรงด้านข้างที่ปลายเสาไฟฟ้า

12. กำหนดการตรวจสอบผลของความเค้น โดยไปที่คำสั่ง Solution >> Insert >> Stress Tool >> Max Equivalent Stress แล้วกรอกค่าความเค้นที่ยอมให้ของคอนกรีตที่ช่อง Stress Limit



รูปที่ 3.34 แสดงการกำหนดค่า Stress Limit

13. กด Solve หรือ F5 เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของเสาไฟฟ้าที่มีวัสดุ CFRP ติดอยู่ และหาความหนาของวัสดุ CFRP ที่เหมาะสมที่สุด โดยเมื่อวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมแล้วต้องไม่มีข้อผิดพลาด (0 Error) และคำเตือน (0 Warning) ถึงจะแล้วเสร็จ แต่ถ้าเกิดข้อผิดพลาดและคำเตือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามในชื่อโครงการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นใช้ประโยชน์จากการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นจะต้องทำการตรวจสอบและแก้ไขจนกว่าจะไม่มีข้อผิดพลาดและคำเตือนเกิดขึ้นในหน้าการประมวลผลการวิเคราะห์

เมื่อโปรแกรมทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้นแล้วผลวิเคราะห์จะถูก Save file ออกมาในไฟล์แสดงผลแบบ PDF และผลการวิเคราะห์สามารถแสดงผล Deformation ความเค้นในเสาไฟฟ้า โดยการแสดงผลภาพของ Stress และ Deformation ที่เกิด พร้อมกับตารางของแรงที่ใส่ ดังจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลวิเคราะห์ในแบบ Linear การวิเคราะห์จะหาตำแหน่งของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใน คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า โดยมีการวิเคราะห์ด้วย Mode Path เพื่อดูผลของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต เพื่อทำนายการหักโค่นของเสาไฟฟ้า

ผลจากการวิเคราะห์จะทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress, σ_{max}) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองเสาไฟฟ้าเทียบกับค่ากำลังรับแรงสูงสุดของวัสดุ (S_{limit}) โดยเสาไฟฟ้าจะเกิดการหักเมื่อค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุที่รับได้ดังสมการที่ (4.1) และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) ได้ดังสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$\sigma_{max} \geq S_{limit} \quad (4.1)$$

และอัตราส่วนความปลอดภัย Factor of Safety คือ

$$F.S. = \frac{S_{limit}}{\sigma_{max}} \quad (4.2)$$

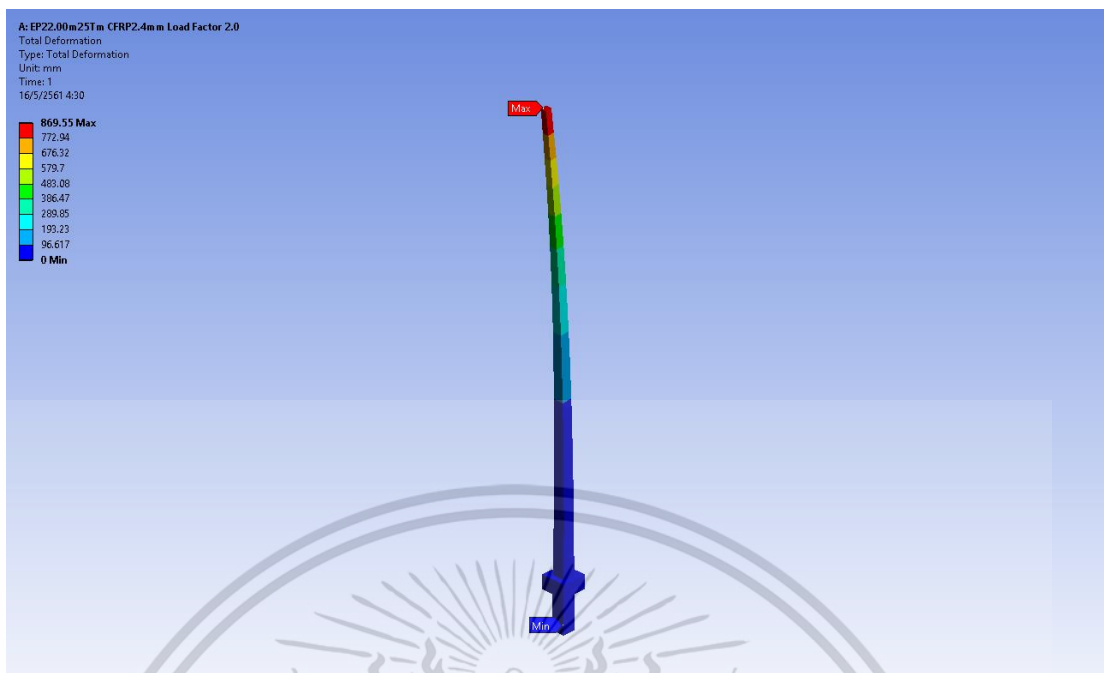
โดยมีเป้าหมายในการออกแบบคือ

$$\frac{S_{limit}}{\sigma_{max}} > 1 \quad (4.3)$$

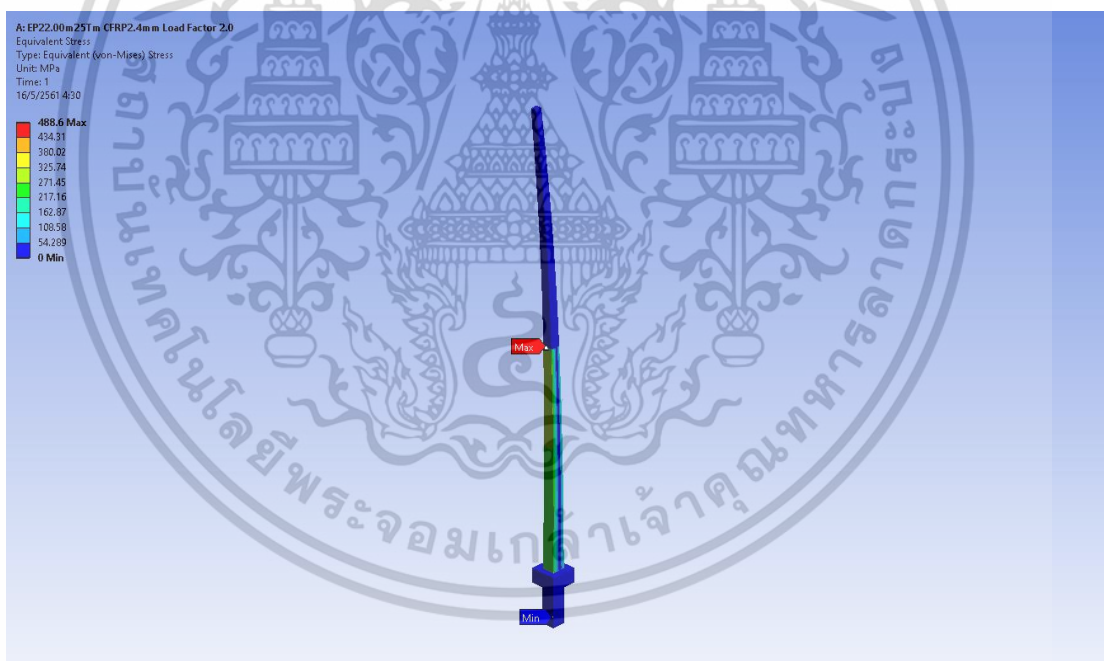
σ_{max} = Maximum Stress (Pa)

S_{limit} = Limit Stress ของวัสดุ (Pa)

$F.S.$ = Factor of Safety



รูปที่ 4.1 รูปแสดงผล Displacement ในเสาไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 รูปแสดงความเค้นสูงสุดที่ปลายเสาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลวิเคราะห์ Stress และ Deformation ของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) และ 22 เมตร (BM 25T-m) ในความสูงที่กำหนด จะได้ Stress และ Deformation ดังตารางและมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. เสริมกำลังเสาไฟฟ้าด้วยการติดแผ่น CFRP จนถึงระยะความสูง 14.1 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน ของเสาไฟฟ้าแบบ 22 เมตร ที่รับโมเมนต์ 18 ตัน-เมตร จะมี Stress Value และ Deformation ที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 4.8 mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
Results		
Minimum	0. mm	3.0113e-011 MPa
Maximum	1286.8 mm	397.02 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 6.0 mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
Results		
Minimum	0. mm	2.9505e-011 MPa
Maximum	1286.8 mm	399.02 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 7.0 mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0. mm	6.961e-010 MPa
Maximum	1211.3 mm	369.44 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

2. เสริมกำลังเสาไฟฟ้าด้วยการติดแผ่น CFRP จนถึงระยะความสูง 11.7 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน ของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร ที่รับโมเมนต์ 25 ตัน-เมตร จะมี Stress และ Deformation ที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m) ที่ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 6.0 mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	746.75 mm	444.41 MPa
Minimum Occurs On	Column	
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m) ที่ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 7.0mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	707.49 mm	416.24 MPa
Minimum Occurs On	SYS\Concrete	
Maximum Occurs On	SYS\Concrete	SYS\CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m) ที่ติดด้วยแผ่น CFRP หนา 8.4 mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
Results		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	674.5 mm	320.87 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

4.2 ผลวิเคราะห์ Safety Factors Path ใน ANSYS ในการวิเคราะห์ Post-Cracking ของ เสาไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ใน Path Safety Factor ของ ANSYS เพื่อหาผลวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยในคอนกรีตด้านที่รับกำลังอัดเพื่อทำนายตำแหน่งการเกิดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า จะได้ค่า Safety Factors ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 22 เมตร 18 ต้น-เมตร

Length (m.)	ความหนา CFRP (mm.)		
	4.8	6.0	7.0
0.00	15.000	15.000	15.000
0.40	15.000	15.000	15.000
0.80	15.000	15.000	15.000
1.20	15.000	15.000	15.000
1.60	15.000	15.000	15.000
2.00	4.827	4.886	4.945
2.30	1.353	1.403	1.453
2.40	1.031	1.069	1.108
2.80	1.012	1.050	1.089
3.20	1.012	1.051	1.089
3.60	1.012	1.050	1.089
4.00	1.012	1.050	1.089
4.40	1.012	1.051	1.089
4.80	1.012	1.051	1.090
5.20	1.013	1.052	1.091
5.60	1.014	1.053	1.092
6.00	1.015	1.055	1.094
6.40	1.017	1.056	1.096
6.80	1.019	1.059	1.099
7.20	1.021	1.061	1.101
7.60	1.024	1.064	1.105
8.00	1.027	1.068	1.109
8.40	1.031	1.072	1.113
8.80	1.035	1.077	1.118
9.20	1.040	1.082	1.123
9.60	1.045	1.087	1.129
10.00	1.051	1.094	1.136
10.40	1.058	1.101	1.143
10.80	1.065	1.109	1.152
11.20	1.074	1.117	1.161
11.60	1.078	1.122	1.166
12.00	1.093	1.138	1.182
12.40	1.104	1.150	1.195
12.80	1.108	1.153	1.199
13.20	1.131	1.177	1.224
13.60	1.146	1.193	1.241
14.00	1.207	1.256	1.305
14.40	0.611	0.611	0.611
14.80	0.621	0.621	0.621
15.20	0.631	0.631	0.631
15.60	0.643	0.643	0.643
16.00	0.657	0.657	0.657
16.40	0.673	0.673	0.673
16.80	0.684	0.684	0.684
17.20	0.713	0.713	0.713
17.60	0.737	0.737	0.737
18.00	0.760	0.760	0.760
18.40	0.799	0.799	0.799
18.80	0.839	0.839	0.839
19.20	0.885	0.885	0.885
19.60	0.947	0.947	0.947
20.00	1.018	1.018	1.018
20.40	1.103	1.103	1.103
20.80	1.226	1.226	1.226
21.20	1.396	1.396	1.396
21.60	1.631	1.631	1.631
22.00	1.865	1.865	1.865

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

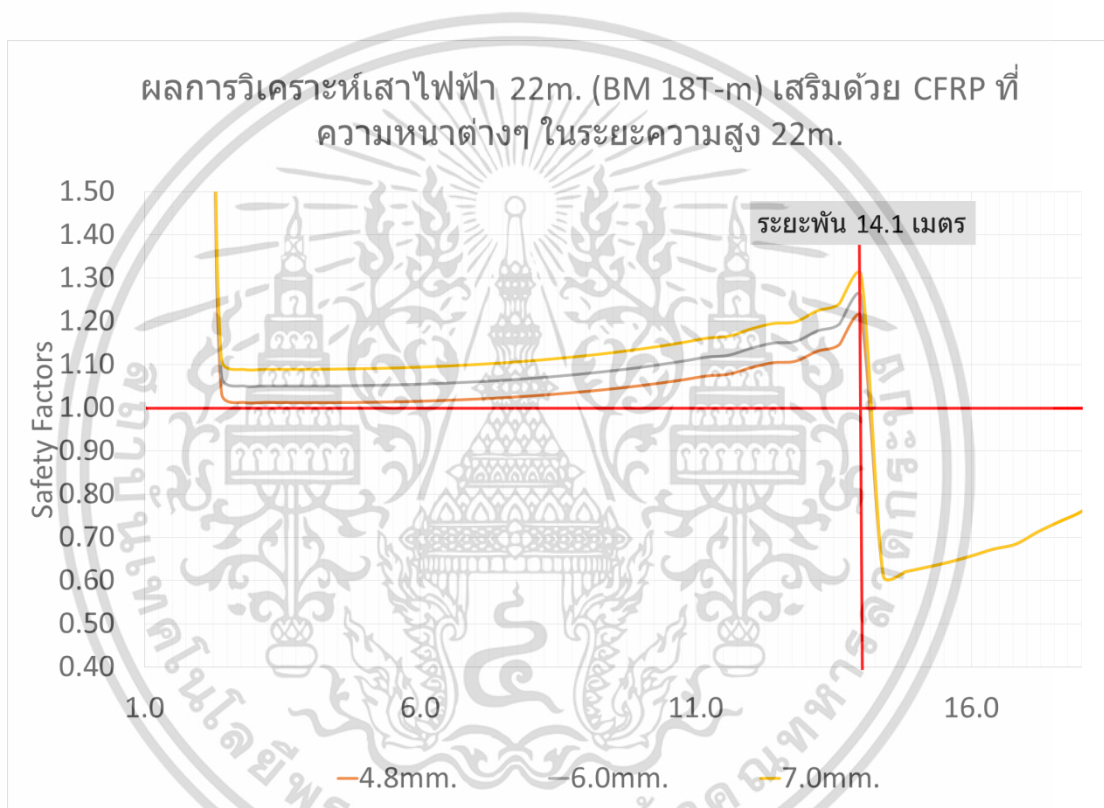
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 22 เมตร 25 ตัน-เมตร

Length (m.)	ความหนา CFRP (mm.)			Length (m.)	ความหนา CFRP (mm.)		
	6.0	7.0	8.4		6.0	7.0	8.4
0.00	15.000	15.000	15.000	11.25	0.925	1.657	1.814
0.25	15.000	15.000	15.000	11.50	0.919	1.634	1.785
0.50	15.000	15.000	15.000	11.70	0.645	0.494	0.413
0.75	15.000	15.000	15.000	11.75	0.820	0.839	0.833
1.00	15.000	15.000	15.000	12.00	0.827	0.889	0.890
1.25	15.000	15.000	15.000	12.25	0.824	0.884	0.884
1.50	15.000	15.000	15.000	12.50	0.822	0.882	0.882
1.75	3.436	2.644	2.643	12.75	0.819	0.880	0.880
2.00	4.572	5.511	5.623	13.00	0.817	0.879	0.879
2.25	1.196	2.494	2.863	13.25	0.816	0.877	0.877
2.50	1.146	1.932	2.089	13.50	0.814	0.876	0.876
2.75	1.112	1.885	2.039	13.75	0.813	0.876	0.876
3.00	1.105	1.875	2.030	14.00	0.812	0.876	0.876
3.25	1.098	1.868	2.022	14.25	0.812	0.876	0.876
3.50	1.091	1.860	2.014	14.50	0.812	0.876	0.876
3.75	1.084	1.852	2.007	14.75	0.812	0.877	0.877
4.00	1.078	1.845	1.999	15.00	0.813	0.879	0.879
4.25	1.071	1.838	1.992	15.25	0.814	0.881	0.881
4.50	1.064	1.832	1.986	15.50	0.816	0.884	0.884
4.75	1.058	1.835	1.989	15.75	0.819	0.887	0.887
5.00	1.051	1.785	1.938	16.00	0.822	0.891	0.891
5.25	1.045	1.759	1.913	16.25	0.826	0.895	0.895
5.50	1.038	1.760	1.914	16.50	0.830	0.901	0.901
5.75	1.032	1.754	1.908	16.75	0.835	0.907	0.907
6.00	1.026	1.747	1.901	17.00	0.842	0.915	0.915
6.25	1.020	1.741	1.895	17.25	0.849	0.923	0.923
6.50	1.014	1.735	1.889	17.50	0.857	0.933	0.933
6.75	1.008	1.729	1.883	17.75	0.867	0.944	0.944
7.00	1.003	1.723	1.877	18.00	0.878	0.957	0.957
7.25	0.997	1.717	1.872	18.25	0.891	0.972	0.972
7.50	0.992	1.712	1.866	18.50	0.906	0.988	0.988
7.75	0.986	1.707	1.861	18.75	0.922	1.008	1.008
8.00	0.981	1.702	1.856	19.00	0.942	1.029	1.029
8.25	0.976	1.697	1.852	19.25	0.964	1.055	1.055
8.50	0.971	1.692	1.847	19.50	0.990	1.083	1.083
8.75	0.966	1.688	1.843	19.75	1.021	1.117	1.117
9.00	0.961	1.684	1.839	20.00	1.056	1.156	1.156
9.25	0.956	1.680	1.835	20.25	1.097	1.202	1.202
9.50	0.952	1.677	1.832	20.50	1.147	1.256	1.256
9.75	0.948	1.673	1.829	20.75	1.206	1.320	1.320
10.00	0.944	1.670	1.826	21.00	1.278	1.399	1.399
10.25	0.940	1.667	1.824	21.25	1.368	1.495	1.495
10.50	0.936	1.665	1.821	21.50	1.480	1.615	1.615
10.75	0.932	1.663	1.820	21.75	1.625	1.763	1.763
11.00	0.929	1.661	1.818	22.00	1.798	1.884	1.884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลวิเคราะห์ Path Safety Factor ข้างต้นสามารถสรุปเป็นกราฟตามระยะความสูงของเสาไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

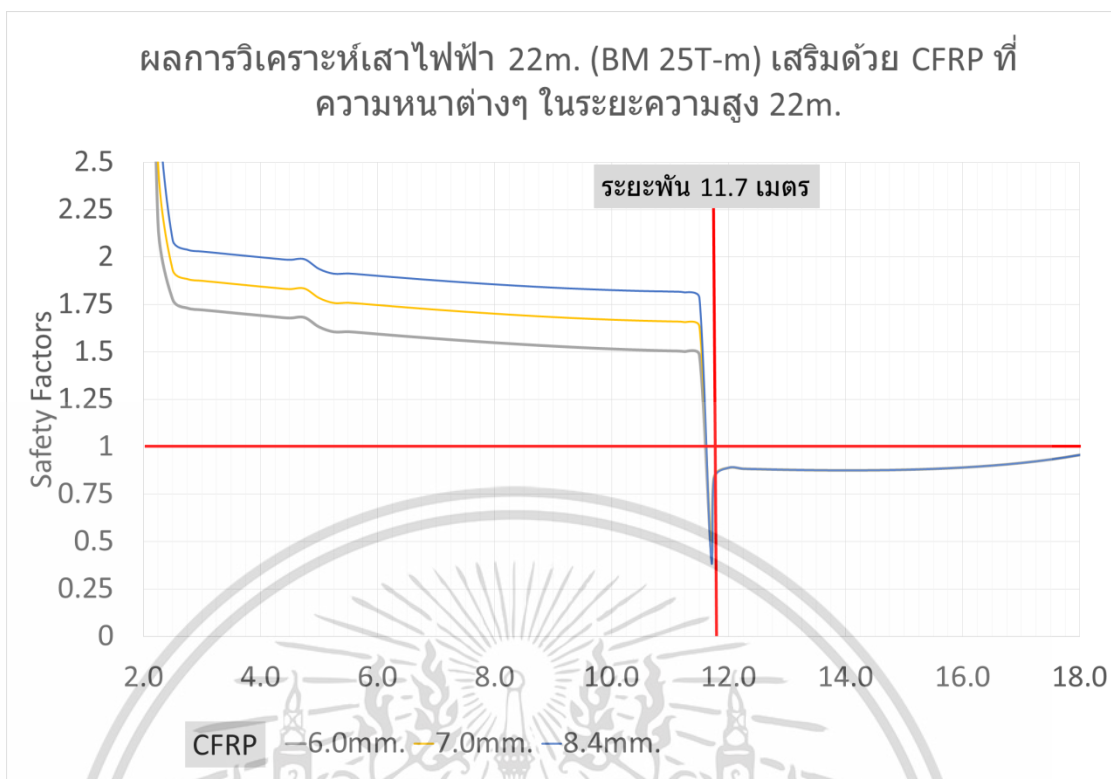
1. เสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 18T-m) ที่มีระยะเสาฝังดิน 2.00 เมตร และเสริมกำลังเสาไฟฟ้าด้วยการติดแผ่น CFRP จนถึงระยะความสูง 14.1 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน จะได้กราฟในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าค่า Safety Factor ของเสาที่ติดด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่น ในทุกๆความหนามีค่ามากกว่า 1 และสูงขึ้นตามลำดับความสูงของเสาไฟฟ้า และที่ระดับความสูง 14.1 เมตร ของทุกความหนาจะมีค่า Safety Factor ลดลงน้อยกว่า 1 ในจุดสูงสุดที่ติดวัสดุ CFRP แบบแผ่น จากนั้นค่า Safety Factor จะมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกันไปทุกต้น



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (18T-m.)

2. เสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (BM 25T-m) ที่มีระยะเสาฝังดิน 2.00 เมตร และเสริมกำลังเสาไฟฟ้าด้วยการติดแผ่น CFRP จนถึงระยะความสูง 11.7 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน จะได้กราฟในรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าค่า Safety Factor ของเสาที่ติดด้วยวัสดุ CFRP แบบแผ่น ในทุกๆความหนามีค่ามากกว่า 1 และสูงขึ้นตามลำดับความสูงของเสาไฟฟ้า และที่ระดับความสูง 11.7 เมตร ของทุกความหนาจะมีค่า Safety Factor ลดลงน้อยกว่า 1 ในจุดสูงสุดที่ติดวัสดุ CFRP แบบแผ่น จากนั้นค่า Safety Factor จะมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกันไปทุกต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 22 เมตร (25T-m.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

5.1 สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าคอนกรีตในระบบ 69/115 kV ที่เสริมกำลังด้วยการติด CFRP ที่ขนาดความหนาต่างๆพบว่าผลที่ได้จากการติด CFRP ที่มีขนาดความหนาต่างๆนั้นต้องมีค่า Factor of Safety ที่ฐานจนถึงตำแหน่งที่ต้องการให้หักต้องมีค่ามากกว่า 1 เสมอซึ่งหมายความว่าจะทำให้เสาไฟฟ้าไม่เกิดการวิบัติในช่วงดังกล่าวในขณะที่ค่า Factor of Safety ที่ระดับที่บังคับให้หักไว้ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 จึงจะทำให้เสาไฟฟ้าที่ทำการเสริมกำลังด้วยการติด CFRP เสริมกำลังนั้นเกิดการวิบัติในตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับเสาไฟฟ้าขนาด 22.00m 18T-m ที่เสริมกำลังด้วยการติด CFRP หนา 4.8 mm. มีค่า Factor of Safety ต่ำกว่า 1 ตรงบริเวณตำแหน่งที่ต้องการให้เกิดการวิบัติแสดงว่าเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติด CFRP ขนาดดังกล่าวจะไม่ทำให้เกิดการหักโค่นแบบต่อเนื่องไปยังต้นข้างเคียง หากมีการหักโค่นของเสาไฟฟ้า สำหรับเสาไฟฟ้าขนาด 22.00 m 25T-m ที่เสริมกำลังด้วยการติด CFRP หนา 6 mm. มีค่า Factor of Safety ต่ำกว่า 1 ตรงบริเวณตำแหน่งที่ต้องการให้เกิดการวิบัติแสดงว่าเสาไฟฟ้าที่เสริมกำลังด้วยการติด CFRP ขนาดดังกล่าวจะไม่ทำให้เกิดการหักโค่นแบบต่อเนื่องไปยังต้นข้างเคียง หากมีการหักโค่นของเสาไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า

- เสาไฟฟ้าขนาด 22.00 m. 18T-m ควรทำการเสริมกำลังด้วยการติด CFRP หนา 4.8 mm. จึงจะทำให้เกิดการวิบัติที่ตำแหน่งที่ต้องการ
- เสาไฟฟ้าขนาด 22.00 m. 25T-m ควรทำการเสริมกำลังด้วยการติด CFRP หนา 6.0 mm. จึงจะทำให้เกิดการวิบัติที่ตำแหน่งที่ต้องการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้วัสดุ CFRP ยังมีราคาที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กหรืออื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินที่เกิดขึ้นในแต่ละเหตุการณ์ อาจมีมูลค่าความเสียหายที่ประเมินค่าไม่ได้ การใช้วัสดุ CFRP ยังสามารถใช้เสริมกำลังเสาไฟฟ้าในต้นที่ตั้งอยู่ได้ โดยที่การติดตั้งจริงจะใช้เวลาไม่นานและไม่มีการสกัดหรือการทำลายเสาไฟฟ้าเดิมใดๆ มีต้นทุนเรื่องค่าแรงที่ต่ำกว่า จึงอาจจะเป็นทางเลือกทางหนึ่ง ที่สามารถเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าในต้นที่ตั้งอยู่ เพื่อช่วยลดการเกิดอันตรายและความเสียหายดังกล่าวได้เป็นอย่างดี โดยในการศึกษานี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อทำการวิเคราะห์ได้ต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.2.1 การศึกษาวิเคราะห์หาความหนาที่เหมาะสมของวัสดุ CFRP ในการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า
- 5.2.2 การศึกษาหาระยะความสูงในการพันวัสดุ CFRP ที่ให้ประสิทธิภาพผลดีที่สุดในการลดการหักโค่นต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าและมีผลทำให้มีจำนวนเสาไฟฟ้าหักโค่นที่น้อยที่สุด
- 5.2.3 การศึกษาการล้าของเสาไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เกิดแรงดัด เพื่อการติดตั้งวัสดุ CFRP ในตำแหน่งที่เกิดแรง
- 5.2.4 การศึกษาหาวิธีเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้าด้วยวัสดุอื่นๆ เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- ชญาภา อัญป้อม. 2559. “ผลกระทบของข้อบกพร่องที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวของระบบเสริมกำลัง FRP ระดับกลาง-การศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์. ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนีสร สถาพร. “การวิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อช่วยลดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า.” วิศวกรรมลาดกระบัง.
- ธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล. 2558. “การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบภายนอกด้วยวัสดุเส้นใยเสริมแรง.” โยธาสาร, กันยายน-ตุลาคม 2546, : หน้า 14-18.
- พนิดา กลิ่นโพธิ์กลาง และจักรพันธ์ เทือกดี. 2016. “ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงต่อพฤติกรรมภายใต้แรงอัดของคอนกรีตที่โอบรัดด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน.” วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย : หน้า 14-27.
- มยพ. 1508-51, 2551, มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย.
- สดสวย สุจริตธรรมกุล. “ข้อจำกัดและข้อพึงระวังในการใช้งานวัสดุ FRP Composites ในงานเสริมกำลังโครงสร้าง.” วารสารคอนกรีต.
- อรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์. 2555. “ประสิทธิภาพทางโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำเอียงศูนย์. ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.