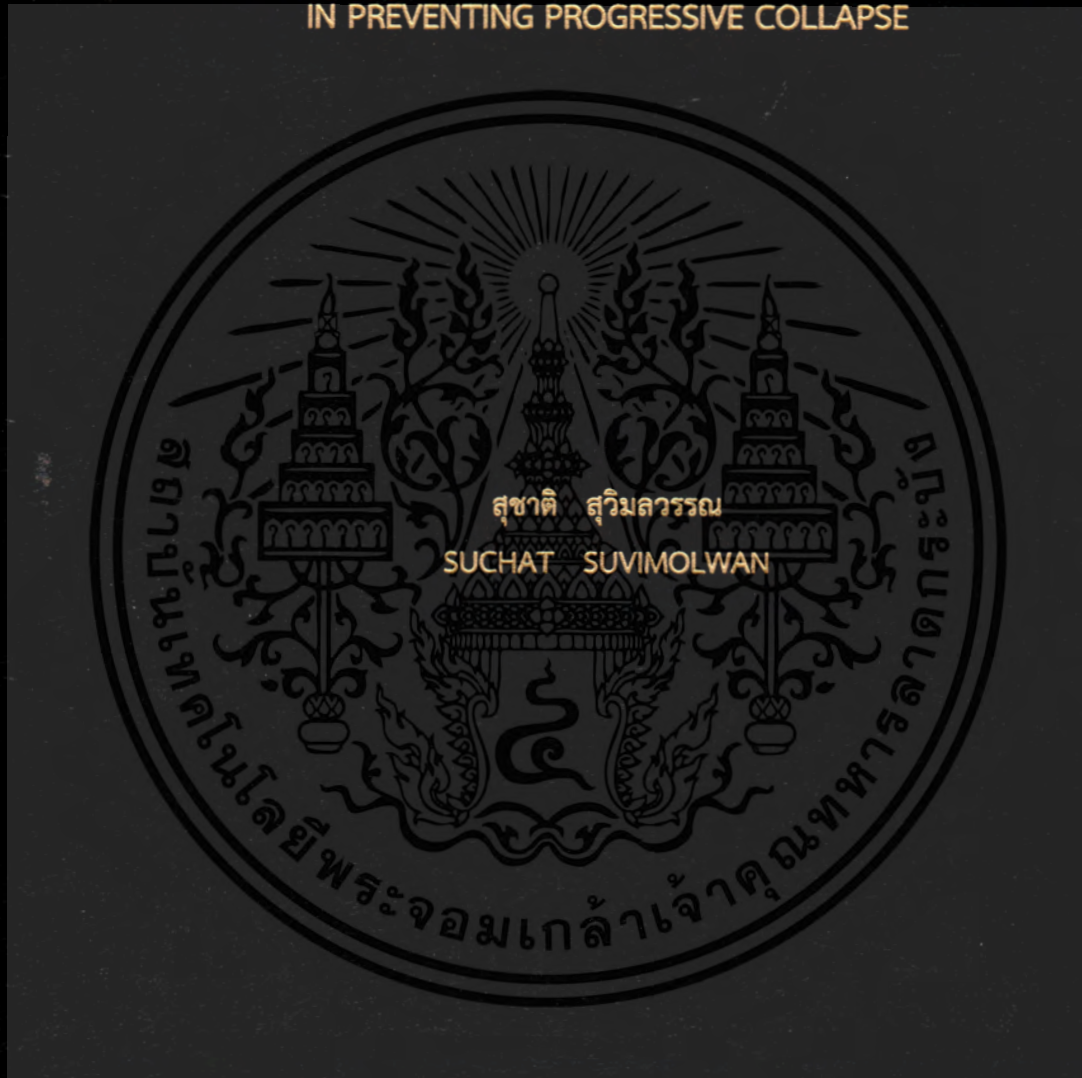


การศึกษาการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่น  
ต่อเนื่อง

A STUDY ON STRENGTHENING IN ELECTRICAL POLES WITH CFRP  
IN PREVENTING PROGRESSIVE COLLAPSE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-093-120

การศึกษาการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่น  
ต่อเนื่อง

A STUDY ON STRENGTHENING IN ELECTRICAL POLES WITH CFRP  
IN PREVENTING PROGRESSIVE COLLAPSE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-093-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON STRENGTHENING IN ELECTRICAL POLES WITH CFRP  
IN PREVENTING PROGRESSIVE COLLAPSE



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-093-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเสริมกำลัง ด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง  
Thesis Title A Study on Strengthening in Electrical Poles with CFRP in Preventing Progressive Collapse  
นักศึกษา นายสุชาติ สุวิมลวรรณ  
รหัสประจำตัว 56601234  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.อัฐวิทย์ สุจริตพงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-093-120

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 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  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเสริมกำลัง ด้วยวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง
นักศึกษา	นายสุชาติ สุวิมลวรรณ
รหัสประจำตัว	5661234
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.อภิญญาวิทย์ สุจริตพงศ์

### บทคัดย่อ

จากรายงานสถิติอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในปัจจุบันหลายๆครั้งพบว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง เกิดการโค่นล้มแบบต่อเนื่องจำนวนหลายต้นจากอุบัติเหตุรถชนเสาไฟฟ้า ลมพายุ และจากการที่รถเครนเกี่ยวสายไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละเหตุการณ์ได้สร้างอันตราย ความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินต่อประชาชนทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีตเองยังมีจุดด้อยตรงที่เป็นวัสดุแข็งเปราะ มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำและทนทานต่อแรงกระแทกที่จำกัด การหักโค่นจึงเกิดในตำแหน่งที่เกิดแรงกระแทกโดยตรงที่มีแรงเค้นสูงสุดหรือตำแหน่งใกล้ฐานน้ำหนักของเสาไฟฟ้าเหนือบริเวณที่หักโค่นจะทำให้เกิดแรงดึงกระชากในเสาไฟฟ้าในต้นข้างเคียง ทำให้เกิดการโค่นล้มแบบต่อเนื่องและอาจทำให้สายไฟฟ้าขาดเป็นผลติดตามมา ดังนั้นการลดน้ำหนักของเสาไฟฟ้าเหนือบริเวณที่หักโค่น จะทำให้แรงดึงกระชากที่เกิดขึ้นในเสาไฟฟ้าต้นข้างเคียงลดลง และสามารถลดการหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าต้นข้างเคียงได้ การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นของเสาไฟฟ้าจากตำแหน่งใกล้ฐานเสาให้สูงขึ้นไปเพื่อทำให้น้ำหนักของเสาไฟฟ้าเหนือบริเวณที่หักโค่นลดลง ซึ่งจะทำให้แรงดึงกระชากที่เกิดขึ้นในเสาไฟฟ้าต้นข้างเคียงมีค่าลดลงตามลำดับ และทำให้สามารถลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาข้างเคียงจากแรงกระทำดังกล่าวได้โดยการนำวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ ในการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงในตำแหน่งของแรงเค้นสูงสุด โดยการวิเคราะห์จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาจำนวนรอบของการพัน CFRP ที่จะสามารถรับแรงเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น และบังคับให้เสาไฟฟ้าหักในบริเวณตำแหน่งที่ต้องการ โดยผลที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการป้องกันเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ทำการปักเสापาดสายแล้ว เพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าข้างเคียงจากแรงกระทำดังกล่าวต่อไป

<b>Thesis</b>	A Study on Strengthening in Electrical Poles with CFRP in Preventing Progressive Collapse
<b>Student</b>	Mr. Suchat Suvimolwan
<b>Student ID.</b>	5661234
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Atavit Sujaritpong

## ABSTRACT

Based on the statistically accidental reports recently, many cases of prestressed concrete electrical poles which are manufactured following the Metropolitan Electricity Authority (MEA) standards were found to be continuously collapsed from the car accident, severe storms, and from the wires hooked by the cranes. And resulting in damage to lives and properties with the poor properties of concrete as a brittle material and low tensile strength which limits the impact resistance, the failure will therefore occur in the position of impact where maximum stress is presented near the base. The concrete weight above the failure position will cause the impact force to the adjacent electrical poles, resulting in consecutive damage and increase the tensile force in electrical cables. To minimize the weight beyond the failure position the consideration to decrease these impact forces to the adjacent poles were studied that might present the consequently consecutive damage. This research was emphasized on the reposition of failure zone from the pole base to the position beyond in order to decrease the weight of concrete which impact the tensile strength induced in the adjacent poles. The prevention of consecutive damage in electrical poles can be achieved by the application of CFRP to strengthen and increase the ductility of the poles where the maximum stress is expected. The finite element analysis was introduced to analyze the amount numbers of wrapping in order to control the desired position of failure. The result from study will be introduced as a guideline to prevent the consecutive damage for the existing prestressed concrete electrical poles.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านอาจารย์ ดร. อัญฐวิทย์ สุจริตพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะในแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณท่านอาจารย์ ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางตลอดจนข้อมูลต่างๆ ที่การจัดงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จและลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority) ที่ให้ข้อมูลสนับสนุนการดำเนินการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุชาติ สุวิมลวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา .....	1
1.2 ปัญหางานวิจัย .....	2
1.3 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการศึกษา .....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา .....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 แนวคิดของงานวิจัย .....	5
2.2 ชนิดของเสาไฟฟ้า การติดตั้งและข้อมูลของเสาไฟฟ้า .....	6
2.3 คุณสมบัติของวัสดุ .....	8
2.3.1 คอนกรีต .....	8
2.3.2 เหล็กลวด Pre-stress .....	9
2.3.2.1 ชนิดของลวดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด .....	9
2.3.2.2 รูปแบบของลวด .....	10
2.4 ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า .....	11
2.5 มยผ. 1508-51 [2551] มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุ คอมโพสิตเสริมเส้นใย .....	12
2.5.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite) .....	12
2.5.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ .....	13
2.5.3 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน .....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Pushover) .....	31
2.6.1 การกระจายแรงผลักแบบโหมดเดียว .....	32
2.6.2 การผลักแบบหลายโหมด .....	34
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	37
3.1 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการปิกเสาพาดสายไฟฟ้า .....	37
3.2 การจำลองโมเดลโครงสร้างเสาไฟฟ้า .....	39
3.2.1 การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม .....	39
3.2.2 การสร้างแบบจำลอง .....	43
3.2.3 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ .....	51
3.3 น้ำหนักบรรทุก .....	46
3.3.1 การสร้างน้ำหนักบรรทุก .....	52
3.4 วิเคราะห์แบบจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	53
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล.....	57
4.1 การแบ่งเอลิเมนต์และการวิเคราะห์ผลเสาไฟฟ้า ที่ไม่มีการพันด้วย CFRP .....	57
4.2 ผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ .....	60
5.1 สรุปผล.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
บรรณานุกรม .....	61

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า .....	6
2.2	ตารางแสดง Mix Design ที่ใช้ในการผลิตเสาไฟฟ้าในปัจจุบัน .....	9
2.3	เส้นผ่านศูนย์กลางระบุพื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิด ไม่คลายความเค้น .....	9
2.4	เส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุพื้นที่หน้าตัด ระบุมวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิด คลายความเค้น .....	10
2.5	คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใย .....	19
2.6	ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของเส้นใยภายใต้แรงดึง .....	19
2.7	คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยเสริมกำลังที่มีไนท์องกลาด.....	21
2.8	การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวแกนของวัสดุต่างๆ .....	27
3.1	ตารางแสดงระยะการพันวัสดุ CFRP ในแบบจำลองเสาไฟฟ้า .....	52
3.2	ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง .....	54
3.3	ตารางแสดงคุณสมบัติกำลังและความหนาของวัสดุ CFRP .....	54
3.4	ตารางแสดงแรงกระจายในลวดอัดแรงที่ใช้ในแบบจำลองเสาไฟฟ้า .....	55
3.5	ตารางแสดงแรงที่ใช้ Input ที่ตำแหน่งหัวเสาในแบบจำลองเสาไฟฟ้า .....	55
3.6	ตาราง Pressure และ Force (เสาที่ไม่มี CFRP) จากผลวิเคราะห์ .....	56
3.7	ตาราง Pressure และ Force (เสาที่มี CFRP) จากผลวิเคราะห์ .....	56
4.1	แสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่ไม่ได้พัน CFRP .....	60
4.2	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 5T-m) ที่ไม่ได้พัน CFRP .....	60
4.3	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) ที่ไม่ได้พัน CFRP .....	60
4.4	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าแบบ 12เมตร (BM 3.5T- m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.13 mm. ....	64
4.5	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าแบบ 12เมตร (BM 3.5T- m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.17 mm. ....	64
4.6	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าแบบ 12เมตร (BM 3.5T- m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.26 mm. ....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าแบบ 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.34 mm. ....65
4.8	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.13mm. .... 66
4.9	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.17mm. .... 66
4.10	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.26mm. .... 66
4.11	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.34mm. .... 67
4.12	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.13mm. .... 68
4.13	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.17mm. .... 68
4.14	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.26mm. .... 68
4.15	ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร ที่พันด้วย CFRP หน้า 0.34mm. .... 68
4.16	แสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร 3.5 ตัน-เมตร ..... 71
4.17	แสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร 5 ตัน-เมตร ..... 72
4.18	แสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร 6 ตัน-เมตร..... 73

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปแสดงความเค้นเนื่องจากแรงกระทำที่บริเวณปลายเสา .....	1
2.2	รูปแสดงแรงกระทำการเกิดโมเมนต์ .....	11
2.3	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย .....	15
2.4	รูปแสดงการเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆ ในการสร้างแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง .....	16
2.5	รูปแสดงพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ .....	18
2.6	รูปแสดงกระบวนการม้วนเส้นใย (Filament Winding Process) .....	22
2.7	รูปแสดงกระบวนการรีดเส้นใย (Pultrusion Process) .....	23
2.8	รูปแสดงกระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ (Vacuum Compaction Process) .....	24
3.1	รูปแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	38
3.2	รูปแสดงการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	39
3.3	รูปแสดงหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	40
3.4	รูปแสดงการปรับแต่ง Option ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	41
3.5	รูปแสดงเครื่องมือพื้นฐานในการเขียนภาพ 2 มิติ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	42
3.6	รูปแสดงการวาดรูปร่างเสาไฟฟ้า 2 มิติ .....	44
3.7	รูปแสดงคำสั่งที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ .....	44
3.8	รูปแสดง Planes สำหรับระดับของส่วนประกอบในเสาไฟฟ้า .....	45
3.9	รูปแสดงคำสั่ง Loft ในการ Sketch แบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า 3 มิติ .....	45
3.10	รูปแสดงการสร้าง Chamfer ที่ขอบของเสาไฟฟ้า .....	46
3.11	รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้า .....	46
3.12	รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้าในการสร้างร่องของเสา .....	47
3.13	รูปแสดงภาพ Plane View หลังจาก Mirror ร่องของโมเดลเสาไฟฟ้า .....	47
3.14	รูปแสดงภาพ View ของเหล็กเสริมหลักในโมเดลเสาไฟฟ้า .....	48
3.15	รูปแสดงภาพเหล็กปลอกและระยะจากฐานเสา .....	48
3.16	รูปแสดงภาพเหล็กปลอกรูปทรงสี่เหลี่ยมจากรยะ Plane ตามแบบ .....	49
3.17	รูปแสดงรูปแสดงระยะเหล็กปลอกแบบสี่เหลี่ยม .....	49
3.18	รูปแสดงภาพตัดที่ Plan ของการเสริมเหล็กในแบบจำลองเสาไฟฟ้า .....	50
3.19	รูปแสดงการพันรอบด้วยวัสดุคอมโพสิต ชนิด คาร์บอน หรือ CFRP .....	50
3.20	รูปแสดงการกำหนดความหนาของวัสดุ CFRP ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset .....	51
3.21	รูปแสดงการสร้างตุ้มคอนกรีตหุ้มเสาและวัสดุ CFRP ที่ตำแหน่ง Ground Level .....	52
3.22	รูปแสดงตุ้มคอนกรีตที่ได้ .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23	รูปแสดงการสร้าง Split ผิวนที่ต็มคอนกรีตสำหรับการกำหนด Fix End ในการวิเคราะห์ ...53
3.24	รูปแสดงโมเดลจาก Inventor ที่แปลงเป็น STP File เปิดใน ANSYS .....57
4.1	รูปแสดงการแบ่ง Mesh การใส่แรง และกำหนด Fix End ที่ปลายเสา (เสาที่ไม่มี CFRP)..58
4.2	รูปแสดงผล Displacement ในเสาไฟฟ้า (เสาที่ไม่มี CFRP) ..... 59
4.3	รูปแสดงความเค้นสูงสุดที่ปลายเสาไฟฟ้า (เสาที่ไม่มี CFRP) ..... 59
4.4	กราฟแสดงผลวิเคราะห์เปรียบเทียบ Stress และ Deformation ในเสาขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m), 12 เมตร (BM 5T-m) และ 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) ที่ไม่ได้พันวัสดุ CFRP ..61
4.5	รูปแสดงการ Input แรงกระทำในแบบจำลองเสาไฟฟ้าในการวิเคราะห์ .....62
4.6	รูปแสดงการแบ่ง Mesh ในโปรแกรม ANSYS (เสาที่มี CFRP) ..... 62
4.7	รูปแสดง Deformation ที่เกิดที่ปลายเสาจากแรงกระทำ ..... 63
4.8	รูปแสดงความเค้นเหนือระยะการพันด้วยวัสดุ CFRP จากระดับพื้นดิน ..... 63
4.9	รูปแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสา 12 เมตร (BM 3.5T-m) เปรียบเทียบกำลังของวัสดุ CFRP ..... 65
4.10	รูปแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสา 12 เมตร (BM 5T-m) เปรียบเทียบกำลังของวัสดุ CFRP ..... 67
4.11	รูปแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสา 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) เปรียบเทียบกำลังของวัสดุ CFRP ..... 69
4.12	กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (3.5T-m.) .....74
4.13	กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (5T-m.) ..... 75
4.14	กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร. (6.5T-m.) ..... 75

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

การไฟฟ้านครหลวงนั้นจะมีข้อกำหนดมาตรฐานของการผลิตเสาไฟฟ้าคอนกรีตทั้งแบบเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Process) และเสาคอนกรีตแรงเหวี่ยง (Spun Process) โดยมีขนาด และการแบ่งประเภทของเสาตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งมีความยาวของเสาไฟฟ้าตั้งแต่ 6 เมตรขึ้นไปจนถึงความยาว 22 เมตร เช่น เสาขนาด 18, 20 และ 22 เมตร ใช้สำหรับรับสายส่ง 69 kV และ 115 kV มีระยะปักเสาพาดสายทุก 80 เมตร เสาขนาด 12, 12.35 เมตร ใช้สำหรับรับสายป้อน 12 kV และ 24 kV มีระยะปักเสาพาดสายทุก 40 เมตร เป็นต้น

โดยทั่วไปการผลิตเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานอุตสาหกรรมมีการใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก ด้วยเหตุผลที่ว่า คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถหล่อให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดตามต้องการได้ง่าย และไม่ถูกจำกัดเหมือนวัสดุอื่น คอนกรีตยังเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งในเรื่องราคาและมีความสามารถในการรับกำลังจากสภาพแวดล้อมและพฤติกรรมเกิดขึ้น เช่น จากการนำสายไฟฟ้ามาพาดไว้ แรงลมที่จะพัดโยกเสา และสายไฟให้แกว่ง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงในเสาไฟฟ้ามากกว่าเสาทั่วไป

แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติและแรงดัดเองของคอนกรีตมีจุดด้อยตรงที่เป็นวัสดุเปราะ มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำและทนต่อการกระแทกที่จำกัด ดังเห็นได้จากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประสบปัญหาจากเสาไฟฟ้าหักโค่นหรือล้มเป็นจำนวนมากในแต่ละเหตุการณ์ โดยพบว่าปัจจัยที่มักกระทำส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากปัจจัยภายนอก เช่น อุบัติเหตุรถชนเสาไฟฟ้า รถเกี่ยวสายไฟฟ้าหรือสายสื่อสาร ต้นไม้ล้มทับเสาหรือสายไฟฟ้า เป็นต้น ส่งผลกระทบให้เสาไฟฟ้าเกิดการหักโค่นหรือล้มในต้นที่ถูกแรงกระทำตรง และส่งผลต่อเนื่องทำให้หักโค่นในเสาไฟฟ้าข้างเคียงรวมแล้วเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากสายไฟฟ้าขาด ในแต่ละเหตุการณ์ ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟน. ได้รับความเดือนร้อนไม่มีไฟฟ้าใช้ และเกิดอันตรายต่อประชาชนทั่วไปจากเสาไฟฟ้าที่หักโค่น เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน อีกทั้งการหักโค่นของเสาไฟฟ้าที่เกิดจากพายุฝนฟ้าคะนองและลมกรรโชกแรงในบางพื้นที่ เช่น เสาไฟฟ้าหักโค่นล้มทับรถยนต์และบ้านเรือนทำให้มีผู้เสียชีวิต มีไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง หรือไฟไหม้จากการที่ไฟฟ้าลัดวงจรเกิดขึ้น จากเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นนี้ แสดงให้เห็นว่ากำลังของคอนกรีตไม่เพียงพอต่อการต้านทานการพังของเสาไฟฟ้า จากกรณีต่างๆ นี้ จึงเป็นที่มาของการศึกษาการปรับปรุงเพื่อการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า ด้วยการเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวให้กับคอนกรีต เพื่อลดปัญหาต่างๆ ดังที่กล่าวมา

การหักหรือโค่นล้มของเสาไฟฟ้าข้างเคียงแบบต่อเนื่องจำนวนมากนี้ ส่วนใหญ่เกิดจากการหักโค่นของเสาในตำแหน่งใกล้ฐานที่เกิดโมเมนต์สูงสุดจากแรงกระแทก ทำให้น้ำหนักของเสาไฟฟ้าที่หักโค่นแต่ละต้นเพิ่มแรงกระทำในสายเคเบิลไฟฟ้า โดยแรงกระทำนี้มีทิศทางลงในแนวตั้งและจะแปรผันตรงกับจำนวน ตำแหน่งที่หักโค่นและน้ำหนักของเสาไฟฟ้า การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเพื่อเป้าหมายการลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่นหรือล้ม ต่อเนื่อง จากแรงกระทำดังกล่าว

โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเรื่องการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Polymer) ชนิด Carbon หรือ CFRP ในการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้า เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง โดยจะนำมาใช้ในการเสริมกำลังเสาไฟฟ้าคอนกรีต

## 1.2 ปัญหางานวิจัย

การวิบัติหรือการหักโค่นหรือล้มของเสาไฟฟ้าทั้งจากอุบัติเหตุ และภัยธรรมชาติ เช่น ลมพายุ เป็นต้น และจะเกิดขึ้นโดยไม่สามารถคาดการณ์ว่าจะเกิดกับเสาไฟฟ้าต้นไหนเป็นต้นหลัก และงานวิจัยนี้จะศึกษา โดยการวิเคราะห์แบบจำลองตามเงื่อนไขในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อหาแนวทางในการป้องกันผลลัพธ์ของการหักโค่นต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์นี้

## 1.3 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นจากใกล้ฐานให้อยู่สูงขึ้นด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Polymer) หรือ CFRP
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Polymer) ชนิด Carbon
3. เพื่อศึกษาความเค้นสูงสุดหรือ Maximum Stress ที่จะเกิดในเสา และพฤติกรรม Post-cracking หรือตำแหน่งการหักของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจากผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
4. เป็นแนวทางในการปรับปรุงเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าคอนกรีต เพื่อลดจำนวนการหักโค่นหรือล้ม ต่อเนื่อง ของต้นที่ตั้งอยู่ข้างเคียงจากอุบัติเหตุรถชนเสาไฟฟ้า รถเกี่ยวสายไฟฟ้าหรือสายสื่อสาร และต้นไม้ล้มทับเสาหรือสายไฟฟ้า ในเสาไฟฟ้าต้นหลัก ดังกล่าว

## 1.4. ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาโดยใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced Polymer) หรือ CFRP ชนิด Carbon ในการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้า ตามมาตรฐานการติดตั้งของ มยผ. 1508-51. มาตรฐานการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย, กรมโยธาธิการและผังเมือง

2. จำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตเสียดัดแรงแบบ (Pre-stressed Process) ตามขนาดมาตรฐานของ กปน โดยเลือกใช้เสาไฟฟ้าที่ความยาว 12 เมตร (GW), 12 เมตร และ 12.35 เมตร สำหรับสายป้อน 12 kV และ 24 kV เป็นตัวอย่างในทำแบบจำลองและทำการวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

3. การศึกษาจะพิจารณาส่วนโครงสร้างที่อยู่เหนือพื้นระดับผิวดิน โดยให้เงื่อนไขส่วนที่อยู่ในดิน หรือส่วนปักฝังมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการหักโค่นหรือล้ม

4. การวิเคราะห์ความเค้นและการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายเสาที่เกิดจะพิจารณาเฉพาะที่เกิดจากแรงกระทำในเสาไฟฟ้าคอนกรีตเท่านั้น ไม่รวมถึงแรงลม น้ำหนักบรรทุกจากการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนเสาไฟฟ้า เช่น การติดตั้งหม้อแปลงชนิดแขวนบนเสาไฟฟ้า หรือการติดตั้งคอนสายด้านเดียวของสายป้อนและสายส่ง เป็นต้น

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

การจัดทำโครงการวิจัยการเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้าเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการทนต่อแรงกระทำจากอุบัติเหตุ ด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced Polymer) หรือ CFRP ชนิด Carbon มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาแบบมาตรฐานและข้อกำหนดของเสาไฟฟ้าคอนกรีต ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (กปน) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย หรือ CFRP ชนิด Carbon ที่มีใช้อยู่ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง รวมถึงวิธีการติดตั้งในโครงสร้างคอนกรีตต่างๆ ตามมาตรฐานของ มยพ.1508-51 [2551] มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

3. สร้างแบบจำลองเสาไฟฟ้าขนาดตามมาตรฐานของ กปน เพื่อการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นและจำลองเสาที่ใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย หรือ CFRP โดยพันจากตำแหน่งฐานเสาจนถึงระดับความสูงในตำแหน่งที่จะบังคับให้เกิดการหักในเสาไฟฟ้าคอนกรีต โดยเลือกใช้เสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ที่มี BM 3.5 และ 5 ตัน-เมตร และเสา 12.35 ที่มี BM 6 ตัน-เมตร เป็นแบบจำลองในการสร้างโมเดลในโปรแกรมวิเคราะห์ ที่มีการพันวัสดุ CFRP ที่ความสูง 6.05, 6.0 และ 5.3 เมตร ตามลำดับ ที่ความหนา 0.13 มม. เป็นต้นไป ในแต่ละโมเดล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์

4. วิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาที่ไม่ได้ใช้ และเสาที่มีการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย หรือ CFRP

5. สรุปผลการวิเคราะห์ เปรียบเทียบความเค้นและตำแหน่งที่เกิดในเสาไฟฟ้าที่ใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย หรือ CFRP กับเสาที่ไม่ได้พัน

6. จัดทำรูปเล่ม และนำเสนองานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-reinforced Polymer) หรือ CFRP ชนิด Carbon แบบแผ่น (Strip) และแบบผ้า (Fabric) ที่ใช้ในการเสริมกำลังของเสาคอนกรีต
2. ได้ทราบผลการวิเคราะห์ความเค้นสูงสุดที่เกิดในวัสดุ CFRP และอัตราส่วนความปลอดภัยของการแตกหักในคอนกรีตเพื่อวิเคราะห์การหักโค่นหรือล้ม ของเสาไฟฟ้าที่เกิดจากอุบัติเหตุรถชน ในระยะความสูงของการติดตั้งวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยหรือ CFRP ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต
3. ได้แนวทางในการปรับปรุงการเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีตในต้นที่ตั้งอยู่ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติกำลังต้านทานต่อความเค้นที่เกิดจากแรงที่ส่งถ่ายมาจากเสาไฟฟ้าในต้นที่เกิดการหักโค่น จากอุบัติเหตุรถชนหรือธรรมชาติต่างๆ และเปลี่ยนตำแหน่งของความเค้น (Stress) ให้เกิดในตำแหน่งที่สูงขึ้นไปในเสาไฟฟ้า ที่จะสามารถลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่หักโค่นได้

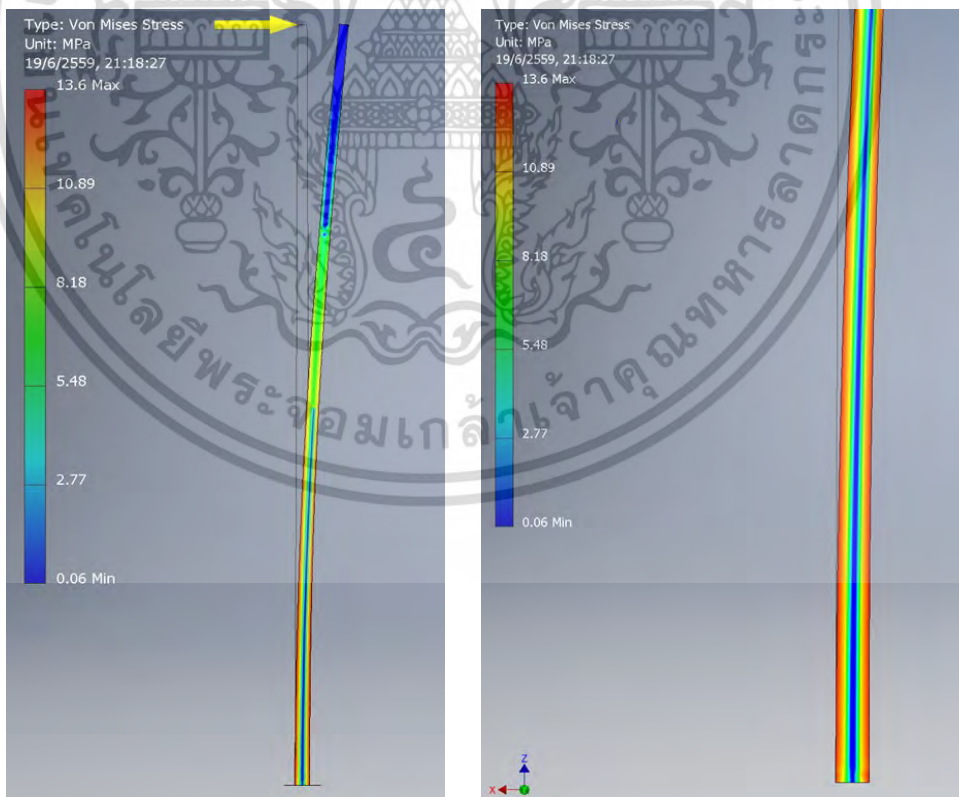


## บทที่ 2

# แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดของงานวิจัย

แรงกระแทกในทางกลศาสตร์ คือ แรงที่มีขนาดสูงในระยะเวลานั้นๆ ผลของแรงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัตถุหรือขนาดของแรงและความเร็วสัมพัทธ์ วัสดุที่เปราะกว่าก็จะเกิดการแตกหัก ตามผลของแรงที่เกิด การต้านทานแรงกระแทกขึ้นอยู่กับโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่แข็งแรงจะทนต่อแรงกระแทกน้อยกว่า วัสดุยืดหยุ่นจะทนต่อแรงกระแทกได้ดี การวิบัติหรือแตกร้าวก็จะเกิดในตำแหน่งที่ถูกแรงกระแทกมากกว่า ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต หากเกิดแรงกระแทกจากอุบัติเหตุรถชน พฤติกรรมของเสาจะเกิดแรงเค้นในตำแหน่งที่เกิดแรงกระแทกและถ่ายแรงไปสู่ด้านตรงข้ามของเสา ในขณะที่เสาไฟฟ้าต้นตอเนื่อง จะถูกส่งถ่ายแรงมาจากเสาไฟฟ้าต้นที่หักโค่น โดยสายไฟฟ้าที่พาดเสาแต่ละต้น ในตำแหน่งต่างๆ ของการปักเสาพาดสาย ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ในลักษณะของแรงที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดโมเมนต์ในตำแหน่งฐาน สามารถอธิบายได้จากหัวข้อที่ 2.4



รูปที่ 2.1 รูปแสดงความเค้นเนื่องจากแรงกระทำที่บริเวณปลายเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ชนิดของเสาไฟฟ้า การติดตั้งและข้อมูลของเสาไฟฟ้า

เสาไฟฟ้า (Pole) เสาที่ใช้ในการติดตั้งเสาไฟฟ้ามียู่ 2 ชนิด คือ เสาไม้ (Wood Pole) และเสาคอนกรีต (Concrete Pole) เสาไม้ปัจจุบันได้เลิกใช้ไปแล้วเนื่องจากไม้หายาก ส่วนเสาคอนกรีต (Concrete Pole) มีข้อกำหนดมาตรฐานของการผลิตเสาไฟฟ้าคอนกรีตทั้งแบบเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง (Pre-stressed Process) และเสาคอนกรีตแรงเหวี่ยง (Spun Process) มีการผลิตในขนาดที่ใช้ 6, 8.50, 10, 10.50, 12, 12.35, 14, 16, 18, 18.50, 20 และ 22 เมตร

เสาขนาด 18, 22, 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 พหล.

เสาขนาด 10 เมตร ใช้สำหรับ Line Pole ในเขต Network Area สำหรับเป็น Line Pole และ Service Pole ระหว่างเสาแรงดันปานกลาง หรือในที่ต่ำหรือเสาชามถนน

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

### ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเสาไฟฟ้า

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

โดยความลึกของเสาที่ปัก ตามมาตรฐาน มีดังนี้ เสา 6 เมตรปักลึกจากระดับถนน 1.20 เมตร เสา 8.50 เมตรปักลึกจากระดับถนน 1.30 เมตร เสา 10 เมตรปักลึกจากระดับถนน 1.75 เมตร เสา 12 เมตรปักลึกจากระดับถนน 1.75 เมตร และเสา 14 เมตรจะปักลึกจากระดับถนน 2 เมตร

ระยะ Span ในการปักเสา เสาแรงสูงตามปกติไม่ควรเกิน 40 เมตร และเสาแรงต่ำ ตามปกติไม่ควรเกิน 30 เมตร ในบางกรณีระยะ Span ก็อาจจะยาวกว่าปกติได้ เช่น กีดขวางประตูบ้านทางเขวากออก (ไม่ควรเกิน 45 เมตร) กรณีปักเสาในคลองหรือแม่น้ำ ใ้ไข Span ไม่เกิน 80 เมตรได้ โดยจะตองพาดสายแรงสูงขนาด 2-35 mm<sup>2</sup> และสามารถติดตั้งหม้อแปลง และ/หรือพาดสายแรงต่ำได้ ในกรณีที่จะต้องพาดสายเป็นระบบ 3 เฟส และขนาดของสายไม่เกินขนาด 185 mm<sup>2</sup> จะต้องปักเสาแซมเป็น MID SPAN คือ 40 เมตร ทั้งนี้ ปัจจุบันสายแรงกลางชนิดเปลือยทุกขนาด ไม่มีการออกแบบติดตั้งในระบบจำหน่าย

ในกรณีทางโค้ง Maximum Line Angle สำหรับการพาดสาย (35 mm<sup>2</sup> ไม่เกิน 60°, 70 mm<sup>2</sup> A ไม่เกิน 35°, 105 mm<sup>2</sup> ไม่เกิน 26°, 185 mm<sup>2</sup> A ไม่เกิน 18°) เกินกว่าที่กำหนดไว้ต้องลด Span ลงเป็น 40 เมตร ทั้งนี้ จะต้องคำนึงถึง Bending Moment หรือความมั่นคงของเสาดวย

การทำให้ฐานเสา โดยทั่วไปการทำให้ฐานเสาจะทำ ในกรณีที่จะมีการติดตั้งหม้อแปลง โดยมีหลักเกณฑ์ในการเลือกใช้ฐานเสาซึ่งจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของหม้อแปลงเป็นเกณฑ์ ขอแนะนำในการเลือกฐานเสา มีดังนี้

- 2.2.1 ฐานเสา 12 เมตร เพื่อรับหม้อแปลง 3 x 75 kVA หรือดินแข็ง รับน้ำหนักได้ 2,000 Kg. (สร้างก่อนปักเสา)
- 2.2.2 ฐานเสา 12 เมตร เพื่อรับหม้อแปลง 3 x 75 kVA, 225 kVA หรือ 2 x 100 kVA ดินอ่อนรับน้ำหนักได้ 1,800 kg. (สร้างก่อนการปักเสา)
- 2.2.3 ฐานเสา 12 เมตร เพื่อรับหม้อแปลง 3 x 75 kVA, 225 kVA หรือ 2 x 100 kVA รับน้ำหนักได้ 1,500 Kg. (เสริมทำเสาที่ปักไว้แล้ว)
- 2.2.4 Key pole สำหรับนั่งฐานหม้อแปลง (รับน้ำหนักไม่เกิน 3 ตัน)
- 2.2.5 ฐานเสานั่งฐานหม้อแปลง 4.5 ตัน ดินอ่อน (รถเขอปฎิบัติงานได้ถึงที่)
- 2.2.6 ฐานนั่งหม้อแปลง 6.5 ตัน ดินแข็ง (รถเขอปฎิบัติงานได้ถึงที่)
- 2.2.7 ฐานเสานั่งฐานหม้อแปลง 6.5 ตัน ดินอ่อน (เขอปฎิบัติงานได้ถึงที่) เพื่อสะดวกในการเลือกใช้งานหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำฐานเสาในน้ำ ตามปกติพยายามหลีกเลี่ยงเนื่องจากทำได้ลำบากการบำรุงรักษา ภายหลังทำได้ไม่สะดวก ในกรณีที่ยังจำเป็นต้องทำหรือหลีกเลี่ยงไม่ได้ ก็มีรายละเอียดดังนี้ ฐานเสานั่งร้านหม้อแปลงรับน้ำหม้อแปลงได้ไม่เกิน 4.5 คนต่อต้น เป็นฐานเสาชนิดใช้ Stub คู่ ฐานเสาหม้อแปลงขนาด 3 x 50 kVA ถึง 3 x 75 kVA ใช้ Stub คู่

การพิจารณากำหนดจุดปักเสา การกำหนดจุดที่จะปักเสานั้นมักจะประสบปัญหาอยู่เสมอ ฉะนั้นจะต้องคำนึงและพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้ แนวสายที่แยกไปใหญ่ที่ข้อไขไฟ มุมเลี้ยวต้องคำนึงถึงเพื่อไว้สำหรับแนวสายแรงสูง แรงต่ำที่จะต้องต่อแยกไปในอนาคต ตำแหน่งที่จะติดตั้งหม้อแปลง ตำแหน่งที่จะโยงสายและฝังสมอจะมีการติดตั้งไฟฟ้าสาธารณะในอนาคตหรือไม่ พยายามปักเสาในทิศทางสาธารณะให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ควรปักเสาให้อยู่ฝังตรงข้ามกับถนนหรือซอยแยก ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการต่อสาย ปักเสาในตำแหน่งที่ระยะ Slack Span น้อยที่สุด ซึ่งไม่ควรเกิน 23 เมตร คอนสายใหญ่ในกรณีที่ยังไม่ปักเสาในทิศทางจราจรและการสัญจร ควรปักเสาด้านริม ให้สามารถใช้สมอเท่าที่จะทำได้ ควรหลีกเลี่ยงการใช้ Side Walk Guy ที่ด้านริม ควรหลีกเลี่ยงการปักเสาในที่สวนบุคคล การกำหนดจุดปักเสาต้องห่างจากหลักหมุดเขตถนนถึงจุดศูนย์กลางเสาที่จะปักอย่างน้อย 65 cm กรณีที่มีเสาอยู่แล้ว อนุโลมให้ปักตามแนวเดิมได้ การกำหนดจุดปักเสาจะต้องคำนึงถึง Working Space ที่โคนเสาดวย โดยเมื่อปักเสาลงไปแล้วจะต้องทำงานได้โดยไม่มีอุปสรรคทางดานสาธารณูปโภค เช่น ท่อระบายน้ำ ประปา การปักเสาในเขตที่กรุงเทพมหานคร

## 2.3 คุณสมบัติของวัสดุ

### 2.3.1 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 2.3.2 เหล็กลวด Pre-stress

ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง หมายถึง ลวดที่สร้างขึ้นโดยวิธีดึงเย็นเหล็กลวดคาร์บอนสูง ดึงดึงเย็น คือลวดลักษณะตัน ทำจากเหล็กลวดโดยการดึงเย็นผ่านตายหรือลูกกลิ้ง

2.3.2.1 ชนิดของลวดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดไม่คลายความเค้น (Non-Stress Relieved or Mild Coil Wire) หมายถึง ลวดซึ่งอยู่ในสภาพที่ได้จากการดึงเย็น มีสารหล่อลื่นที่ใช้ในการดึงเย็นหล่อเหลืออยู่ที่ผิว ขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 เส้นผ่านศูนย์กลาง ระบุพื้นที่หน้าตัด ระบุมวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดไม่คลายความเค้น

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ระบุ มิลลิเมตร	ความทนแรง ดึงระบุ <sup>1)</sup> นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัด ระบุ ตาราง มิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ <sup>2)</sup> ต่ำสุด		
			คาร์ระบุ <sup>3)</sup> กรัม	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน กรัม	แรงดึง สูงสุด <sup>4)</sup> กิโลนิวตัน	แรงดึงพิสูจน์ ร้อยละ 0.1 กิโลนิวตัน	รัศมีการตัดโค้ง 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชนิดลวดคลายความเค้น (Stress Relieved Wire) หมายถึงลวดดึงเย็นซึ่งผ่านขบวนการปรับคุณสมบัติวิธีใดวิธีหนึ่งตลอดความยาวของเส้น ดังต่อไปนี้

- นำลวดผ่านชุดตัดตรง แล้วอบร้อนระยะเวลาสั้น หรือ
- อบร้อนระยะเวลาสั้นในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรในสภาพให้ความเครียดตามแนวแกน ขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 เส้นผ่านศูนย์กลางระบุ พื้นที่หน้าตัดระบุ มวลต่อเมตร และค่าลักษณะเฉพาะของลวดชนิดคลายความเค้น

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ระบุ มิลลิเมตร	ความหนา แรง ดึงระบุ <sup>1)</sup> นิวตันต่อ ตาราง มิลลิเมตร	พื้นที่หน้าตัด ระบุ ตาราง มิลลิเมตร	มวลต่อเมตร		ค่าลักษณะเฉพาะ <sup>2)</sup> ต่ำสุด			
			คาร์ระบุ <sup>3)</sup> กรัม	เกณฑ์ความ คลาดเคลื่อน กรัม	แรงดึง สูงสุด <sup>4)</sup> กิโลนิวตัน	แรงดึงพิสูจน์		รัศมีการดัดโค้ง มิลลิเมตร
						ร้อยละ <sup>4)5)6)</sup> 0.1 กิโลนิวตัน	ร้อยละ <sup>4)6)</sup> 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

2.3.2.2 รูปแบบของลวดแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

1. แบบเกลี้ยง (Plain Wire) หมายถึง ลวดที่มีผิวตามที่ได้จากตายที่ใช้ดึง มีพื้นที่ภาคตัดขวางสม่ำเสมอ ลักษณะผิวและแนวแกนไม่เปลี่ยนแปลงเป็นคาบตลอดความยาว

2. แบบมีรอยย้า (Indented Wire) หมายถึง ลวดซึ่งผิวมีรอยย้าเป็นระยะเท่าๆ กันตลอด

ความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบบหยัก (Crimped Wire) หมายถึง ลวดที่เปลี่ยนแปลงแนวแกนอย่างสม่ำเสมอในระนาบเดียวหรือในรูปของเกลียว ซึ่งเกิดขึ้นโดยกรรมวิธีทางกลหลังการดึงเย็น

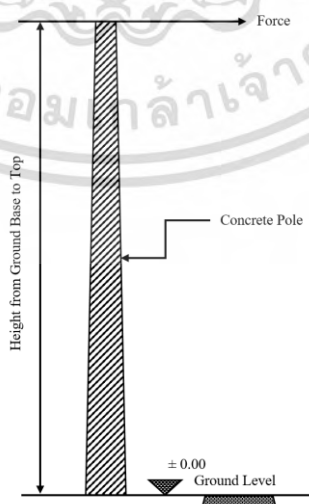
4. แบบมีบั้ง (Chevron) คล้ายกับแบบหยัก ทั้งนี้การใช้งานของลวดทั้งสองแบบเหมือนกันทุกประการ เพราะมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันรวมทั้งสามารถใช้อุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆร่วมกันได้ตามปกติ

## 2.4 ผลของโมเมนต์ดัดเนื่องจากแรงดึงของสายไฟฟ้า

ความสามารถในการรับแรงดัด (bending moment : B.M.) ของเสาคอนกรีตอัดแรง ที่มีการติดตั้งสายไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ บนเสาไฟฟ้า ซึ่งความหมายของ B.M. จะหมายถึงเมื่อมีแรงลมกระทำต่อวัสดุที่ยึดอยู่กับที่ในลักษณะที่แรงนั้นพยายามทำให้วัตถุนั้นหมุนไปตามทิศทางของแรงที่มากระทำ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างแรงที่กระทำกับระยะทางในแนวตั้งฉากจากแนวแรงไปยังจุดหมุน เป็นไปตามสมการที่ (2.3)

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

โดยที่ B.M. = โมเมนต์ดัด กิโลกรัม-เมตร (kg-m)  
 F = แรงที่กระทำต่อวัตถุ กิโลกรัม (kgf)  
 S = ระยะทางในแนวตั้งฉากจากจุดที่แรงกระทำไปยังจุดหมุน เมตร (m)



รูปที่ 2.2 รูปแสดงแรงกระทำที่เกิดจากการเกิดโมเมนต์ดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 หากพิจารณาเป็นการฝังเสาคอนกรีตในพื้นที่ดิน จะแทนค่าใหม่โดยไขความสูงของเสาคอนกรีต (H) แทนค่า S ดังนั้นจะเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$B.M. = F \times H \quad (2.4)$$

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

F = แรงที่กระทำต่อเสาคอนกรีต กิโลกรัม (kgf)

H = ความสูงของเสาคอนกรีตที่อยู่เหนือพื้นดิน เมตร (m)

โดยทั่วไปวัตถุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการรับ B.M. ไม่เท่ากัน ซึ่งวัตถุจะสามารถรับค่า B.M. ได้สูงสุดอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าหากแรงที่มากระทำทำให้เกิด B.M. มีค่าสูงเกินกว่าที่วัตถุนั้นจะรับได้ วัตถุนั้นก็จะเกิดการแตกหักหรือร้าวซึ่งขึ้นอยู่กับว่าจะเป็วัตถุชนิดใด ในที่นี้การไฟฟ้านครหลวงได้ใช้เสาคอนกรีตอัดแรงเป็นตัวรับ 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 จะเกิดขึ้นในกรณีที่สายไฟทำการเข้าปลายสายที่เสาต้นสุดท้ายโดยไม่มีสายยึดโยง หรือเกิดจากการขาดสายไฟที่ไม่เป็นแนวตรงทำให้เกิดแรงลัพท์ตั้งฉากกับหน้าเสาเนื่องจากมุมเบี่ยงเบนของสายไฟ

2. B.M. ที่เกิดจากแรงลม โดยจะเกิดเฉพาะเวลาที่ลมพัดมาปะทะกับเสาไฟฟ้าหรือสายไฟฟารวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ ดวยที่ติดตั้งอยู่บนเสาไฟฟ้า

## 2.5 มยพ. 1508-51 [2551] มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย

### 2.5.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite)

คอมโพสิต (Composite) เป็นระบบของวัสดุที่ประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งมีการเชื่อมประสานวัสดุดังกล่าวเข้าไว้ด้วยกัน วัสดุคอมโพสิตในเอกสารนี้ หมายถึง เมทริกซ์ (Matrix) ของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย หรือวัสดุเสริมกำลังอื่นๆ ซึ่งมีความยาวมากกว่าความหนา

อย่างชัดเจน วัสดุคอมโพสิต หรือ พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย สามารถอธิบายให้ชัดเจน เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ขึ้นด้วยการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้าง 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

### 2.5.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

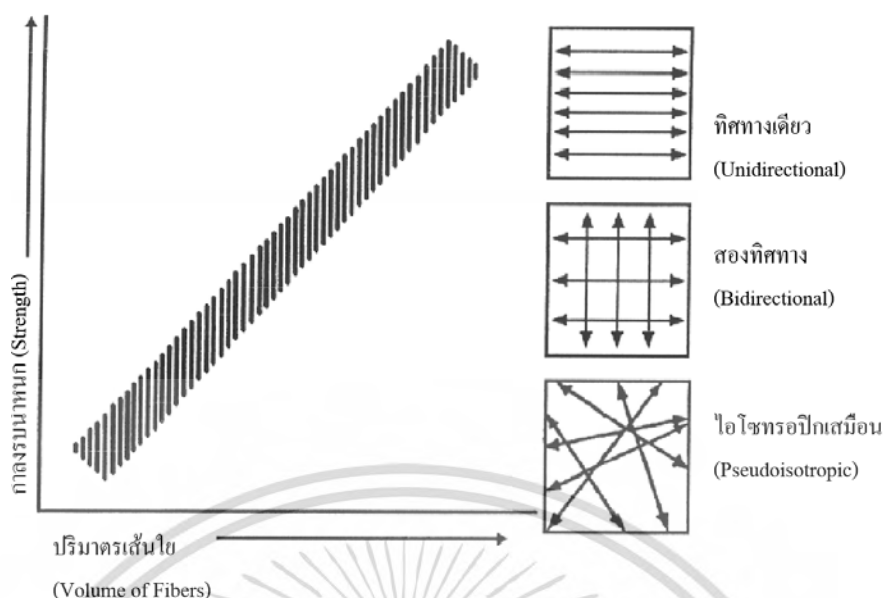
ความสำคัญของพอลิเมอร์เมทริกซ์ บทบาทของเมทริกซ์พอลิเมอร์ ได้แก่ การทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างเส้นใยเสริมกำลังและ โครงสร้างโดยรวม และป้องกันเส้นใยจากสภาวะแวดล้อม และความเสียหายเชิงกลต่างๆ ซึ่งเทียบได้ กับคอนกรีต ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงเฉือนระหว่างชั้น (Interlaminar Shear) เป็นข้อพิจารณาสำคัญในการออกแบบโครงสร้างภายใต้แรงดัด (Bending Loads) และแรงเฉือนในระนาบ (In-Plane Shear) มีความสำคัญกับโครงสร้างภายใต้แรงบิด (Torsional Loads) ซึ่งคุณสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์มีผลกระทบโดยตรงต่อกำลังของวัสดุคอมโพสิตในการรับแรงเฉือนระหว่างชั้นและแรง เฉือนในระนาบ นอกจากนี้เรซินเมทริกซ์ยังมีส่วนช่วยค้ำยันทางด้านข้าง เพื่อป้องกันเส้นใยโก่งเดาะ (Buckling) ขณะรับแรงอัดอีกด้วย ด้วยเหตุผลข้างต้น เนื้อหาในส่วนนี้จึงเน้นหนักไปทางด้านเรซินเมทริกซ์ ซึ่งมีได้มุ่งหมายเพื่อลดบทบาทความสำคัญของเส้นใยในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุเสริมกำลังคอมโพสิตใดๆ แต่เพื่อให้มีความเข้าใจในบทบาทของเมทริกซ์พอลิเมอร์ต่อสมรรถนะ โดยรวมของวัสดุคอมโพสิต และส่งเสริมให้เกิดความสมดุลในการวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต

เส้นใยเสริมกำลังสำหรับวัสดุคอมโพสิต (Reinforcing Fibers for Structural Composites) เส้นใยหลักที่ใช้กันในท้องตลาดสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาซึ่งรวมถึงคอนกรีตเสริมเหล็ก เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด รูปแบบของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ใช้กันมากในงานโครงสร้างมักจะเป็นแบบแผ่นเสริมกำลัง (Laminate) แผ่นเสริมกำลังทำขึ้นโดยการเรียงซ้อนของเส้นใย และเมทริกซ์ชั้นบางๆ หลายชั้นรวมกันจนได้ความหนาที่ต้องการ การควบคุมทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย (Fiber Orientation) ในแต่ละชั้นและลำดับของการเรียงซ้อนชั้นต่างๆ จะทำให้ได้คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพตามที่ต้องการ วัสดุคอมโพสิตจะเป็นส่วนผสมระหว่างวัสดุสองชนิดหรือมากกว่าซึ่งมีการแยกกันได้อย่าง ชัดเจน และสามารถระบุขอบเขตของวัสดุแต่ละชนิดได้ วัสดุจะถูกผสมเข้าด้วยกัน และจุดสัมผัส ระหว่างวัสดุ เช่น ผิวนสัมผัสระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ 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 ทิศทางที่พิจารณาแสดงในรูป



รูปที่ 2.3 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

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

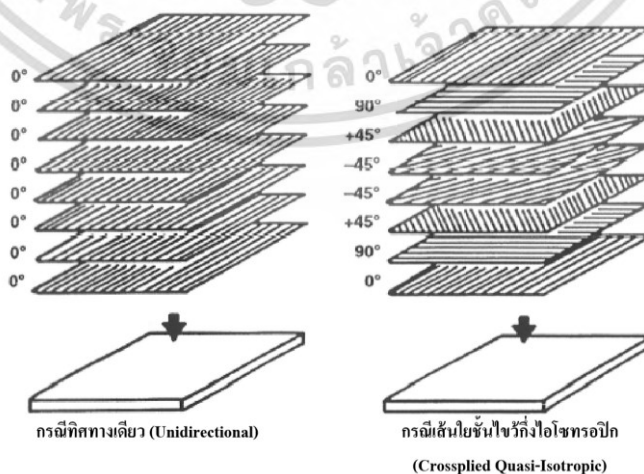
แรงดึงและมอดุลัส เหล็กจะมีจุดคาน (Yielding) และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก หรือมีความเหนียวภายใต้แรงกระทำ สำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยโดยส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงอลาสติก ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Nature) ของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยจะทำให้เกิดกลไกสำหรับการดูดซับพลังงานได้สูงกว่าในระดับไมโครสเกล (Micro Scale) เมื่อเทียบกับกระบวนการคานของเหล็ก (Metallic Yielding Process) แผ่นเสริมกำลังคอมโพสิตจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยขึ้นอยู่กับชนิดและความรุนแรงของแรงกระทำภายนอก วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยหลายชนิดจะมีค่าความหน่วงสูง (High Damping) ลักษณะเช่นนี้ทำให้เพิ่มการดูดซับพลังงานสั่นไหว และลดการถ่ายแรงกระทำสู่อาคารข้างเคียง พฤติกรรมด้านนี้ของวัสดุคอมโพสิตจะมีความสำคัญกับโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางวิศวกรรมโยธา (เช่น สะพาน ทางหลวง เป็นต้น) ซึ่งจะอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกชั่วคราวและมีช่วงเวลาที่ได้รับแรง กระทำสั้นกว่ากรณีรับน้ำหนักบรรทุกแบบคงที่ (Sustained Excessive Loading)

ความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และเส้นใยเสริมกำลัง เมทริกซ์จะทำหน้าที่เป็นแบบและป้องกันเส้นใยจากสภาวะแวดล้อมภายนอก สมรรถนะทางเคมี สมรรถนะทางด้านอุณหภูมิ และสมรรถนะทางไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับชนิดของ เมทริกซ์เรซินที่เลือกใช้งาน แต่เมทริกซ์เรซินยังมีหน้าที่อื่นๆ ได้แก่ ทำหน้าที่รักษาตำแหน่ง ของเส้นใย และในขณะที่รับน้ำหนักเมทริกซ์เรซินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและกระจาย หน่วยแรงเข้าไปสู่เส้นใยซึ่งมีมอดุลัสสูงกว่า โดยทั่วไปเมทริกซ์จะมีการยืดตัวที่จุดแตกหัก (Breaking Point) มากกว่าเส้นใย ทั้งนี้เมทริกซ์ไม่ควรเกิดการหดตัวมากนัก ในขณะที่บ่มเพื่อ หลีกเลี่ยงความเครียดภายในเส้นใยเสริมกำลัง ถ้าผู้ออกแบบมีความต้องการวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก อาจพิจารณาเลือกใช้ ทิศทางการเรียงเส้นใยและรูปแบบการวางเส้นใยแบบทิศทางเดียวที่เหมาะสม หากมีความ ต้องการต่างไปจากนี้อาจจำเป็นต้องพิจารณาเลือกหน้าตัดให้เหมาะสม ทั้งนี้จะทำได้ในขนาด จำกัดในกรณีที่ไม่เสริมเส้นใยในทิศทางแกนสั้น หรือกรณีที่ไม่มีการจัดเรียงเส้นใยใหม่

การเสริมเส้นใยในทิศทางแกนสั้นหรือการจัดเรียงเส้นใยใหม่จะลดความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีผลกระทบต่อความคุ้มค่าในการใช้งาน ทั้งนี้สำหรับชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนอาจต้องจัดเรียงเส้นใยสั้นเพิ่มเติมเพื่อเสริมกำลังให้ ขึ้นรูปเป็นสามมิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบควอไซแอนไอโซทรอปิก (Quasi-Isotropic) ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิกดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการเรียงตัวของเส้นใยแบบต่างๆ ในการสร้างแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง

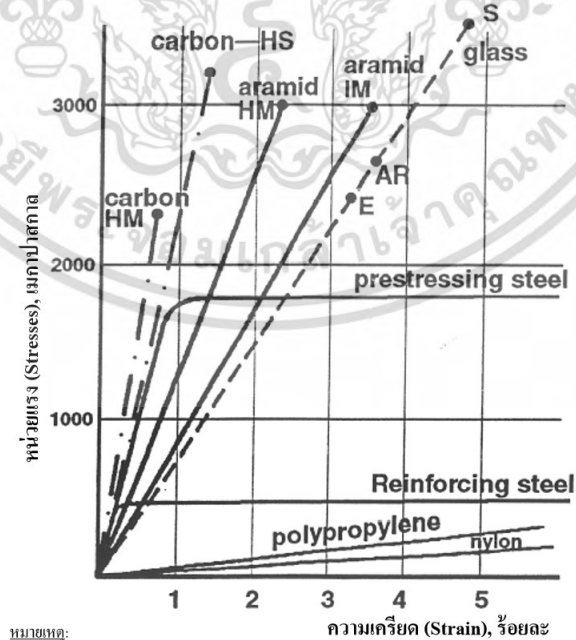
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้และผู้เผยแพร่เห็นชอบที่จะใช้เอกสารนี้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของความยาวเส้นใยต่อคุณสมบัติของแผ่นเสริมกำลัง ตำแหน่งการวางเส้นใยมีผลมาจากทั้งกรณีเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fibers) และเส้นใยสั้น (Short Fibers) นอกจากนี้ที่กล่าวไปข้างต้นโดยนัยทางโครงสร้างผู้ออกแบบอาจพบข้อจำกัด ของชิ้นส่วนหรือข้อจำกัดในกระบวนการผลิต และอาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัด หรือรูปร่างของหน้าตัดวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ความหลากหลายของผู้ผลิตเส้นใยต่อเนื่อง อาจทำให้เป็นไปได้ที่จะควบคุมเส้นใยให้มีหน่วยแรงเท่าๆกัน ตลอดความยาวขณะขึ้นรูป ชิ้นส่วนโดยที่ไม่ใช้มาตรการอื่นเป็นพิเศษ การยึดเหนี่ยวบริเวณรอยต่อวัสดุคอมโพสิต เสริมเส้นใยมีความต้านทานต่อหน่วยแรงสูงกว่าวัสดุตั้งต้นเดิมเนื่องจากเมทริกซ์และเส้นใยจะมีการกระจายหน่วยแรงภายใต้แรงกระทำภายนอก การกระจายของหน่วยแรงในโครงสร้างคอมโพสิตขึ้นอยู่กับธรรมชาติและประสิทธิภาพของแรงยึดเหนี่ยว อาจต้องพิจารณาถึงกระบวนการทางเคมีและเชิงกลที่ใช้กันได้ดีกับสภาพทางโครงสร้างที่กำหนด สารเชื่อมต่อก่อนใช้เพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างเส้นใยเสริมกำลังและเมทริกซ์ ทั้งนี้รอยต่อระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มักจะเป็นการถ่ายแรงเฉือนเมื่อวัสดุคอมโพสิต อยู่ภายใต้แรงกระทำ 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 แต่ต้องระมัดระวังให้กระบวนการผลิตเข้ากันได้กับวัสดุที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบ ใช้ประโยชน์จากขอบเขตสูงสุดของความเครียดของแผ่นเสริมกำลัง การยึดตัวของเรซิน เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกเมทริกซ์เรซินสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามต้องระวังผลกระทบเนื่องจากรอยร้าวจากหน่วยแรง และการกัดกร่อนทางเคมีหรือ โดยสภาวะแวดล้อม ซึ่งอาจลดสมรรถนะในระยะยาว และอาจจำเป็นต้องออกแบบโดย เพื่อความปลอดภัยมากขึ้น เพื่อให้ระบบสามารถทนต่อผลกระทบจากการคืบ (Creep) การ แตกร้าว การบ่ม (Aging) และสารละลายที่เป็นอันตราย (Deleterious Solution) เป็นต้น ต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านการคืบ และความล้า (Fatigue) ของแผ่นเสริมกำลังภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent Loads)

การพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติที่ยอมรับได้ เมทริกซ์ควรจะสามารถรับความเครียดได้สูงกว่าเส้นใยเสริมกำลัง พลังงานที่สะสมไว้ที่จุดแตกหัก (Energy Stored at Failure) ซึ่งเป็นพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรง ควรจะมีค่ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เนื่องจากเป็นสิ่งที่แสดงถึงความเหนียวของคอมโพสิต (Toughness) ดังรายละเอียดข้างต้น ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงสำหรับ เส้นใย ต้องพิจารณาเส้นใยแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมโครงสร้างเพื่อให้มี ระยะยืดและความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและหน่วยแรงตามที่ต้องการ รูปแสดง ช่วงของคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ



รูปที่ 2.5 รูปแสดงพฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใย

หัวข้อพิจารณา	เส้นใยคาร์บอน	เส้นใยแก้ว	เส้นใยอะรามิด
การทนกรด/ด่าง	ทนทานมาก	ไม่ทน	ไม่ทน
การขีด/หัดตัวตามอุณหภูมิ	เกือบไม่ขีด/หัด (ทำให้หน่วยแรงขีดเหนียวสูง)	ใกล้เคียงคอนกรีต	เกือบไม่ขีด/หัด (ทำให้หน่วยแรงขีดเหนียวสูง)
การนำไฟฟ้า	นำไฟฟ้าได้ดี	เป็นฉนวน	เป็นฉนวน
ทนการกระแทก	ต่ำ	สูง	สูง
การวิบัติจากการล้าและความล้า (Fatigue)	ทนทานมาก	ทนทานต่ำ	ทนทานต่ำ

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกลของเส้นใยภายใต้แรงดึง

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

### 2.5.3 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน

เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers) เส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในท้องตลาดผลิตได้จาก 3 แหล่ง ได้แก่ น้ำมันดิน (Pitch) พอลิอะคริโลไนไตรล (Polyacrylonitrile: PAN) และเรยอน (Rayon) คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้าง โมเลกุล และระดับของความบกพร่อง (Degree of Freedom from Defects) การขึ้นรูปของเส้นใย คาร์บอนต้องผลิตภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส (1,830 องศาฟาเรนไฮต์) ณ อุณหภูมินี้ เส้นใยสังเคราะห์โดยส่วนใหญ่จะหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกลายเป็นไอ อย่างไรก็ตามอะคริลิกจะไม่หลอมเหลวและไม่กลายเป็นไอและโครงสร้างโมเลกุลจะรักษาสภาพอยู่ขณะทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชันภายใต้อุณหภูมิสูง (High-Temperature Carbonization) เส้นใยคาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยชนิด I ชนิดมอดูลัสสูง (High Modulus Type I) และเส้นใยชนิด II ชนิดกำลังสูง (High Strength Type II) ความแตกต่างของคุณสมบัติระหว่างเส้นใย ชนิด I และชนิด II เกิดมาจากความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย (Fiber Microstructure)

คุณสมบัตินี้เกิดมาจากการเรียงตัวของโครงข่ายเป็นชั้นแบบกราฟีนหรือรูปหกเหลี่ยม (Graphene [Hexagonal] Layer Network) ซึ่งมักพบในกราไฟต์ (Graphite) ถ้าชั้นเหล่านี้เรียงตัวกันเป็นชั้นสามมิติ จะเรียกว่า กราไฟต์ แต่ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นแต่ละชั้นต่ำและเกิดเป็นชั้นสองมิติจะเรียกว่า คาร์บอน เส้นใยคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นการจัดเรียงสองมิติ เส้นใยคาร์บอนชนิดมอดูลัสสูงซึ่งมีค่ามอดูลัสถึงประมาณ 200 กิกะปาสกาล ( $30 \times 10^6$  ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว) ต้องประกอบด้วยชั้นกราฟีนแข็งเรียงตัวในทิศทางขนานกับแกนของเส้นใย เรยอนและสารตั้งต้นน้ำมันดินแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Pitch Precursor) จะใช้ในการผลิต เส้นใยคาร์บอนมอดูลัสต่ำ (ประมาณ 50 กิกะปาสกาล หรือ  $7 \times 10^6$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในขณะที่กรณี PAN และสารตั้งต้นน้ำมันดินเหลวเนื้อผลึก (Liquid Crystalline Pitch Precursor) จะใช้ในการผลิตเส้น ใยคาร์บอนมอดูลัสสูง โดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันภายใต้อุณหภูมิเกิน 800 องศาเซลเซียส (1400 องศาฟาเรนไฮต์) มอดูลัสของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นโดยการให้ความร้อนจาก 1000 ถึง 3000 องศาเซลเซียส (1830 ถึง 5430 องศาฟาเรนไฮต์) ผลของกระบวนการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ กำลังของ เส้นใย จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส (2730 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับ PAN และเส้นใย

จากสารตั้งต้นของน้ำมันดิน (Pitch Precursor Fiber) แต่จะเพิ่มขึ้นสำหรับเส้นใยซึ่งผลิตจากสารตั้งต้น ของน้ำมันดินชนิดเมโซเฟส (Mesophase or Anisotropic Pitch Precursor Fiber) การเรียงตัวตามแนวแกนที่ต้องการของชั้นกราฟีนในเส้นใยคาร์บอนจะเป็นตัวกำหนดค่ามอดูลัส ของเส้น ใย เส้นใยตามแนวแกนและเส้นใยตามแนวรัศมีและช่องว่างจะมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของ เส้นใย การเรียงตัวของชั้นกราฟีนที่ผิวเส้นใยจะช่วยเพิ่มกำลังและลดการตึงผิว (Wetting) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ เส้นใยคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกับเรซินได้ค่อนข้างยากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยมอดูลัสสูง การปรับปรุงผิวเพื่อเพิ่มกลุ่มสารเคมีที่มีความไวต่อปฏิกิริยา (และบางครั้งเพื่อทำให้ผิวเส้นใยหยาบขึ้น) ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับวัสดุเมทริกซ์เรซินบางชนิด การขนส่งเส้นใยคาร์บอนมักจะมีการปรับปรุงผิวเพื่อป้องกันการขีดถู (Abrasive) การจับต้อง (Handling) และทำให้มีการยึดเหนี่ยวได้กับเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีค่าใกล้เคียงกับกำลังของเมทริกซ์เรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ เส้นใยมอดุลัสต่ำ อย่างไรก็ตามสำหรับเส้นใยมอดุลัสสูงซึ่งผลิตจาก PAN มีค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าเมทริกซ์เรซินอย่างเห็นได้ชัด ความเสียหายของเส้นใยมอดุลัสสูงจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวเช่นเดียวกับบอระฆาติ 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)	ความหนาแน่นจำเพาะ	มอดุลัสแรงดึงกิกะปาสกาล (10 <sup>6</sup> ปอนด์/ตร.นิ้ว)	กำลังรับแรงดึงกิกะปาสกาล (10 <sup>6</sup> ปอนด์/ตร.นิ้ว)	ความเครียดที่จุดแตกหัก	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน 10 <sup>-6</sup> /°C	อัตราส่วนผิวของ
<b>เส้นใยแก้ว</b>							
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
<b>เส้นใยคาร์บอน</b>							
PAN-Carbon T-300 <sup>1)</sup>	7	1.76	231 (33.5)	3.65 (530)	1.4	-0.1 ถึง -0.5 (ตามยาว) 7 ถึง 12 (ตามรัศมี)	-0.2
AS <sup>2)</sup>	7	1.77	220 (32)	3.1 (450)	1.2	-0.5 ถึง 1.2 (ตามยาว) 7 ถึง 12 (ตามรัศมี)	-
t-40 <sup>1)</sup>	6	1.81	276 (40)	5.65 (820)	2.0	-	-
HSB <sup>2)</sup>	7	1.85	344.5 (50)	2.34 (340)	0.58	-	-
Fortafil 3 <sup>TM 3)</sup>	7	1.80	227 (33)	3.80 (550)	1.7	-0.1	-
Fortafil 5 <sup>TM 3)</sup>	7	1.80	345 (50)	2.76 (400)	0.8	-	-
<b>PITCH-Carbon</b>							
P-555 <sup>1)</sup>	10	2.0	380 (55)	1.90 (275)	0.5	-0.9 (ตามยาว)	-
P-100 <sup>1)</sup>	10	2.16	758 (110)	2.41 (350)	0.32	-1.6 (ตามยาว)	-
<b>เส้นใยอะรามิด</b>							
Kevlar <sup>TM 49<sup>4)</sup></sup>	11.9	1.45	131 (19)	3.62 (525)	2.8	-2.0 (ตามยาว) +59 (ตามรัศมี)	0.35
Twaron <sup>TM 1055<sup>5),6)</sup></sup>	12.0	1.45	127 (18)	3.6 (533)	2.5	-2.0 (ตามยาว) +59 (ตามรัศมี)	0.35

กระบวนการในการขึ้นรูปการวางเส้นใยสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของกระบวนการผลิต ได้แก่ การม้วนเส้นใย (Filament Winding) เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยต่อเนื่องในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

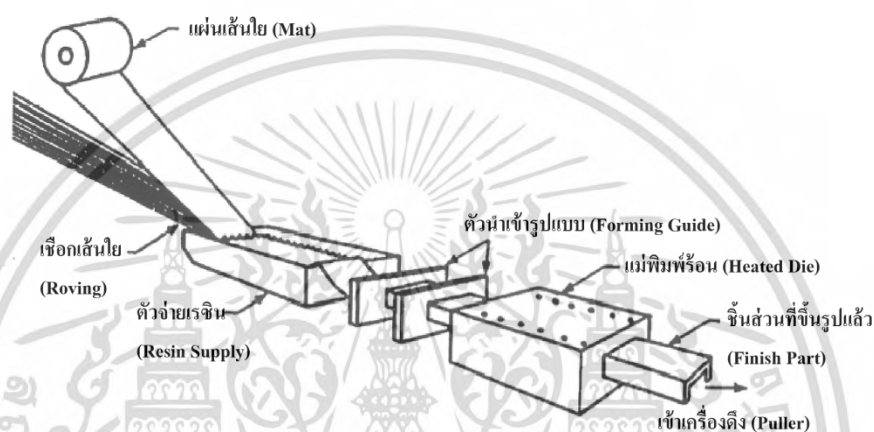
รูปสเตรนด์ซึ่ง ขนานกันหรือเชือกเส้นใย (Parallel Strand or Rovings) แขนในเรซินเมทริกซ์ และ ม้วนเข้า ด้วยกันด้วยแกนหมุนรูปทรงกระบอก (Rotating Cylinder) เชือกเส้นใยซึ่งแขนในเรซินแล้ว จะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าและด้านข้างตลอดความยาวของแกนหมุน เพื่อให้ได้ความหนา มุม ของการม้วน (Wind Angle) และปริมาณของเส้นใยตามที่ต้องการ วัสดุจะได้รับการบ่มที่แกน หมุน และจะนำออกในภายหลัง แสดงดังรูปที่ 2.6 ท่อ ท่อรับแรงบิด กล่องเก็บจรวด ขวดรับแรงดัน ถังกัก เก็บ และส่วนลำตัวของเครื่องบิน (Airplan Fuselages) มักจะใช้วิธีการนี้ในการผลิต ความสัมพันธ์ ของการเคลื่อนที่ระหว่างพื้นผิว ที่หมุน และเชือกเส้นใย และเมทริกซ์ จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้อาจมีการวางเส้นใยเพิ่มเติมโดยการเพิ่มเส้นใยสั้นๆ หรือ วัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มความหนาและมีราคาต่ำลง วัสดุพวกพอลิเอสเทอร์ ไวนิลเอสเทอร์ และอีพอกซีมักใช้เป็นเมทริกซ์ในการผลิต



รูปที่ 2.6 รูปแสดงกระบวนการม้วนเส้นใย (Filament Winding Process)

การรีดเส้นใย (Pultrusion): กระบวนการนี้สามารถผลิตเส้นใยต่อเนื่องซึ่งมีหน้าตัดคงที่ได้โดยไม่จำกัดความยาวโดยจำกัดด้วยเหตุผลด้านการขนส่งและการก่อสร้างเท่านั้น กระบวนการรีด เส้นใย ทำโดยใช้เส้นใยต่อเนื่องผ่านชุดของครีล (Creel) เชือกเส้นใยที่ต้องใช้ในกระบวนการ ผลิตจะถูกดึงผ่านเมทริกซ์เรซิน ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารทำให้แข็งตัว และสารผสมเพิ่มอื่นๆ เร ซินเหลวส่วนเกิน จะถูกขจัดออกและส่งคืนกลับไปอย่างในขณะที่ยกเส้นใยที่ชุ่มด้วยเรซิน แล้วจะถูกส่งเข้าสู่แม่พิมพ์ สำหรับรีดเส้นใย (Pultrusion Die) แม่พิมพ์เหล่านี้ส่วนใหญ่มีความ ยาวประมาณ 0.9 ถึง 1.3 เมตร (36 ถึง 48 นิ้ว) และให้ความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าหรือน้ำมันร้อน ในบางกรณีอาจใช้ เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio-Frequency [RF] PreheatinCabinet) เพื่อให้ง่ายต่อการ บ่มชิ้นส่วนที่มีความหนา มาก ลักษณะกระบวนการทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปแล้วสามารถผลิต ได้ประมาณ 0.9 เมตรต่อนาที (36 นิ้วต่อนาที) หน้าตัดที่หนาหรือรูปร่างซับซ้อนจะต้องใช้เวลาในการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติโทษไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

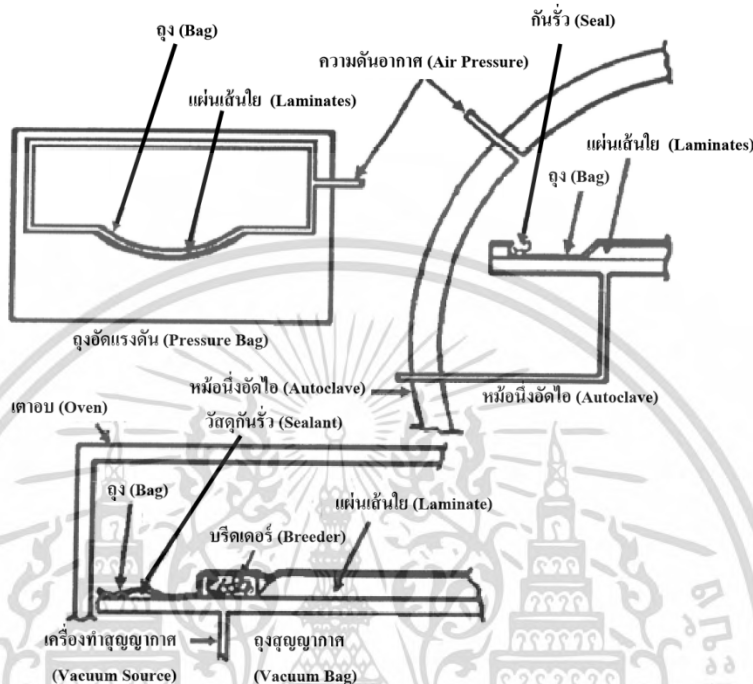
บ่มให้สมบูรณ์มากกว่าหน้าตัดบาง กระบวนการรีด เส้นใยมักใช้เรซินชนิดพอลิเอสเตอร์เรซิน และโพลีเอสเตอร์เป็นเมทริกซ์หลักในการผลิต ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยวิธีการนี้ ได้แก่ แท่งสำหรับสูบน้ำมัน (Oil Well Sucker Rods) เเทนดอน (Tendons) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงทั้งชนิดอัดแรงก่อนและอัดแรงหลัง อุปกรณ์ดิ่งแบบสำหรับคอนกรีต (Concrete Formties) ชิ้นส่วนของเครื่องขุดเจาะน้ำมัน โรงงานผลิตสารเคมี ลูกกรง (Grating) วัสดุเคลือบผิวราว (Third Rail Cover) เพลารถยนต์ (Automobile Drive Shaft) สมอยึดดิน (Ground Anchor) และไทแบ็ก (Tie Back) เชื่อมพืด (Sheet Piling) และชิ้นส่วนกรอบหน้าต่าง



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 วิธีการโดย ส่วนมากที่ใช้ประโยชน์จากการกระจายของเรซิน และวิธีโพสิทีฟสปেসซิง (Positive Spacing Method) เพื่อควบคุมการยึดตัวของฟิล์มจาก

การจับยึดให้เรซินไหลเข้ามาก่อน การบ่มเรซิน สามารถทำได้โดยวิธีการเดียวกับที่กล่าวข้างต้น ปัจจุบันมีการใช้วิธีการนี้สำหรับแบบหล่อ ขนาดใหญ่ โดยไม่จำเป็นต้องมีการปิดแบบหล่อ และเป็นเครื่องมือที่ใช้งานเพียงด้านเดียว (Single-Sided Tool) กระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแสดงกระบวนการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศ (Vacuum Compaction Process)

กระบวนการแบบหล่อประกบ (Matched Mold Processes): ระบบนี้สามารถใช้ในการผลิตวัสดุได้หลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามมีลักษณะเฉพาะดังนี้ แบบหล่อเป็นตัวกำหนดรูปร่างและความหนาของชิ้นส่วน ดังนั้นจึงสามารถผลิตซ้ำชิ้นส่วน แต่ละชิ้นได้หลายครั้ง ในกรณีส่วนใหญ่จะหมายถึงการปิดของบางแบบ มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดที่สามารถปิดได้ พื้นที่ราบ และช่องเปิดในทางปฏิบัติ แรงที่ปิดจะขึ้นอยู่กับระบบวัสดุที่ผลิตโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.21 ถึง 6.21 เมกาปาสกาล (30 ถึง 900 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) การหล่อเรซิน (Resin Transfer Molding: RTM) ใช้แรงปิดอยู่ในช่วงค่าต่ำ แต่การหล่อแผ่นเส้นใยประกอบ (Sheet Molding Compound) อาจต้องใช้แรงปิดสูงขึ้น โดยทั่วไประบบนี้จะใช้เส้นใยสั้นๆ ในการผลิตเป็นกลุ่มเส้นใยสามมิติทำให้ มีคุณสมบัติเป็นแบบควอไซโอไซโทรปิก และมีค่าน้อยกว่ากลุ่มเส้นใยต่อเนื่องแบบแอนไอไซโทรปิก คุณสมบัติเชิงกลและวิธีการทดสอบ (Mechanical Properties and Test Method) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของแท่ง FRP (FRP bars) หรือเทนดอน FRP (FRP Tendons) ได้แก่ (1) แท่ง FRP มีลักษณะเป็นแอนไอไซโทรปิก (Anisotropic) โดยมีแกนหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Strong Axis) เป็นแกนตามยาวของแท่ง FRP และ คุณสมบัติเชิงกลของ FRP ของแต่ละผู้ผลิตมีความ หลากหลายและแตกต่างกันมากซึ่งแตกต่างจากเหล็ก

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของ FRP ได้แก่ ปริมาตรของเส้นใยและเรซิน ชนิดของเส้นใยและเรซิน ทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Fiber Orientation) ผลกระทบทางมิติ (Dimensional Effects) และการควบคุมคุณภาพในการผลิต นอกจากนี้ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยอาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆเช่นเดียวกับวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป เช่น ผลจากประวัติและช่วงเวลาของการรับน้ำหนักบรรทุก อุณหภูมิ และ ความชื้น มาตรฐานการทดสอบทั่วไปพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ประเมินคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานก่อสร้างทั่วไป เช่น เหล็ก คอนกรีต เป็นต้น แต่อาจไม่สามารถใช้สำหรับการทดสอบ FRP ได้

นอกจากนี้การใช้งานวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยในงานโครงสร้างยังอยู่ในระยะเริ่มต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบสภาพ น้ำหนักบรรทุกแท้จริงเพื่อปรึกษาผู้ผลิตในการประเมินลักษณะเฉพาะของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการใช้ งานข้างต้น 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  $6 \times 10^{-6}$  ถึง  $11 \times 10^{-6}$  ต่อองศาเซลเซียส ( $4 \times 10^{-6}$  ถึง  $6 \times 10^{-6}$  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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

890 เมกาปาสกาล (130 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร เเทนดอน FRP (FRP Tendon) บางครั้งสามารถสร้างจากสแตรอนด์เส้นใยแก้วชนิด 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) มอดุลัสแรงดึง (Tensile Elastic Modulus) ตามตารางที่ 2.8 ซึ่งให้เห็นว่ามอดุลัสแรงดึงของแท่ง GFPR มีค่าประมาณร้อยละ 25 ของ เหล็ก มอดุลัสของเทนดอน CFRP มีค่าสูงกว่ามอดุลัสของแท่ง GFPR

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวแกนของวัสดุต่างๆ

คุณสมบัติ	เหล็กเสริม	ลวดพื้นเกลียว	แท่ง GFPR	เทนดอน (Tendons)		
				GFPR	CFPR	AFPR
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)
กำลังรับแรงดลากล, เมกาปาสกาล (กิโลปอนด์/ตร.นิ้ว)	276-414 (40-60)	1034-1396 (150-203)		ไม่สามารถหาจุดดลากลได้		
มอดุลัสแรงดึง, 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
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ, 10 <sup>-6</sup> ต่อองศาเซลเซียส (10 <sup>-6</sup> 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 ทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยภายใต้แรงอัดตามแนวแกนให้มีความแม่นยำ การจับยึด และวิธีการจัดตำแหน่ง รวมถึงเสถียรภาพของเส้นใย อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของวัสดุ คอมโพสิต FRP ไม่ใช่คุณสมบัติหลักในการประยุกต์ใช้งานโดยส่วนใหญ่ กำลังรับแรงอัด ขึ้นอยู่กับลักษณะแท่งเสริมกำลังว่าเป็นแบบเรียบหรือมีสัน (Rib) ด้วย กำลังรับแรงอัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 317 ถึง 470 เมกาปาสกาล(46 ถึง 68 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับแท่งเสริมกำลัง GFPR ที่มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 552 ถึง 896 เมกาปาสกาล (80 ถึง 130 กิโล ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) กำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแท่งเสริมกำลังมีกำลังรับแรง ดึงสูงขึ้น มอดุลัสแรงอัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Compressive Elastic Modulus) ความแข็งเกร็งด้านแรงอัด (Compressive Stiffness) ของแท่งเสริมกำลัง FRP ขึ้นอยู่กับ ขนาด ชนิด การควบคุมคุณภาพในการผลิต และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ แท่งตัวอย่างซึ่งแตกต่างจากความแข็งเกร็งด้านแรงดึง โดยทั่วไปมอดุลัสแรงอัดจะมีค่าต่ำกว่า มอดุลัสแรงดึง จากผลการทดสอบตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยเส้นใยแก้วต่อเนื่องชนิด E-Glass ร้อยละ 55 ถึง 60 โดยปริมาตรในเมทริกซ์ของไวนิลเอสเตอร์ หรือไอโซพทาสิกเรซิน จะมีค่ามอดุลัสอยู่ในช่วง 34 ถึง 48 กิกะปาสกาล (5000 ถึง 7000 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ผู้ผลิตอื่นได้รายงานวามอดุลัสแรงอัดของเส้นใยมีค่าประมาณ 34 กิกะปาสกาล (5000 กิโล ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 77 ของค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเดียวกัน

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

ดังนั้นการเรียงตัวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยเป็นปัจจัยที่มีผล อย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะต่อการคืบของแท่งเสริมกำลังหรือเทนดอน มีรายงานการศึกษา กับแท่ง GFRP คุณภาพสูง พบว่าความเครียดที่เพิ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคืบมีค่าประมาณร้อยละ 3 ของค่าความเครียดอีลาสติกเริ่มต้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกและสภาพแวดล้อมซึ่งเป็นอันตราย แท่ง FRP หรือเทนดอนซึ่งอยู่ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่อาจเกิดความเสียหายอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่ง ที่เรียกว่าเวลาของความคงทน (Endurance Time) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความเสียหายจากการคืบ (Creep Rupture) ซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุทุกชนิดรวมถึงเหล็ก ไม่เว้นแม้แต่ลวดอัดแรง (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบได้กระทำโดยให้น้ำหนักทดสอบเป็นร้อยละ 50 ของค่ากำลังรับน้ำหนักประลัย และแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ ทดสอบระยะสั้น (48 ชั่วโมง) และทดสอบระยะ ยาว (1 ปี) และทำการทดสอบกับเทคนตอน GFRP และเทคนตอน CFRP ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า แท่งตัวอย่าง มีการคืบเพียงเล็กน้อย โมดูลัสแรงดึงและกำลังรับแรงดึงประลัยภายหลังจากการ ทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญความล้า (Fatigue) แท่ง FRP มีความทนทานต่อความล้าที่ดี ผลงานวิจัยส่วนมากได้ทำการทดสอบเส้นใยที่มี ค่ามอดูลัสสูง (เช่น อะรามิต และคาร์บอน) ภายได้ แรงดึงเป็นวัฏจักรซึ่งใช้กับยานอวกาศ ระหว่างการทดสอบได้ให้แรงกระทำถึง 10 ล้านรอบ พบว่า คอมโพสิตชนิดคาร์บอน-อีพอกซี มีกำลังรับความล้าได้ดีกว่าเหล็ก ในขณะที่กำลังรับความล้าของคอมโพสิตชนิดเส้นใยแก้วจะ มีค่าต่ำกว่าเหล็กในกรณีอัตราส่วนหน่วยแรงเดียวกันต่ำ (Low Stress Ratio)

งานวิจัยโดย Porter et al, 1993 แสดงว่าแท่งเดี่ยว GFPR มีความต้านทานต่อความล้าดี ภายได้ แรงเฉือนกระทำเป็นวัฏจักรถึง 10 ล้านรอบ นอกจากนี้มีงานวิจัยศึกษาแท่ง GFRP ซึ่งใช้ สำหรับงานอัดแรง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกเป็นวัฏจักรโดยมีหน่วยแรงสูงสุด 496 เมกาปาสกาล (72 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และมีช่วงค่าหน่วยแรง (Stress Range) 345 เมกาปาสกาล (50 กิโลปอนด์ ต่อตารางนิ้ว) พบว่าแท่ง GFPR สามารถทนน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า 4 ล้านรอบ ก่อนจะเกิดความเสียหายบริเวณตำแหน่งจับยึดเทคนตอน CFRP มีความทนทานต่อความล้าที่ดี โดยทำการทดสอบความ ล้าภายได้แรงดึง เพียงอย่างเดียวถึง 2 ล้านรอบ หน่วยแรงเฉลี่ยที่ใช้ทดสอบมีค่าประมาณร้อยละ 60 ของกำลัง รับแรงดึงประลัยโดยมีค่าหน่วยแรงต่ำสุดและสูงสุดเป็นร้อยละ 55 และ 64 ของกำลังรับ แรงดึง ประลัยตามลำดับ พบว่ามอดูลัสของเทคนตอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ประการ ได้แก่ ช่วงเวลาที่แรงกระทำ และประวัติการรับน้ำหนัก อุณหภูมิ และความชื้น ปัจจัยเหล่านี้ มีความเกี่ยวข้องกันและยากที่จะ ประเมินผลกระทบของแต่ละปัจจัยในขณะที่รักษาปัจจัยอื่นให้คงที่ ความชื้น วัสดุคอมโพสิตที่มีการดูดซึมความชื้นมากเกินไปจะทำให้สูญเสียกำลังรับน้ำหนักและความ แข็งเกร็งอย่างมีนัยสำคัญ การดูดซึมความชื้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเรซิน และ ทำให้เกิดการบวมและการบิดงอของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตจะต้อง ประเมินภายได้สภาพแวดล้อมเดียวกันกับที่วัสดุใช้งาน อย่างไรก็ตามมีเรซินบาง ประเภทซึ่งมีความ ต้านทานความชื้นซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่คาดว่าจะต้องสัมผัสความชื้น ตลอดเวลา ในเขตหนาว จะต้องพิจารณาผลของการละลาย-การแข็งตัวของน้ำ (Freeze-Thaw Cycle) ประกอบด้วย ไฟและ อุณหภูมิ วัสดุคอมโพสิตหลายชนิดมีคุณสมบัติดีเยี่ยมภายได้อุณหภูมิสูง วัสดุคอมโพสิตโดยส่วนใหญ่ จะไม่ถูกเผาไหม้โดยง่าย อุณหภูมิสูงจะมีผลต่อเรซินมากกว่าเส้นใย เรซินซึ่งประกอบไป ด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากจะสามารถติดไฟได้ และมีผลงานวิจัยอย่าง ต่อเนื่องเพื่อพัฒนาเรซิน ชนิดทนไฟ

การทดสอบในประเทศเยอรมันได้แสดงให้เห็นว่าแท่งเส้นใยแก้วชนิด E-Glass มีกำลังรับน้ำหนักเหลือร้อยละ 85 ของกำลังรับน้ำหนัก ภายใต้อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (570 องศาฟาเรนไฮต์) โดยมีหน่วยแรงทดสอบประมาณร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงดึง ในขณะที่สมรรถนะดังกล่าวดีกว่าเหล็กอัดแรง แต่กำลังรับน้ำหนักจะลดลงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียง เหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปัญหาของไฟสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมวัสดุคอมโพสิต FRP แตกต่างจากกรณีวัสดุ คอมโพสิตได้รับเพลิงไหม้โดยตรง ในกรณีนี้คอนกรีตจะทำหน้าที่ป้องกัน FRP จากการสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิภายในชิ้นส่วนสูงขึ้น คุณสมบัติเชิงกลของ FRP จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นแนะนำให้ผู้ใช้ตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับ สมรรถนะของระบบ FRP และเรซินที่อุณหภูมิสูงในกรณีที่มีโอกาสเกิดเพลิงไหม้ได้มาก ริงส์อัลตราไวโอเล็ต วัสดุคอมโพสิตสามารถถูกทำลายโดยริงส์อัลตราไวโอเล็ตเมื่อรับแสงอาทิตย์โดยตรง ริงส์ เหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ ถึงแม้ว่าปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการผสมสารผสมเพิ่มเติมที่เหมาะสมเข้าไปในเรซิน แต่ความเสียหายแบบนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับชิ้นส่วน FRP ซึ่งใช้เสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตซึ่ง ไม่สัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง

การกัดกร่อนเหล็กเสริมและการขยายตัวของวัสดุเป็นเหตุให้เกิดรอยร้าวและคอนกรีตหลุดร่อนออกมาซึ่งจะช่วยเร่งให้เกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้น ข้อดีหลักของวัสดุคอมโพสิต คือ จะไม่เกิดการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามวัสดุคอมโพสิตอาจเกิดความเสียหายได้ภายใต้สภาพแวดล้อม ที่รุนแรง แท่ง GFPR มีความทนทานต่อกรดสูงแต่จะเสื่อมสภาพได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ เป็นต่าง ได้มีการวิจัยการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงโดยเสริมสแตนด์ชนิด เส้นใยแก้ว-อีพอกซี บางชนิดในคอนกรีตและทดสอบภายใต้การจำลองการขึ้นลงของระดับ น้ำเกลือ (Salt Water Tidal Simulation) พบว่าเมื่อได้รับน้ำมากขึ้นจะสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก [Sen et al. 1993] ถึงแม้ว่าการทดสอบนี้จะใช้ไม่ได้ในกรณีทั่วไป 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] โดยใช้สมการทั้งสองสามารถประเมินการเร่งบ่มของแท่งเดี่ยวของเส้นใย แก้วชนิด E-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Glass เคลือบด้วยไวนิลเอสเตอร์เรซินและบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) เป็นเวลา 9 สัปดาห์ แห่งตัวอย่างถูกบ่มในน้ำ ปูนขาว (Lime) และอ่าง น้ำเกลือ พบว่าคาบของการเร่งบ่มมีค่าประมาณ 63.3 วันภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮต์) ในสารละลาย โดยไม่เกิดการเสื่อมสภาพภายใต้อ่างทดสอบปูนขาว การเร่งบ่มนี้เทียบเท่ากับอายุการใช้งาน ประมาณ 50 ปี กลไกการจับยึด (Gripping Mechanism)

การออกแบบและการพัฒนาระบบการจับยึด (Gripping System) ที่เหมาะสมกับแท่ง FRP สำหรับ การทดสอบการรับแรงดึง และในกรณีประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงก่อน (Prestressed) หรืออัดแรงภายหลัง (Post-tensioned) เป็นปัญหาหลักสำหรับผู้วิจัยและผู้ใช้งาน เนื่องจากแท่งเสริมกำลัง FRP และเทวดอน FRP มีกำลังรับแรงในทิศทางตามขวางต่ำ แรงซึ่งเกิดจากการจับยึดสามารถทำให้เกิดความเสียหายเฉพาะแห่ง (Local Failure) ของ FRP บริเวณตำแหน่งจับยึด นอกจากนี้การเพิ่มความยาวในการจัดยึดเพื่อลดหน่วยแรงในบริเวณตำแหน่งจับยึดไม่เหมาะสม ในทาง ปฏิบัติสำหรับกรณีส่วนใหญ่ ตัวจับยึดชนิดใช้ซ้ำได้ (Re-Usable Grips) คิดค้นโดย GangaRao and Fuza (1992) ประกอบด้วย แผ่นเหล็ก 2 แผ่นขนาด 178x76x19 มิลลิเมตร (7.0x3.0x0.75 นิ้ว) และเซาะร่องรูปโค้งเป็นส่วนหนึ่ง ของวงกลม (Semi-Circular Groove) โดยมี เส้นผ่านศูนย์กลางของร่องมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ แท่ง FRP ที่จะทดสอบ 3 มิลลิเมตร (0.12 นิ้ว) ทรายละเอียดเปียกนอกเหนือจากสารเคลือบชนิดทรายผสมอีพอกซีจะใช้เพื่อปิดร่อง แผ่นเหล็ก ทั้ง สองจะนำมายึดเข้าด้วยกันที่แต่ละด้านของแท่งทดสอบ วางตัวจับยึดในตัวจับ (Jaw) ของเครื่อง ทดสอบ (Universal Testing Machine)

โดยทั่วไประหว่างการทดสอบจะมีการขยับเลื่อนของแท่งทดสอบได้ เล็กน้อย แต่ข้อจำกัดนี้ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำการทดสอบแท่งทดสอบจนเสียหาย ตามรายงานการวิจัยพบว่าตัวจับยึด นี้สามารถใช้ในการสำหรับการจับยึดแท่งเสริมกำลัง FRP ได้เป็นอย่างดี โดยมีการประยุกต์ใช้ยึดสลัก เกลียวกำลังสูง 6 ตัวเข้ากับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่น 1 ชุด [Chen et al. 1992] วิธีการให้หน่วยแรง เคเบิล FRP โดยใช้ชัค (Chuck) 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร (0.6 นิ้ว) ได้ถูกพัฒนาขึ้น [Iyer and Anigol 1991] โดยติดตั้งชัคที่ปลายทั้งสองด้านเพื่อให้เคเบิลมีกำลัง รับน้ำหนักเต็มที่ มี งานวิจัยซึ่งพัฒนาการจับยึดแท่ง FRP โดยการเชื่อมประสานเข้ากับท่อทองแดงด้วยอีพอกซี [Porter et al. 1992] การทดสอบแรงดึงของแท่ง FRP โดยการใช้ตัวจับยึดลักษณะนี้เพื่อลดความเสียหาย ของแท่ง FRP พบว่าแท่งตัวอย่างทดสอบมากกว่า 200 ตัวอย่างสามารถทดสอบได้อย่าง สมบูรณ์โดย ให้มีระยะห่างระหว่างตัวจับยึดมากพอ และค่ากำลังรับแรงดึงที่ทดสอบได้มีค่าสอดคล้อง กับกำลังรับ แรงดึงในทางทฤษฎี ทั้งนี้อยู่ในระหว่างการวิจัยเพื่อใช้ตัวจับซึ่งทำจากท่อเหล็กตีเกลียว ภายในและ เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีชนิดเดียวกัน 1 ชัค (chuck) หมายถึง แผ่นกลมมีเกลียวสำหรับจับวัตถุที่ จะต้องกลิ้ง หรือเครื่องจับดอกสว่าน หรือเครื่องจับวัตถุ

## 2.6 การวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Pushover)

การวิเคราะห์โดยวิธี Nonlinear Static Analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่เป็นที่นิยมเพื่อประเมินความสามารถของโครงสร้างและสามารถประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหว การวิเคราะห์หาค่ากำลังต้านทานด้วยวิธีแรงสถิตไม่เชิงเส้น (ATC-40, FEMA-440) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการประเมินผลตอบสนอง ของโครงสร้าง ต่อแรง วิธีการนี้นิยมเรียกว่าการผลักแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Pushover) โดยเป็นการผลักด้วยแรงกระทำทางด้านข้างอย่างช้าๆ และค่อยๆ เพิ่มแรงกระทำ จนกระทั่งโครงสร้างถึงจุดวิบัติ ด้วยสมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$[K]\{\Delta\mu\} = \{\Delta F\} - [C]\{\Delta\dot{\mu}\} \quad (2.3)$$

โดยที่  $[K]$  คือ สติฟเนสของโครงสร้าง  
 $\{\Delta\mu\}$  คือ เวกเตอร์ของการเพิ่มค่าการเคลื่อนที่ด้านข้าง  
 $\{\Delta F\}$  คือ เวกเตอร์ของการเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้าง  
 $[C]$  คือ ความหน่วงของโครงสร้าง  
 $\{\Delta\dot{\mu}\}$  คือ เวกเตอร์ของการเพิ่มค่าความเร็วในการเคลื่อนที่  
 สมการการเคลื่อนที่ที่ไม่มีเทอมของแรงอินเนอร์เซียเนื่องจากแรงกระทำช้ามาก

การทดสอบผลักแบบนี้ อาจกระทำด้วยการควบคุมแรงกระทำ (Force control) หรือควบคุมการเคลื่อนที่ (Displacement control) อย่างไม่อย่างหนึ่ง ในวิธีการแรก โครงสร้างจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไป ด้วยการค่อยๆ เพิ่มแรงกระทำด้านข้างที่มีการกระจายรูปแบบหนึ่ง และคำนวณการเคลื่อนที่ซึ่งเพิ่มขึ้นตามมา สำหรับวิธีการหลังจะต้องกำหนดรูปแบบการโก่งตัวของโครงสร้างเสียก่อน และจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปตามรูปแบบการโก่งตัวที่กำหนดโดยทั่วไป เนื่องจากรูปแบบการโก่งตัวของโครงสร้างยังไม่ทราบในเบื้องต้น ดังนั้นการใช้วิธีควบคุมแรงกระทำจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า ลักษณะการกระจายแรงกระทำ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

### การกระจายแรงผลักแบบโหมดเดียว (Single-Mode Load Distribution)

การกระจายแรงผลักแบบโหมดเดียว (Single-Mode Load Distribution) ประกอบด้วย

1. น้ำหนักกระทำแบบจุด (Concentrated Load) เป็นรูปแบบแรงกระทำอย่างง่ายที่สุด โดยมีแรงกระทำแบบจุดเพียงแรงเดียวกระทำบนยอดอาคาร
2. น้ำหนักกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงกระทำแบบนี้มีสมมุติฐานว่าอัตราเร่งของระบบโครงสร้างมีค่าคงที่ตลอดความสูงของอาคาร โดยมีการกระจายแรงกระทำ ดังนี้

$$\Delta F_i = \frac{\Delta V_b}{N} \quad (2.4)$$

โดย  $\Delta F_i$  คือ การเพิ่มแรงกระทำสำหรับระดับชั้นที่  $i$   
 $\Delta V_b$  คือ การเพิ่มแรงเฉือนที่ฐานอาคาร  
 $N$  คือ จำนวนชั้นอาคารทั้งหมด

### 3. น้ำหนักกระจายแบบสามเหลี่ยม (Triangular Load)

แรงกระทำแบบนี้มีสมมุติฐานว่าอัตราเร่งของระบบโครงสร้างมีการเพิ่มเป็นเชิงเส้นจากค่าศูนย์ที่ ฐานอาคารไปจนถึงค่าสูงสุดที่ยอดอาคาร โดยมีการกระจายแรงกระทำ ดังนี้

$$\Delta F_i = \frac{W_i h_i}{\sum_{i=1}^N W_i h_i} \Delta V_b \quad (2.5)$$

เมื่อ  $W_i$  คือ น้ำหนักอาคารสำหรับระดับชั้นที่  $i$   
 $h_i$  คือ ความสูงอาคารที่ระดับชั้น ที่  $i$

### 4. น้ำหนักกระจายตามข้อบังคับการออกแบบ (Code Distribution Load) มีการกระจายแรงกระทำ ดังนี้

$$\Delta F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{i=1}^N W_i h_i^k} \Delta V_b \quad (2.6)$$

เมื่อ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ที่กำหนดรูปแบบการกระจายแรง และ  $k$

$$k = 1.0, \quad T \leq 0.5 \text{ sec}$$

$$k = 2.0, \quad T \leq 2.5 \text{ sec}$$

$$k = 1 + \frac{T - 0.5}{2}, \quad 0.5 < T < 2.5 \text{ sec}$$

### 5. น้ำหนักกระจายแบบโหมดแรก (First Mode Load)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงกระทำแบบนี้มีสมมุติฐานว่าอัตราเร่งของระบบโครงสร้างเป็นสัดส่วนกับรูปแบบการสั่นของโครงสร้างในโหมดแรก โดยมีการกระจายแรงกระทำ ดังนี้

$$\Delta F_i = \frac{W_i \omega_{i1}}{\sum_{i=1}^N W_i \omega_{i1}} V_b - F_i^{old} \quad (2.7)$$

โดย  $\omega_{i1}$  คือ ค่ารูปแบบการสั่น ในโหมดแรกสำหรับระดับชั้น ที่  $i$   
 $\Delta F_i$  คือ แรงกระทำในระดับชั้น ที่  $i$  ของการคำนวณขั้นตอนก่อน

#### 6. น้ำหนักกระจายแบบโหมดแรกซึ่งปรับแก้ได้ (Adaptive First Mode Load)

วิธีการนี้พิจารณาว่าเมื่อโครงสร้างถูกแรงกระทำมากขึ้นจะทำให้ค่าสติเฟนลดลงส่งผลให้การโก่งตัวในแต่ละรูปแบบการสั่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงมีการปรับแรงกระทำเพื่อให้สอดคล้องกับรูปร่างการโก่งตัวที่เปลี่ยนไป โดยเฉพาะในโหมดแรก ในขั้นตอนการปรับแรงกระทำ เวกเตอร์ของแรงจะถูกปรับที่ค่าการเลื่อนตัวทุกๆ 0.5% ของความสูงอาคาร

#### 7. น้ำหนักกระจายแบบรวมโหมดด้วยวิธี SRSS (SRSS Load)

วิธีการนี้เป็นการคำนวณหาการกระจายแรงกระทำจากแรงเฉือนในแต่ละชั้นที่ได้จากการรวมแรงเฉือนที่คำนวณจากแรงกระทำที่เป็นสัดส่วนกับรูปแบบการสั่นในแต่ละโหมด การรวมแรงเฉือนใช้วิธี Square Root of the Sum of the Square (SRSS) ซึ่งเป็นหลักการรวมผลตอบสนองสำหรับพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic modal response) แม้ว่าพฤติกรรมของโครงสร้างในความเป็นจริงจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear response) การคำนวณแรงเฉือนใช้สูตรดังนี้

$$V_i = \sqrt{\sum_{m=1}^n V_{im}^2} \quad (2.8)$$

โดยที่  $V_i$  คือ แรงเฉือนรวมในแต่ละระดับชั้น  $i$   
 $V_{im}$  คือ แรงเฉือนในแต่ละระดับชั้น  $i$  สำหรับรูปแบบการสั่น ที่  $m$

การรวมจำนวนของรูปแบบการสั่น (Number of modes) จะใช้ข้อกำหนดว่า หากค่าผลรวมของ Modal weight เท่ากับหรือมากกว่า 90% ของ Seismic weight จะถือว่าเป็นจำนวนของรูปแบบที่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 การผลึกแบบหลายโหมด (Multi-Mode Pushover Procedure)

วิธีการผลึกอาคารแบบนี้ เป็นวิธีหนึ่งซึ่งพิจารณาผลตอบสนองของรูปแบบการสั่นในแต่ละโหมด จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การวิเคราะห์แบบการผลึกตามรูปแบบการสั่นของโครงสร้าง (Modal Pushover Analysis, MPA) Chopra และ Goel (2002) ได้เสนอวิธีการ MPA เพื่อปรับปรุงแรงกระทำให้น่าเชื่อถือ ยิ่งขึ้นกว่าแรงกระทำเพียงโหมดเดียว ในวิธีการนี้เป็นการใช้แรงผลึกกระทำกระจายตามแต่ละรูปแบบ การสั่นของโครงสร้าง โดยใช้รูปแบบการสั่นจำนวน 3 โหมดแรก และแสดงกราฟการผลึกในแต่ละโหมด สำหรับการรวมผลตอบสนองของแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนตัว ใช้วิธี Square Root of the Sum of the Square (SRSS) แม้ว่าจะเป็นที่ทราบกันว่าผลตอบสนองของโครงสร้างในความเป็นจริง มีลักษณะไม่เชิงเส้น แต่วิธีการนี้ สมมุติว่าค่าที่ได้จากการรวมผลตอบสนองแบบนี้ ไม่แตกต่างจากพฤติกรรมจริงมาก

### 2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นันทิกา นามวิจิตร 2557 ได้ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก มีการให้หน่วยแรงโอบรัดคอนกรีตในแนวแกน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ที่ได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 และเพื่อใช้เป็นข้อมูล ในการเสนอสมการ การออกแบบที่เหมาะสมของเสาประเภทดังกล่าว ตัวแปรหลักที่ใช้ ในการศึกษาประกอบด้วย กำลังอัดประลัยคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดคอนกรีตด้านข้าง การศึกษาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดกลมทรงกระบอกที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็ก และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดคอนกรีต ผลทดสอบให้กำลังอัดสูงสุด และความเหนียวสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก โดยมีพฤติกรรมภายใต้แรงกดอัดแบบเชิงเส้นตรงถึง 50-70% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ( $f'_{max}$ ) จากนั้น ผลการทดสอบมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไรเชิงเส้น โดยสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบคือ (1) Strain hardening (2) Elastic-perfectly plastic และ (3) Strain softening และการวิบัติจะเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไป และสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้สูงก่อนเกิด การวิบัติจากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าความหนาของปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร และมีการให้ หน่วยแรงโอบรัดคอนกรีตด้านข้าง ( $0.05f'_{co}$ ) เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสม ในการนำไปศึกษา ขั้นตอนต่อไป จากการศึกษาตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัด ด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดคอนกรีต พบว่าตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรง มีค่าถึง 60-70% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ( $P'_{max,col}$ ) จากนั้น ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไรเชิงเส้น โดยสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือ Strain hardening และ Elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบจะมีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อย

ไป และมีความเหนียวสูงเพิ่มขึ้นก่อนการวิบัติ โดยมีอัตราส่วนของกำลังรับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายโดยสมการออกแบบกำลังรับแรงกดอัด เสาเชิงประกอบตามมาตรฐานของ ACI Committee 318 ( $P'_{max,col} / P_{ACI}$ ) มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 จึงควรถูกปรับให้เหมาะสมในรูป  $P_{ACI}^{proposed} = 0.85f'_{co}(A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.4A_s^{tube} f_y^{tube}$  ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาได้อย่างเหมาะสม

ณัฐธา สกานพวงษ์ ณัฐธยาน์ ก้อยชูสกุล และ ประภาพathy โขคสกุลวงษ์ 2557 (1) ศึกษา รูปแบบรอยร้าว และกำลังของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก โดยการพัฒนาแบบจำลองการรับแรงของคอนกรีต ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานคอนกรีตล้วน และคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก ที่มีปริมาณเส้นใย 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% โดยปริมาตร จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยเหล็กเพิ่มขึ้นจะพบว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะเพิ่มมากขึ้น และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและตำแหน่งของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานได้ โดยคอนกรีตจะแตกร้าวมากขึ้นแต่เป็นการแตกร้าวในลักษณะของการกระจายรอยแตกเนื่องจากเส้นใยเหล็กจะช่วยในการกระจายแรง

ชูชัย สุจิวิตรกุล และ วทีญญ ชูติคามิ 2549 ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกำลังดัด และพฤติกรรมในการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการดัด มีขนาด 10x10x40 ซม. โดยทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 30 ซม. ตัวแปรที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต ขนาดมวลรวมหยาบ ปริมาณเส้นใยเหล็ก และขนาดเส้นใยเหล็กที่แตกต่างกัน จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตและการเพิ่มปริมาณการผสมเพิ่มของเส้นใยเหล็กแบบตะขอ ส่งผลต่อการรับแรงดัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็กสูงขึ้น ขนาดมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กส่งผลที่ดีต่อการรับแรงดัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กที่สูงขึ้น

ศรารุช 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. ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแรงอัดมีขนาดเท่ากับ 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. จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต การเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณการผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ และเพิ่มปริมาณการเสริมเหล็กส่งผลให้กำลังรับโมเมนต์ดัด และความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีความแข็งแรงขึ้น จะทำให้เส้นใยเหล็กแบบตะขอมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

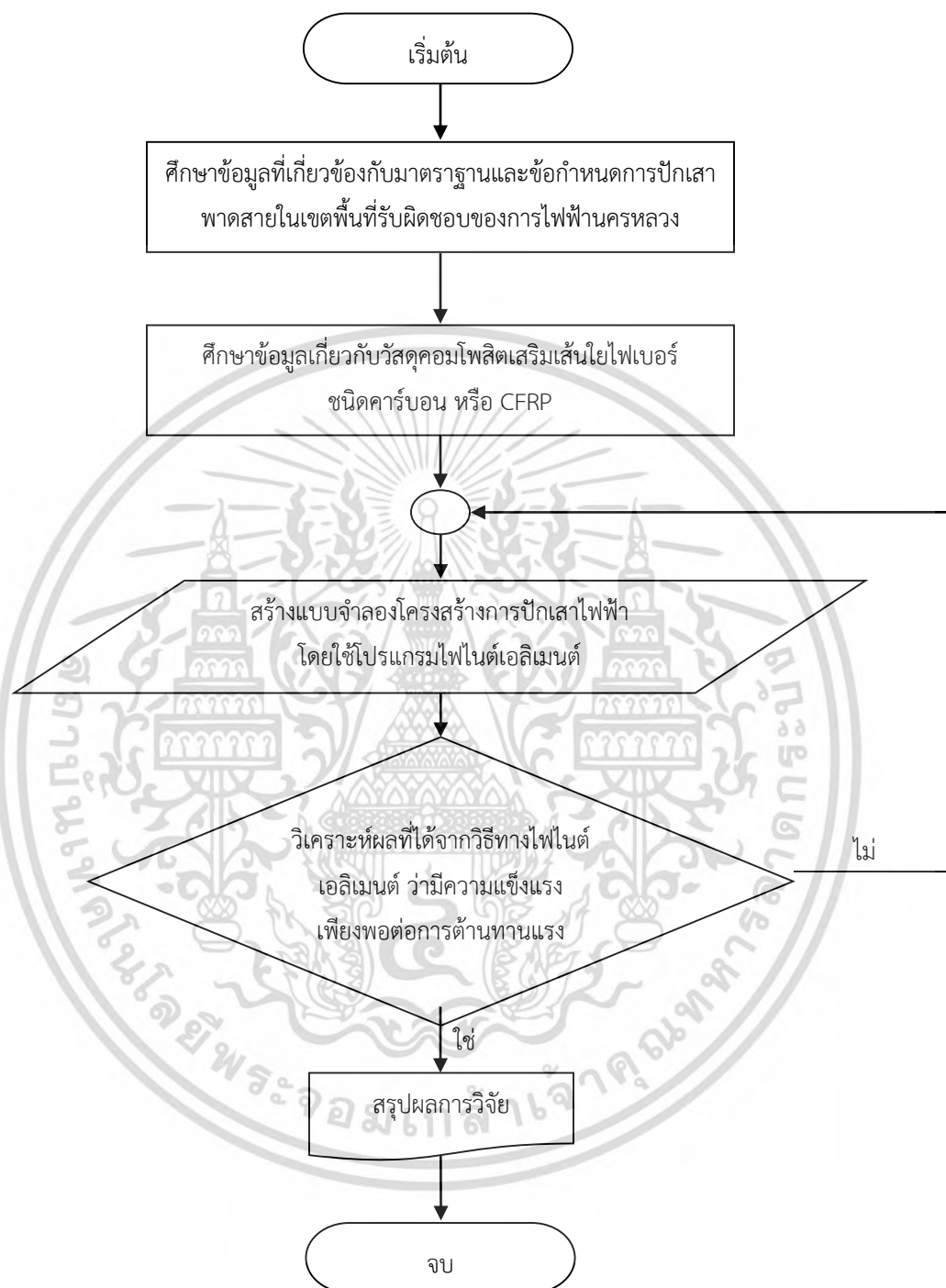
### วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการเสริมกำลังด้วยการใช้วัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่องของเสาข้างเคียง จากแรงกระแทกที่มีจากอุบัติเหตุรถชนนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 3.1 ที่ประกอบด้วย การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับกฎเกณฑ์ มาตรฐานและข้อกำหนด ลักษณะของเสาไฟฟ้าและสายส่ง ไฟฟ้ารวมถึงอุปกรณ์ที่จะติดตั้งอื่นๆ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ ชนิดคาร์บอน หรือ CFRP สร้างแบบจำลองเสาไฟฟ้าโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้รูปแบบการปักเสาพาดสายจริง และใช้เสาขนาดความยาว 12 เมตร, 3.5ตัน-เมตร 12 เมตร, 5ตัน-เมตร และ 12.35, 6ตัน-เมตร เป็นตัวอย่างในการทำแบบจำลองและวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อดูความเค้นสูงสุดของวัสดุและอัตราส่วนความปลอดภัยของคอนกรีตในด้านที่รับกำลังอัดตามระยะความสูงของเสาไฟฟ้า โดยผลที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงเพื่อลดจำนวนเสาไฟฟ้าที่จะหักโค่น/ล้มแบบต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าข้างเคียงจากแรงกระทำ วิเคราะห์ผลที่จากการโปรแกรม สรุปผลการวิจัย

#### 3.1 การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการปักเสาพาดสายไฟฟ้า

ทำการศึกษาข้อมูลการปักเสาพาดสายของไฟฟ้านครหลวงจากคู่มือการออกแบบและประมาณราคา พ.ศ. 2547 ของกองมาตรฐานการติดตั้งสายใน/สายนอกและความปลอดภัยการไฟฟ้านคร รวมถึงการออกสำรวจภาคสนามของการปักเสาพาดสายที่การไฟฟ้านครหลวงที่ใช้ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตตามมาตรฐานของ กฟน. การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเรื่องการใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Polymer) ชนิด Carbon หรือ CFRP ในการเสริมกำลังเพื่อเพิ่ม (Stiffness) ความเหนียวให้กับเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรงในตำแหน่งของแรงเค้นสูงสุดเนื่องจากวัสดุ CFRP ดังกล่าวมีอัตราส่วนของกำลังวัสดุต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง โดยจะนำมาใช้ในการพัน (Wrap) แผ่น CFRP เข้ากับเสาไฟฟ้าเพื่อรัดเสาในตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์สูงสุดทำให้เสามีกำลังรับแรงกระแทกและแรงจากด้านข้าง



รูปที่ 3.1 รูปแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

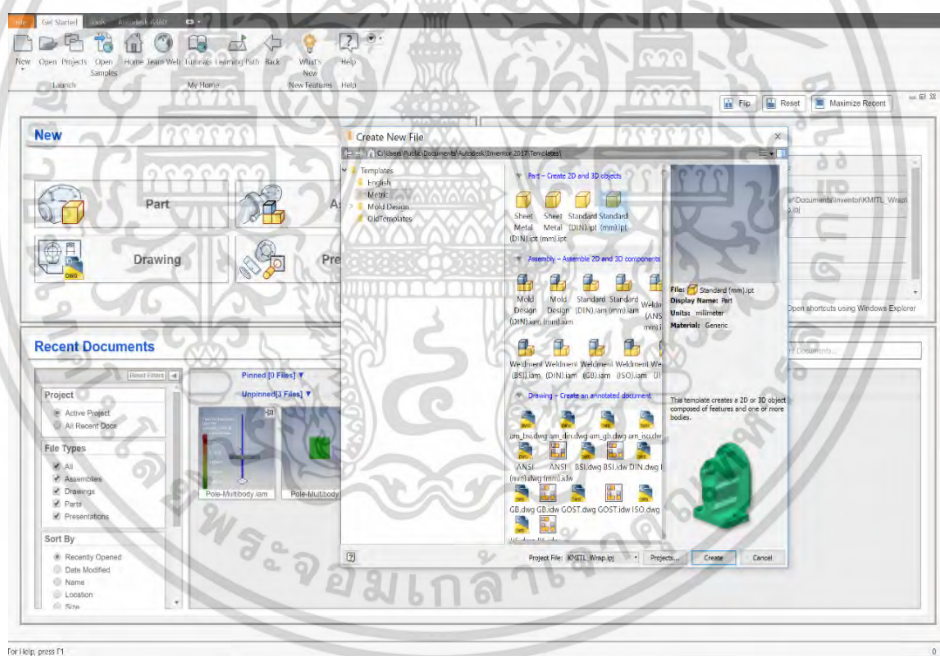
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การจำลองโมเดลโครงสร้างเสาไฟฟ้า

ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยรูปแบบโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์โดยเลือกโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความถูกต้องและได้รับการยอมรับในการวิเคราะห์โครงสร้าง และทดสอบความถูกต้องด้วยการจำลองโครงสร้างอย่างง่ายเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์โครงสร้าง

### 3.2.1 การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม

เปิดโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จากนั้นเลือกเมนู File | New หรือเลือก New Project และเมื่อโปรแกรมถูกโหลดขึ้นมาจะแสดงหน้าต่าง New ดังในรูปที่ 3.2

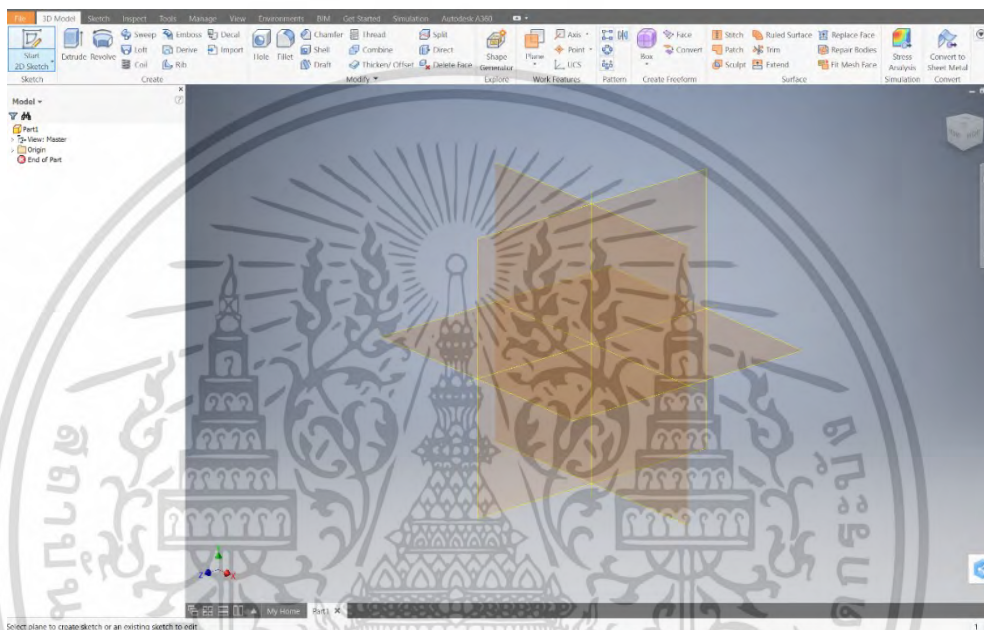


รูปที่ 3.2 รูปแสดงการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

Project คือไฟล์ที่เก็บข้อมูลต่างๆ ซึ่งสร้างโดยโปรแกรม ของผู้ใช้ เช่น การจัดการ standard part, ความสัมพันธ์ของชิ้นงานแต่ละชิ้นในงานประกอบ การสร้าง New Project

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 แล้ว Done



รูปที่ 3.3 รูปแสดงหน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ส่วนประกอบของหน้าต่างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยดังนี้

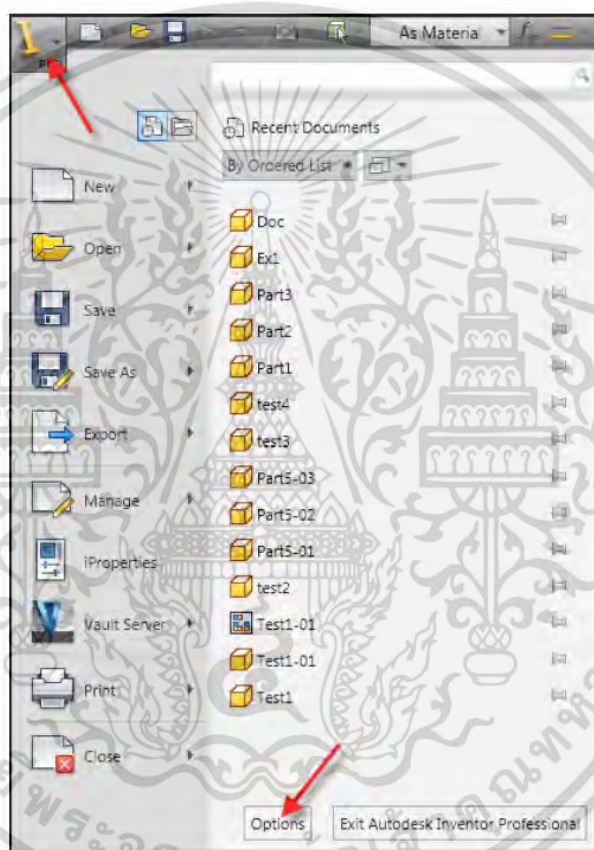
- เมนูบาร์ (Menu Bar) อยู่บนสุดของหน้าจอ สามารถเรียกได้ทุกคำสั่งของโปรแกรมได้จากเมนูนี้
- ทูลบาร์ (Toolbar) ทูลบาร์ที่อยู่ถัดลงมาจกเมนู และที่อยู่ในแนวตั้งทางด้านซ้าย ซึ่งสามารถกดเข้าออกได้ ใช้ในการสั่งคำสั่งที่ใช้ง่าย เพื่อความสะดวกในการใช้งานโปรแกรม โดยสามารถกำหนดได้เอง
- เมนูวินโดว์ (Main Window) เป็นพื้นที่ที่ใหญ่ที่สุดบริเวณกลางหน้าจอ ใช้แสดงแบบจำลองและผลการคำนวณ
- เพจคอนโทรล (Page Control) เป็นชุดแถบด้านข้างซ้ายของเมนูวินโดว์มีสองแถวคือแต่ละหน้าหลักจะแยกออกเป็นหน้าย่อย ใช้ทำงานเฉพาะอย่าง การเรียงหน้าหลักและหน้าย่อยจะเป็นไปตามลำดับการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมมอง (View Orientation) เป็นพื้นที่ทางขวาของหน้าจอ แสดงมุมมองและควบคุมหน้าการทำงานของโปรแกรม หรือรายการต่างๆ ตามลักษณะการทำงาน

### การปรับแต่ง Option ต่างๆ

การปรับแต่ง Option ต่างๆให้ใช้งานง่ายขึ้นและตามความเหมาะสมหรือความชอบของผู้ใช้สามารถทำได้ดังนี้ไปที่ Application Menu >> Option



รูปที่ 3.4 รูปแสดงการปรับแต่ง Option ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

### การปรับเปลี่ยนมุมมองด้วย View Orientation



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

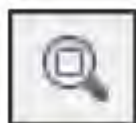
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



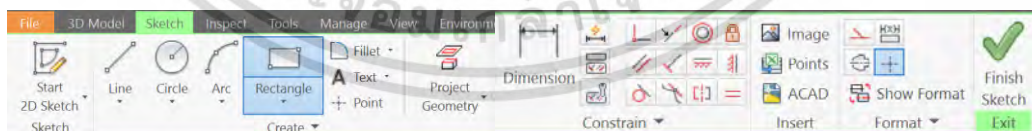
View Face: คำสั่งที่เลือกโดยผิวแล้วส สำหรับปรับการแสดงใน Graphics Window ให้แสดงที่ผิวนั้นๆ

## 2. Basic 2D Sketch

Sketch Tab ประกอบด้วย Panel ที่สำคัญสำหรับการ Sketch ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วยนี้

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 3.5 รูปแสดงเครื่องมือพื้นฐานในการเขียนภาพ 2 มิติ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.2.2 การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถทำได้สองวิธีด้วยกัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

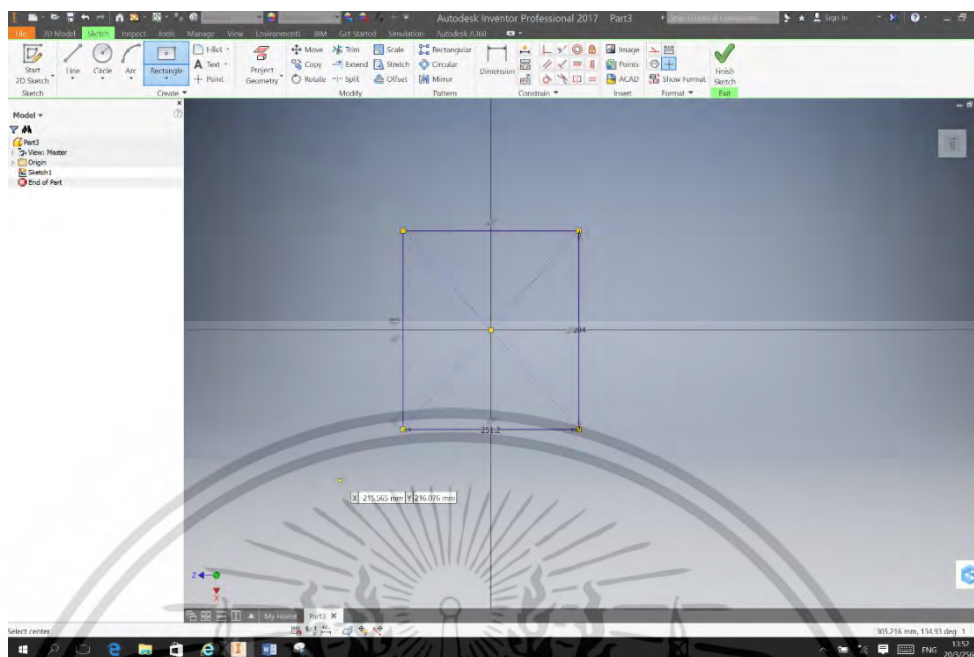
- ใช้ไฟล์คำสั่ง (command file) ไฟล์คำสั่งคือไฟล์ข้อความบรรจุข้อมูลโครงสร้าง โดยจะเป็นคำสั่งในภาษาที่เข้าใจง่ายตามรูปแบบของโปรแกรม ผู้ใช้สามารถสร้างไฟล์นี้ได้โดยใช้โปรแกรมอิตเตอร์ทั่วไป โดยระหว่างใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ผู้ใช้งานสามารถเปิดไฟล์คำสั่งขึ้นมาตรวจสอบและแก้ไขได้

- ใช้การสร้างแบบโต้ตอบเชิงกราฟิก วิธีการสร้างแบบกราฟิกจะใช้เครื่องมือทางกราฟิกในโหมดสร้างโมเดล 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. เป็นฐานเสาไฟฟ้า (เปลี่ยนด้านโดยการกด Tab ที่คีย์บอร์ด)
6. ไปที่ Sketch Tab >> Draw Panel >> Project Geometry จากนั้นเลือกที่ XY Axis
7. ไปที่ Sketch Tab >> Constrain Panel >> Confident Constrain
8. จากนั้น เลื่อนเมาส์ไปที่บริเวณกลางเส้นจะประกฎจุดสี่เหลี่ยมขึ้นหมายถึงกึ่งกลางของเส้นแล้วคลิกเลือก
9. จากนั้นให้คลิกเส้นแกนที่โปรเจกมาจกข้อ 6 ทำทั้งแกน X และแกน Y
10. ไปที่ Sketch Tab >> Exit Panel >> Finish Sketch
11. ไปที่ Application Menu >> Save
12. คลิก OK จะได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6

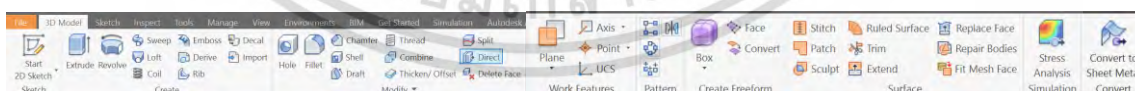


รูปที่ 3.6 รูปแสดงการวาดรูปฐานเสาไฟฟ้า 2 มิติ

การขึ้นรูปแบบจำลองสามมิติ

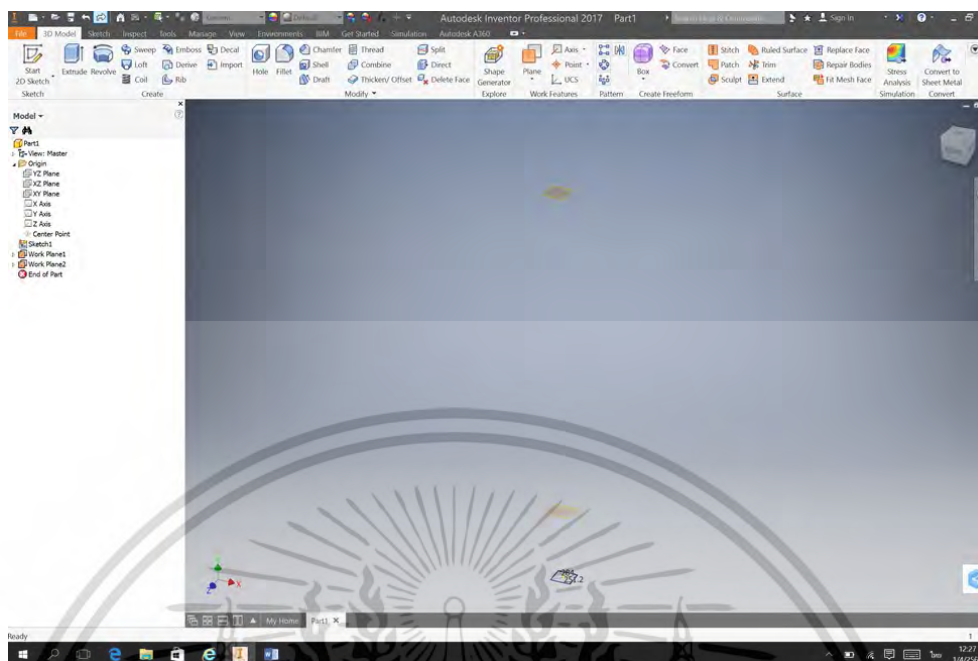
เมื่อวาดรูปฐานเสาและปลายเสาไฟฟ้าเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ การสร้าง 2D Sketch ให้เป็น 3D Model แล้วได้เตรียม Sketch สำหรับสร้างเสาไฟฟ้า

1. ไปที่ 3D Model >> Plane >> Offset from Plane
2. เลือก Plane ฐานเสาไฟฟ้าถึงปลายเสาไฟฟ้า
3. ไปที่ Model Tab >> Loft เพื่อสร้าง Solid ของเสา
4. คลิก OK จะได้ดังแสดงในรูปที่ 3.9

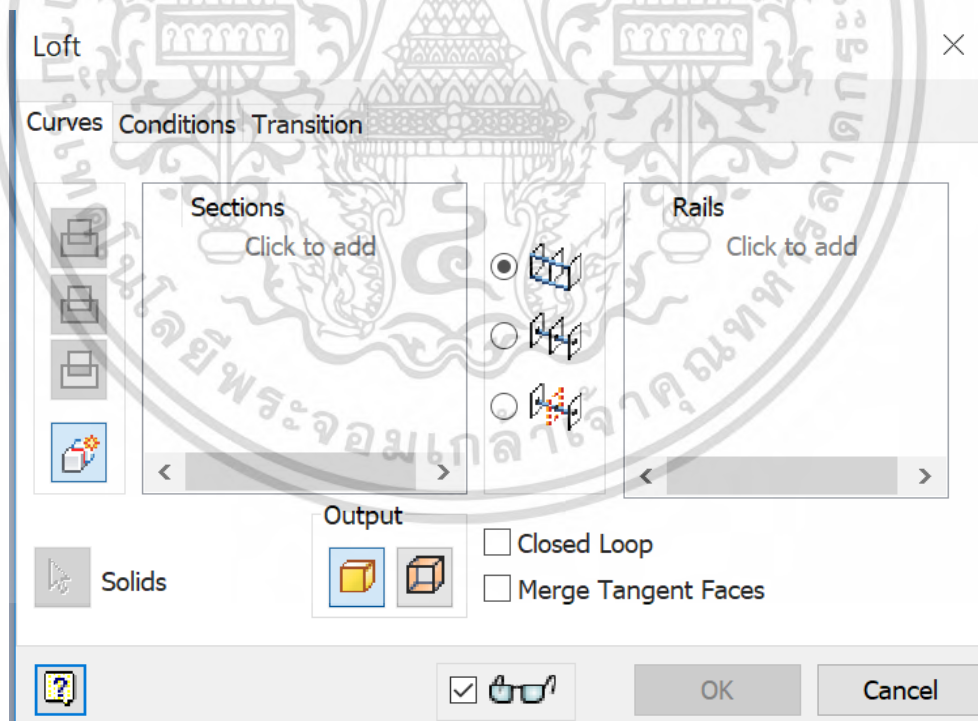


รูปที่ 3.7 รูปแสดงคำสั่งที่ใช้ในแบบจำลอง 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

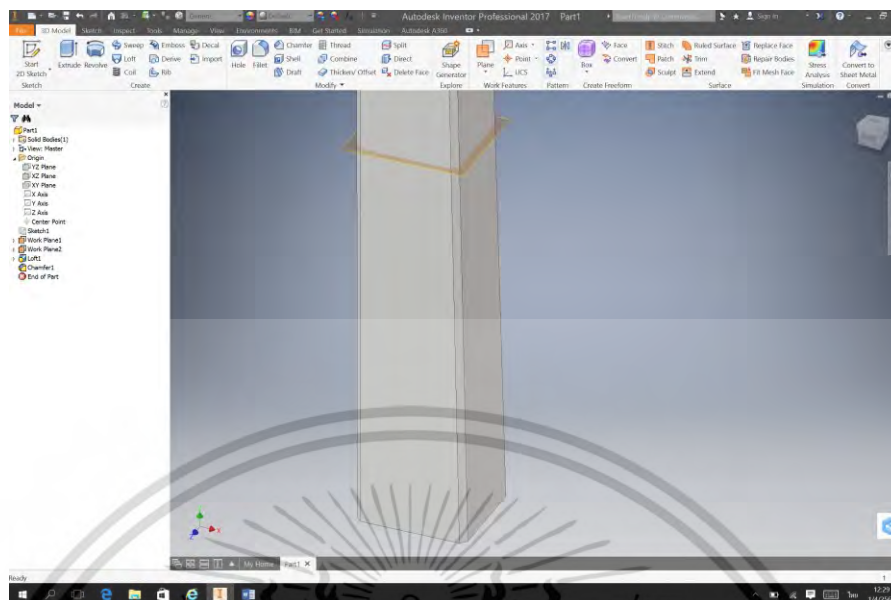


รูปที่ 3.8 รูปแสดง Planes สำหรับระดับของส่วนประกอบในเสาไฟฟ้า

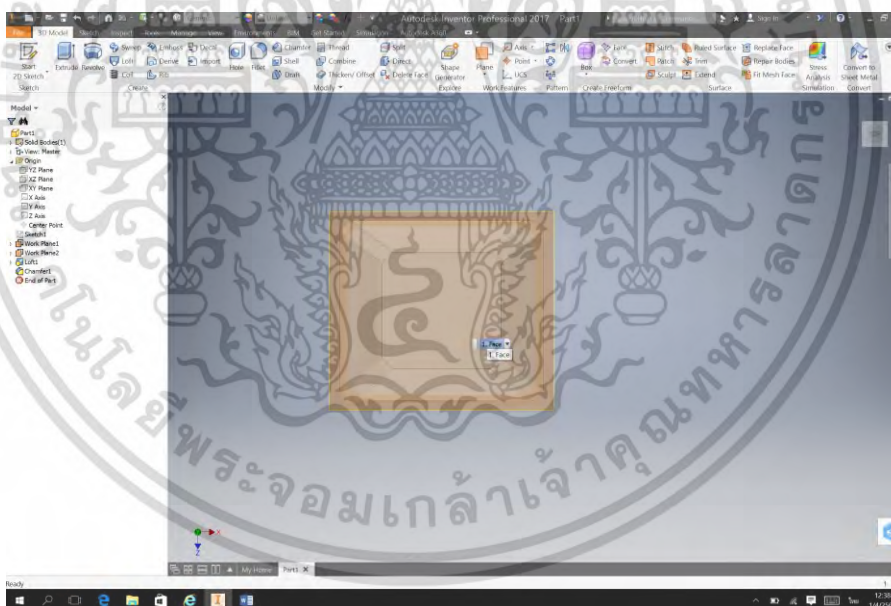


รูปที่ 3.9 รูปแสดงคำสั่ง Loft ในการ Sketch แบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้า 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 รูปแสดงการสร้าง Chamfer ที่ขอบของเสาไฟฟ้า

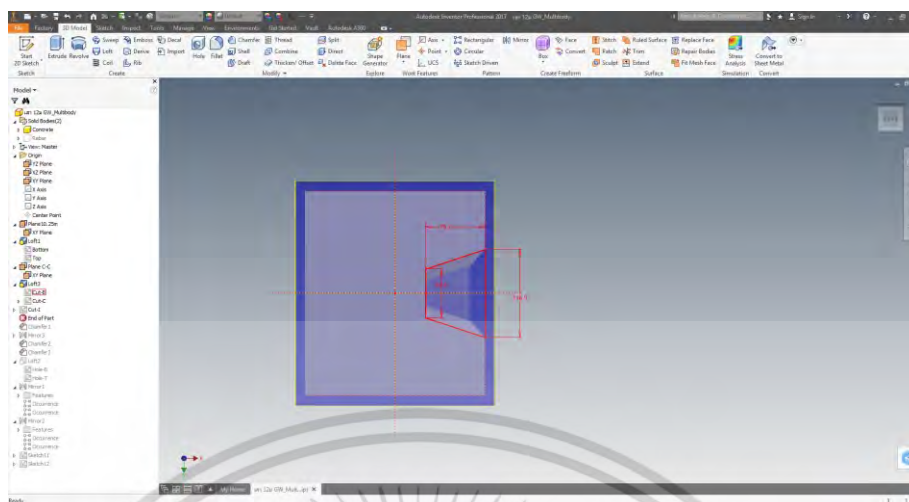


รูปที่ 3.11 รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้า

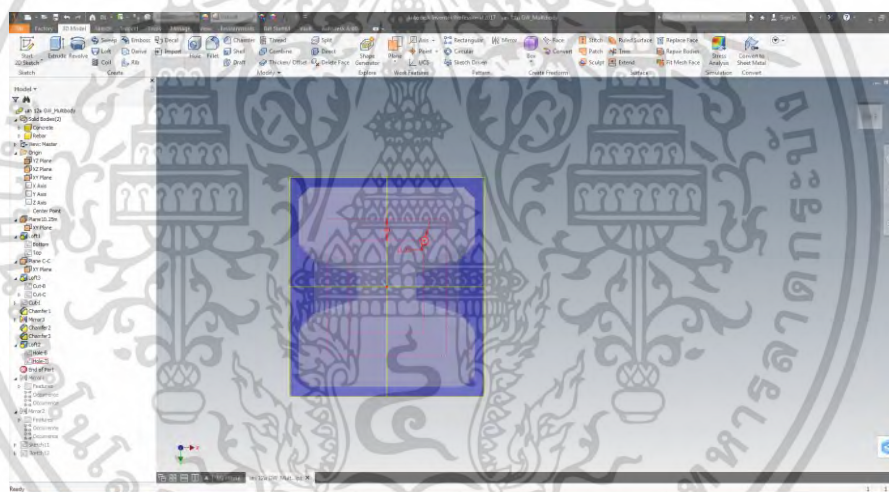
### การสร้างร่องคอนกรีตในเสาไฟฟ้า

สร้างร่องของเสาไฟฟ้าด้วยคำสั่ง Loft Cut และ Mirror เพื่อให้ได้ร่องในด้านตรงข้ามของเสาดังรูปที่ 3.12 และ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 รูปแสดงภาพ Top View ของโมเดลเสาไฟฟ้าในการสร้างร่องของเสา

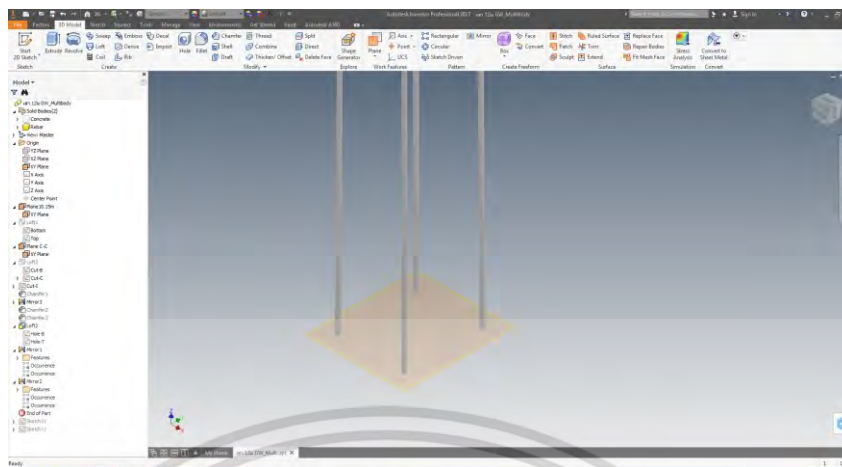


รูปที่ 3.13 รูปแสดงภาพ Plane View หลังจาก Mirror ร่องของโมเดลเสาไฟฟ้า

### การใส่เหล็กเสริมในเสาไฟฟ้า

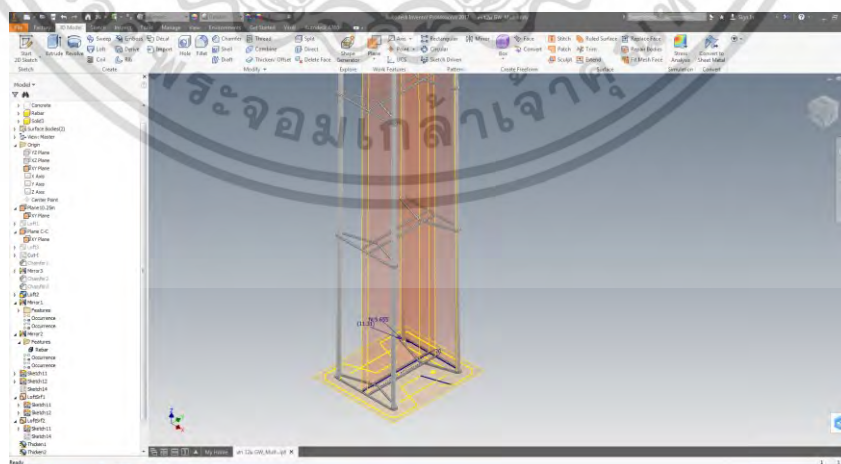
สร้างเหล็กเสริมหลัก โดยเปิด Plane XY Axis แล้วทำการวาดวงกลมของเส้นเหล็กเสริมที่ฐานและปลายของเสาไฟฟ้า แล้วใช้คำสั่ง Loft เพื่อสร้าง Solid ของเหล็กเสริมไปที่ปลายเสาไฟฟ้า เมื่อแล้วเสร็จจะได้ดังรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



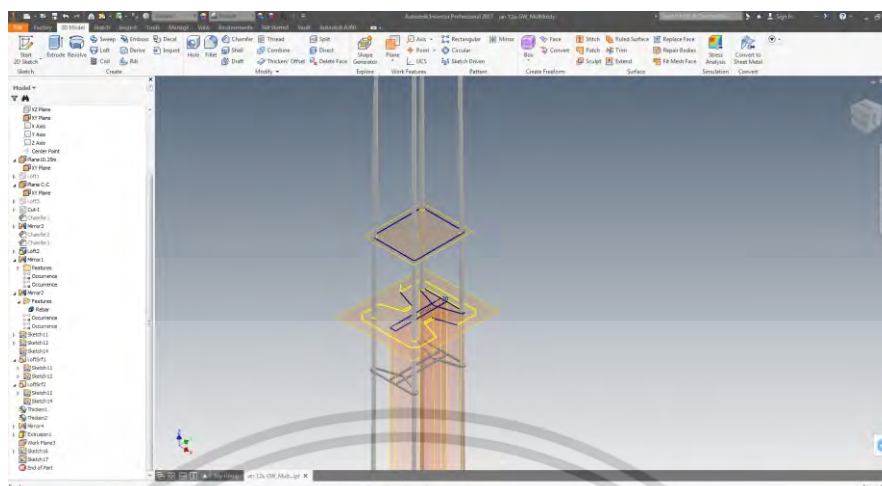
รูปที่ 3.14 รูปแสดงภาพ View ของเหล็กเสริมหลักในโมเดลเสาไฟฟ้า

เหล็กปลอกของเสาไฟฟ้ามี 2 ลักษณะ ที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมประกอบและรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ที่ฐาน การสร้างเริ่มวาดรูปทรงแบบแรกของเหล็กปลอกจากฐานเสาและที่ Plane ที่กำหนดไว้ ตามแบบมาตรฐานของ กพน กำหนดความหนาของเหล็กปลอกด้วยคำสั่ง Thicken/Offset สร้างสี่เหลี่ยมตามระยะของเหล็กปลอกและใช้คำสั่ง Loft Cut เพื่อให้ได้ระยะเหล็กปลอกตามแบบมาตรฐาน เมื่อแล้วเสร็จจะได้ดังรูปที่ 3.15 และจาก Plane ในระยะที่กำหนดขึ้นไป วาดสี่เหลี่ยมรอบเหล็กเสริมแบบที่ 2 ที่ Plane นี้และที่ปลายเสา กำหนดความหนาของเหล็กปลอกด้วยคำสั่ง Thicken/Offset สร้างสี่เหลี่ยมตามระยะของเหล็กปลอกอีกครั้งและใช้คำสั่ง Loft Cut เพื่อตัด Solid ออกให้เกิดระยะของเหล็กปลอกตามรูปที่ 3.15, 3.16 และ 3.17

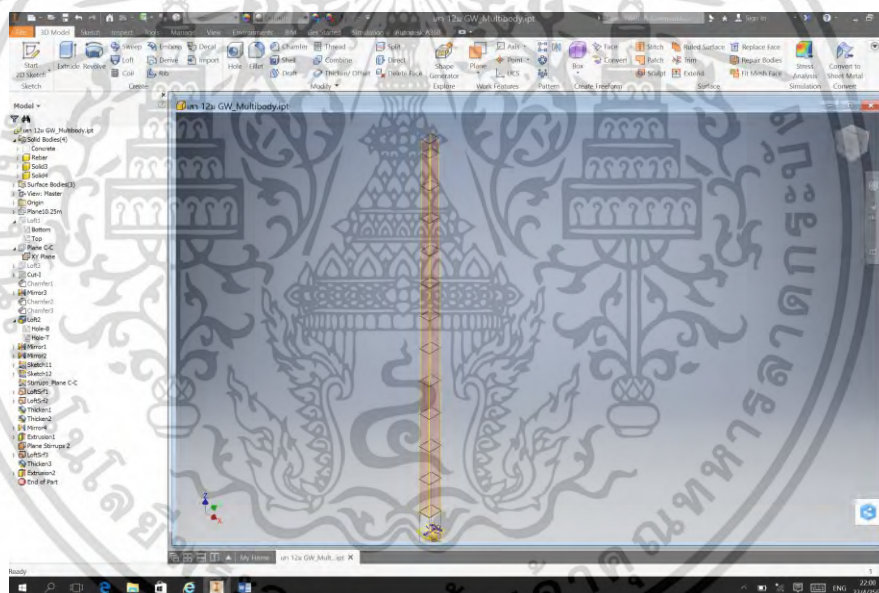


รูปที่ 3.15 รูปแสดงภาพเหล็กปลอกและระยะจากฐานเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

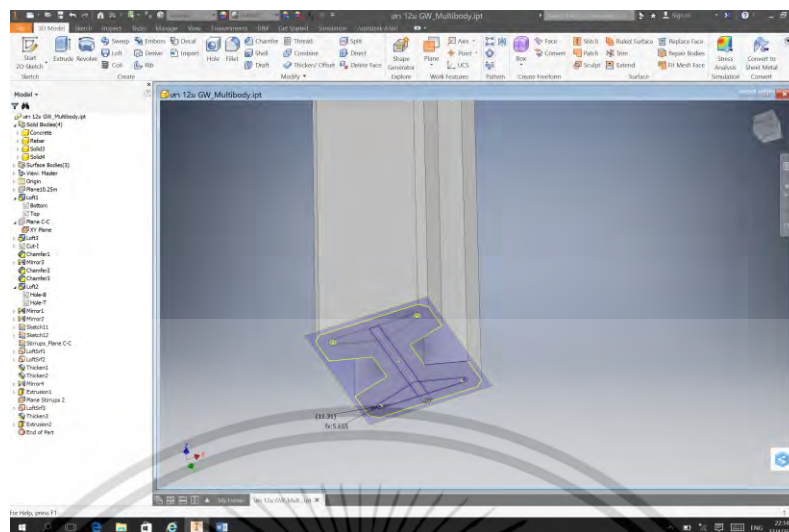


รูปที่ 3.16 รูปแสดงภาพเหล็กปลอกทรงสี่เหลี่ยมจากระยะ Plane ตามแบบ



รูปที่ 3.17 รูปแสดงรูปแสดงระยะเหล็กปลอกแบบสี่เหลี่ยม

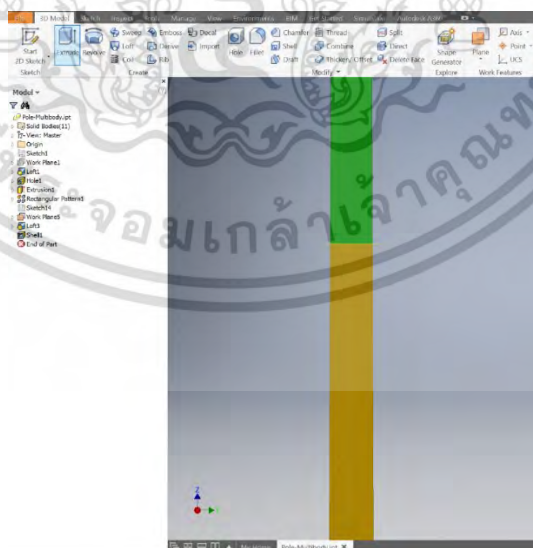
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 รูปแสดงภาพตัดที่ Plan ของการเสริมเหล็กในแบบจำลองเสาไฟฟ้า

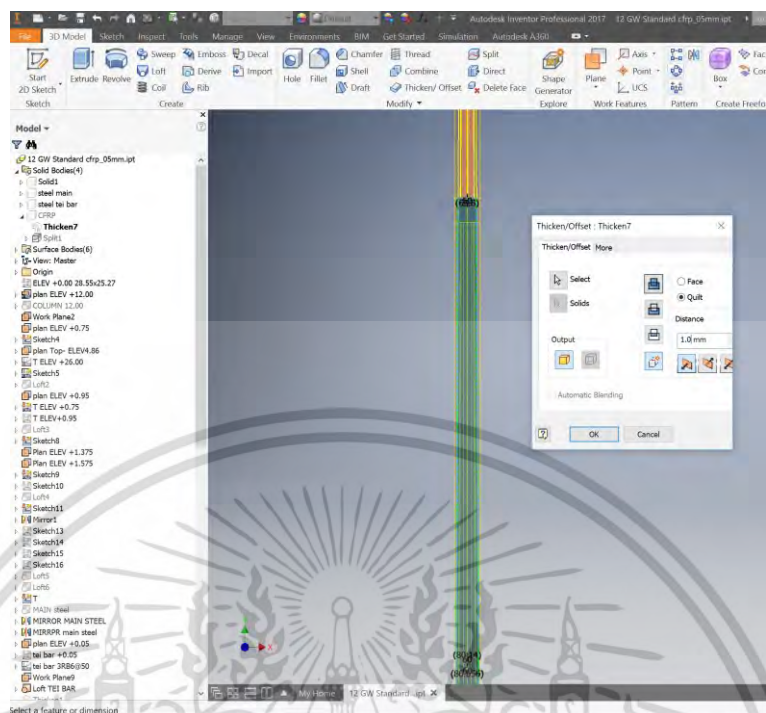
การพันรอบด้วยวัสดุคอมโพสิต ชนิด CFRP

กลับไปเปิด Plane XY Axis เช่นเดียวกับการใส่เหล็กเสริม แล้ววาดสี่เหลี่ยมที่ฐานเสาและที่ Plane ที่กำหนดตามความสูงในการพันวัสดุ CFRP ใช้คำสั่ง Loft ดังแสดงในรูปที่ 3.9 กำหนดความหนาของวัสดุ CFRP ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset เมื่อเสร็จแล้วให้ปรับระดับ Plane XY ไปที่ระดับที่เราต้องการสิ้นสุดการพัน CFRP เมื่อแล้วเสร็จตามที่ต้องการแล้ว จะได้โมเดลดังรูปที่ 3.19 และ 3.20



รูปที่ 3.19 รูปแสดงการพันรอบด้วยวัสดุคอมโพสิต ชนิด คาร์บอน หรือ CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 รูปแสดงการกำหนดความหนาของวัสดุ CFRP ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset

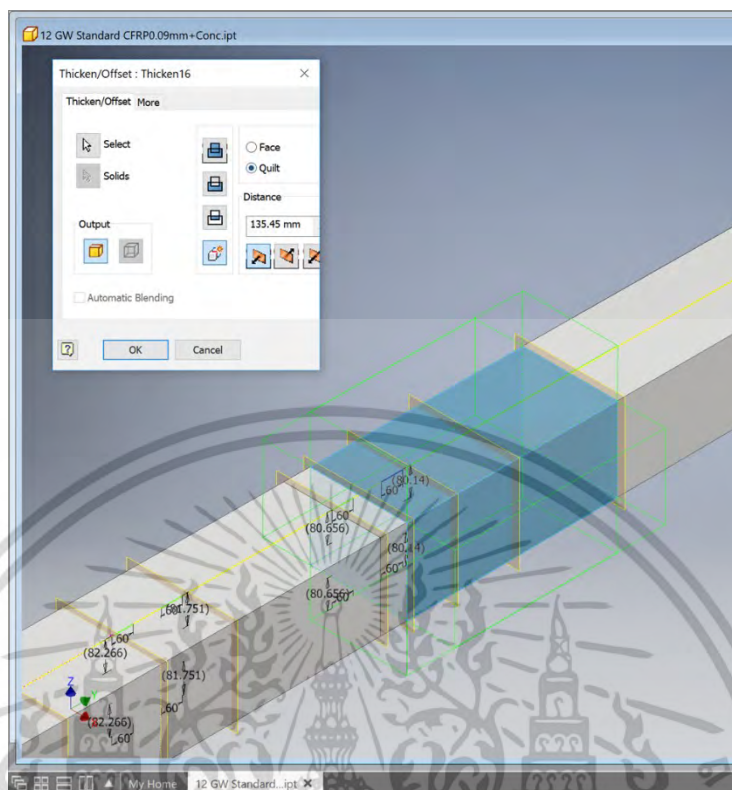
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงระยะการพันวัสดุ CFRP ในแบบจำลองเสาไฟฟ้า

ขนาดของเสาไฟฟ้า (เมตร)	โมเมนต์ของเสา (T-m)	ระยะฝังดิน (เมตร)	ระยะความสูงการพัน CFRP (เมตร, รวมระยะฝังดิน)	อัตราส่วนต่อความสูงของเสา	ระยะความสูงการพัน CFRP, หักระยะฝังดินของเสา (เมตร)
12.00	3.50	1.75	6.05	50.4%	4.30
12.00	5.00	1.75	6.00	50.0%	4.25
12.35	6.50	2.10	5.30	42.9%	3.20

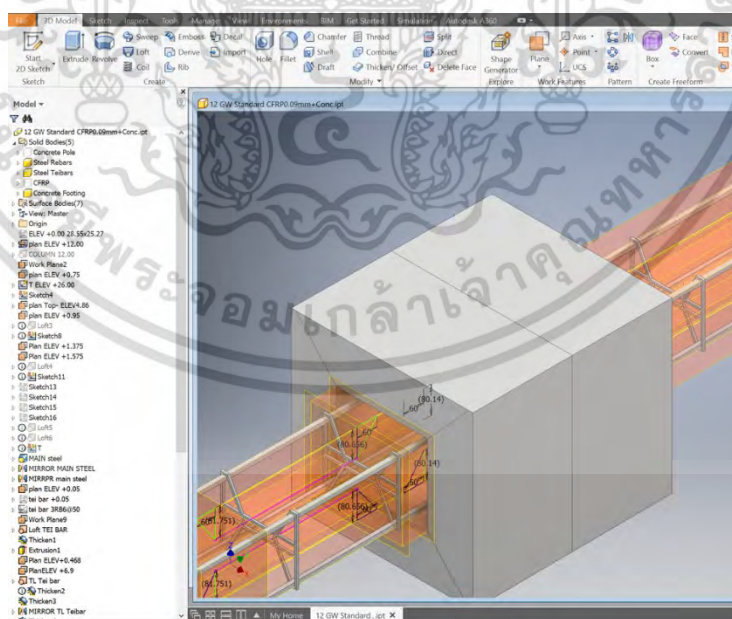
### การสร้างตอมคอนกรีต (Footing concrete) ที่ตำแหน่ง Ground Level ของเสาไฟฟ้า

ที่ Plane XY Axis ตำแหน่ง Ground Level ของเสา สร้าง Plane Offset ที่ +/- 300mm คลีกขวาที่ Plane ที่กำหนด คลีก Create Sketch แล้ววาดสี่เหลี่ยมที่ Plane ทั้งสองที่ Offset มา จากนั้นใช้คำสั่ง Loft ดังแสดงในรูปที่ 3.21 และ 3.22 เพื่อสร้าง Solid Surface ระหว่าง Sketch และ กำหนดความหนาของของตอมคอนกรีตนี้ด้วยคำสั่ง Thicken/Offset โดยเลือกความหนาที่ 135.45 ซม. เมื่อเสร็จแล้วให้กด OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



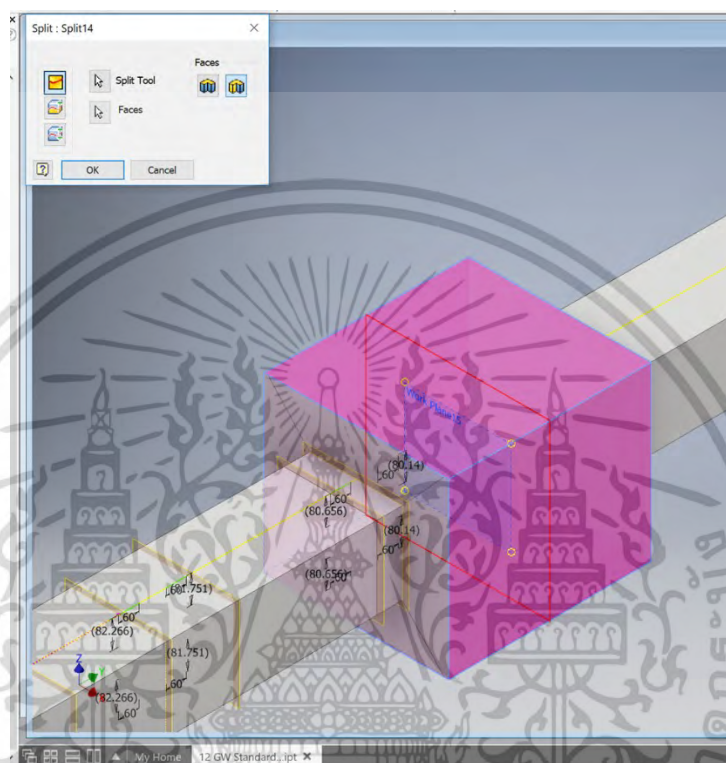
รูปที่ 3.21 รูปแสดงการสร้างค้ำคอนกรีตหุ้มเสาและวัสดุ CFRP ที่ตำแหน่ง Ground Level ของเสา



รูปที่ 3.22 รูปแสดงค้ำคอนกรีตที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Split ผิวของตอมคอนกรีต (Footing concrete) สำหรับการกำหนด Fix End ในการวิเคราะห์  
 ที่ Menu Modify ให้เลือกคำสั่ง Split แล้วเลือก Plane ที่ต้องการ Split จากนั้นเลือกที่ผิวของ  
 ตอมคอนกรีตทั้ง 4 ด้าน และกด OK ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 รูปแสดงการสร้าง Split ผิวที่ตอมคอนกรีตสำหรับการกำหนด Fix End ในการวิเคราะห์

### 3.2.3 กำหนดคุณสมบัติวัสดุ

เราต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ได้แก่ คุณสมบัติของคอนกรีตของเสาไฟฟ้า, เหล็กเสริมของเสาไฟฟ้า และคุณสมบัติของ CFRP เพื่อให้โมเดลที่เราได้จำลองแล้วนั้นมีความใกล้เคียงกับโครงสร้างของการปักเสาพาดสายไฟฟ้าจริง

- คลิกแถบด้านข้างหน้าหลัก General | Property หรือคลิก Property Page บนทูลบาร์ด้านบน
- หน้าต่าง Property จะแสดงขึ้นมา มีสองขั้นตอนที่ต้องกำหนด คือ
- กำหนดค่าคุณสมบัติให้กับหน้าตัดของเสาไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง, ที่ความยาวเสาไฟฟ้า 12 เมตร และหน้าตัดของเหล็กเสริมในเสาไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงเป็นหน้าตัดอ้างอิงในรายการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนด (Assign) หน้าตัดอ้างอิงให้แก่องค์อาคารที่ต้องการ มี 4 วิธีคือ
  - Assign To Selected Beams : กำหนดให้คานาที่ถูกเลือก
  - Assign To Edit List : กำหนดตามหมายเลขคานา
  - Use Cursor To Assign : ใช้เคอร์เซอร์กำหนด
  - Assign To View : กำหนดให้ทุกองค์อาคารในมุมมอง

โดยกำหนดให้คุณสมบัติของเสาไฟฟ้าเป็นคอนกรีต, เหล็กเสริมในเสาไฟฟ้า และวัสดุคอมโพสิตชนิดคาร์บอนพันรอบ หรือ CFRP

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง

วัสดุที่ใช้ในเสาไฟฟ้า	กำลังวัสดุ	หน่วย
คอนกรีต	450	กก./ซม. <sup>2</sup>
ลวดอัดแรง	12,500	กก./ซม. <sup>2</sup>
เหล็กปลอก	2,400	กก./ซม. <sup>2</sup>
วัสดุ CFRP	35,500	กก./ซม. <sup>2</sup>

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติกำลังและความหนาของวัสดุ CFRP

Grade	FRC 200	FRC 230	FRC 300	FRC 530	FRC 300HM
Fiber Area Weight (g/m <sup>2</sup> )	200	230	300	530	300
Design thickness (mm)	0.111	0.131	0.167	0.293	0.165
Ultimate Elongation	2.1%				1.2%
Fiber Density	1.8 g/cm <sup>3</sup>				1.82 g/cm <sup>3</sup>
Tensile strength (kgf/cm:width)	390	450	590	1050	500
Tensile strength "design value" (kgf/cm <sup>2</sup> )	35,500				30,000
Tensile E-modulus "design value" (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.35x10 <sup>6</sup>				3.80x10 <sup>6</sup>

### 3.3 น้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกหลักของงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักของเสาไฟฟ้าที่หักโค่น โดยเป็นแรงที่ส่งถ่ายจากสายไฟฟ้าที่คาดการณ์จากเสาไฟฟ้าในต้นข้างเคียงเท่านั้น

### 3.3.1 การสร้างน้ำหนักบรรทุก

ไปหน้า General | Load จะมีหน้าต่างแสดงการกำหนดน้ำหนักบรรทุก

- Definition : ใช้กำหนดข้อมูลในการสร้างน้ำหนักบรรทุก เช่น แรงลม แผ่นดินไหว ตามมาตรฐานต่างๆ

- Load Cases Details : กำหนดน้ำหนักบรรทุกในแต่ละกรณี กำหนดการร่วมกระทำ (Load Combination) และการสร้างน้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ

- Load Envelops : กำหนดกรณีบรรทุกเพื่อนำไปสร้างสภาวะขอบเขตบรรทุกได้  
เลือกรายการ Load Cases Details แล้วกดปุ่ม Add จะมีหน้าต่างแสดงขึ้นมา ให้เรากำหนดค่า Primary Load

ตั้งชื่อว่า DL แล้วกดปุ่ม Add แล้วกดปุ่ม Close จะมีรายการแสดงเพิ่มขึ้นมา คลิกเลือก DL บนทูลบาร์จะแสดง DL ขึ้นมา ซึ่งถ้ามีหลายกรณีเราก็สามารถเปลี่ยนกรณีบรรทุกได้ที่นี้ คลิกปุ่ม Add จะมีหน้าต่าง Add New : Load Items แสดงขึ้นมาเพื่อให้เราเลือกที่จะใส่น้ำหนักบรรทุกใดลงใน DL บ้าง น้ำหนักที่เราจะใส่คือน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองดังนั้นเราเลือก Self-Weight Load ในทิศทาง Y-1 และคลิกปุ่ม Add

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงแรงกระจายในลวดอัดแรงที่ใช้ในแบบจำลองเสาไฟฟ้า

ขนาดเสาไฟฟ้า (เมตร)	จำนวนลวด (เส้น)	จำนวนมุม (ต่อต้น)	จำนวนลวด (ต้นต่อเส้น)	แรงดึงในลวด (ตันต่อเส้น)	หน้าตัดกลาง (ซม.)		หน้าตัดบน (ซม.)		แรงกระจายที่ใช้ในลวดอัดแรงกลาง (MPa)	แรงกระจายที่ใช้ในลวดอัดแรงบน (MPa)
					กว้าง	ยาว	กว้าง	ยาว		
12.00	8	4	32	1.35	25.27	28.55	16.18	18.55	5.87	14.12
12.00	8	5	40	1.35	25.27	28.55	16.18	18.55	7.34	17.64
12.35	5	6	30	4	35.63	35.63	22.40	22.40	9.27	23.45

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงแรงที่ใช้ที่ตำแหน่งหัวเสาในแบบจำลองเสาไฟฟ้า

ขนาดเสาไฟฟ้า (เมตร)	โมเมนต์ของเสาตามแบบ (ตัน-เมตร)	ระยะพันวัสดุ CFRP (เมตร)	แรงที่ใช้ x Factor 2.0 (N)
12.00	3.50	6.05	11,541.18
12.00	5.00	6.00	16,350.00
12.35	6.50	5.30	18,089.36

ตารางที่ 3.6 ตาราง Pressure และ Force ที่ใช้ (เสาที่ไม่มี CFRP)

Type	Fixed Support	Pressure	Remote Force
Suppressed		No	
Define By		Components	
Coordinate System		Global Coordinate System	
X Component		0. Pa (ramped)	3432.3 N (ramped)
Y Component		5.9195e+006 Pa (ramped)   -1.4392e+007 Pa (ramped)	0. N (ramped)
Z Component		0. Pa (ramped)	0. N (ramped)
Behavior			Deformable

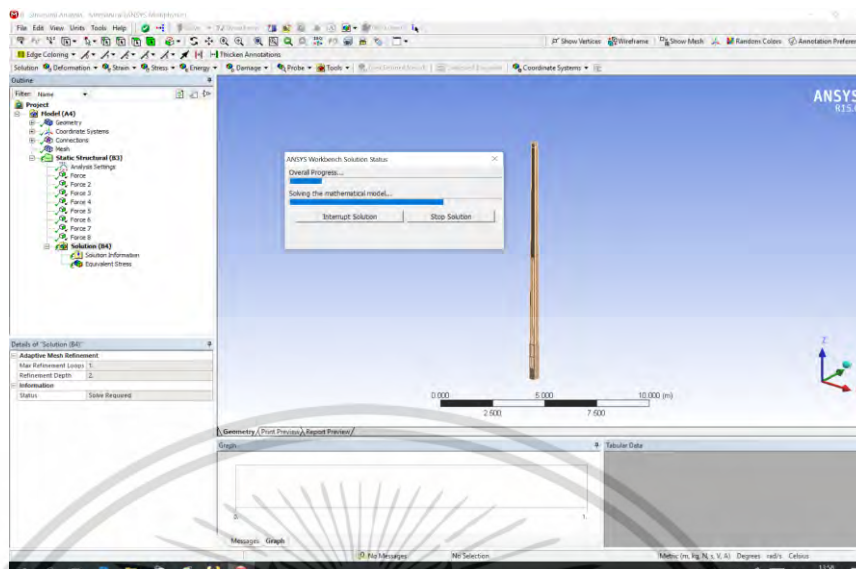
ตารางที่ 3.7 ตาราง Pressure และ Force ที่ใช้ (เสาที่มี CFRP)

Type	Fixed Support	Pressure	Remote Force
Suppressed		No	
Define By		Components	
Coordinate System		Global Coordinate System	
X Component		0. Pa (ramped)	7000. N (ramped)
Y Component		-1.4392e+007 Pa (ramped)   5.9195e+006 Pa (ramped)	0. N (ramped)
Z Component		0. Pa (ramped)	0. N (ramped)
Behavior			Deformable

### 3.4 วิเคราะห์แบบจำลองโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเสาไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Inventor แล้วนั้น เพื่อการวิเคราะห์ในระดับ Bi-Linear จึงทำการ Save file เป็น STP file เพื่อนำโมเดลไปรันผลวิเคราะห์ต่อในโปรแกรม ANSYS การวิเคราะห์เริ่มต้นโดยการกำหนด Fix End ที่ฐานเสา ใส่ Pressure หรือแรงกระทำแบบกระจายของลวดอัดแรงที่หัวและฐานเสา ส่วนแรงจากสายมีการกำหนดให้เป็นแรงกระทำแบบ Point Load เข้าด้านข้างที่หัวเสา โดยแรงที่ใส่นี้พิจารณาจากโมเมนต์ของเสาไฟฟ้าที่รับได้ของต้นนั้นแปรผันตามระยะของแกนโมเมนต์และระยะของการพันวัสดุ CFRP จากนั้นทำการแบ่ง Mesh โดยวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมทั้งหมดมีขนาด 2 และ 1 ซม. ตามลำดับ การวิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSYS มีขั้นตอนดังนี้

- สั่งให้โปรแกรมประมวลผลการคำนวณ เลือกเมนู Analyze | Run Analysis... หรือกด Ctrl + F5 ดังรูปที่ 3.12 แล้วคลิกปุ่ม Run Analysis



รูปที่ 3.24 รูปแสดงโมเดลจาก Inventor ที่แปลงเป็น STP File เปิดใน ANSYS

การวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของเสาไฟฟ้าที่มีและไม่มีวัสดุ CFRP พันอยู่ และหาความหนาของวัสดุ CFRP ที่ให้ผลที่ดีที่สุด โดยเมื่อรันโปรแกรมแล้วต้องไม่มีข้อผิดพลาด (0 Error) และคำเตือน (0 Warning) ถึงจะแล้วเสร็จ แต่ถ้าเกิดข้อผิดพลาดและคำเตือนขึ้นจะต้องทำการตรวจสอบ และแก้ไขจนกว่าจะไม่มีข้อผิดพลาดและคำเตือนเกิดขึ้นในหน้าการประมวลผลการวิเคราะห์

เมื่อเสร็จสิ้นการคำนวณแล้วผลวิเคราะห์จะถูก Save file ออกมาในไฟล์แสดงผลนามสกุล .pdf โดยมีการเลือก View ของภาพการวิเคราะห์ที่ต้องการทั้งใน Mode ของ Stress และ Deformation หลังจากนั้นเรามีสามทางเลือกคือ

- View Output File: ดูไฟล์แสดงผล
- Go to Post Processing Mode : ไปยังโหมดหลังการคำนวณ
- Stay in Modeling Mode : อยู่ในโหมดสร้างโมเดลเหมือนเดิม

ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงผล Deformation ความเค้นในเสาไฟฟ้า โดยการแสดงผลภาพของ Stress และ Deformation ที่เกิด พร้อมกับตารางของแรงที่ใส่ ดังจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

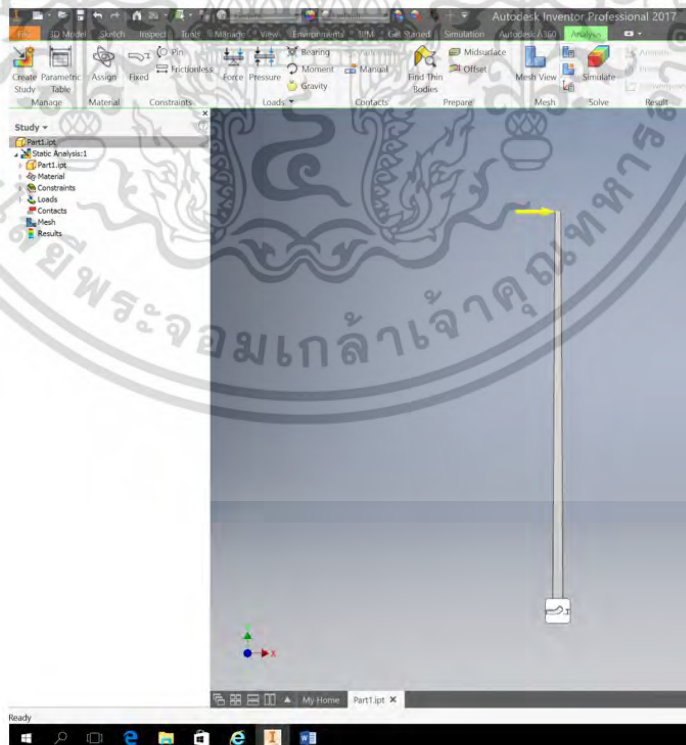
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลวิเคราะห์ในระดับ Bi-Linear การวิเคราะห์จะหาตำแหน่งของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Solid ของคอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า โดยมีการรันวิเคราะห์ Mode Path เพื่อดูผล Safety Factors ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต เพื่อทำนายการหักโค่นของเสาไฟฟ้าด้วยโมเดลจำลองโครงสร้างและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

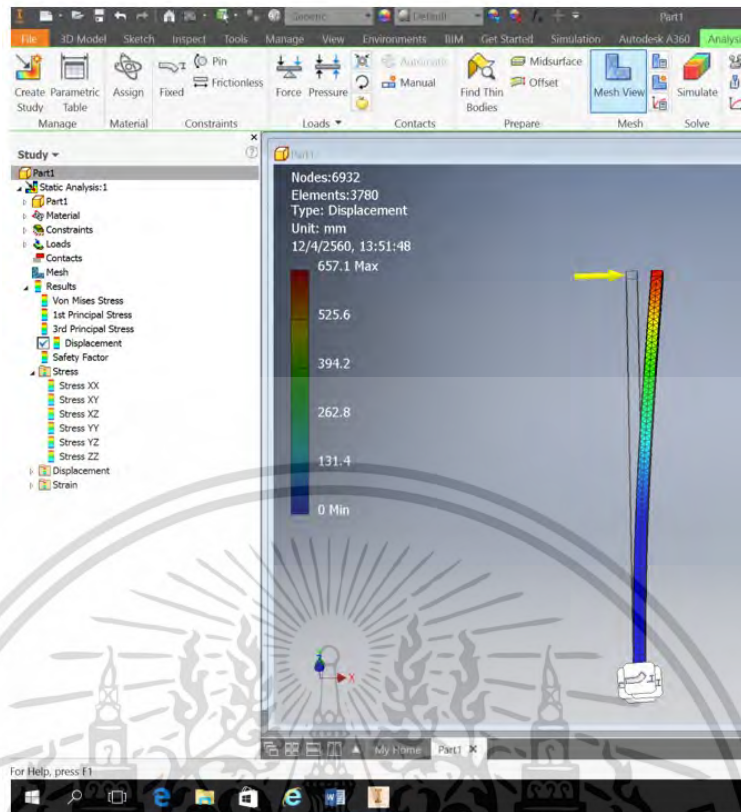
#### 4.1. การแบ่งเอลิเมนต์และการวิเคราะห์ผลเสาไฟฟ้า ที่ไม่มีการพันด้วย CFRP

การวิเคราะห์เบื้องต้นของเสาเปล่าขนาด 12 เมตร ใน Inventor Program ด้วย โดยให้แรงกระทำที่ปลายเสา แบ่ง Mesh ด้วย Program control ที่ 10 มม. ทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม ผลการวิเคราะห์ของเสาไฟฟ้า (ที่ยังไม่พันวัสดุ CFRP) จะพบว่า ความเค้นสูงสุดจะเกิดที่โคนเสา ในขณะที่ Displacement สูงสุดจะเกิดที่ปลายเสาไฟฟ้าในตำแหน่งที่แรงกระทำ

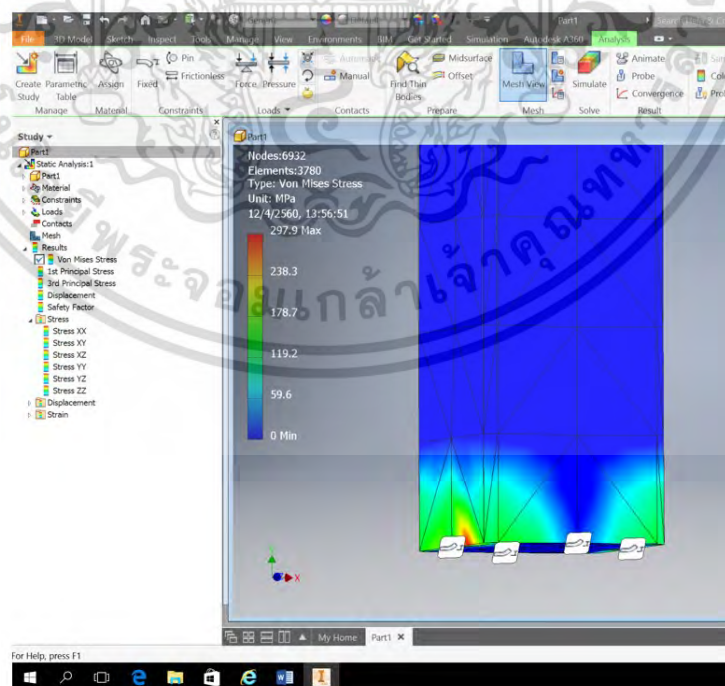


รูปที่ 4.1 รูปแสดงการแบ่ง Mesh การใส่แรง และการกำหนด fix end ที่ปลายเสา (เสาที่ไม่มี CFRP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปแสดงผล Displacement ในเสาไฟฟ้า (เสาที่ไม่มี CFRP)



รูปที่ 4.3 รูปแสดงความเค้นสูงสุดที่ปลายเสาไฟฟ้า (เสาที่ไม่มี CFRP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่ไม่ได้พัน CFRP

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
<b>Results</b>		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	270.42 mm	146. MPa
Minimum Occurs On	12 GW Standard	
Maximum Occurs On	12 GW Standard	

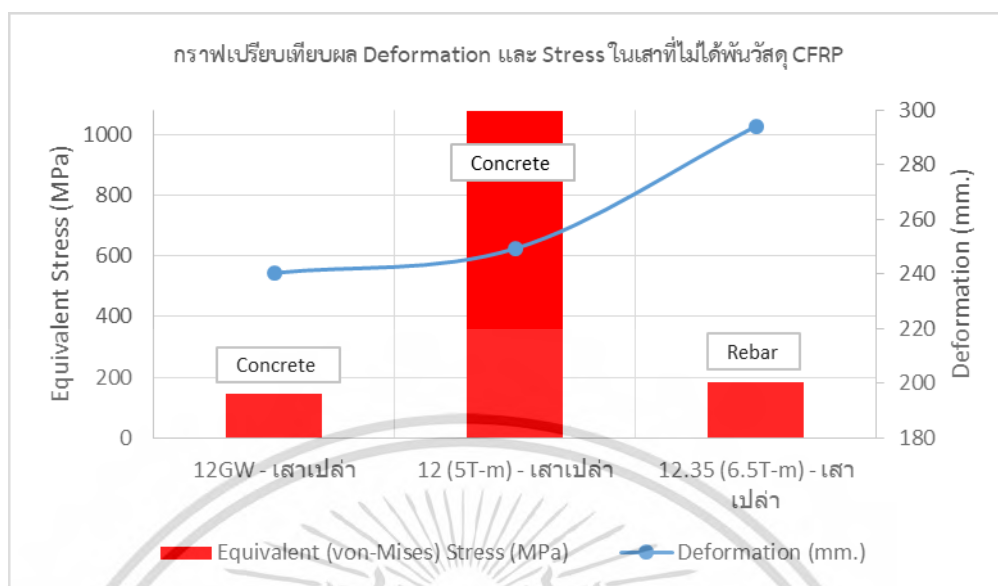
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 5T-m) ที่ไม่ได้พัน CFRP

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
<b>Results</b>		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	249.31 mm	1076.2 MPa
Minimum Occurs On	Column	
Maximum Occurs On	Column	

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) ที่ไม่ได้พัน CFRP

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
<b>Results</b>		
Minimum	0. mm	6.5356e-016 MPa
Maximum	294.06 mm	184.91 MPa
Minimum Occurs On	Column	
Maximum Occurs On	Column	Rebar1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



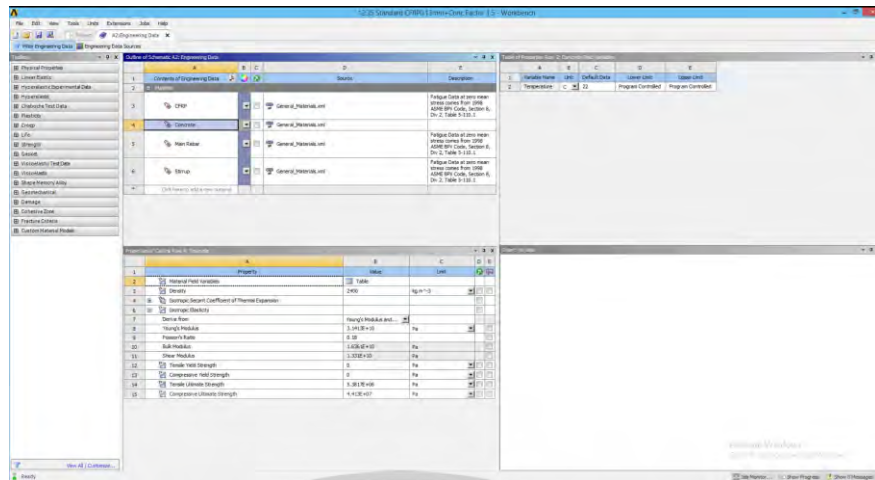
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลวิเคราะห์เปรียบเทียบ Stress และ Deformation ในเสาขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m), 12 เมตร (BM 5T-m) และ 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) ที่ไม่ได้พันวัสดุ CFRP

จากกราฟผลวิเคราะห์ที่ได้ในเสาไฟฟ้าขนาดต่างๆ ที่ไม่ได้พันวัสดุ CFRP ข้างต้น Deformation ในเสาที่พันด้วยวัสดุ CFRP มีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์จากโมเมนต์ของเสาในแต่ละต้น โดยที่ความเค้นสูงสุดในเสามีค่าสูงขึ้นในคอนกรีต ในขณะที่ความเค้นในเสา 12.35 เมตร จะเกิดในเหล็กเสริม

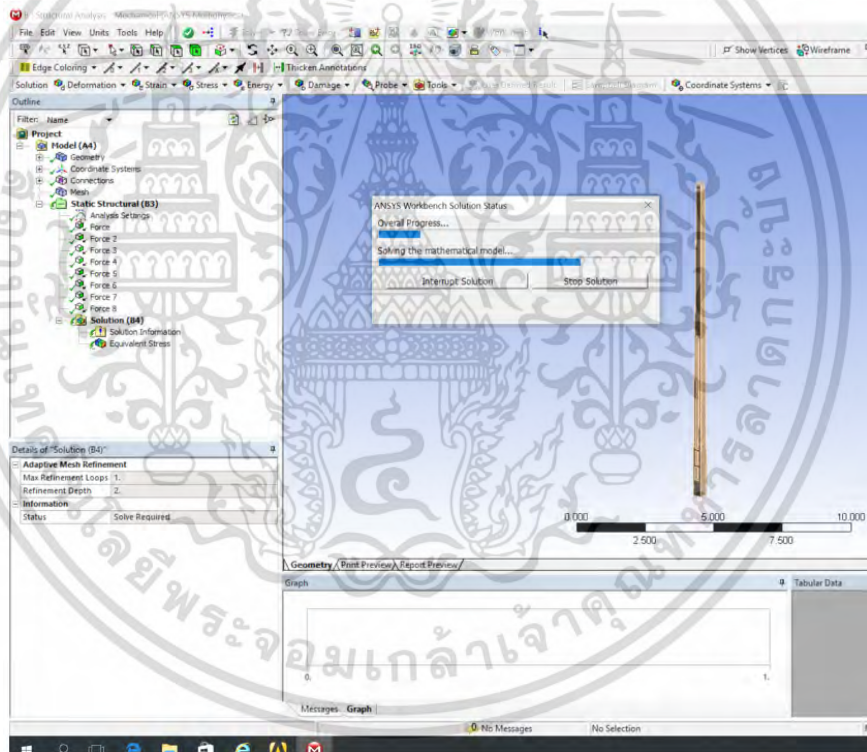
## 4.2. ผลการวิเคราะห์เสาไฟฟ้าด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์เสาไฟฟ้าที่พันด้วยวัสดุ CFRP แบบ Fabric ที่ความหนาต่างๆ ในโปรแกรม ANSYS โดยใช้กำลังของวัสดุ CFRP ตามสเปกมาตรฐานของผู้ผลิตวัสดุ CFRP และให้แรงกระทำของลวด Pre-Stressed เป็นแรงกระจายอัดเข้าที่ด้านบนและล่างของเสาไฟฟ้า ในขณะที่ให้แรงที่เกิดแรงดึงจากสายไฟเข้าที่ปลายเสาเป็น 2 เท่าค่านวนจากโมเมนต์ของเสาไฟฟ้าตามมาตรฐานของ กฟน. จากนั้นแบ่ง Mesh ด้วย ด้วย Program control ที่ 10 มม. ทั้ง Solid คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



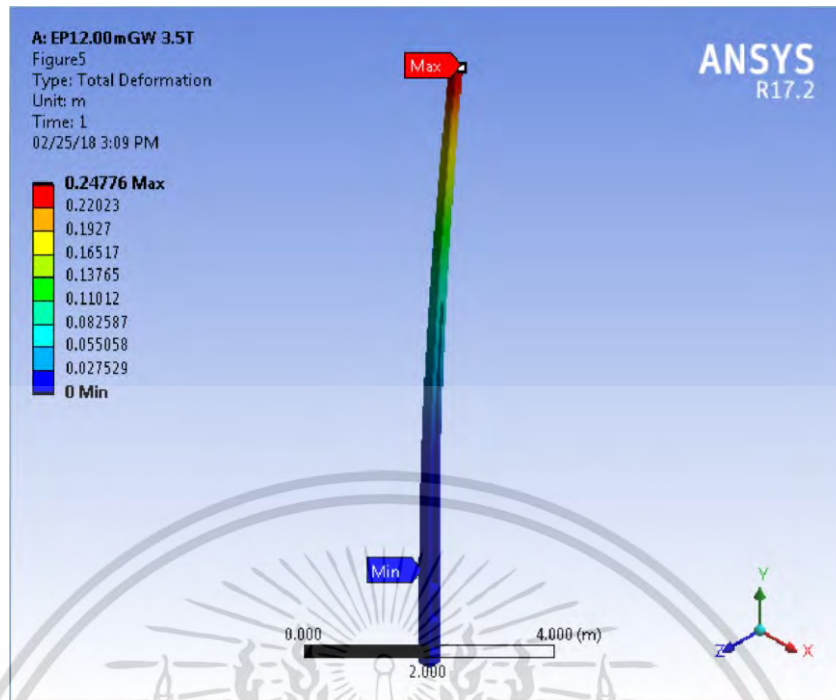
รูปที่ 4.5 รูปแสดงการ Input แรงกระทำในแบบจำลองเสาไฟฟ้าในการวิเคราะห์



รูปที่ 4.6 รูปแสดงการแบ่ง Mesh ในโปรแกรม ANSYS (เสาที่มี CFRP)

ผลการวิเคราะห์ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m), 12 เมตร (BM 5T-m) และ 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) ที่พันด้วยวัสดุ CFRP ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่า ความเค้นสูงสุดขยับจากโคนเสาสูงขึ้นไปบนระยะที่พันด้วยวัสดุ CFRP ในขณะที่ Deformation สูงสุดยังคงเกิดที่ปลายเสาไฟฟ้าในตำแหน่งที่แรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปแสดง Deformation ที่เกิดที่ปลายเสาจากแรงกระทำ



รูปที่ 4.8 รูปแสดงความเค้นเหนือระยะการพันด้วยวัสดุ CFRP จากระดับพื้นดิน

ผลวิเคราะห์ Stress และ Deformation ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m), 12 เมตร (BM 5T-m) และ 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) ในความสูงที่กำหนด จะได้ Maximum Stress และ Deformation ดังตารางและมีรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พันด้วย CFRP ด้วยระยะความสูง 6.05 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน ของเสาไฟฟ้าแบบ 12 เมตร ที่รับโมเมนต์ 3.5 ตัน-เมตร จะมี Stress Value และ Deformation ที่เกิด ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.56 mm.

Definition		
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	430.76 mm	650.35 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.65 mm.

Definition		
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	398.95 mm	659.13 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.85 mm.

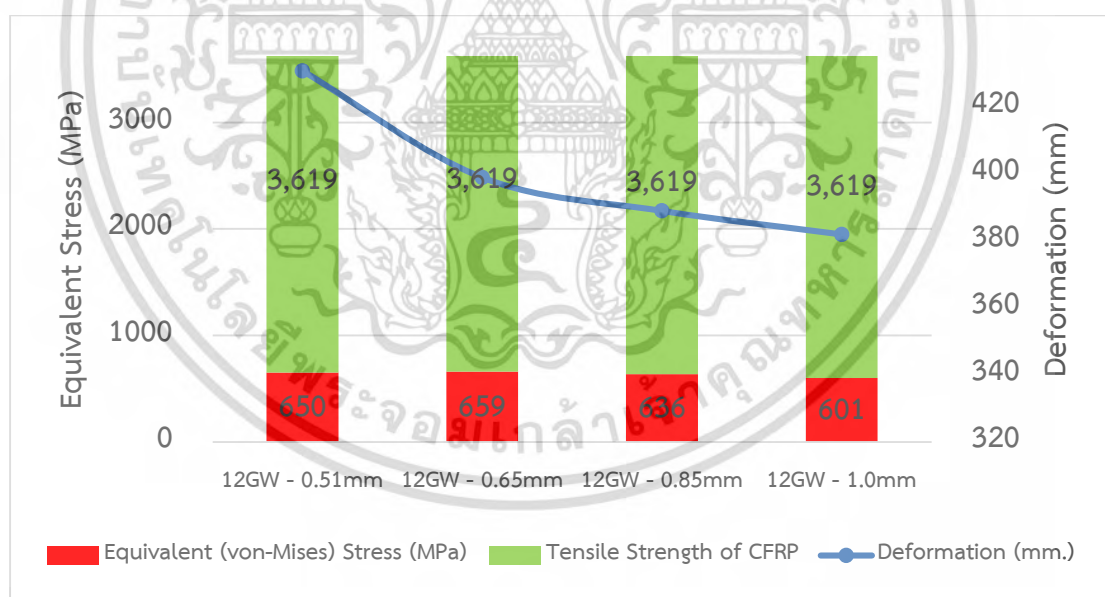
Definition		
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
Results		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	388.98 mm	636.22 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 1.0 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	381.95 mm	600.67 MPa
Minimum Occurs On	SYS\Concrete Pole	
Maximum Occurs On	SYS\Concrete Pole	SYS\CFRP

จากผลวิเคราะห์ที่ได้ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) พบว่า Deformation ในเสาที่พันด้วยวัสดุ CFRP มีค่าลดลง 7.4%, 2.5% และ 1.8% ตามลำดับเมื่อวัสดุ CFRP ที่พันมีความหนามากขึ้น ในขณะที่ Stress สูงสุดเกิดในวัสดุ CFRP แทนวัสดุคอนกรีตในเสาที่ไม่ได้พัน และมีอัตราส่วนของ Stress ที่เกิดต่อกำลังของวัสดุ CFRP ที่ 18.2%, 17.6% และ 16.6% โดย Stress ที่เกิดในวัสดุ CFRP มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ถึงแม้จะมีความหนาของวัสดุ CFRP ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 รูปแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสา 12 เมตร (BM 3.5T-m) เปรียบเทียบกำลังของวัสดุ CFRP

2. พันด้วย CFRP ด้วยระยะความสูง 6 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ที่รับโมเมนต์ 5 ตัน-เมตร จะมี Stress และ Deformation ที่เกิด ตามตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.65 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	441.85 mm	610.17 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 0.78 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	449.07 mm	630.5 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.10 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 1.2 mm.

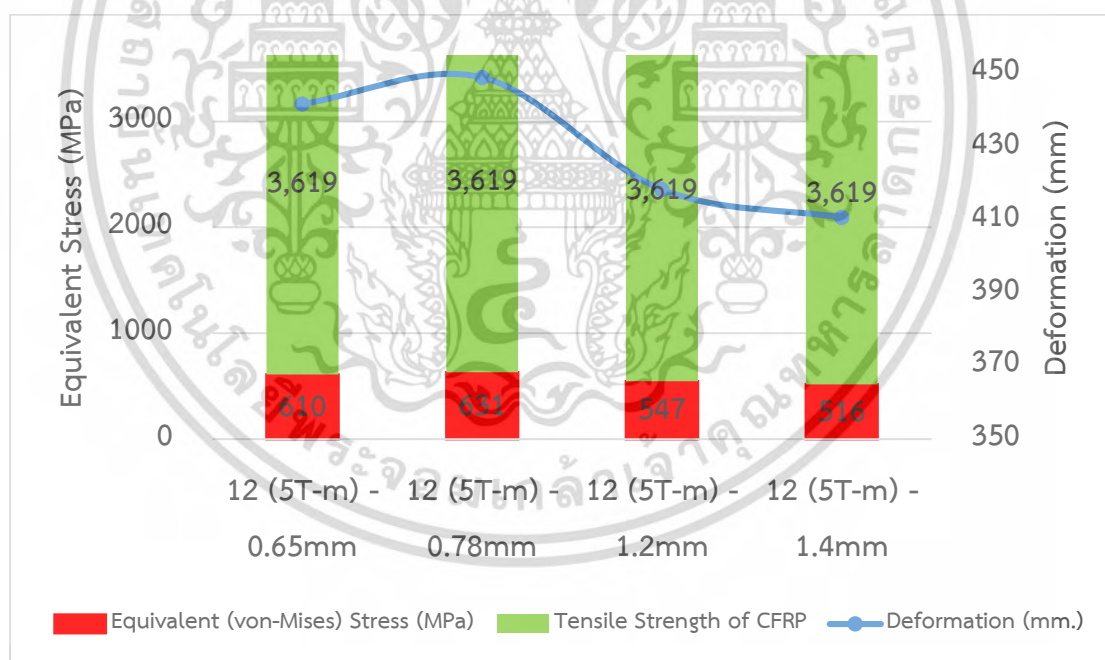
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
Results		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	418.42 mm	547.39 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (5T-m) ที่พันด้วย CFRP ทหนา 1.4 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	410.76 mm	515.79 MPa
Minimum Occurs On	Column	Concrete
Maximum Occurs On	Column	CFRP

จากผลวิเคราะห์ที่ได้ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 5T-m) พบว่าแนวโน้ม Deformation ในเสาที่พันด้วยวัสดุ CFRP มีค่าลดลง สูงสุดที่ 6.8% ที่ความหนา 1.2 มม. ในขณะที่ Stress สูงสุดเกิดในวัสดุ CFRP แทนวัสดุคอนกรีตในเสาที่ไม่ได้พัน และมีอัตราส่วนของ Stress ที่เกิดต่อ Strength ของวัสดุ CFRP ที่ 17% และลดลงถึง 14.3% ตามความหนาของวัสดุ CFRP ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 รูปแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสา 12 เมตร (BM 5T-m) เปรียบเทียบกำลังของวัสดุ CFRP

3. พันด้วย CFRP ด้วยระยะความสูง 5.3 เมตร ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร ที่รับโมเมนต์ 6 ตัน-เมตร จากระดับโคนเสาในดิน จะมี Stress และ Deformation ที่เกิด ตามตารางที่ 4.9 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (6.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 1.2mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
<b>Results</b>		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	360.6 mm	670.09 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.13 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (6.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 1.4mm.

Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
<b>Results</b>		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	355.73 mm	655.16 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

ตารางที่ 4.14 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (6.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 2.4mm.

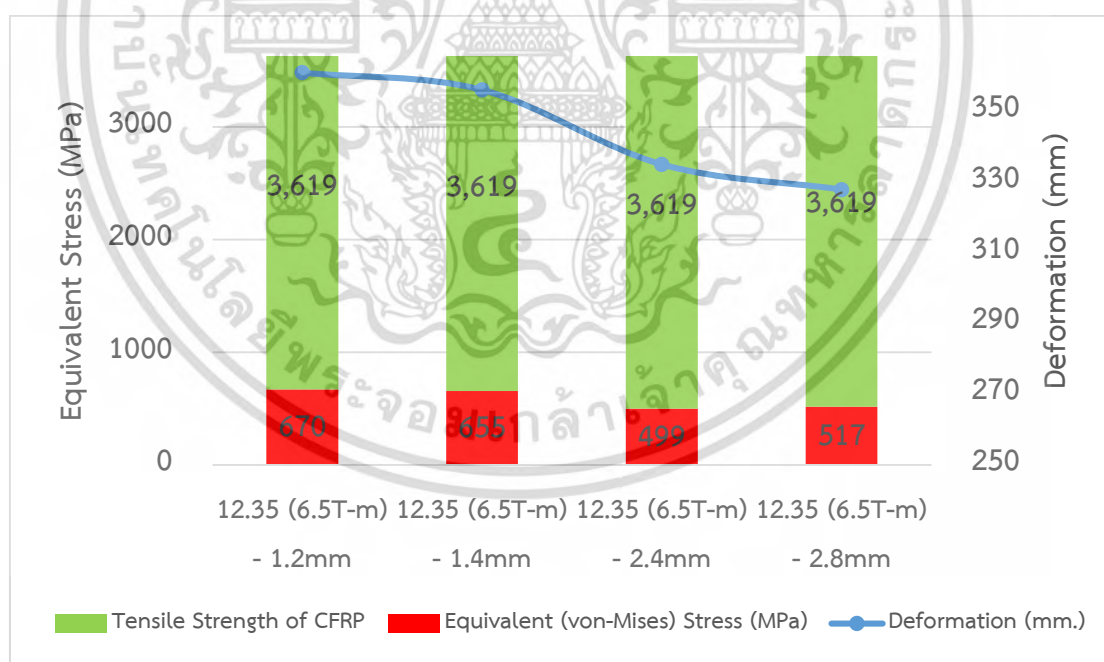
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
By		Time
Display Time		Last
Calculate Time History		Yes
Identifier		
Suppressed		No
<b>Results</b>		
Minimum	0. mm	0. MPa
Maximum	334.71 mm	499.3 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงการวิเคราะห์ผล Deformation และ Stress ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (6.5T-m) ที่พันด้วย CFRP หนา 2.8mm.

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	327.64 mm	517.43 MPa
Minimum Occurs On		Column
Maximum Occurs On	Column	CFRP

จากผลวิเคราะห์ที่ได้ในเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) พบว่า Deformation ในเสาที่พันด้วยวัสดุ CFRP มีค่าลดลง 1.4%, 5.9% และ 2.1% ตามลำดับเมื่อวัสดุ CFRP ที่พันมีความหนามากขึ้น ในขณะที่ Stress สูงสุดเกิดในวัสดุ CFRP แทนวัสดุคอนกรีตในเสาที่ไม่ได้พัน มีอัตราส่วนต่อกำลังของวัสดุ CFRP ที่ 18.5%, 18.1%, 13.8% และ 14.3% โดย Stress ที่เกิดในวัสดุ CFRP มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงเช่นกัน ตามความหนาของวัสดุ CFRP ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 รูปแสดงผลวิเคราะห์ Deformation และ Stress ที่เกิดในเสา 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) เปรียบเทียบกำลังของวัสดุ CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3. ผลวิเคราะห์ Safety Factors Path ใน ANSYS ในการวิเคราะห์ Post-Cracking ของ เสาไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ใน Path Safety Factor ของ ANSYS เพื่อหาผลวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยในคอนกรีตด้านที่รับกำลังอัดเพื่อทำนายตำแหน่งการเกิดการหักโค่นของเสาไฟฟ้า จะได้ค่า Safety Factors ดังตารางที่ 4.16, 4.17 และ 4.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 12 เมตร 3.5 ตัน-เมตร

Length (m.)	CFRP Thickness ที่ใช้			
	0.51mm.	0.65mm.	0.85mm.	1.0mm.
0.0	15.0	15.0	15.0	15.0
0.3	15.0	15.0	15.0	15.0
0.5	15.0	15.0	15.0	15.0
0.8	15.0	15.0	15.0	15.0
1.0	15.0	15.0	15.0	15.0
1.3	15.0	15.0	15.0	15.0
1.5	15.0	15.0	15.0	15.0
1.8	14.1	14.0	14.0	14.2
2.0	2.4	2.4	2.4	2.5
2.1	0.9	0.9	1.0	1.1
2.3	1.1	1.1	1.2	1.2
2.5	1.1	1.1	1.2	1.2
2.8	1.1	1.1	1.2	1.2
3.0	1.1	1.1	1.2	1.2
3.3	1.1	1.1	1.2	1.2
3.5	1.1	1.1	1.2	1.2
3.8	1.1	1.1	1.2	1.2
4.0	1.1	1.1	1.2	1.2
4.3	1.1	1.1	1.2	1.2
4.5	1.1	1.1	1.2	1.2
4.8	1.1	1.1	1.2	1.2
5.0	1.1	1.2	1.2	1.2
5.3	1.1	1.2	1.2	1.2
5.5	1.1	1.2	1.2	1.3
5.8	1.2	1.2	1.2	1.3
6.0	1.2	1.2	1.3	1.3
6.1	1.0	1.0	1.0	1.0
6.3	1.1	1.1	1.1	1.1
6.5	1.1	1.1	1.1	1.1
6.8	1.1	1.1	1.1	1.1
7.0	1.1	1.1	1.1	1.1
7.3	1.1	1.1	1.1	1.1
7.5	1.1	1.1	1.1	1.1
7.8	1.1	1.1	1.1	1.1
8.0	1.2	1.2	1.2	1.2
8.3	1.2	1.2	1.2	1.2
8.5	1.2	1.2	1.2	1.2
8.8	1.3	1.3	1.3	1.3
9.0	1.3	1.3	1.3	1.3
9.3	1.3	1.3	1.3	1.3
9.5	1.4	1.4	1.4	1.4
9.8	1.5	1.4	1.4	1.5
10.0	1.5	1.5	1.5	1.5
10.3	1.6	1.6	1.6	1.6
10.5	1.7	1.7	1.7	1.7
10.8	1.8	1.8	1.8	1.8
11.0	2.0	2.0	2.0	2.0
11.3	2.2	2.2	2.2	2.2
11.5	2.5	2.4	2.4	2.5
11.8	2.8	2.8	2.8	2.8
12.0	3.2	3.1	3.1	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 12 เมตร 5 ต้น-เมตร

Length (m.)	CFRP Thickness ที่ใช้			
	0.65mm.	0.78mm.	1.2mm.	1.4mm.
0.0	15.0	15.0	15.0	15.0
0.3	15.0	15.0	15.0	15.0
0.5	15.0	15.0	15.0	15.0
0.8	15.0	15.0	15.0	15.0
1.0	15.0	15.0	15.0	15.0
1.3	15.0	15.0	15.0	15.0
1.5	15.0	15.0	15.0	15.0
1.8	10.5	10.6	10.8	10.8
2.0	2.0	2.0	2.1	2.1
2.1	0.9	0.9	1.0	1.0
2.3	1.0	1.0	1.1	1.1
2.5	1.0	1.0	1.1	1.1
2.8	1.0	1.0	1.1	1.1
3.0	1.0	1.0	1.1	1.1
3.3	1.0	1.1	1.1	1.2
3.5	1.0	1.1	1.1	1.2
3.8	1.0	1.1	1.1	1.2
4.0	1.0	1.1	1.1	1.2
4.3	1.1	1.1	1.1	1.2
4.5	1.1	1.1	1.2	1.2
4.8	1.1	1.1	1.2	1.2
5.0	1.1	1.1	1.2	1.2
5.3	1.1	1.1	1.2	1.2
5.5	1.1	1.1	1.2	1.2
5.8	1.1	1.1	1.2	1.3
6.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6.3	1.0	1.0	1.0	1.0
6.5	1.0	1.0	1.0	1.0
6.8	1.1	1.1	1.1	1.1
7.0	1.1	1.1	1.1	1.1
7.3	1.1	1.1	1.1	1.1
7.5	1.1	1.1	1.1	1.1
7.8	1.1	1.1	1.1	1.1
8.0	1.2	1.2	1.2	1.2
8.3	1.2	1.2	1.2	1.2
8.5	1.2	1.2	1.2	1.2
8.8	1.3	1.3	1.3	1.3
9.0	1.3	1.3	1.3	1.3
9.3	1.4	1.4	1.4	1.4
9.5	1.5	1.5	1.5	1.5
9.8	1.5	1.5	1.5	1.5
10.0	1.6	1.6	1.6	1.6
10.3	1.7	1.7	1.7	1.7
10.5	1.9	1.9	1.9	1.9
10.8	2.0	2.0	2.0	2.0
11.0	2.2	2.3	2.3	2.3
11.3	2.5	2.6	2.6	2.6
11.5	3.0	3.0	3.0	3.0
11.8	3.6	3.6	3.6	3.6
12.0	2.8	2.8	2.8	2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

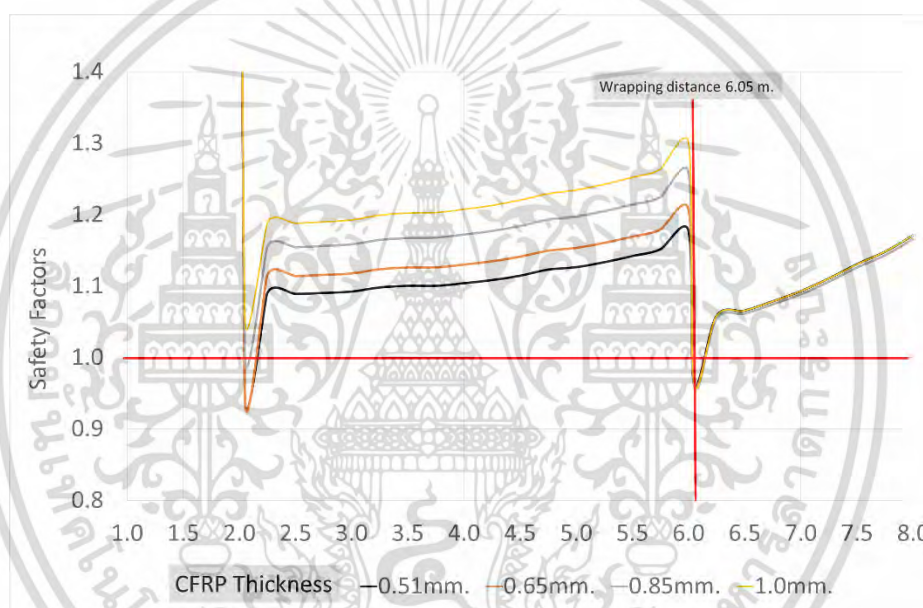
ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงผล Safety Factors จาก ANSYS ในเสาขนาด 12.35 เมตร 6 ต้น-เมตร

Length (m.)	CFRP Thickness ที่ใช้			
	1.2mm.	1.4mm.	2.4mm.	2.8mm.
0.00	15.00	15.00	15.00	15.00
0.30	15.00	15.00	15.00	15.00
0.60	15.00	15.00	15.00	15.00
0.90	15.00	15.00	15.00	15.00
1.20	15.00	15.00	15.00	15.00
1.51	15.00	15.00	15.00	15.00
1.81	14.84	15.01	14.88	14.94
2.11	8.40	8.50	8.75	8.84
2.41	0.81	0.85	1.08	1.14
2.71	1.07	1.10	1.25	1.30
3.01	1.08	1.10	1.25	1.31
3.31	1.08	1.11	1.25	1.31
3.61	1.08	1.11	1.26	1.32
3.92	1.08	1.11	1.26	1.32
4.22	1.09	1.12	1.27	1.33
4.52	1.09	1.12	1.27	1.33
4.82	1.10	1.13	1.28	1.34
5.12	1.10	1.13	1.28	1.34
5.31	0.75	0.74	0.73	0.74
5.42	0.93	0.93	0.93	0.93
5.72	0.93	0.93	0.93	0.93
6.02	0.94	0.94	0.94	0.94
6.33	0.95	0.95	0.95	0.95
6.63	0.96	0.96	0.96	0.96
6.93	0.97	0.97	0.97	0.97
7.23	0.99	0.99	0.99	0.99
7.53	1.00	1.00	1.00	1.00
7.83	1.02	1.02	1.02	1.02
8.13	1.04	1.04	1.04	1.04
8.43	1.07	1.07	1.07	1.07
8.74	1.10	1.10	1.10	1.10
9.04	1.13	1.13	1.13	1.13
9.34	1.17	1.17	1.17	1.17
9.64	1.22	1.22	1.22	1.22
9.94	1.28	1.28	1.28	1.28
10.24	1.35	1.35	1.35	1.35
10.54	1.43	1.43	1.43	1.43
10.84	1.54	1.54	1.54	1.54
11.15	1.68	1.68	1.68	1.68
11.45	1.86	1.86	1.86	1.86
11.75	2.12	2.12	2.12	2.12
12.05	2.49	2.49	2.49	2.49
12.35	2.88	2.88	2.88	2.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

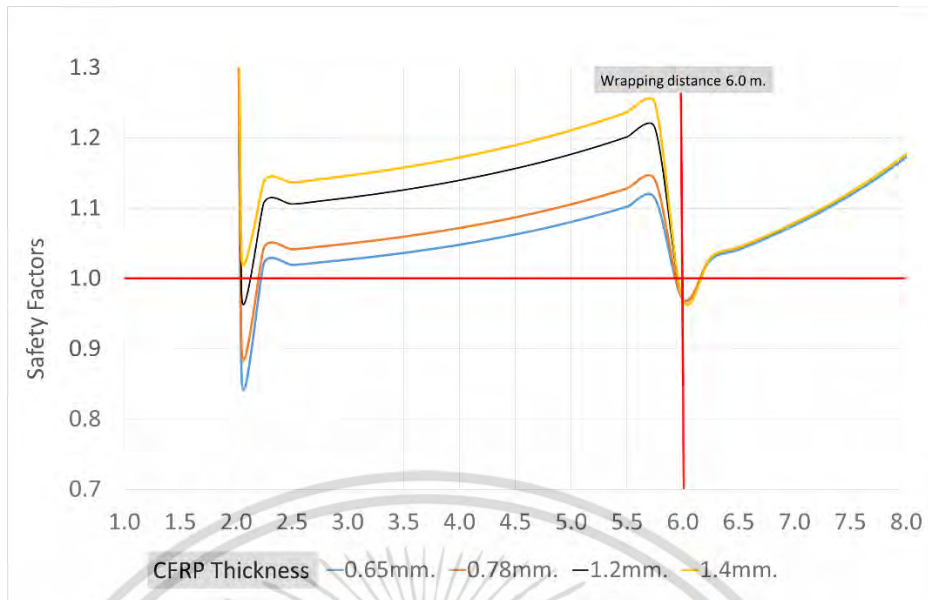
จากผลวิเคราะห์ Path Safety Factor ข้างต้นสามารถสรุปเป็นกราฟตามระยะความสูงของเสาไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

1. เสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) ที่มีระยะเสาฝังดิน 1.75 เมตร และพันด้วย CFRP ที่ระยะความสูง 6.05 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน จะได้กราฟในรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่าความหนาของวัสดุ CFRP ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Safety Factor สูงขึ้นมากกว่า 1 ที่ระดับดิน ตามตารางที่ 4.16 โดยที่ค่า Safety Factor ของเสาที่พันด้วยวัสดุ CFRP มีค่าสูงขึ้นตามลำดับความสูงของเสาไฟฟ้า และที่ระดับความสูง 6.05 เมตร ของเสาที่พันวัสดุ CFRP ในทุกความหนาจะมีค่า Safety Factor ที่ลดลงต่ำกว่า 1 ในระยะเหนือการพันวัสดุ CFRP จากนั้นค่า Safety Factor จะมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกันไปทุกต้น โดยความหนาที่ให้ค่าปลอดภัยของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m) นี้คือที่ 1.0 มม.



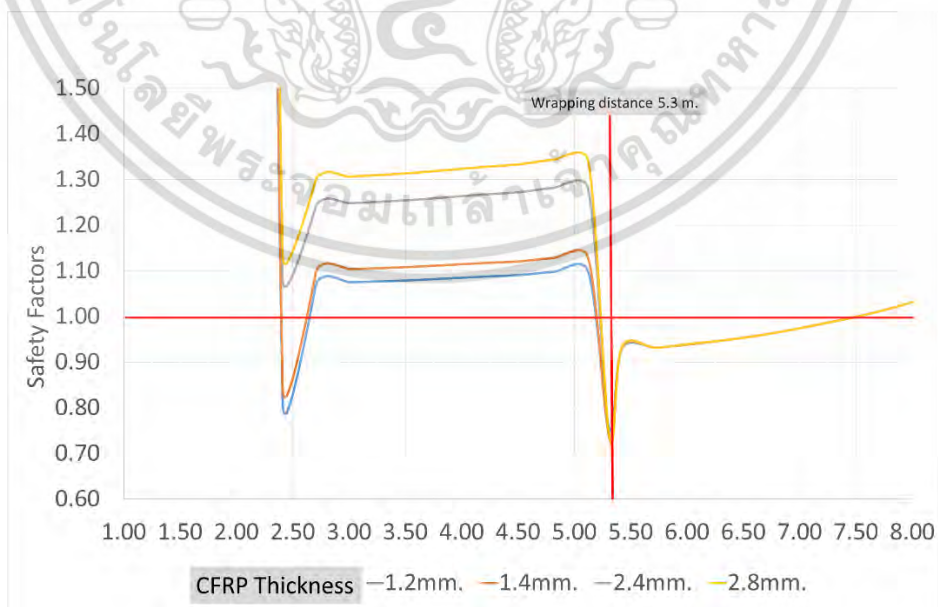
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (3.5T-m.)

2. เสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 5T-m) มีระยะเสาฝังดิน 1.75 เมตร และพันด้วย CFRP ที่ระยะความสูง 6.0 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน จะได้กราฟในรูปที่ 4.13 ซึ่งพบว่าที่ความหนา 1.4 มม. ให้ค่า Safety Factor ที่มากกว่า 1 ตามตารางที่ 4.17 และสูงขึ้นตามลำดับความสูงของเสาไฟฟ้า ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 6.0 เมตร จะมีค่า Safety Factor ที่ต่ำกว่า 1 และจะมีค่า Safety Factor ที่ไม่แตกต่างกันไปทุกต้นหลังจากพันระยะพันวัสดุ CFRP โดยความหนาที่ให้ค่าปลอดภัยของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 5.0T-m) นี้คือที่ 1.4 มม.



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (5T-m.)

3. เสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) มีระยะเสาฝังดิน 2.1 เมตร และพันด้วย CFRP ที่ระยะความสูง 5.3 เมตร จากระดับโคนเสาในดิน จะได้กราฟในรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่าวัสดุ CFRP ที่ความหนา 2.4 และ 2.8 มม. มีค่า Safety Factor ที่มากกว่า 1 ตั้งแต่ระยะ 2.1 เมตร และที่ระดับความสูง 5.3 เมตร จะมีค่าที่ลดลงต่ำกว่า 1 และมีค่าที่ใกล้เคียงกันไปตลอดความสูงที่พันระยะพันวัสดุ CFRP ไปแล้ว โดยความหนาที่ให้ค่าปลอดภัยของเสา 12.35 เมตร (BM 6.5T-m) นี้คือที่ 2.4 มม.



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่า Safety Factor ของเสาไฟฟ้าขนาด 12.35 เมตร (6.5T-m.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิเคราะห์

### 5.1 สรุปผล

การใช้วัสดุวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer) หรือ CFRP ชนิด Carbon แบบผ้า (Fabric) และแบบแผ่น (Strip) ที่มีกำลังของแรงดึง (Tensile Strength) ในเส้นใยที่ 3,550 และ 2,800 MPa ตามลำดับ โดยความหนาที่ใช้คือ 0.51 มม. 0.65 มม. 0.85 มม. และ 1.0 มม. ในเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m), ความหนา 0.65 มม. 0.78 มม. 1.2 มม. และ 1.4 มม. ในเสาขนาด 12 เมตร (BM 5T-m) และใช้ความหนา 1.2 มม. 1.4 มม. 2.4 มม. และ 2.8 มม. ในเสาขนาด 12.35 (BM 6.5T-m) ติดตั้งเส้นใยขนานกับความสูงของเสา ในการเสริมกำลังของเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัดแรง สามารถเปลี่ยนตำแหน่งการหักโค่นจากใกล้ฐานให้อยู่สูงขึ้นเหนือระยะพันธวัสดุ CFRP โดยพิจารณาจาก Safety Factor Path ของการรันวิเคราะห์ในโปรแกรม ANSYS จากแบบจำลองโมเดลเสาไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ และสามารถสรุปได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 แรงที่เกิดที่ปลายเสาด้านบนของโมเดลเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร (BM 3.5T-m), 12 เมตร (BM 5T-m) และ 12.35 (BM 6.5T-m) ที่มีและไม่มีวัสดุ CFRP พัน จะทำให้เกิด Deformation ที่ปลายเสาด้านบนไปตามทิศทางของแรงที่กระทำ โดยที่ Deformation มีค่าสูงสุดที่ 45 ซม. ในเสา 12 เมตร (BM 5T-m) และต่ำสุดที่ 32.8 ซม. ในเสา 12.35 (BM 6.5T-m) โดยมี Deformation ที่ลดลงตามเมื่อวัสดุ CFRP ที่พันมีความหนาเพิ่มขึ้นในเสาแต่ละต้น ขณะที่ความเค้นสูงสุดจะเกิดในวัสดุ CFRP เป็นสัดส่วน 18.5% ของกำลังของวัสดุ CFRP เท่านั้น ในเสา 12.35 (BM 6.5T-m)

5.1.2 ผลวิเคราะห์ Safety Factor ใน Path ของ ANSYS พบว่าการพันเสาไฟฟ้าด้วยวัสดุ CFRP สามารถทำให้ความเค้นสูงสุดเลื่อนตัวจากตำแหน่งฐานขึ้นไปตามระยะของความสูงที่พันวัสดุ CFRP ในเสาไฟฟ้า และสามารถทำนายการหักโค่นของเสาไฟฟ้าได้ว่ามีขนาดสั้นลงเหนือระยะการพันวัสดุ CFRP และจะมีน้ำหนักที่จะสร้างแรงกระทำไปยังเสาไฟฟ้าต้นถัดไปลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้วัสดุ CFRP ยังมีราคาที่ยังสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กหรืออื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินที่เกิดขึ้นในแต่ละเหตุการณ์ อาจมีมูลค่าความเสียหายที่ประเมินค่าไม่ได้ การใช้วัสดุ CFRP ยังสามารถใช้เสริมกำลังเสาไฟฟ้าในต้นที่ตั้งอยู่ได้ โดยที่การติดตั้งจริงจะใช้เวลาไม่นานและไม่มีการสกัดหรือการทำลายเสาไฟฟ้าเดิมใดๆ มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นทุนเรื่องค่าแรงที่ต่ำกว่า จึงอาจจะเป็นทางเลือกทางหนึ่ง ที่สามารถเสริมกำลังให้กับเสาไฟฟ้าในต้นที่ตั้งอยู่ เพื่อช่วยลดการเกิดอันตรายและความเสียหายดังกล่าวได้เป็นอย่างดี โดยในการศึกษานี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อทำการวิเคราะห์ที่ได้ต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

5.2.1 การศึกษาวิเคราะห์หาความหนาที่เหมาะสมของวัสดุ CFRP ในการเสริมกำลังเสาไฟฟ้า

5.2.2 การศึกษาหาระยะความสูงในการพันวัสดุ CFRP ที่ให้ประสิทธิภาพที่สุดในการลดการหักโค่นต่อเนื่องของเสาไฟฟ้าและมีผลทำให้มีจำนวนเสาไฟฟ้าหักโค่นที่น้อยที่สุด

5.2.3 การศึกษาการล้าของเสาไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เกิดแรงตัด เพื่อการติดตั้งวัสดุ CFRP ในด้านที่เกิดแรง

5.2.4 การศึกษาหาวิธีเสริมกำลังให้เสาไฟฟ้าด้วยวัสดุอื่นๆ เพื่อลดการหักโค่นต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- การไฟฟ้านครหลวง, ฝ่ายธุรกิจขนส่งและผลิตภัณฑ์, 2560, **คำแนะนำแบบมาตรฐานเสาไฟฟ้า 12 เมตร (GW), 12 เมตร (5T-m.) และ 12.35 เมตร (6T-m) ของ กฟน. ม.ป.ท. : ม.ป.ป.**
- การไฟฟ้านครหลวง, กองมาตรฐานการติดตั้งสายใน/สายนอกและความปลอดภัย, 2547, **คู่มือการออกแบบและประมาณราคา**, ม.ป.ท. : ม.ป.ป.
- กระทรวงมหาดไทย, กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2551, **มยพ. 1508-51. มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย**, กรมโยธาธิการและผังเมือง
- กระทรวงมหาดไทย : กรุงเทพฯ
- กระทรวงมหาดไทย, กรมทางหลวง, 2559, **คู่มือการเสริมกำลังสะพาน**, กรมทางหลวง
- กระทรวงมหาดไทย : กรุงเทพฯ
- นันทิกา นามวิจิตร, 2554, **“การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดกลมโดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก”**, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ณัฐสา สกานุกพงษ์ ณัฐธยาน์ ก้อยชูสกุล และ ประภาทิพย์ โชคสกุลวงศ์, 2557, **“รูปแบบรอยร้าวและกำลังของคานคอนกรีต”**, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชูชัย สุจิวิกรกุล และ วทันญ ชุตติคามิ, 2548, **“ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติในการรับแรงดัดและแรงอัดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ”**, การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11
- ศราวุธ แสนเสน, 2549, **“การศึกษาอิทธิพลของการใช้เส้นใยเหล็กแบบตะขอ ที่มีต่อกำลังดัด และพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก”**, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จินตชัย ไกรนรา, 2554, **“อิทธิพลของชนิดและปริมาณเส้นใยเหล็กแบบตะขอและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กแบบตะขอ”**, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Chuchai Sujivorakul and Akkaphol Taotip, **“Parameters Affecting Tensile Properties of Hooked Steel Fibers Reinforced Concrete”**, Faculty of Industrial Technology and Education, King Mongkut’s University of Technology Thonburi