

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการนำวัสดุผสมเหล็กกับอีพอกซี มาใช้แทนเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี
สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต

STUDY ON REPLACING CARBON FIBER EPOXY COMPOSITE
WITH STEEL MESH EPOXY COMPOSITE FOR CONCRETE REPAIRING



โดย

นายพันธร
นายวิชาญ

ธนรุ่งโรจน์กิจ
โนนิตเจริญกุล

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 62813

วัน,เดือน,ปี..... 22 ส.ค. 2549

b. 11k 24C41

i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON REPLACING CARBON FIBER EPOXY COMPOSITE
WITH STEEL MESH EPOXY COMPOSITE FOR CONCRETE REPAIRING**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการนำวัสดุผสมเหล็กกับอีพอกซี ใช้แทนเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี
สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต

STUDY ON REPLACING CARBON FIBER EPOXY COMPOSITE WITH
STEEL MESH EPOXY COMPOSITE FOR CONCRETE REPAIRING

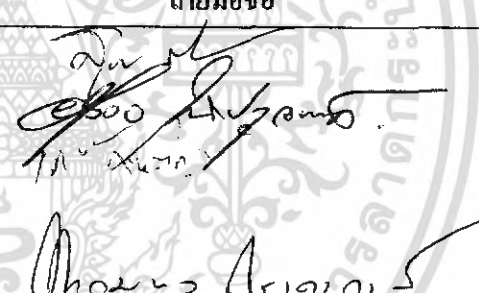
นักศึกษา นายพันธร ธารรุ่งโรจน์กิจ รหัสประจำตัว 45010397

นายวิชาญ โฉมิตเจริญกุล รหัสประจำตัว 45010710

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สุพจน์ ศรีนิล
ผศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.สุพจน์ ศรีนิล	
ผศ.อำนาจ พานิชกุลพงศ์	
อาจารย์เกษม อมัญกุล	
ดร.คมสัน มาลีสี	
ผศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.สุพจน์ ศรีนิล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ เดือน เมษายน พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการนำวัสดุผสมเหล็กกับอีพอกซี ใช้แทนเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต		
นักศึกษา	นายพันธร	ชนะรุ่งโรจน์กิจ	รหัสประจำตัว 45010397
	นายวิชาญ	โมฆิตเจริญกุล	รหัสประจำตัว 45010710
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.สุพจน์	ศรีนิล	
	ผศ.แหลมทอง	เหล่าทองถาวร	
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2548		

บทคัดย่อ

วัสดุผสมเส้นใยคาร์บอน-อีพอกซี (CFEC) ได้นำมาใช้งานในวงการก่อสร้างอย่างมากในเรื่องของการเสริมความมั่นคงของโครงสร้าง แต่เส้นใยคาร์บอนต้องนำเข้าจากต่างประเทศ มีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อน จึงทำให้มีราคาแพง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการใช้งาน ในขณะที่เหล็กมีกำลังรับแรงน้อยกว่าเส้นใยคาร์บอนประมาณ 3 เท่า แต่มีราคาถูกกว่าถึงประมาณ 40 เท่า ประกอบกับเหล็กมีการใช้งานทั่วไป สามารถผลิตและหาได้ง่ายกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของวัสดุผสมเหล็ก-อีพอกซี (SMEC) ในการนำมาเสริมความมั่นคงของโครงสร้าง โดยทำการเปรียบเทียบการเสริมความสามารถรับแรงของคอนกรีตด้วยวัสดุ CFEC, SMEC สำหรับการรับแรงอัด ของตัวอย่างรูปทรงกระบอกชนิดละ 5 ตัวอย่าง และแรงดัด ของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $1 \times 5 \times 40$ cm. 5 ตัวอย่าง และ ตัวอย่างคอนกรีตขนาด $75 \times 15 \times 7.5$ cm. 5 ตัวอย่าง แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงต่อราคา จากผลทดสอบ SMEC สามารถนำเสริมความสามารถรับแรงอัดได้ โดยมีประสิทธิภาพการเสริม 3.160 บาท/ksc ขณะที่ CFEC เท่ากับ 4.459 บาท/ksc และ กรณีการรับแรงดัดของคอนกรีต 2.400 บาท/ksc สำหรับ CFEC และ 2.289 บาท/ksc สำหรับ SMEC และกรณีการรับแรงดัดของมอร์ตาร์ 0.036 บาท/ksc สำหรับ CFEC และ 0.031 บาท/ksc สำหรับ SMEC อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการเสริมความสามารถรับแรง ของ SMEC สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ถ้าหากมีการศึกษาวิจัย ต่อถึงการเลือกชนิดของ อีพอกซีที่เหมาะสม และการเพิ่มประสิทธิภาพแรงยึดเหนี่ยวซึ่งจะทำให้ราคาถูกลง และรับแรงได้ดีขึ้น

Title : STUDY ON REPLACING CARBON FIBER EPOXY COMPOSITE WITH
STEEL MESH EPOXY COMPOSITE FOR CONCRETE REPAIRING

Name : MR.PUNTHAKORN THANARUNGROJKIT
MR.WICHARN KOSITCHAROENKUL

Field : CIVIL ENGINEERING

Department : CIVIL ENGINEERING

Faculty : ENGINEERING

Advisor : ASST.PROF.SUPOJ SRINIL
ASST.PROF.LAEMTHONG LAOKHONGTHAVORN

ABSTRACT

Carbon fiber-epoxy composite (CFEC) have been used in construction field to strengthen structure. But it must be imported from other countries, and the process to produce is very so complicated, thus it is costly. By considering the steel mesh, although steel mesh has tensile strength less than carbon fiber about 3 times but it is cheaper than carbon about 40 times. Furthermore, steel mesh is pervasively used in civil engineering work, easily to find and use it.

So the purpose of this research is to study how to use steel mesh-epoxy composite (SMEC) for reinforcement in the reinforced concrete structure. We compared the ability of compressive strength of cylindrical concrete sample which reinforced with CFEC and SMEC, and flexural strength of mortar, 1 x 5 x 40 cm size of each 5 samples, concrete, 7.5 x 15 x 75 cm size of each 5 samples. Then we compared the efficiency of reinforcement of each specimen in both of strength and cost aspect. By considering the test results, we can conclude that SMEC can use for reinforcing compressive strength of concrete, with efficiency of 3.160 baht / ksc. for SMEC, compared with 4.459 baht / ksc. of CFEC. For flexural strength reinforcement of concrete, SMEC has efficiency of 2.289 baht/ksc. and CFEC is 2.400 baht/ksc. For flexural strength reinforcement of mortar, SMEC has efficiency of 0.031 baht/ksc. and CFEC is 0.036 baht/ksc. However we can increase efficiency of reinforcement of SMEC by further research to use the appropriate type of epoxy and proportion of steel mesh, to get more strength with lower cost.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จะสำเร็จมิได้ หากขาดบุคคลผู้ที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คือ อาจารย์สุพจน์ ศรีนิล ที่ได้ให้คำแนะนำแนวทางในการศึกษาโครงการพิเศษให้เกิดประโยชน์ สามารถนำโครงการพิเศษไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขอขอบคุณอาจารย์แหลมทอง เหล่าคงถาวร ที่ปรึกษาทั้งสองท่านที่ได้สละเวลาในการให้คำปรึกษาและดูแลโครงการพิเศษอย่างใกล้ชิดทั้งในและนอกเวลาราชการ รวมทั้งดูแลความเรียบร้อยของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณท่านคณะกรรมการโครงการพิเศษอาจารย์เกษม อมันตกุล อาจารย์อำนวย พานิชกุล และอาจารย์คมสัน มาลีสี ที่ได้ให้คำชี้แนะและคำสั่งสอนที่มีประโยชน์อย่างมากมาในการทำงานและการดำเนินชีวิต

ขอขอบบริษัท กรู๊ปเมค จำกัด และเจ้าหน้าที่ประจำบริษัท ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและวัสดุคือเส้นใยคาร์บอน และอีพอกซี ในโครงการพิเศษนี้ ให้การแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการพิเศษ ขอขอบคุณบริษัท โออาร์ซีคอนกรีต จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์วัสดุคอนกรีตผสมเสร็จ ที่ให้ทำตัวอย่างในการทดสอบ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล. ที่ได้ให้โอกาสศึกษาหาความรู้ที่เป็นประโยชน์ เจ้าหน้าที่ควบคุมงานปฏิบัติการทดสอบทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมือในการทำงาน ตลอดจนการให้คำแนะนำและวิธีการใช้เครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณ โครงการ IRPUS จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้ให้โอกาสสนับสนุนงบประมาณการวิจัยในการดำเนินโครงการพิเศษ ให้โครงการพิเศษดำเนินไปได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ

สุดท้ายนี้จะขอเสียดสีมิได้สำหรับคำขอบพระคุณพระคุณแม่ท่านนุพการีของผู้จัดทำโครงการพิเศษ ตั้งแต่การสั่งสอน การเลี้ยงดู ทำให้มีทุกวันนี้ได้ จนถึงความช่วยเหลือที่ท่านมีในระหว่างทำโครงการพิเศษทั้งเป็นกำลังใจและกำลังทุนทรัพย์ รวมทั้งความรักที่มีให้แก่บุตรเสมอมา

นายพันธร ธารรุ่งโรจน์กิจ
นายวิชาญ โฉมิตเจริญกุล
ผู้ประพันธ์

ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
ปกใน (ภาษาไทย)	ก
ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
หน้าอวนันติ	ค
บทกัตถ์อภาษาไทย	ง
บทกัตถ์อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฏ
1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานศึกษา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	5
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	5
1.5 วิธีการศึกษา	6
2 วรรณกรรมปริทัศน์	9
2.1 กล่าวนำ	9
2.2 คำนิยามและคำจำกัดความ	9
2.3 วัสดุประเภทเส้นใย	10
2.3.1 ไยแก้วสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน	10
2.3.2 เส้นใยคาร์บอนสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน	13
2.3.3 เส้นใยอะรามิดสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน	15
2.3.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอน อะรามิด และใยแก้วสำหรับเสริมแรงพลาสติกของวัสดุผสม	16

สารบัญ

บทที่ เรื่อง

หน้า

2.4	วัสดุพลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์	18
2.5	วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรง	19
2.5.1	ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)	19
2.5.2	สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง	20
2.5.3	ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม	21
2.5.4	เส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง	21
2.5.5	การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านต่างๆให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์	21
2.6	อีพอกซีเรซิน	23
2.6.1	ประวัติของอีพอกซี	23
2.6.2	ลักษณะเบื้องต้นของอีพอกซีเรซิน	23
2.6.3	ชนิดของอีพอกซี	24
2.6.4	คุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซิน	24
2.6.5	การคิดแปลงคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินเพื่อการใช้งาน	25
2.6.6	งานที่เหมาะสมจะใช้อีพอกซีเป็นตัวประสาน	25
2.6.7	ข้อดีและข้อเสียของอีพอกซีเรซิน	26
2.7	เส้นใยเหล็ก	27
2.7.1	การผลิตเส้นใยเหล็ก	27
2.7.2	ลักษณะการใช้งาน	28
2.7.3	คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็ก	30
3	การศึกษากาเก็บข้อมูลและการทดสอบ	34
3.1	กล่าวนำ	34
3.2	การศึกษากาสมบัติเชิงกล	34
3.2.1	การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	34
3.2.2	การทดสอบกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีต	37
3.2.3	การทดสอบกำลังคดของแผ่นมอร์ตาร์	39

สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
3.2.3 การทดสอบความสามารถรับแรงดึงของลวดตาข่าย	40
3.2.4 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเส้นใยคาร์บอน	44
3.3 การเตรียมตัวอย่าง	46
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตทรงกระบอก	46
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ของคานคอนกรีต	48
3.3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ของแผ่นซีเมนต์บอร์ด	51
3.3.4 การเตรียมตัวอย่างฉาบวัสดุผสม	55
3.3.5 การคำนวณปริมาณการเสริมเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็ก ในคานคอนกรีต	60
3.3.6 การคำนวณปริมาณการเสริมเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็ก ในแผ่นพื้นซีเมนต์บอร์ด	62
3.4 การศึกษาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ	64
3.4.1 การใช้งานของวัสดุผสมสำหรับงานเสริมแรงคอนกรีต	64
3.4.2 ราคาวัสดุ	65
4. ผลการทดสอบวัสดุ	67
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน	67
4.2 ผลการทดสอบอีพอกซี	68
4.3 ผลการทดสอบการรับกำลังดึงของแถบตะแกรงเหล็ก	69
4.4 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต	70
4.5 ผลการทดสอบการรับกำลังดัดของคอนกรีต	72
4.6 ผลการทดสอบการรับกำลังดัดของแผ่นมอร์ตาร์	74

ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ เรื่อง

หน้า

5. การวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา	76
5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเหล็กตะแกรงที่นำมาทดสอบ	76
5.2 สรุปผลการทดสอบในการใช้งานในการรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	78
5.3 สรุปผลการทดสอบในการใช้งานในการรับแรงค้ำของแผ่นบอร์ดาร์	83
5.4 สรุปผลการทดสอบในการใช้งานในการรับแรงค้ำของคานคอนกรีต	86
5.5 สรุปผลการศึกษา	89
5.6 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	89

เอกสารอ้างอิง

ค

บรรณานุกรม

ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
1.1	แสดงคุณสมบัติของวัสดุComposite ประเภทต่างๆ	3
1.2	แสดงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของวัสดุComposite ประเภทต่างๆ เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเหล็ก	4
2.1	แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงพลาสติก	12
2.2	แสดงสมบัติของเรซินพอลิเอสเตอร์และอีพอกซี	19
2.3	แสดงคุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ใช้งานในประเทศไทย	22
2.4	แสดงคุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก ชนิดต่าง ๆ	33
3.1	แสดงราคาวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับเสริมแรงคอนกรีต	65
3.2	แสดงราคาของวัสดุผสมที่ใช้ในการเสริมแรงคอนกรีตและมอร์ตาร์	66
4.1	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน	67
4.2	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอน	67
4.3	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอีพอกซี	68
4.4	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแถบตะแกรงเหล็ก	69
4.5	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	70
4.6	แสดงผลการทดสอบกำลังค้ำของกานคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบ แรงกระทำจุดเดียวกึ่งกลาง	72
4.7	แสดงผลการทดสอบการรับกำลังค้ำของแผ่นมอร์ตาร์	74
5.1	แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึง ราคาและราคาต่อกำลังรับแรงดึง ของเหล็กตะแกรง	76
5.2	สรุปประสิทธิภาพในการใช้งานในการรับแรงอัด(คอนกรีต)	78
5.3	สรุปกำลังที่เส้นใยรับได้ในการรับแรงอัด(คอนกรีต)	78
5.4	สรุปประสิทธิภาพในการใช้งานในการรับแรงค้ำ(มอร์ตาร์)	83

ฉ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
5.5	สรุปประสิทธิภาพการใช้เส้นใยในการเสริมกำลังคอนกรีตรับแรงอัด	83
5.6	สรุปประสิทธิภาพการใช้เส้นใยในการเสริมกำลังมอร์ตาร์รับแรงค้ำ	86
5.7	สรุปประสิทธิภาพการใช้เส้นใยในการเสริมกำลังคอนกรีตรับแรงค้ำ	86
ผก.1	แสดงผล การทดสอบวัสดุฉนวนกันไฟ(เล็ก)ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก2
ผก.2	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 8#20ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก3
ผก.3	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 20 # 30ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก4
ผก.4	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนกันไฟ(กลาง)ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก5
ผก.5	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนกันไฟ(ใหญ่)ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก6
ผก.6	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 50#36ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก7
ผก.7	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 16#23ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก8
ผก.8	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 20#25ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก9
ผก.9	แสดงผลการทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 40#37ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก10
ผก.10	การทดสอบวัสดุฉนวนเลขA304 30#32ที่ใช้เสริมเป็นComposite	ผก11
ผข.1	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.1	ผข2
ผข.2	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.5	ผข3
ผข.3	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.7	ผข4
ผข.4	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.8	ผข5
ผข.5	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.15	ผข6
ผข.6	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.14	ผข7
ผข.7	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงค้ำของคอนกรีต No.6	ผข8
ผข.8	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงค้ำของคอนกรีต No.15	ผข9
ผข.9	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงค้ำของคอนกรีต No.13	ผข10
ผข.10	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงค้ำของคอนกรีต No.16	ผข11
ผข.11	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงค้ำของคอนกรีต No.8	ผข12
ผข.12	แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงค้ำของคอนกรีต No.10	ผข13

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
ผค.1	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.1	ผค2
ผค.2	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.2	ผค3
ผค.3	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.3	ผค4
ผค.4	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.4	ผค5
ผค.5	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.5	ผค6
ผค.6	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.6	ผค7
ผค.7	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.7	ผค9
ผค.8	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.8	ผค11
ผค.9	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.9	ผค13
ผค.10	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.10	ผค15
ผค.11	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.12	ผค17
ผค.12	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.13	ผค18
ผค.13	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.14	ผค19
ผค.14	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์บอร์ตาร์ No.15	ผค20

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	ชื่อรูปภาพ	หน้า
1.1	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุ ที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษา	2
1.2	แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	8
2.1	กระบวนการผลิตใยแก้วในอุตสาหกรรม	11
2.2	ขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรง และโมดูลัสสูงจากพอลิเอทรีนไทรล์ (PAN) ฟรีเคอเรอร์	13
2.3	หน่วยย่อยของโครงสร้างทางเคมีสำหรับเส้นใยเคบลาร์	15
2.4	ลักษณะของ Stress – Strain ของเส้นใยเสริมแรงแบบต่าง ๆ	17
2.5	ความสัมพันธ์ของ Tensile Strength จำเพาะ (Tensile Strength/Density) กับ Tensile Modulus จำเพาะ (Tensile Modulus/Density) ของเส้นใยเสริมแรงแบบต่าง ๆ	18
2.6	แสดงตัวอย่างวัสดุผสม(Composite Material) ที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน	20
2.7	ภาพเส้นใยเหล็ก	27
2.8	ภาพเส้นใยเหล็กที่ผลิตในรูปของตะแกรง	28
2.9	ภาพการใช้เส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีต	29
2.10	ภาพการใช้เส้นใยเหล็กเสริมแรงในยางรถยนต์	29
2.11	กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	30
2.12	กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็ง (A) และที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว (B)	32
3.1	ภาพการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก	35
3.2	ภาพการวางตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต	38
3.3	ภาพการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต	38
3.4	ภาพการทดสอบกำลังรับแรงดัดของแผ่นมอร์ตาร์	40
3.5	ภาพชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตะแกรงเหล็ก	41

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	ชื่อรูปภาพ	หน้า
3.6	ภาพหัวจับแถบตะแกรงเหล็กสำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึง	42
3.7	การทดสอบกำลังรับแรงดึงของแถบตะแกรงเหล็ก	43
3.8	ชิ้นส่วนวัสดุที่ใช้สำหรับทดสอบการรับแรงดึง	45
3.9	ภาพการเตรียมแบบเหล็ก โดยการทำความสะอาดและทาน้ำมัน	46
3.10	ภาพการปาดผิวให้แบบเหล็กให้เรียบ	47
3.11	ภาพไม้แบบที่ทำการแช่น้ำแล้ว	48
3.12	ภาพการทาน้ำมันที่ไม้แบบ	49
3.13	ภาพคอนกรีตสำเร็จรูปที่ผสมโดยผสมคอนกรีตสำเร็จรูป	50
3.14	ภาพการปาดหน้าผิวคอนกรีตให้เรียบ	51
3.15	ภาพการทำไม้แบบสำหรับแผ่นพื้นซีเมนต์บอร์ด ขนาด 1 X 5 X 40 ซม.	52
3.16	วัสดุปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำสำหรับทำซีเมนต์บอร์ด	53
3.17	ภาพการบรรจุซีเมนต์บอร์ดลงในแบบที่ได้เตรียมไว้แล้ว และทำการทำให้แน่น	54
3.18	ภาพแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่แกะแบบแล้ว หลังจากเทไว้แล้ว 24 ชั่วโมง	54
3.19	ภาพการทาน้ำยอีพอกซ์เป็น Primer เตรียมฉาบ	55
3.20	ภาพการทาน้ำยอีพอกซ์ลงบนแผ่นเส้นใยให้ชุ่มทั้งสองด้าน	56
3.21	ภาพการติดแผ่นเส้นใยลงบนก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	57
3.22	ภาพตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกที่ทำการฉาบด้วยวัสดุผสม	58
3.23	ภาพตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่ทำการฉาบด้วยวัสดุผสม	58
3.24	ภาพตัวอย่างทดสอบแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ทำการฉาบด้วยวัสดุผสม	59
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress strain การทดสอบกำลังรับอัด ของคานคอนกรีตทรงกระบอก	71
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress Strain การทดสอบกำลังรับแรงดัด ของคานคอนกรีต	73

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	ชื่อรูปภาพ	หน้า
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress Strain การทดสอบกำลังรับแรงคดของแผ่นซีเมนต์มอร์ตาร์	75
5.1	ภาพผลการเปรียบเทียบราคาต่อหน่วย/กำลังรับแรงคดของเหล็กตะแกรงต่าง ๆ	77
5.2	ภาพการวิบัติของคอนกรีตทรงกระบอกล้วน	80
5.3	ภาพการวิบัติของคอนกรีตทรงกระบอกเสริมเส้นใยคาร์บอน	81
5.4	ภาพการวิบัติของคอนกรีตทรงกระบอกเสริมตะแกรงเหล็ก	82
5.5	ภาพการวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์ล้วน	84
5.6	ภาพการวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์เสริมใยคาร์บอน	85
5.7	ภาพการวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์เสริมตะแกรงเหล็ก	85
5.8	ภาพการวิบัติของคานคอนกรีตล้วน	87
5.9	ภาพการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยคาร์บอน	88
5.10	ภาพการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมตะแกรงเหล็ก	88
5.11	การวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์ที่เสริมด้วยแผ่นเหล็กที่มีผิวเรียบมัน	90

ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

คอนกรีตเสริมเหล็ก ถือเป็นวัสดุผสม (Composite Material) แบบ Metal Ceramic Composite โดยจะเสริมในลักษณะมีเหล็กทำหน้าที่รับแรงดึง คอนกรีตเป็นวัสดุในกลุ่มเซรามิกที่ทำหน้าที่รับแรงอัด แต่วัสดุแบบนี้อาจเกิดความเสียหายได้ เนื่องจาก การรับแรงเกินกำลัง การกัดกร่อนของสถานะแวดล้อม การเกิดสนิมเหล็ก การรับแรงที่ไม่ได้คำนวณออกแบบไว้ หรือการเกิดแผ่นดินไหวเป็นต้น แต่วัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นยังมีข้อดีคือสามารถซ่อมแซมได้ง่าย และสามารถเสริมกำลังในรูปแบบต่าง ๆ ที่หลากหลายได้ การเลือกใช้วัสดุผสมระหว่างเส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยแก้ว หรือเส้นใยอะรามิด (Aramid) กับอีพอกซี (Epoxy) มาใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก ก็เป็นถือเป็นลักษณะหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเสริมกำลังและใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีการใช้งานที่ง่าย และสะดวกในการซ่อมแซม

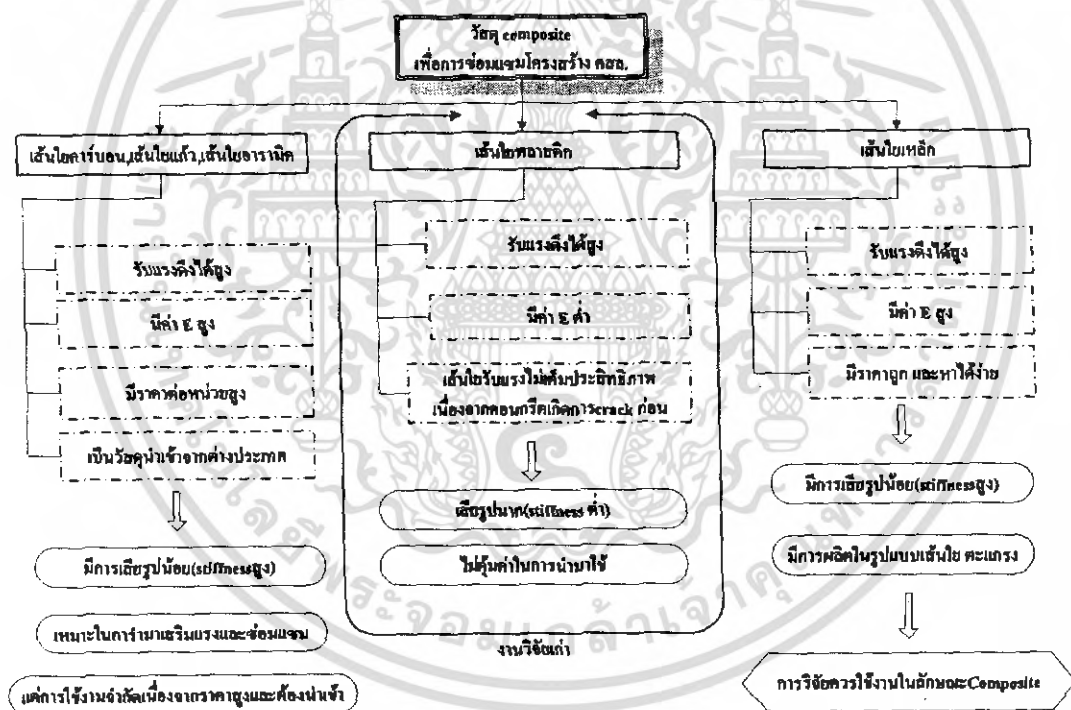
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของงานศึกษา

สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบันนั้น จะมีการเสริมกำลังโดยเลือกใช้วัสดุผสม (Composite material) คือให้เส้นใยกับอีพอกซีเสริมกำลังคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหายในกรณีต่าง ๆ เพราะเนื่องจาก เส้นใยคาร์บอนนั้น สามารถต้านกำลังแรงดึงได้สูงมีน้ำหนักเบา และง่ายต่อการซ่อมแซม แต่เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้เฉพาะในงานซ่อมแซม และต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงทำให้มีราคาสูง และมีการใช้งานที่จำกัด

การศึกษาก่อนหน้านี้ที่ผ่านมา ได้พบว่าได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเสริมเส้นใยพลาสติกในคอนกรีตซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาถูก เพื่อนำมาใช้เพิ่มคุณสมบัติการรับกำลังแรงดึงของคอนกรีต เส้นใยพลาสติกนั้นมีความสามารถรับกำลังแรงดึงได้สูง แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยพลาสติกมีการยึดตัวมากแม้แรงกระทำเพียงเล็กน้อย ซึ่งหมายถึง พลาสติกมีค่าอึลลัสติกมอดุลัสต่ำกว่าคอนกรีตมาก เมื่อนำมาเสริมในคอนกรีตในลักษณะของวัสดุผสมจะทำให้เส้นใยไม่สามารถรับแรงได้เต็มประสิทธิภาพ เพราะเนื่องจากเมื่อเส้นใยยึดตัวมาก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวก่อน จึงยังไม่เหมาะสมในการเลือกใช้ในการเสริมกำลังในคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและราคาต่อหน่วยของวัสดุเหล็ก เส้นใยคาร์บอน เส้นพลาสติก คอนกรีต และอิพอกซี่ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และสามารถนำมาเปรียบเทียบค่า ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าอิลาสติกมอดุลัส และราคาต่อหน่วยได้ดังตารางที่ 1.2 จะเห็นได้ว่า เหล็กเป็นวัสดุผสมที่มีความสามารถรับกำลังแรงดึงได้ค่อนข้างสูง แต่มีราคาถูกกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของเส้นใยคาร์บอน จึงได้มีความสนใจในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นในการ เลือกใช้เหล็กแทนเส้นใยคาร์บอนในงานซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับแรงจูงใจในการเลือกวัสดุผสมมาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ นั้น สามารถ เขียนเป็นแผนภาพแสดงคุณสมบัติ ลักษณะข้อดีข้อเสีย ของเส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด พลาสติก และเหล็กได้ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ Composite ประเภทต่างๆ
(Callister, 2003)

คุณสมบัติ	เหล็ก	ใยคาร์บอน	ใยพลาستيك
Density (g/cm^3)	7.85	1.78 – 1.81	0.905
Modulus of Elasticity (GPa)	207	230 285 400	1.14 – 1.55
Yield Strength (MPa)	220 – 250	-	31.0 – 37.2
Tensile Strength (MPa)	400 – 500	3,800 – 4,200 4,650 – 6,350 2,500 – 4,500	31.0 – 41.4
Cost (\$/US/kg)	0.50-0.90	31.50 - 41.50 70.00 - 105.00 175.00 - 225.00	0.85 – 1.65

ตารางที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของวัสดุ Composite ประเภทต่างๆ เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเหล็ก
(Callister, 2003)

คุณสมบัติ	เหล็ก	ใยคาร์บอน	ใยพลาสติก	epoxy	คอนกรีต
Relative Modulus of Elasticity	1.00	1.48	0.0065	0.0116	0.15
Relative Tensile Strength	1.00	9.63	0.0804	0.13	0.0873
Cost and Relative cost	1.00	154.00	1.50	5.00	0.06

1.3 วัดอุปประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการนำวัสดุผสม ระหว่างเหล็กกับอีพอกซี มาใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก ในลักษณะเดียวกับวัสดุผสมระหว่าง เส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการรับแรงของวัสดุผสมกับราคาต่อหน่วยปริมาณที่ใช้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการนำวัสดุผสม ระหว่างเหล็กกับอีพอกซีโดยมุ่งเน้นที่การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม คือเหล็ก อีพอกซี และคอนกรีตที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยวัสดุผสมเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับคอนกรีตล้วน และคอนกรีตที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยวัสดุผสมระหว่างเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร โดยคุณสมบัติเชิงกลที่จะทำการศึกษาได้แก่

1. Epoxy : การทดสอบความสามารถรับแรงดึง จำนวน 5 ตัวอย่าง
2. เส้นใยคาร์บอน : ความสามารถรับแรงดึง พื้นที่หน้าตัด อีลาสติคโมดูลัส ความหนาแน่น จำนวน 5 ตัวอย่าง (หรือใช้คุณสมบัติจากบริษัทที่ให้ตัวอย่างมาศึกษา)
3. ตะแกรงเหล็ก : ความสามารถรับแรงดึง พื้นที่หน้าตัด อีลาสติคโมดูลัส ความหนาแน่น จำนวน 5 ตัวอย่าง
4. คอนกรีต : ความสามารถรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด โดยแบ่งเป็น
 - คอนกรีตล้วน
จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง
 - คอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและอีพอกซี
จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง
 - คอนกรีตที่เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กและอีพอกซี
จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง

โดยทั้ง 3 ชนิด ใช้คอนกรีตที่ได้รับการผสมในครั้งเดียวกัน และมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 28 วัน เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม.

5. ซีเมนต์มอร์ตาร์: ความสามารถรับแรงคด โดยแบ่งเป็น

- ซีเมนต์มอร์ตาร์
จำนวน 5 ตัวอย่าง
- ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและอีพอกซี
จำนวน 5 ตัวอย่าง
- ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กและอีพอกซี
จำนวน 5 ตัวอย่าง

1.5 วิธีการศึกษา

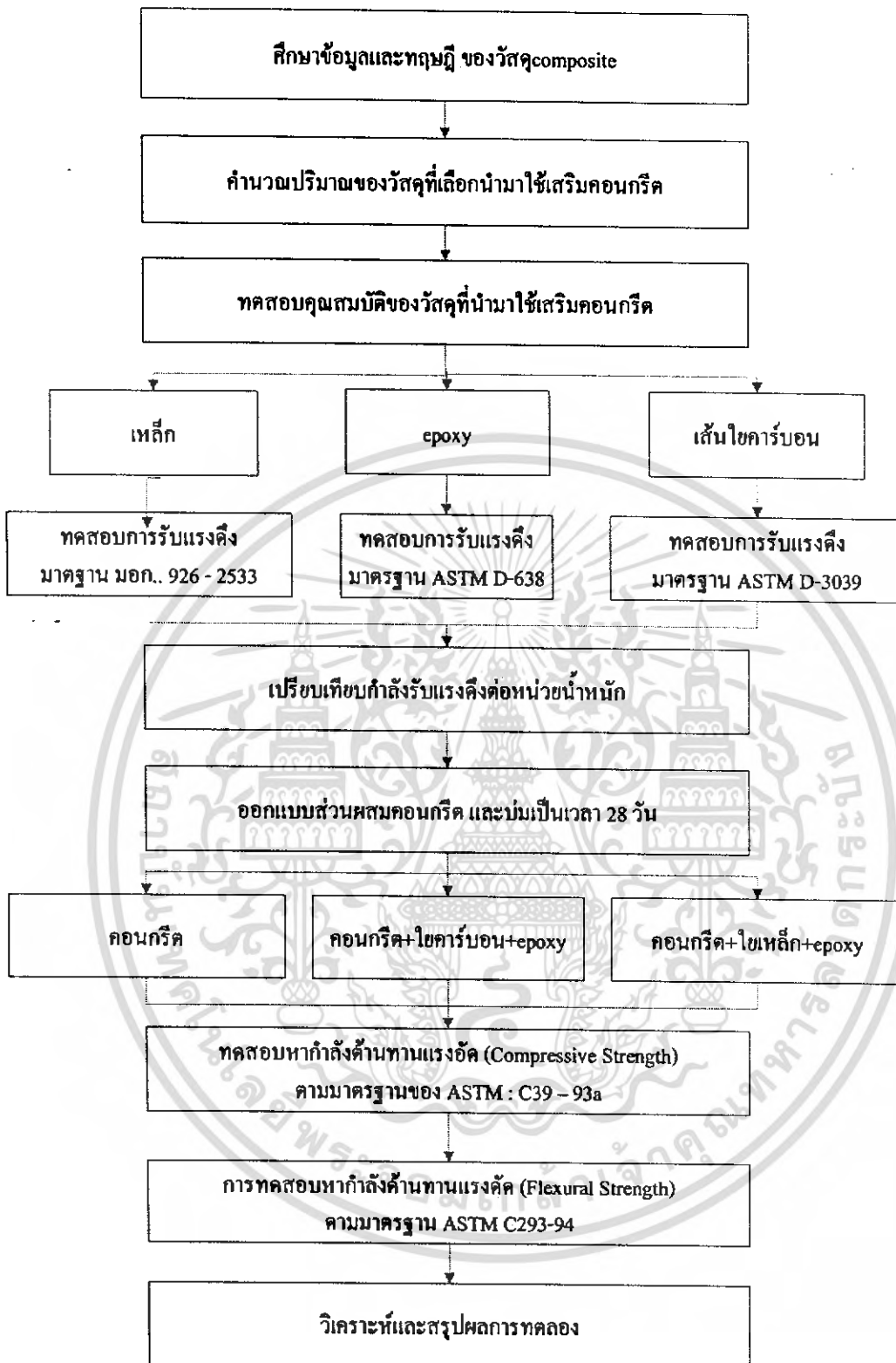
1. การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของเหล็กตามมาตรฐานของ มอก. 926 -2533 ; Standard for Welded Deformed Steel Wire Fabric for Concrete Reinforcement
2. ศึกษาการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของเส้นใยคาร์บอน ตามมาตรฐาน ASTM D-3039 โดยใช้ข้อมูลจากบริษัท Fyfe Co.LLC
3. การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) ของแท่งคอนกรีต ตัวอย่างรูปทรงกระบอก (Cylinder) ตามมาตรฐานของ ASTM : C39 – 93a ; ASTM Cylinder Test of Compressive Strength
4. การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงคด (Flexural Strength) ของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง รูปท่อน ขนาด 7.5 x15 x 75 cm ตามมาตรฐานของ ASTM: C 293 – 94 ; Test of Flexural Strength of Concrete
5. การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงคด (Flexural Strength) ของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ ตัวอย่างขนาด 1 x 5 x 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS6432: 1984 PART 6; Standard Test Methods for Determining Properties of Glass Fiber Reinforced Cement Material.

การทดสอบจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างทดสอบตามแบบมาตรฐานของแต่ละการทดสอบ โดยในแต่ละแบบที่จะทดสอบจะมีตัวอย่างทั้งแบบคอนกรีตล้วน คอนกรีตที่มีการเสริมกำลังโดยตะแกรงเหล็กกับอีพอกซี และคอนกรีตที่มีการเสริมกำลังโดยเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี และมีการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงคดต้องมีการเตรียมตัวอย่างทดสอบเป็นแผ่นพื้น โดยมีตัวอย่างทดสอบแบบคอนกรีตที่มีการเสริมกำลังโดยตะแกรงเหล็กกับอีพอกซี และคอนกรีตที่มีการ

เสริมกำลังโดยเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซีเช่นเดียวกัน โดยที่ตัวอย่างการทดสอบทุกแบบจะมีการควบคุมให้มีส่วนผสมพื้นฐานของคอนกรีต (Concrete Mix) อันได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ มีสัดส่วนที่เท่ากันในแต่ละการทดสอบเพื่อให้ข้อเปรียบเทียบที่ได้เป็นผลมาจากวัสดุผสม (Composite Material) ที่แตกต่างกันเท่านั้น โดยจะออกแบบผสมคอนกรีตที่กำลังด้านทานแรงอัดไว้ที่ 240 กก./ตร.ซม.

สำหรับขั้นตอนในการศึกษานั้น สามารถแสดงเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน (Flow Chart) ได้ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนใหญ่ ๆ ของการศึกษาความเป็นไปได้ในการเลือกวัสดุผสมมาศึกษา





รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวคำนิยาม และคำจำกัดที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการใช้วัสดุผสม (Composite Material) ที่ได้มีการรวบรวมข้อมูล แนวความคิด ทฤษฎี งานวิจัยที่มีผู้ศึกษาก่อนนี้ เพื่อให้ได้รับความเข้าใจในเนื้อหาได้ง่ายขึ้น

2.2 คำนิยามและคำจำกัดความ

วัสดุผสม (Composite Material) เป็นสิ่งใดก็ได้ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน สองชนิดขึ้นไปตั้งแต่ในระดับอะตอมของวัสดุ จนถึงขนาดใหญ่เช่นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เป็นพิเศษหรือมีลักษณะสำคัญแตกต่างไปจากเดิม ในการศึกษานี้จะกล่าวถึง วัสดุที่มีความสำคัญในงานวิศวกรรมก่อสร้าง เช่นเส้นใยคาร์บอน เส้นใยพลาสติก เหล็ก คอนกรีต อีพอกซี เป็นต้น (แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

เส้นใย (Fiber) ในที่นี้หมายถึงวัสดุที่ผสมที่ใช้ในงานเสริมแรงหรืองานซ่อมแซมในซีเมนต์คอนกรีตและคอนกรีต เพื่อช่วยให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น มีความต้านทานต่อกำลังแรงอัดและกำลังแรงดึงได้เพิ่มขึ้น (แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) คือเส้นใยที่นำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการเสริมกำลังรับแรงคอนกรีต เส้นใยคาร์บอนได้มาจากแหล่งที่สำคัญ 2 แหล่งคือ พอลิอะครีโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile, PAN) กับยางมะตอย ซึ่งมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้สูงมากคือ 3,800 – 4,500 MPa มีค่า Modulus of Elasticity สูง มีน้ำหนักเบา สำหรับใช้เสริมกำลังและงานซ่อมแซมของคอนกรีตเสริมเหล็ก (แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) ในการศึกษาค้นคว้านี้ใช้เหล็กเส้นเล็ก ๆ นำมาถักหรือเชื่อมเป็นตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือหกเหลี่ยม เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับอีพอกซีในการเสริมกำลังของคอนกรีต เส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติในการรับแรงดึงได้สูง มีค่า Modulus of Elasticity สูง สามารถยึดเกาะกับอีพอกซีได้เป็นอย่างดี สามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก

(www.thaiengineering.com)

อีพอกซี (Epoxy) เป็นวัสดุโพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ที่ใช้สำหรับทำวัสดุผสมเสริมแรงร่วมกับเส้นใยคาร์บอน หรือตะแกรงเหล็ก อีพอกซีมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดประสานเส้นใยและช่วยให้ทนทานต่อแรงกระแทก ใช้ในงานเสริมแรงและงานซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีต (<http://elec.chandra.ac.th>)

คอนกรีต (Concrete) เป็นวัสดุวิศวกรรมหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง วิศวกรโยธาใช้คอนกรีตในการออกแบบก่อสร้างที่หลากหลาย เช่น สร้างสะพาน อาคาร เขื่อน กำแพง มีคุณสมบัติง่ายต่อการออกแบบและเปลี่ยนแปลงได้ง่าย สามารถหล่อได้ ประหยัดราคา มีความทนทาน ป้องกันไฟได้ และมีการเสริมกำลังหรืองานซ่อมแซมได้ง่าย (แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

2.3 วัสดุประเภทเส้นใย

เส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมแรงพลาสติกในสหรัฐอเมริกา มีด้วยกัน 3 ประเภทหลักคือ เส้นใยแก้ว อะรามิด (เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยพอลิเมอร์พวก อะโรมาติก พอลิอะไมด์ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลแข็งแรงมาก ๆ (very rigid) และเส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว คือพวกที่ใช้กันมากที่สุดและมีราคาถูกที่สุด เส้นใยอะรามิด และเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงสูง มีความหนาแน่นต่ำ และนำไปประยุกต์ได้มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างยานอวกาศ เนื่องจากมีราคาแพง

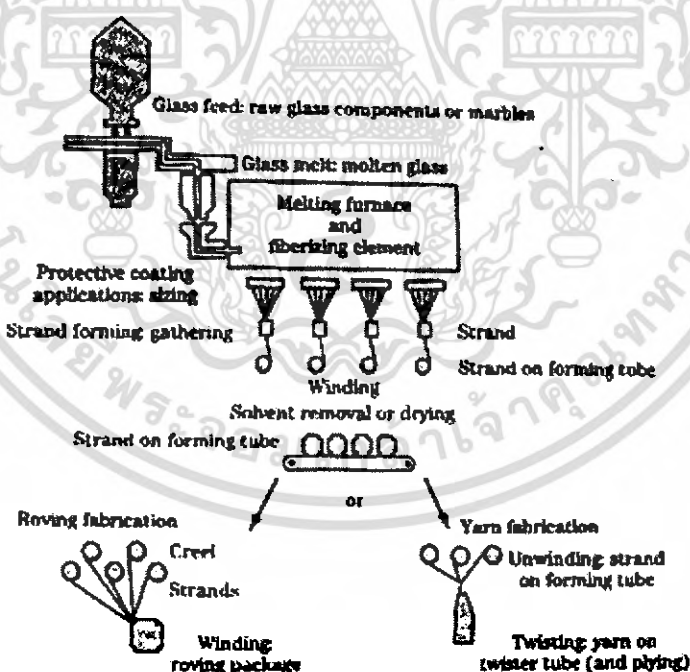
2.3.1 ใยแก้วสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน

ใยแก้วที่นำมาใช้เสริมแรงพลาสติก เพื่อให้มีโครงสร้างแบบวัสดุผสมและใช้สำหรับทำแบบหรือแม่พิมพ์ (Molding compounds) วัสดุพวกนี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ดีคือ มีความแข็งแรงสูง มีรูปทรงเสถียร เป็นฉนวนความร้อน-เย็นที่ดี ไม่ดูดความชื้น ทนทานต่อการผุกร่อน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ขึ้นรูปง่าย และมีราคาถูกค่อนข้างถูก

แก้วที่ใช้สำหรับทำใยแก้ว ที่นับว่าสำคัญที่สุดมีอยู่ 2 ประเภทคือ E (electrical) glasses และ S (high-strength) glasses

E glass เป็นใยแก้วที่ใช้กันมากที่สุด และใช้กับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง E glasses เป็นแก้วที่ได้จากสารประกอบของ lime-aluminum-borosilicate ซึ่งไม่มีโซเดียมหรือมีปริมาณน้อย องค์ประกอบหลักของ E glass คือมี ซิลิกา (SiO_2) 52 - 56 % อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 12 - 16 % แคลเซียมออกไซด์ 16 - 25 % และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) 8 - 13 % E glass ที่บริสุทธิ์มี tensile strength ประมาณ 500 ksi (3.44 GPa) และมี modulus of elasticity 10.5 Msi (72.3 GPa)

S glass มีค่าอัตราส่วนของ Strength ต่อน้ำหนักสูงกว่าและราคาแพงกว่า E glass และในระยะเริ่มแรก S glass จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางการทหารและอวกาศ tensile strength ของ S glass มีค่ามากกว่า 650 ksi (4.48 GPa) และมีค่า modulus of elasticity ประมาณ 12.4 Msi (85.4 GPa) องค์ประกอบที่สำคัญของ S glass มีซิลิกา (SiO_2) ประมาณ 6.5 % อะลูมินา (Al_2O_3) 25 % และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 10 %



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตใยแก้วในอุตสาหกรรม

(McGraw – Hill 1984)

3.1.1.1 การผลิตใยแก้ว และแบบต่าง ๆ ของวัสดุที่เสริมแรงด้วยใยแก้ว (fiber glass reinforcing)

ใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาส ผลิตได้จากการดึงแก้วที่กำลังหลอมเหลวอยู่ในเตาให้ออกมาเป็นเส้นเล็ก ๆ (Filaments) แล้วนำมาปั่นเข้าด้วยกันทำเป็นเกรียว เส้นใยเล็ก ๆ เหล่านี้นำไปทำใยแก้วหรือให้อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (roving) หรืออาจจะทอเป็นแผ่นไฟเบอร์ แผ่นใยแก้วที่ทอเป็นผืนใช้ในการเสริมแรง แผ่นใยแก้วสามารถตัดทำเป็นรูปร่าง ๆ ได้ เส้นใยเล็ก ๆ อาจทำให้มันอยู่รวมกันได้โดยใช้เรซินยึด ส่วนแผ่นใยแก้วจะทำให้ติดกันได้ด้วยพันธะเคมี

3.1.1.2 สมบัติของใยแก้ว การเปรียบเทียบสมบัติเกี่ยวกับแรงดึง (Tensile properties) และความหนาแน่นของเส้นใยแก้วอิ เทียบกับเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิด จะเห็นได้ว่าใยแก้วมี Tensile strength และอีลาสติคโมดูลัสต่ำกว่าใยคาร์บอนและใยอะรามิด แต่มีความความยืดหยุ่นมากกว่า ความหนาแน่นของใยแก้วก็สูงกว่าของใยคาร์บอนและใยอะรามิด อย่างก็ตามเส้นใยแก้วได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางที่ใช้สำหรับเสริมแรงพลาสติกเพราะมีราคาถูก

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงพลาสติก
(แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

Property	E glass (HTS)	Carbon (Type HT)	Aramid (Kevlar 49)
Tensile Strength , MPa	2,410	3,100	3,617
Tensile Modulus , GPa	69	220	124
Elongation to break, %	3.5	1.40	2.5
Density , g/cm ³	2.54	1.75	1.48

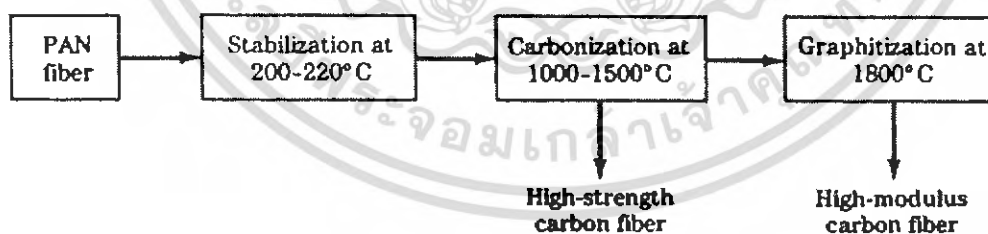
2.3.2 เส้นใยคาร์บอนสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน (Carbon Fiber for Reinforced Plastics)

วัสดุผสมที่ผลิตจากการใช้ใยคาร์บอนไปเสริมแรงให้กับพลาสติกเรซิน (Plastic resin) เช่น อีพอกซี (epoxy) เพื่อให้วัสดุผสมนั้นมีคุณลักษณะเฉพาะในหลาย ๆ ส่วนร่วมกัน คือทำให้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง มีความแข็งตัว ไม่โค้งงอง่าย สมบัติเหล่านี้ก่อให้เกิดความสนใจที่จะนำไปประยุกต์ทางด้านยานอวกาศ (Aerospace) เช่น สร้างเครื่องบิน โดยใช้วัสดุผสมที่ทำด้วยใยคาร์บอนเสริมแรงพลาสติก แต่เนื่องจากราคาของเส้นใยคาร์บอนค่อนข้างสูง จึงทำให้การนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ต้องจำกัดตัวลง

เส้นใยคาร์บอนที่ใช้ผลิตวัสดุผสมนี้ ทำมาจากแหล่งที่สำคัญ 2 แหล่งคือ พอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (Polyacrylonitrile, PAN) กับยางมะตอย (Pitch) ซึ่งเป็นตัวที่เกิดขึ้นมาก่อนที่จะเป็นเส้นใยคาร์บอนเรียกว่า ปริเคอร์เซอร์ (Precursor)

โดยทั่วไปเส้นใยคาร์บอนผลิตมาจาก PAN-precursor ด้วยกระบวนการ 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. กระบวนการทำให้เสถียร (Stabilization)
2. กระบวนการทำให้เกิดคาร์บอน (Carbonization)
3. กระบวนการทำให้เป็นแกรไฟต์ (Graphitization)



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรงและโมดูลัสสูงจากพอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (PAN) ปริเคอร์เซอร์
(แม่น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

ขั้นตอนแรก เป็นกระบวนการทำให้เสถียร (Stabilization Stage) ขั้นตอนนี้เส้นใย PAN จะถูกดึงให้ขึงเป็นเส้นตรง โดยให้เส้นใยแต่ละเส้นขนานกับแกนเส้นใย แล้วทำให้เกิดออกซิเดชันด้วยอากาศที่อุณหภูมิประมาณ $200 - 220^{\circ}\text{C}$ ($392 - 428^{\circ}\text{F}$) ทั้ง ๆ ที่ยังคงอยู่

ขั้นที่สอง เป็นกระบวนการทำให้เกิดคาร์บอน (Carbonization) ซึ่งเป็นการผลิตเส้นใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูง กระบวนการนี้ต่อมาจากกระบวนการแรก โดยเส้นใย PAN ที่เสถียรจะถูกเผาจนกระทั่งกลายเป็นเส้นใยคาร์บอนด้วยการกำจัดออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนจากเส้นใย PAN การเผาให้กลายเป็นคาร์บอนนี้ตามปกติจะเผาที่อุณหภูมิ $1000 - 1500^{\circ}\text{C}$ ($1832 - 2732^{\circ}\text{F}$) ในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ในระหว่างการเกิดกระบวนการที่เปลี่ยนเป็นคาร์บอนนี้เส้นใยนั้นจะเปลี่ยนเป็นเส้นใยเล็ก ๆ หรือเป็นแถบ (Ribbon) คล้ายแกรไฟต์ ขึ้นในแต่ละเส้นใย ซึ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ขั้นที่สาม หรือการทำให้เส้นใยเป็นแกรไฟต์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเพิ่มอีลาสติคโมดูลัสจากการที่มีความแข็งแรงสูง ในระหว่างที่มีการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800°C (3272°F) เส้นใยแต่ละเส้นจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นผลึกคล้ายแกรไฟต์เพิ่มขึ้น

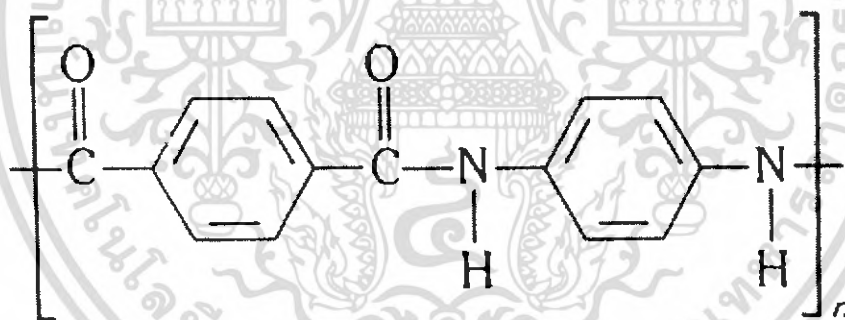
เส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากวัสดุ PAN พรีเคอร์เซอร์ จะได้ Tensile Strength อยู่ประมาณ $340 - 460 \text{ ksi}$ ($2.34 - 3.17 \text{ GPa}$) และมีอีลาสติคโมดูลัสอยู่ในช่วงประมาณ $28 - 60 \text{ Msi}$ ($193 - 413 \text{ GPa}$) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อให้อุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น จนถึงค่าประมาณ 60 Msi (431 GPa) เพื่อให้ได้เส้นใยคาร์บอนที่มีอีลาสติคโมดูลัสสูง ๆ การจัดตัวของโครงสร้างตามแนวแกนของ basal planes แบบแกรไฟต์ ให้ขนานกับแกนของเส้นใยให้เกิดขึ้นมากๆ จึงต้องเผาให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 1200°C แล้วทำให้ tensile strength ลดลงทีน้อยๆ ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การที่ tensile strength ลดลง ขณะที่เผาให้อุณหภูมิสูงขึ้นเชื่อว่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่างหรือรอยแตกขึ้นในเนื้อหรือบนผิวของเส้นใย

ความหนาแน่นเส้นใยคาร์บอน-PAN และเส้นใยแกรไฟต์-PAN จะมีค่าประมาณ $1.7 - 2.1 \text{ กรัม/ซม.}^3$ โดยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $7 - 10 \text{ ไมโครเมตร } (\mu\text{m})$ กลุ่มเส้นใยคาร์บอนประมาณ 6000 เส้น เรียกว่า โท (tow)

2.3.3 เส้นใยอะรามิดสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน (Aramid Fiber for Reinforcing Plastic Resins)

เส้นใยอะรามิด เป็นชื่อทั่วไปของอะโรมาติกพอลิอะไมด์ไฟเบอร์ เส้นใยอะรามิดเริ่มมีการแนะนำทางการค้า โดยบริษัท ดูปองท์ (Du Pont) เมื่อปี 1972 ในชื่อว่าเคบลาร์ (Kevlar) ในปัจจุบันเคบลาร์ที่ขายกันอยู่มี 2 แบบ เคบลาร์ 29 และ เคบลาร์ 49 เคบลาร์ 29 เป็นชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่เป็นเส้นใยอะรามิดที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งออกแบบมาเพื่อป้องกันกระสุนหรือจรวด ใช้ทำเชือกและสายเคเบิล ส่วนเคบลาร์ 49 มีสมบัติเฉพาะคือ มีความหนาแน่นต่ำแต่มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้เคบลาร์ 49 นี้มีประโยชน์ในการเสริมแรงพลาสติก สำหรับงานสร้างเครื่องบิน สร้างเรือ รถยนต์ และนำไปประยุกต์ทางด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ

หน่วยย่อยทางเคมีของโซ่เคบลาร์ พอลิเมอร์ คือ อะโรมาติก พอลิอะไมด์ พันธะไฮโดรเจน จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกันทางค้ำขวาง โดยรวมแล้วเส้นใยเหล่านี้จะมีความแข็งแรงสูงตามยาวและจะไม่แข็งแรงตามขวาง โครงสร้างที่มีวงแหวนอะโรมาติกเป็นส่วนที่ทำให้โซ่พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่งอ่าย (Rigidity) และทำให้มีโครงสร้างคล้ายท่อไม้



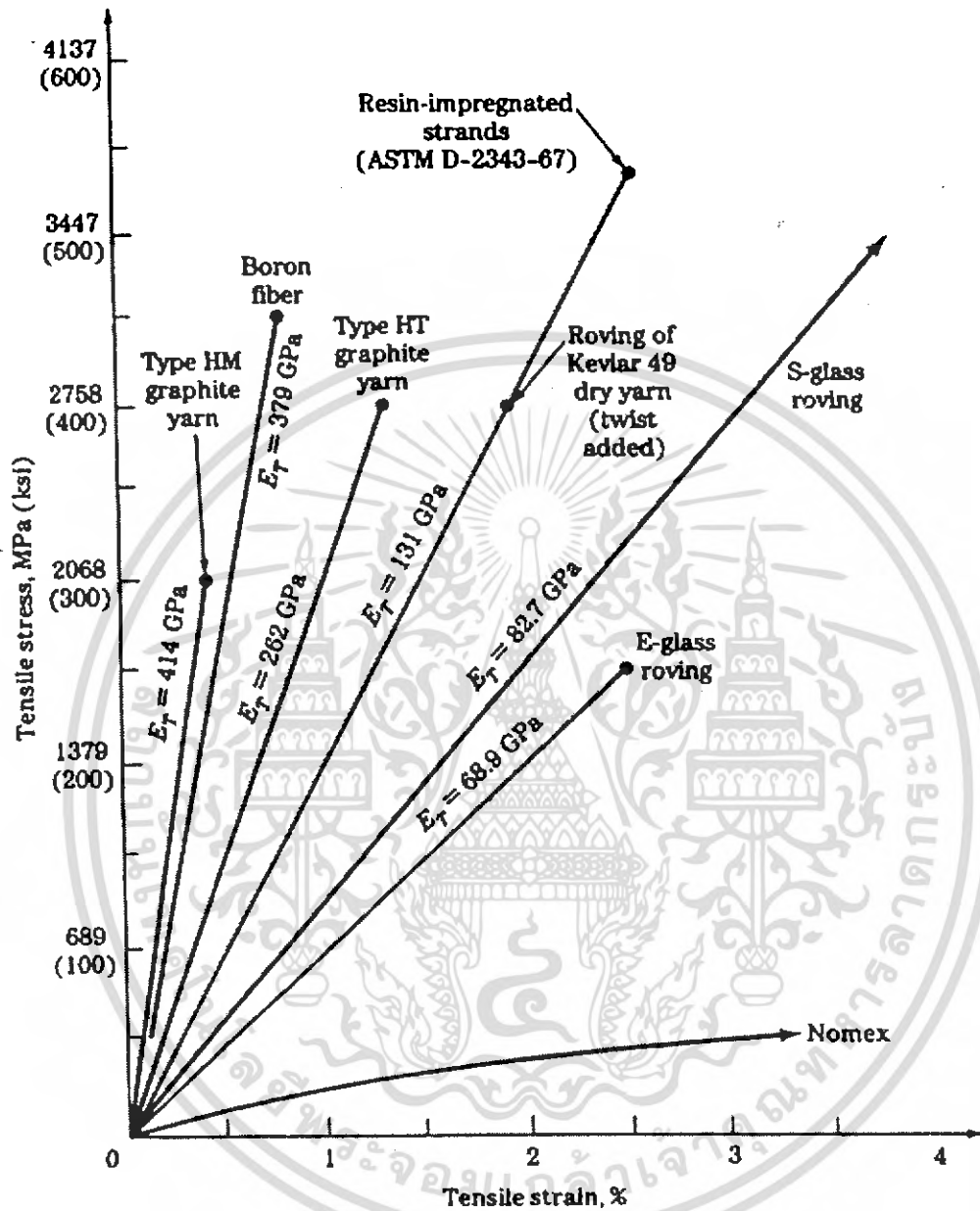
รูปที่ 2.3 แสดงหน่วยย่อยของโครงสร้างทางเคมีสำหรับเส้นใยเคบลาร์
(แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

เคบลาร์อะรามิด เป็นวัสดุผสมที่มีคุณภาพสูงนำไปประยุกต์ได้มากมายเพราะมีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงและเหนียวสูง ทนทานต่อการชำรุด ความล้าและ Stress rupture ที่น่าสนใจอย่างยิ่งคือวัสดุที่เป็นเคบลาร์ – อีพอกซี (Kevlar – epoxy) นี้นำไปใช้ทำส่วนประกอบต่าง ๆ ของกระสวยอวกาศ (space shuttle)

2.3.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอน อะรามิด และใยแก้วสำหรับเสริมกรงพลาสติกของวัสดุผสม

การเปรียบเทียบของ Stress – strain ไดอะแกรมของใยคาร์บอน อะรามิด และใยแก้ว จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของเส้นใยจะอยู่ในช่วงประมาณ 250 -500 ksi (1,720 – 3,440 MPa) ขณะที่ช่วงของ Fracture Strain เป็น 0.4 – 4.0 เปอร์เซ็นต์ อีลาสติคโมดูลัสอยู่ในช่วง 10×10^6 ถึง 60×10^6 psi (68.9 – 413 GPa) เส้นใยคาร์บอนจะให้ส่วนผสมที่ดีที่สุด คือแข็งแรงสูง แข็งเหนียวหรือมอดูลัสสูง และความหนาแน่นต่ำ แต่มีการบิดต่ำกว่าเส้นใยเคבלาร์ 49 ให้ส่วนผสมที่มีความแข็งแรงมาก อีลาสติคโมดูลัสสูง (แต่ไม่สูงเท่ากับเส้นใยคาร์บอน) มีความหนาแน่นน้อย และมีความยืดหยุ่น สำหรับเส้นใยแก้วมีความแข็งแรงและอีลาสติคโมดูลัสต่ำกว่า แต่มีความหนาแน่นสูงกว่า เส้นใยแก้วเอส (S – glass fiber) มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงกว่าเส้นใยแก้วอี (E – glass fiber) เพราะเส้นใยแก้วมีราคาถูกกว่ามากจึงมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง





รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของ Stress - Strain ของเส้นใยเสริมแรงแบบต่าง ๆ

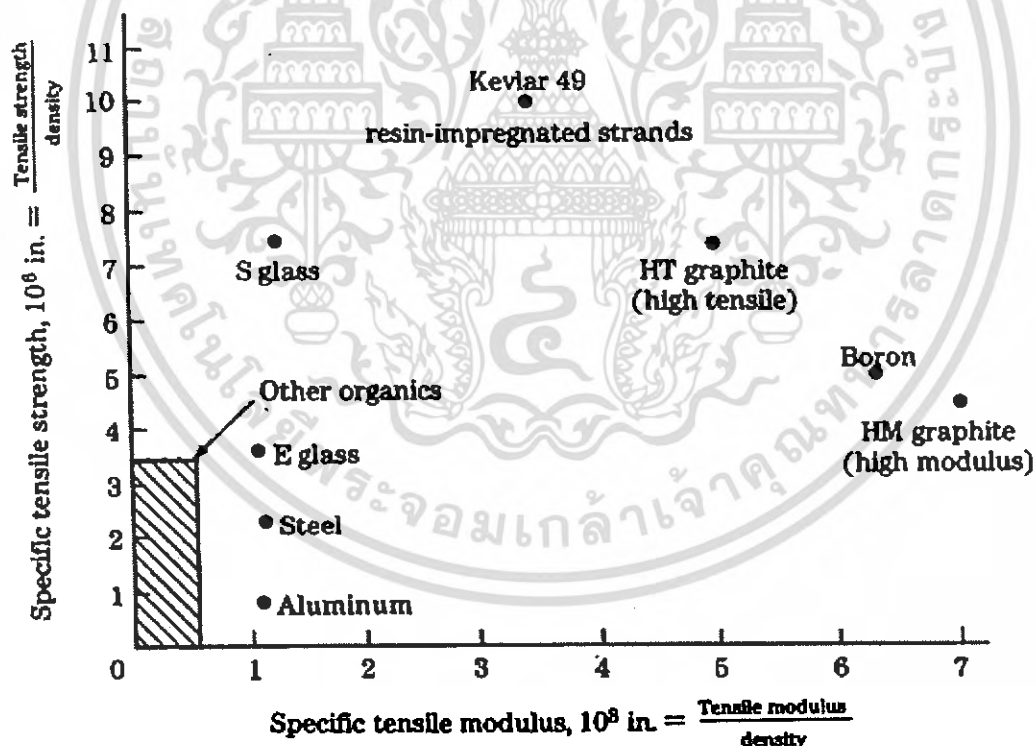
(E.I. Du Point de Nemours & Co., 1974)

62813

รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อความหนาแน่น และความแข็งแรงไม่่งอ (Stiffness) ต่อความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรงชนิดต่าง ๆ การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นจุดเด่นของความแข็งแรงต่อน้ำหนักและความแข็งแรงไม่่งอ ต่อน้ำหนักของเส้นใยคาร์บอนและอะรามิด (aramid; Kevlar 49) กับสมบัติของเหล็กกล้า และอะลูมิเนียม ซึ่งแตกต่างกันอย่างชัดเจน ด้วยสมบัติที่ดีเหล่านี้จึงทำให้วัสดุผสมประเภทเส้นใยคาร์บอน และอะรามิดเสริมแรงเป็นที่นิยมมาประยุกต์ให้แทนโลหะในยานอวกาศจำนวนมาก

2.4 วัสดุพลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์

วัสดุพลาสติกที่ใช้สำหรับทำวัสดุผสมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย ที่นับว่าสำคัญที่สุด 2 ชนิด คือ เรซินพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว กับเรซินอีพอกซี ปฏิกิริยาเคมีที่เทอร์โมเซตพลาสติกเหล่านี้ก่อให้เกิดโครงข่าย (Cross - Linking)



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของ Tensile Strength จำเพาะ (Tensile Strength/Density) กับ Tensile Modulus จำเพาะ (Tensile Modulus/Density) ของเส้นใยเสริมแรงแบบต่าง ๆ

(E.I. du Point de Nemours & Co., Wilmington, Del.)

สมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์เอสเทอร์และเรซินอีพอกซีที่หล่อแข็ง โดยไม่มีเส้นใย แสดง ในตาราง 2.2 เรซินพอลิเอสเทอร์ ราคาจะถูกกว่าเรซินอีพอกซีแต่มีความทนทานน้อยกว่าอีพอกซี พอลิเอสเทอร์ที่ไม่อิมิตันนี้มีการนำไปใช้ทำพลาสติกเสริมแรงอย่างกว้างขวางมาก เช่น ใช้สร้างลำเรือ ทำ ผนังตึก แผงโครงสร้างรถยนต์ เครื่องบิน และอุปกรณ์ต่าง ๆ เรซินอีพอกซีราคาจะแพงกว่าเรซิน พอลิเอสเทอร์ แต่มีสมบัติที่ดีเป็นพิเศษกว่า เช่น มีความแข็งแรงกว่า เวลาบ่ม จะมีการหดตัวน้อยกว่า เป็น ดัน เรซินอีพอกซีมักจะใช้ผสมกับเส้นใยคาร์บอนและอะรามิกทำวัสดุผสม

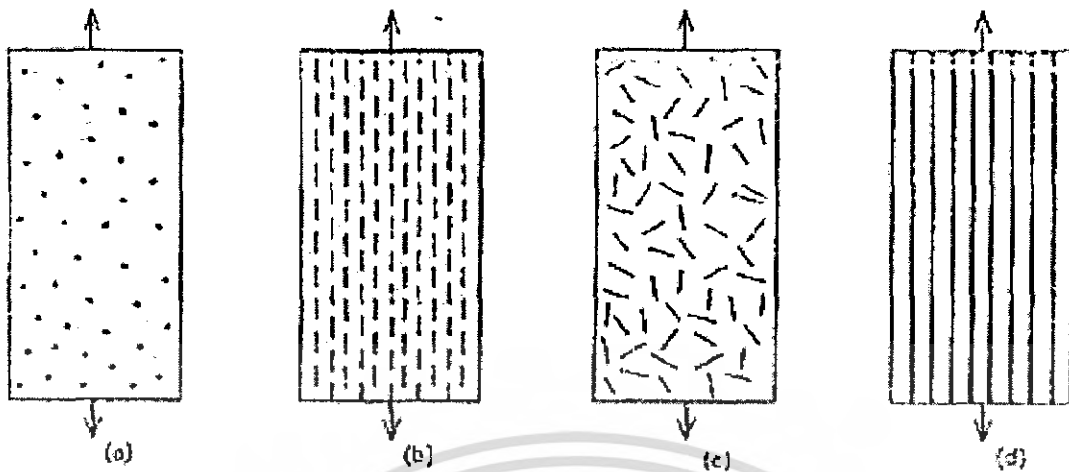
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของเรซินพอลิเอสเทอร์และอีพอกซี
(แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546)

	Polyester	Epoxy
Tensile strength, ksi (MPa)	6–13 (40–90)	8–19 (55–130)
Tensile modulus of elasticity, Msi (GPa)	0.30–0.64 (2.0–4.4)	0.41–0.61 (2.8–4.2)
Flexural yield strength, ksi (MPa)	8.5–23 (60–160)	18.1 (125)
Impact strength (notched-bar Izod test), ft·lb/in (J/m) of notch	0.2–0.4 (10.6–21.2)	0.1–1.0 (5.3–53)
Density (g/cm ³)	1.10–1.46	1.2–1.3

2.5 วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรง (www.nationalpark.go.th/biocom/garbage_sermlang.html)

2.5.1 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase)

มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆ ก็ได้ ตัวเสริมแรง ที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) อาจจะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้น เส้นใยที่ใช้เสริมแรงใน พอลิเมอร์วัสดุผสม (Composite Material) เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงตัวอย่างวัสดุผสม(Composite Material) ที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค | จัดเรียงตัวแบบสุ่ม |
| (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น | จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน |
| (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น | จัดเรียงตัวแบบสุ่ม |
| (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว | จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน |

(www.nationalpark.go.th)

2.5.2 สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรงคอนกรีตควรมีลักษณะดังนี้

- เส้นใยควรมีอีลาสติคโมดูลัสสูงเพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง
- เส้นใยควรมีความแข็งแรงสูง
- ความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก
- เส้นใยควรจะมีเสถียร และรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บ และขึ้นรูปได้
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน

2.5.3 ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม (Composite Material) ได้แก่

- เส้นผ่านศูนย์กลาง ของเส้น ถ้าหากเส้นใยมีขนาดใหญ่ จะมีพื้นที่หน้าตัดรับแรงมากขึ้น
- ความยาวของเส้นใย ให้มีความยาวมากกว่าความยาววิกฤติ ซึ่งถ้าเส้นใยมีความยาวน้อยกว่านี้ จะส่งผลทำให้เส้นใยรับแรงได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ
- ปริมาตรของเส้นใย ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้วัสดุผสมมีความสามารถในการรับแรงมากขึ้น
- ลักษณะรูปร่างของเส้นใย มีผลต่อการยึดเหนี่ยวกับส่วนของที่เป็นส่วนเมตริกซ์ ซึ่งหาก การยึดเหนี่ยวดีจะทำให้ประสิทธิภาพการรับแรงดีขึ้นด้วย
- การจัดเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุผสม(Composite Material) แสดงในรูปที่ 2.6

2.5.4 เส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง

โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในวัสดุผสม(Composite Material) สามารถแบ่งเป็น

- เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber), เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) ผสมลงในพอลิเมอร์จะทำให้ได้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น
- เส้นใยธรรมชาติ จะได้พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง และสามารถย่อยสลายได้แต่ไม่ดีเท่าเส้นใยสังเคราะห์

2.5.5 การผสมเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านต่างๆให้กับพอลิเมอร์เมตริกซ์ เช่น

- ความแข็งแรง
- ความเหนียว
- ความเสถียรภาพของรูปร่าง
- การคืบ
- ความทนทานต่อการใช้งาน

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่ใช้งานในประเทศไทย
(ข้อมูล สจวนวณ, 2546)

ชนิดของเส้นใย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	Specific Gravity	Modulus of Elasticity (ksc.)	Tensile Strength (ksc.)	Elongation at Break (%)
Steel	0.005 – 0.5	7.84	2.10×10^6	5,000 – 20,000	0.5 – 3.5
Polypropylene (Fibrillated)	0.02 – 0.2	0.90	0.5×10^5 ถึง 7.7×10^5	5,000 – 7,500	8.0
Glass	0.009 – 0.015	2.60	7.0×10^5 ถึง 8.0×10^5	20,000 – 40,000	2.0 – 3.5
Asbestos (Crocidolite)	0.00002 – 0.0004	3.4	1.96×10^6	35,000	2.0 – 3.0
Asbestos (Chrysotile)	0.00002 – 0.0004	2.6	1.64×10^6	31,000	2.0 – 3.0

2.6 อีพอกซีเรซิน (นท นิ่มสมบุญและสมพร เชื้อเงิน, 2535)

2.6.1 ประวัติของอีพอกซี

อีพอกซีเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเกาะยึดกับวัสดุต่าง ๆ ได้ดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการซ่อมแซมวัสดุประเภทต่าง ๆ เช่น โลหะ แก้ว กระจก เบ้า พลาสติก คอนกรีต และไม้ได้ โดยทำเป็นมอร์ตาร์ (Mortar) อุดรูรั่วหรือเชื่อมประสานรอยแตกร้าวของคอนกรีตได้ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของอีพอกซีได้เริ่มต้นประมาณปี ค.ศ. 1934 และเริ่มนำมาใช้งานด้านการผลิตทันตภัณฑ์ โดยนักเคมีสวิสเซอร์แลนด์ หลังจากนั้นสารอีพอกซีก็เริ่มต้นใช้งานในอุตสาหกรรมมากขึ้น ในประมาณปี ค.ศ. 1943 มีการพัฒนามากขึ้นตามความต้องการของตลาด โดยมีการผลิตอีพอกซีชนิดใหม่ ๆ มากขึ้นตามความต้องการของการใช้งาน โดยมีบริษัท Union Carbide Co – Operation และบริษัท CIBA ในช่วงนี้มีการใช้งานมากทั้งในยุโรปและอเมริกา ปัจจุบันการพัฒนาเกี่ยวกับสารอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) ยังคงดำเนินต่อไปและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั่วโลก

2.6.2 ลักษณะเบื้องต้นของอีพอกซีเรซิน

สารอีพอกซีเรซินเกิดจากการผสมกับระหว่างส่วนที่เป็นยาง (Resin) ซึ่งเรียกโดยทั่วไปว่า “Part A” และตัวทำให้แข็ง (Hardener) เรียกโดยทั่วไปว่า “Part B” ส่วนผสมทั้งสองชนิดจะขายแยกกันและมีสีต่างกัน สารอีพอกซีเรซินเป็นสาร Thermosetting plastic กล่าวคือ จะมีความแข็งแรงมากหลังจากการบ่มแล้ว และจะมีกำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการรักษาให้อยู่ในสภาพชื้น สารประกอบอินทรีย์นี้ จะมีความคงทนทั้งทางด้านเคมีและฟิสิกส์ ต้องการความร้อนในการบ่มและแข็งตัว ไม่หลอมเหลวและเป็นฉนวนไฟฟ้าภายหลังจากแข็งตัวแล้ว สารอีพอกซีเรซินเช่นนี้ อาจจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวทำให้แข็ง (Hardener) สารผสมเพิ่ม (Filler) และสารทำให้ยืดหยุ่น (Flexibilizer)

อีพอกซีชนิดสีเหลืองอำพันเป็นชนิดที่ใช้กันมาก ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันเครื่องรถยนต์ชนิดชั้น อีพอกซีที่ใช้กันทั่วไปเป็นผลจากปฏิกิริยาของสาร Epichlorohydrin และ Bisphenol A อัตราส่วนของสาร Epichlorohydrin ต่อสาร Bisphenol A จะบอกถึงชนิดของอีพอกซีที่ผลิตได้ ถ้าอัตราส่วนสูงค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลจะต่ำสำหรับตัวทำให้แข็ง (Hardener) ที่ใช้กันมากก็คือ Aliphatic amines, adducts Amido amines และ Polyamide

2.6.3 ชนิดของอิพอกซี

2.6.3.1 ชนิดของอิพอกซี แบ่งโดยลักษณะการใช้งาน

ชนิดของอิพอกซี แบ่งชนิดโดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งาน โดยทั่วไปมี 3 ชนิดดังนี้

- ชนิดที่ 1 (Type 1) ใช้สำหรับยึดเหนี่ยวคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete) และวัสดุอื่น ๆ กับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
- ชนิดที่ 2 (Type 2) สำหรับยึดเหนี่ยววัสดุสำหรับการการไถล (Skid resistant materials) กับคอนกรีตเก่าหรือเป็นตัวเชื่อมประสานในอิพอกซีมอร์ตาร์ อิพอกซีคอนกรีต
- ชนิดที่ 3 (Type 3) สำหรับยึดเหนี่ยวคอนกรีตติดกับคอนกรีตเก่า

2.6.3.2 ชนิดของอิพอกซี แบ่งโดยพฤติกรรม

การแบ่งออกเป็นเกรดต่าง ๆ กำหนดโดยอาศัยพฤติกรรม เช่น ความหนืด (Viscosity) และความข้นเหลว (Consistency) ที่ต้องการ เช่น

- เกรด 1 เป็นวัสดุที่มีความหนืดต่ำ ใช้กับการซ่อมรอยแตกร้าวด้วยการพ่น
- เกรด 2 เป็นวัสดุที่มีความหนืดปานกลาง ใช้สำหรับงานทั่วไป
- เกรด 3 เป็นวัสดุที่มีความหนืดสูงไม่ย้อยตัวขณะใช้งาน (Nonsagging Consistency material) สำหรับใช้กับงานที่อยู่เหนือศีรษะ (Overhead work) หรือ ยึดเหนี่ยวผิวที่ขาดการขยับเขยื้อน (Nonmoving Surface)

2.6.4 คุณสมบัติทางกลของอิพอกซีเรซิน

วิศวกรโยธามักจะพบกับปัญหา ในการเลือกใช้อิพอกซีเรซินที่เหมาะสม สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ คุณสมบัติที่ต้องการในระหว่างการฉีดและหลังจากที่อิพอกซีเรซินแข็งตัวแล้วทั้งนี้ จะสัมพันธ์ถึงความหนืดในระหว่างการฉีด ผลกระทบของอุณหภูมิในระหว่างการฉีด ระยะเวลาในการบ่ม ช่วงเวลาในการที่จะมีความเพิ่มความหนืดอย่างรวดเร็ว (Gelling time) การหดตัวระหว่างการบ่ม

ในระหว่างสารอีพอกซีเรซินหลายชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปเป็นความรับผิดชอบของวิศวกร ที่จะเลือกว่าชนิดใดจะเหมาะที่สุดในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยพิจารณาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารอีพอกซีเรซิน อีพอกซีจะมีกำลังลดลงเมื่อโดนความร้อน และมีจุดหลอมเหลวประมาณ 4 -500 องศาเซลเซียส

2.6.5 การดัดแปลงคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินเพื่อการใช้งาน

เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของการใช้งาน และเพื่อปรับปรุงอีพอกซีเรซินให้มีคุณภาพที่เหมาะสมยิ่งขึ้น จึงมีการดัดแปลงคุณสมบัติทางกล ดังต่อไปนี้คือ

1. โดยการเติมสารอนินทรีย์ ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยา (Filler) สารอนินทรีย์นี้จะเป็นมวลละเอียด มวลละเอียดนี้จะช่วยลดการใช้สารอีพอกซี ซึ่งมีผลทำให้ลดค่าใช้จ่าย และยังช่วยให้ความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้น แต่จะให้ความหนืดสูงมากขึ้นและกำลังของอีพอกซีเรซิน ลดลง
2. โดยการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น (Flexibilizer) ประมาณ 5 – 10 ส่วนใน 100 ส่วนของจำนวนเรซิน (สารจำพวก Reactive Nitrite Rubber) แม้ว่าจะทำให้กำลังและความทนทานลดลง แต่จะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงกระแทก ประมาณ 500% และ Thermal Shock ก็จะลดลงด้วย นอกจากนั้นการเติมสาร Glycedyl ether ก็จะช่วยเพิ่มความเหนียวและกำลังต้านทานแรงกระแทก เช่นเดียวกัน เนื่องจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงชนิดนี้จะทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็ก ๆ (Micro void) ภายในเรซิน
3. โดยการเติมสาร Diluents เพื่อเพิ่มเวลาการทำงาน (Pot Life) ของอีพอกซีเรซิน (ช่วงเวลาในการฉีดหรืออุดรอยแตกร้าวด้วยอีพอกซีเรซิน เริ่มตั้งแต่ผสมเสร็จ) สาร Diluents นี้จะลดความหนืดของอีพอกซีเรซิน

การเลือกใช้วิธีต่าง ๆ ในการดัดแปลงคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซินจะต้องคำนึงถึงผลเสียที่จะเกิดขึ้น เช่น บางครั้งอาจจะทำให้กำลังลดลง นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของอีพอกซีเรซินชนิดที่ใช้งานด้วย การดัดแปลงคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเรซิน ดังนี้ได้กล่าวมาแล้วนี้ โดยทั่วไป มักจะเป็นการดัดแปลงในช่วงการผลิต ผู้ซื้ออาจจะเลือกซื้ออีพอกซี เรซินที่ดัดแปลงแล้วตามความเหมาะสมของงาน

2.6.6 งานที่เหมาะสมจะใช้อีพอกซีเป็นตัวประสาน มีดังนี้ -

- ใช้เป็นตัวต้านทานการเสียดทานและปกคลุมผิวหน้าของพื้นคอนกรีต
- เป็นตัวป้องกันการซึมผ่านของน้ำ
- เป็นสารประกอบที่ใช้ปะผิวหน้าต่าง ๆ เพื่อทำการซ่อมแซม
- อุดรอยร้าวและเชื่อมรอยต่อต่าง ๆ
- ใช้เป็นตัวประสานระหว่างคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ให้ติดกับ

คอนกรีตเดิม

- ใช้อัดเข้าไปตามช่องว่างแทนการอัดน้ำปูน
- ให้ทำเครื่องหมายจราจร ทาป้องกันผิวคอนกรีตจากการสึกกร่อน เนื่องจาก

สารเคมี

- บิดเหล็กหรือโลหะอื่น ๆ ให้ติดกับคอนกรีต
- รับแรงเฉือน สำหรับโครงสร้างสำเร็จรูป

2.6.7 ข้อดีและข้อเสียของอีพอกซีเรซิน

1. ข้อดี

• เนื่องจากในอีพอกซีเรซินจะมีสารพวก Epoxide, Hydroxyl, Amine และอื่น ๆ ซึ่งทำให้อีพอกซีเรซินมีคุณสมบัติในการยึดเกาะระหว่างผิววัสดุต่างชนิดกันเป็นอย่างดี

• มีแรงยึดเกาะ (Cohesion) ภายในตัวเองสูงมาก เมื่อมีการบ่มให้ถูกวิธีซึ่งจะทำให้ยึดเกาะกับวัสดุอื่นได้ดี

- มีความแข็งแรงมาก (100% Solid) เมื่อแข็งตัวแล้วจะเสมือนหนึ่งของแข็ง
- มีการยึดเกาะหด ขยายตัวต่ำมาก (Low Shrinkage) ประมาณ 1%
- มีการคืบตัวน้อย
- ด้านทานความชื้นและการทำละลาย
- มีความต้านทานทางเคมีสูง
- มีความสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 500 F

2. ข้อเสีย

- บางชนิดเป็นพิษต่อร่างกาย คือทำให้เกิดอาการอักเสบต่อผิวหนังได้
- ราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ

2.7 เส้นใยเหล็ก

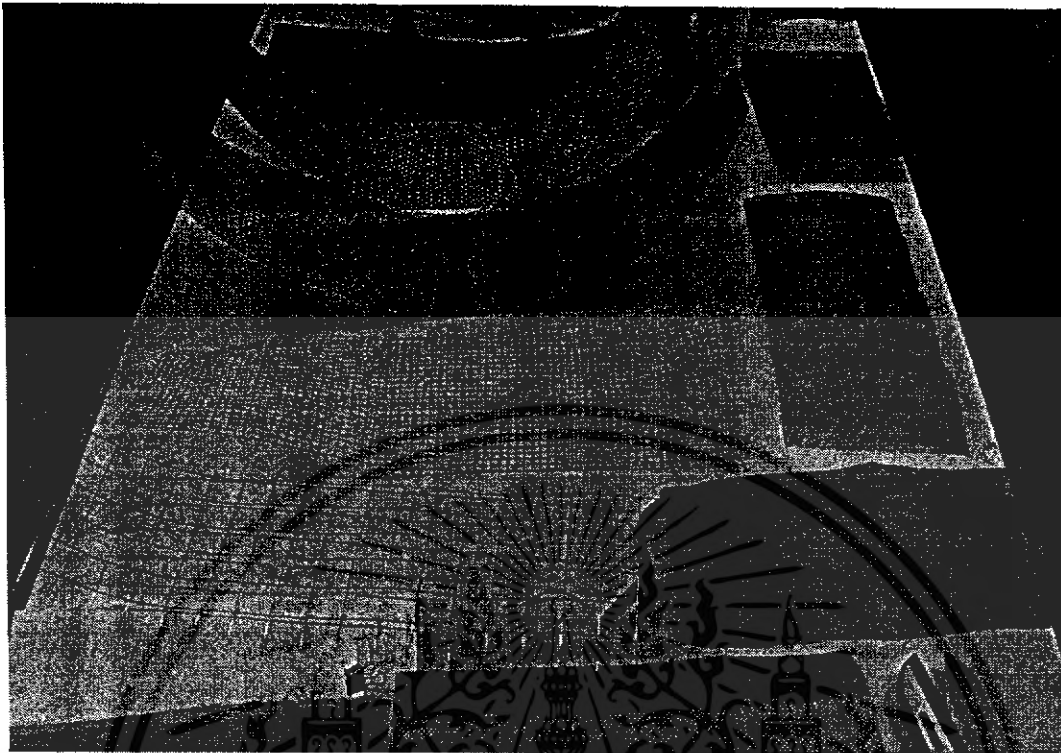
2.7.1 การผลิตเส้นใยเหล็ก

เส้นใยเหล็กเกิดจากการนำเหล็กมารีด จนได้ขนาดของเส้นใยตามที่ต้องการโดยขนาดของเส้นใยที่พบจะมีขนาดเล็กตั้งแต่ 0.05 มม.และอาจมีความยาวสั้นแตกต่างกันไป วัสดุที่นำมาใช้ผลิต เช่น เหล็ก แสตนเลส และอลูมิเนียม เป็นต้น การผลิตเส้นใยเหล็กจะพบส่วนใหญ่ผลิตอยู่ในรูปของตะแกรงเหล็ก ที่เป็นลักษณะของลวดนำมาดัด หรือเชื่อมติดกัน สามารถหาซื้อได้ทั่วไปมีราคาถูก และลักษณะที่ผลิตเป็นเส้นใยที่ใช้กับอุตสาหกรรมยางรถยนต์



รูปที่ 2.7 แสดงภาพเส้นใยเหล็ก

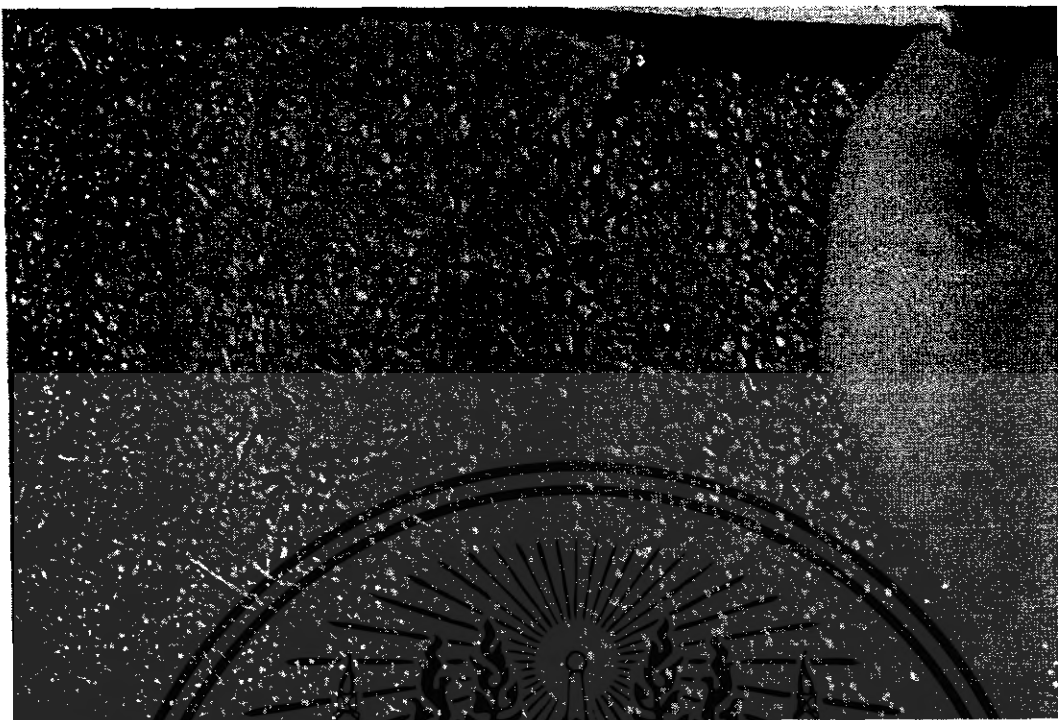
(<http://www.engin.umich.edu>)



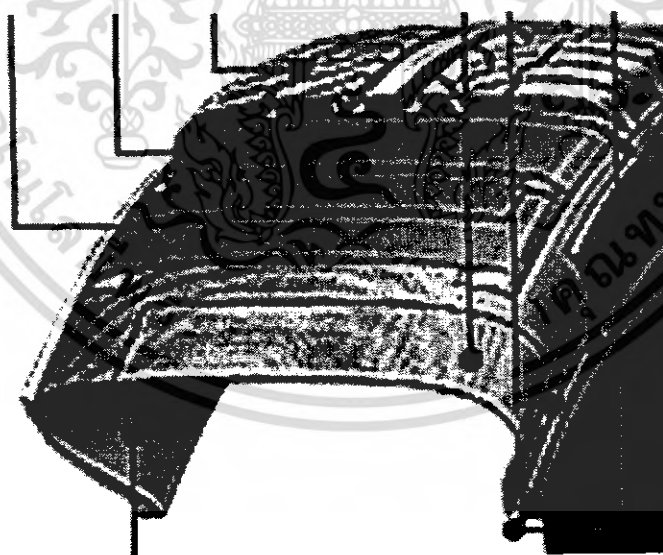
รูปที่ 2.8 แสดงภาพเส้นใยเหล็กที่ผลิตในรูปของตะแกรง

2.7.2 ลักษณะการใช้งาน

การนำเส้นใยเหล็กมาในงาน จะพบได้อยู่หลายลักษณะ คือ ลักษณะเป็นเส้นใยที่ใช้เสริมร่วมกับยางรถยนต์ การเสริมเส้นใยในคอนกรีตเพิ่มคุณสมบัติให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น และซ่อมแซมคอนกรีต เช่น ในประเทศสวีเดน ออสเตรเลีย แคนาดา และในรูปของตะแกรงเหล็ก ถ้าเป็นเหล็กสแตนเลสเป็นงานในลักษณะการนำไปใช้ร้อนเมล็ดพืช หรือใช้ร้อนหินทราย ถ้าเป็นเหล็กตะแกรง จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างคือการเสริมในคอนกรีตป้องกันการแตกร้าว หรือนำไปใช้ในงานล้อมรั้วต่าง ๆ

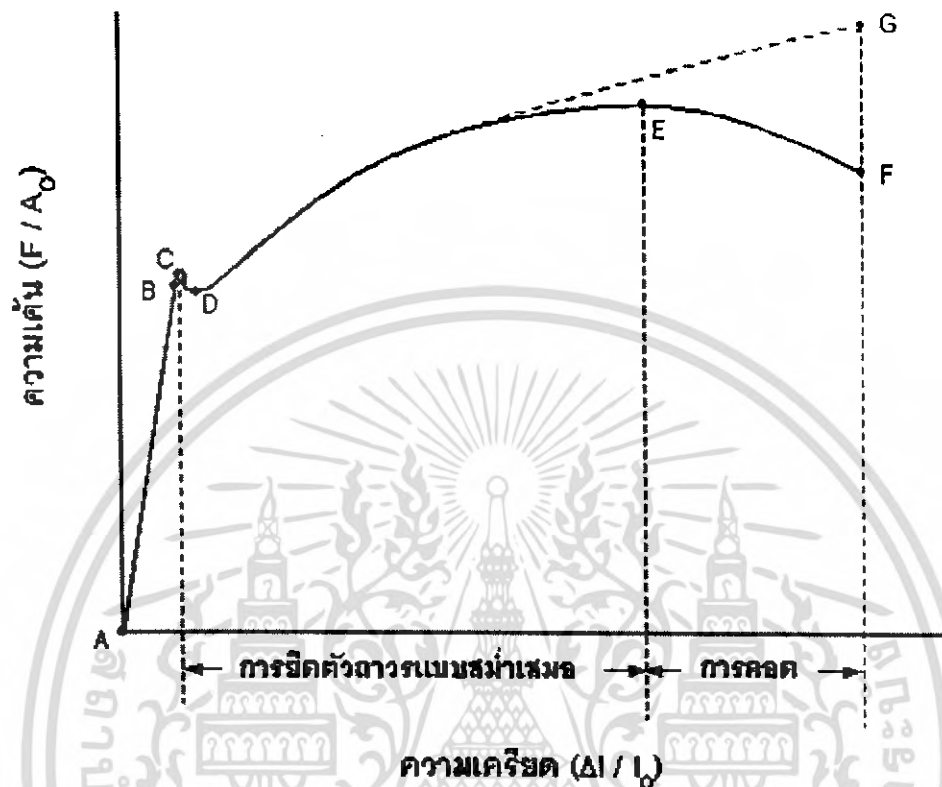


รูปที่ 2.9 แสดงภาพการใช้เส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีต
(<http://kahuna.sdsu.edu>)



รูปที่ 2.10 แสดงภาพการใช้เส้นใยเหล็กเสริมแรงในยางรถยนต์
(<http://www.michelin.co.th>)

2.7.3 คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยเหล็ก (<http://isit.or.th>)



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

(<http://isit.or.th>)

กราฟข้างบนแสดงค่าความเค้น (Stress) เทียบกับความเครียด (Strain) จากการทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยค่าต่างๆ ในกราฟคำนวณจาก

$$\text{ความเค้น (Stress)} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรง}} \quad (2.1)$$

(หน่วยของความเค้นอาจเป็น N/mm^2 หรือ MPa หรือ kgf/mm^2 หรือ psi หรือ ksi ก็ได้)

โดยพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นมักจะใช้พื้นที่หน้าตัด เริ่มต้นก่อนที่จะทำการทดสอบ (A_0) เราเรียกค่าความเค้นนี้ว่า Engineering stress ซึ่งแสดงดังเส้นโค้ง ABCDEF ใน

กราฟรูปที่ 1 ซึ่งค่าความเค้นจะลดลงในช่วงปลายของการยืดตัวเนื่องจากเกิดการคอด (Necking) ทำให้ชิ้นงานรับแรงได้น้อยลงอย่างมาก (แต่ถ้าคำนวณความเค้นจากพื้นที่หน้าตัด ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งที่หน้าตัดเล็กลง เราจะเรียกค่าความเค้นจากการคำนวณนี้ว่า True Stress ซึ่งแสดงดังเส้นโค้ง ABCDG ซึ่งความเค้นในช่วงปลายของการยืดตัวยังคงสูงขึ้นเนื่องจากใช้พื้นที่จริง ๆ ขณะนั้นเป็นตัวหาร)

$$\text{ความเครียด (Strain)} = \frac{\text{ความยาวที่ยืดออก}(\Delta L)}{\text{ความยาวเริ่มต้น}(L_0)} \quad (2.2)$$

ในทำนองเดียวกัน เราเรียกค่าความเครียดที่คำนวณโดยการใช้ค่าความยาวเริ่มต้น (L_0) เป็นตัวเทียบนี้ว่า engineering strain

ช่วงต่างๆ ของกราฟความเค้น-ความเครียดที่น่าสนใจได้แก่

ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มยืดตัว โดยที่ระยะยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มาดึงเป็นแนวเส้นตรง เราเรียกช่วงนี้ของกราฟว่า Proportional limit หรือ Limit of Proportionality โดยความชันของเส้นตรงดังกล่าวจะเรียกว่า Young's Modulus of Elasticity

เมื่อวัสดุยืดตัวอีกเล็กน้อยจะถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มที่จะมีการแปรรูปแบบถาวร (Plastic deformation) โดยวัสดุที่ได้รับแรงดึงในช่วง AC เมื่อทำการหยุดดึงชิ้นงานจะหดกลับไปยังความยาวเริ่มแรกของวัสดุนั้น เราเรียกการแปรรูปในช่วง AC ว่า Elastic deformation ในทางปฏิบัติจุด B และ C จะอยู่ใกล้กันมากจนสามารถถือได้ว่าเป็นจุดเดียวกัน

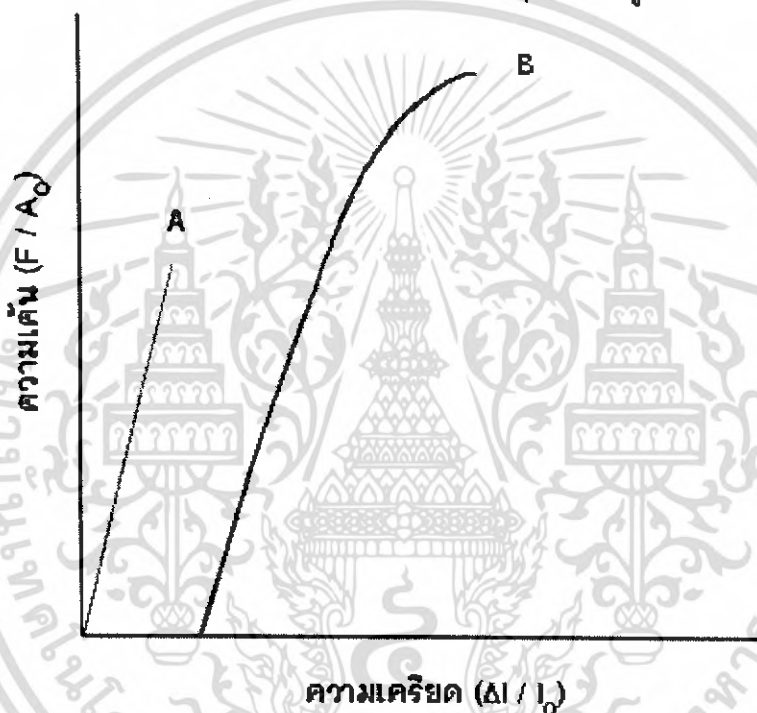
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อทำการแปรรูปต่อจากจุด C ความเค้นจะลดลงและคงที่ โดยวัสดุสามารถยืดตัวออกไปได้เองโดยไม่ต้องเพิ่มความเค้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เราเรียกค่าความเค้นที่จุด D ว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength)

เมื่อดึงวัสดุต่อจากจุด D ไปเรื่อย ค่าความเค้นจะค่อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะยืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด E ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดของกราฟที่เป็นเส้นเต็ม เราเรียกค่าความเค้นสูงสุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งถ้าวัสดุถูกดึงออกจากจุด D พื้นที่หน้าตัดบางส่วน of ชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอด (Non-uniform deformation) และทำให้รับแรงได้น้อยลงอย่างมาก

เมื่อดึงวัสดุต่อเนื่องถึงจุด F วัสดุจะขาดในที่สุด ซึ่งเราสามารถหาค่าความยาวที่วัสดุยืดตัวออกโดยการนำเอาชิ้นงานที่ขาดมาต่อกัน แล้วหาความยาวของวัสดุหลังการดึง (Initial gauge length) ลบด้วยความยาวของวัสดุก่อนดึง (Initial gauge length) และทำการคำนวณหาค่าความยืดตัวร้อยละ (Percentage elongation) ได้โดย

$$\text{ความยืดร้อยละ (\%Elongation)} = \frac{(\text{Gauge length}_{\text{หลังดึง}} - \text{Gauge length}_{\text{ก่อนดึง}}) \times 100}{\text{ความยาว Gauge length}_{\text{ก่อนดึง}}} \quad (2.3)$$

สำหรับตัวอย่างกราฟเหล็กกล้าคาร์บอนแบบอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็ง (A) และที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว (B)

(<http://isit.or.th>)

สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อเหล็กผ่านการรีดปรับผิว (Skin pass rolling) จะไม่ปรากฏจุดครากที่แท้จริงให้เห็น ดังนั้นการคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากจะใช้วิธีการลากเส้นขนานกับเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง (Proportional limit) หรือเรียกว่า Offset method เช่น วัดที่ระยะห่าง 0.2% ของ Gauge length ไปตัดกับเส้นกราฟที่ได้จากการดึง เราเรียกค่าความเค้นตรงจุดที่ทั้งสองตัดกันเรียกว่า ค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) ที่ 0.2% เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก ชนิดต่าง ๆ
(ปฐสม สงวนวงษ์, 2546)

ลำดับที่	ชนิดของเส้นใย	ความยาว (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ค่า Aspect ratio (ความยาว/เส้น ผ่านศูนย์กลาง)	ความ ถ่วงจำเพาะ	Yield Strength (ksc.)	Modulus of Elasticity (ksc.)	รูปร่างของ Fiber
1	Steel Fiber 1 (Hooked)	30.0	0.50	60	7.87	11,700	2,000,000	
2	Steel Fiber 2 (Hooked)	60.0	0.80	75	7.87	11,700	2,000,000	
3	Steel Fiber 3 (Hooked)	30.0	0.54	55	7.87	11,700	2,000,000	
4	Polypropylene (ชนิดเส้นใย ละเอียด)	19.0	-	-	0.91	7,000	34,500	

บทที่ 3

การเก็บข้อมูลและการทดสอบ

3.1 กล่าวนำ

การเก็บข้อมูลและการทดสอบ จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบวัสดุในลักษณะเชิงกล และคุณสมบัติด้านอื่นๆ เช่นราคาและการใช้งาน รวมถึงการเตรียมตัวอย่างการทดสอบให้เหมาะสมกับวิธีการทดสอบ เพื่อให้ได้เข้าใจหลักการทดสอบในพฤติกรรมแบบต่าง ๆ

3.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen)

ก. มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM: C 39 – 93a

ข. วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยการใส่แรงอัดโดยตรงกับแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM

ค. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. คอนกรีตตัวอย่างสำหรับการทดสอบ
2. เครื่องมือทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine)
3. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำด้วยโลหะที่ซีเมนต์ไม่เกาะติดมีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm และสูง 30 cm

4. เครื่องชั่งน้ำหนักขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องมือวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง
6. เครื่องหล่อหวมก (Capped) หัวท้ายของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

ง. ขั้นตอนการทดสอบ

1. การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตให้ทดสอบโดยเร็วที่สุด หลังจากนำขึ้นจากน้ำเมื่อครบอายุ ก่อนการทดสอบตรวจสอบระนาบหัวท้ายของแท่งคอนกรีตว่าแบนราบหรือ ระนาบดังกล่าวไม่ควรเอียงมากกว่า 0.5 องศา (หรือประมาณ 3 มม. ใน 300 มม.) หากไม่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าว ให้ทำการหล่อหวมกหัวท้ายเสียก่อน โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C 617-84 สำหรับระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่จะนำมาให้คำนวณ หาพื้นที่หน้าตัดให้ใช้ค่าเฉลี่ย จากการวัดสองแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแท่งทดสอบ



รูปที่ 3.1 แสดงภาพการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก

2. การคำนวณ

ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีต จะหาได้จากสูตร

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

(สิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542)

โดยที่ f_c = กำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีต , ksc
 P = แรงกระทำสูงสุดต่อแท่งตัวอย่าง , kg
 A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่วัดตั้งฉากกับแรงกระทำ
 $= \frac{\pi D^2}{4}$

จ. การประเมินผลกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อทดสอบกำลังอัดแล้วต้องดำเนินการประเมินผลโดยทำตามมาตรฐาน ACI 318 R Chapter E Concrete Quality, Mixing, and Placing หรือตามมาตรฐาน วสท. ภาค 3 เกณฑ์กำหนดในการก่อสร้าง ซึ่งมีวิธีการประเมินดังนี้

ค่ากำลังอัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

1. ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดจากการทดสอบ 3 ครั้งติดต่อกัน มากกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (f_c)
2. ค่ากำลังอัดแต่ละครั้งต่ำกว่าค่ากำลังอัด (f_c) ที่ต้องการได้ไม่เกิน 30 กก./ตร.ซม.

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต (Test of Flexural Strength of Concrete)

โดยการทดสอบแรงกระทำจุดเดียวที่กึ่งกลาง (Test of Flexural Strength of Concrete)
(Using Simple Beam with Center – Point Loading)

ก. มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM: C293 -94

ข. วัตถุประสงค์

เป็นการทดสอบหากำลังดัดของคอนกรีตด้วยคานตัวอย่าง ที่มีหน้าตัดขนาดเล็ก (เล็กกว่า 15×15 ซม. ลงมา) ปกติเป็นการหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture)

ค. ขั้นตอนการทดสอบกำลังดัด

1. ให้จัดตัวอย่างคานที่จะทดสอบวางบนจุดที่รองรับ พร้อมกับแรงกระทำที่กึ่งกลาง ดังแสดงในรูป และเดินเครื่องทดสอบเพิ่มแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอโดยกำหนดให้อยู่ประมาณ 3 – 6 % ของกำลังสูงสุดที่คาด กระทั่งคานทดสอบวิบัติ

2. กำลังดัดของคาน หาได้ในรูปของโมดูลัสแตกร้าวสมการต่อไปนี้

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

(ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542)

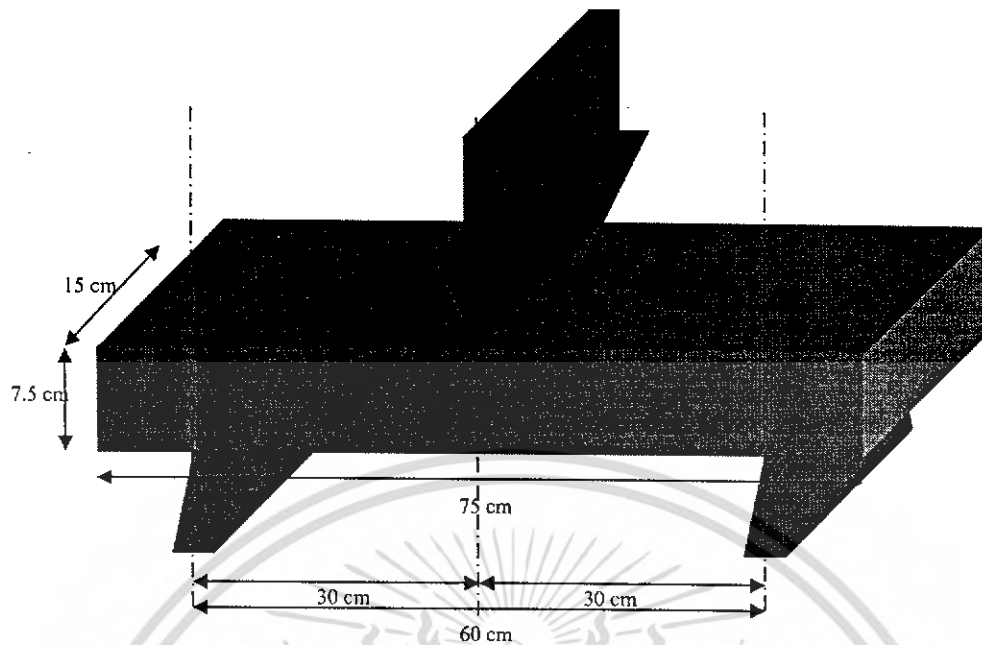
โดยที่

P = แรงกระทำกึ่งกลางคานกระทั่งคานวิบัติ, กก.

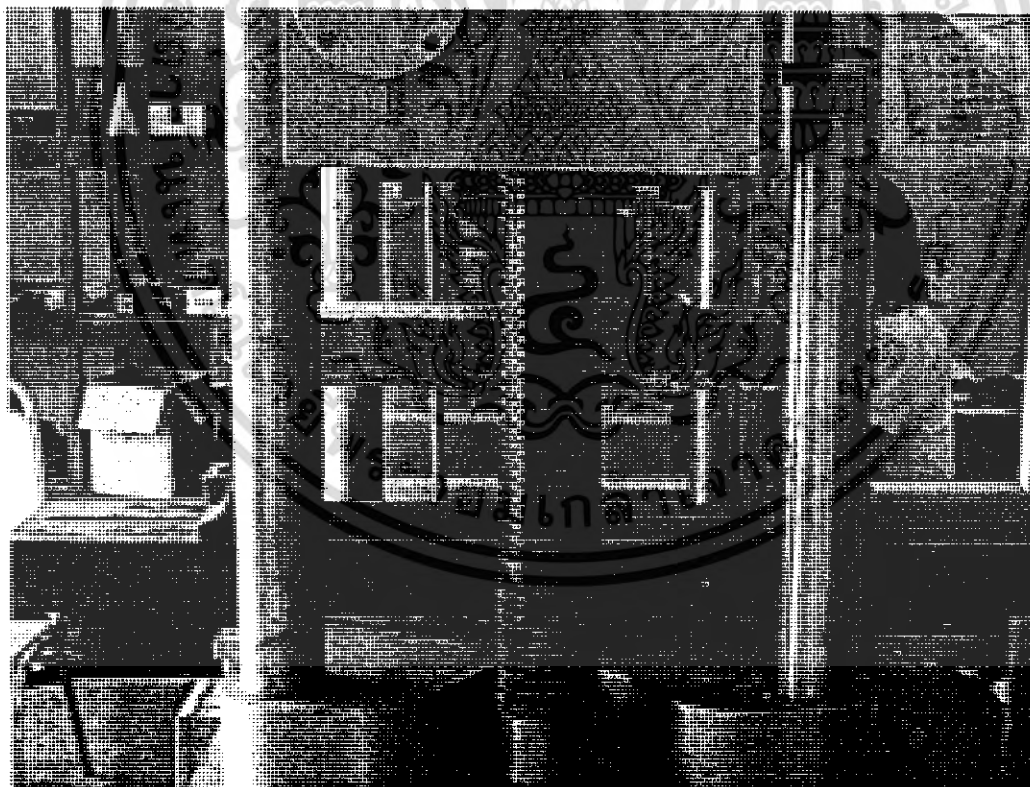
L = ระยะช่วงคานระหว่างที่รองรับ, ซม.

b = ความกว้างเฉลี่ยของคานที่จุดแตกร้าว, ซม.

d = ความลึกเฉลี่ยของคานที่จุดแตกร้าว, ซม.



รูปที่ 3.2 แสดงภาพการวางตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกานคอนกรีต



รูปที่ 3.3 แสดงภาพการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกานคอนกรีต

3.2.3 การทดสอบกำลังดัดของแผ่นมอร์ตาร์ (Test of Flexural Strength of Mortar)

โดยการทดสอบแรงกระทำจุดเดียวที่กึ่งกลาง (Test of Flexural Strength of Mortar)
(Using Simple Beam with Center – Point Loading)

ก. มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานการทดสอบ BS6432: 1984 PART 6; Standard Test Methods for Determining Properties of Glass Fiber Reinforced Cement Material.

ข. วัตถุประสงค์

เป็นการทดสอบหาลำดับดัดของคอนกรีตด้วยคานตัวอย่าง ที่มีหน้าตัดขนาดเล็ก (เล็กกว่า 15 × 15 ซม. ลงมา) ประกิติเป็นการหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture)

ค. ขั้นตอนการทดสอบกำลังดัด

1. ให้จัดตัวอย่างแผ่นมอร์ตาร์ที่จะทดสอบวางบนจุดที่รองรับ พร้อมกับแรงกระทำที่กึ่งกลาง ดังแสดงในรูป และเดินเครื่องทดสอบเพิ่มแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอโดยกำหนดให้อยู่ประมาณ 3 – 6 % ของกำลังสูงสุดที่คาด กระทั่งแผ่นมอร์ตาร์ทดสอบวิบัติ

2. กำลังดัดของคาน หาได้ในรูปของโมดูลัสแตกร้าวสมการต่อไปนี้

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.3)$$

(ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542)

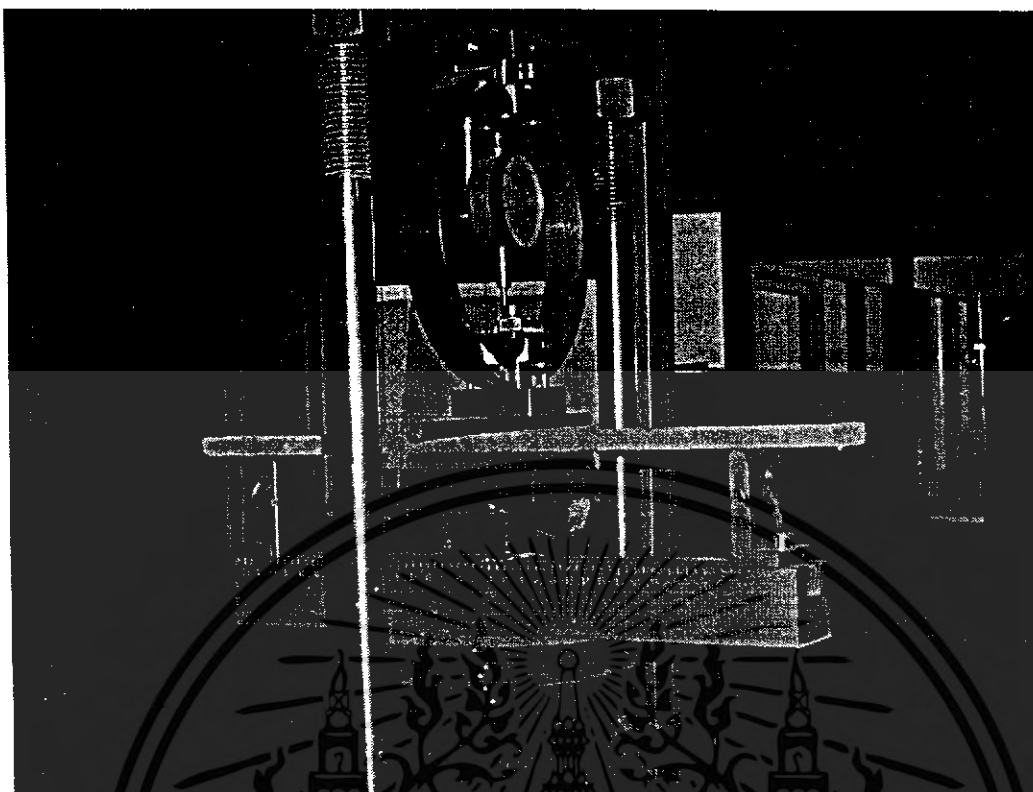
โดยที่

P = แรงกระทำกึ่งกลางคานกระทั่งแผ่นมอร์ตาร์วิบัติ, กก.

L = ระยะช่วงคานระหว่างที่รองรับ, ซม.

b = ความกว้างเฉลี่ยของแผ่นมอร์ตาร์ที่จุดแตกร้าว, ซม.

d = ความลึกเฉลี่ยของแผ่นมอร์ตาร์ที่จุดแตกร้าว, ซม.



รูปที่ 3.4 แสดงภาพการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นมอรัตาร์

3.2.4 การทดสอบความสามารถรับแรงดึงของลวดตาข่าย

ก. มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานของ มอก. 926 -2533 (Standard for Welded Deformed Steel Wire Fabric for Concrete Reinforcement)

ข. วัตถุประสงค์

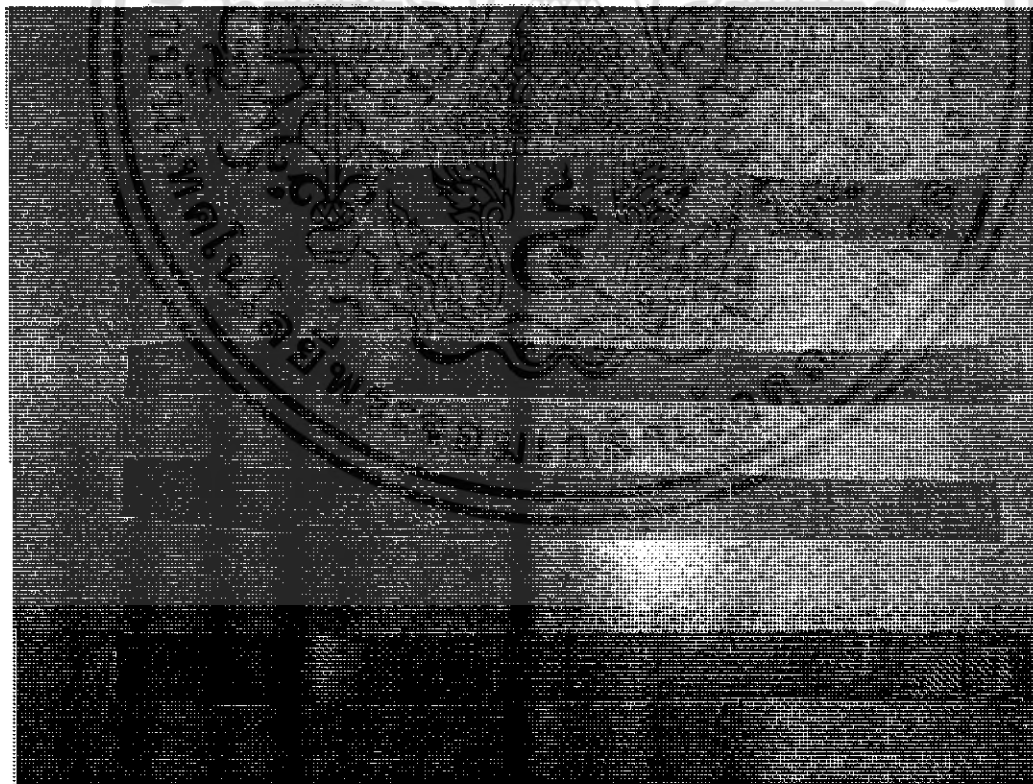
เพื่อทดสอบหากำลังรับแรงดึงของเส้นลวดขนาดหน้าตัดต่าง ๆ ตามระบุซึ่งโดยทั่วไป กำลังรับแรงดึงของเส้นใยโลหะจะอยู่ในช่วง 40 – 400 ksc (A36)

ก. วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. เส้นลวดจากลวดตาข่าย
2. เครื่องทดสอบ UTM (universal Testing Machine)
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. เครื่องมือวัดละเอียด
5. เวอร์เนีย
6. กริมตัดลวด
7. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อม printer ต่อพ่วงเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine

ง. ขั้นตอนการทดสอบ

1. เตรียมลวดตะแกรง โดยฉีกหรือตัดเป็นเส้น ขนาดความยาว 15 cm ทำการทดสอบลวดชนิดละ 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.5 แสดงภาพขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตะแกรงเหล็ก

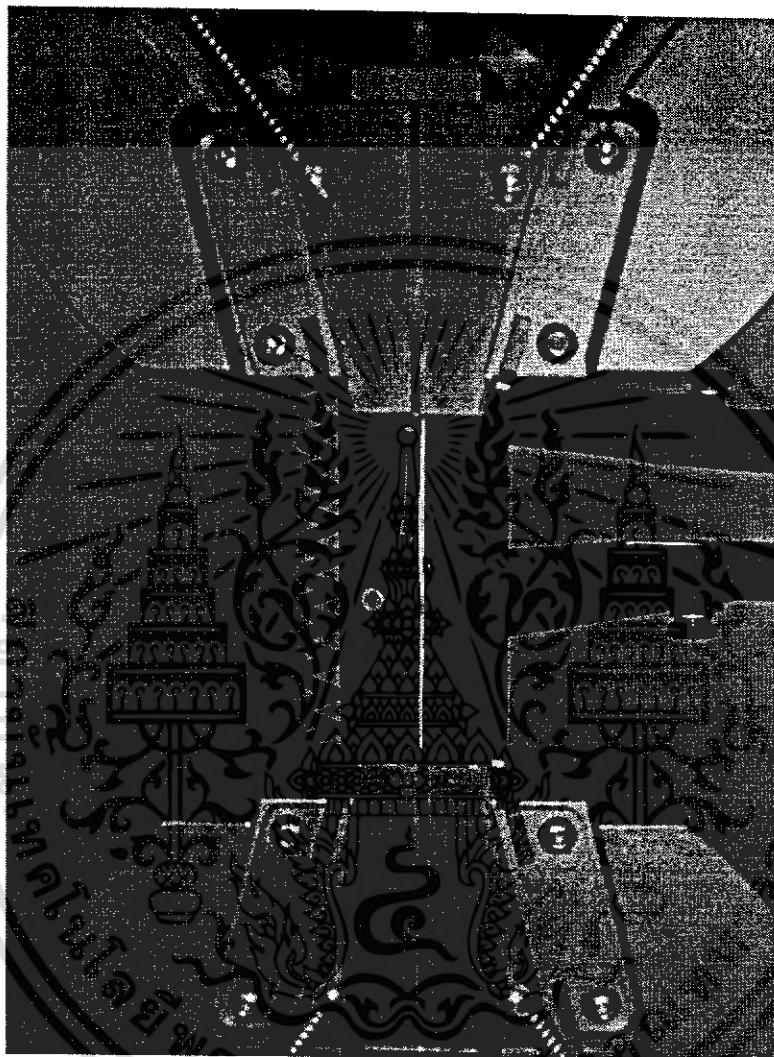
2. เตรียมอุปกรณ์โดยเปลี่ยนหัวจับให้เหมาะกับลวด ตั้งเครื่องคอมพิวเตอร์และ Printer จะวัดขนาดเองโดยอัตโนมัติให้พร้อมทำงาน



รูปที่ 3.6 แสดงภาพหัวจับแถบตะแกรงหลักสำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึง

3. การทดสอบหาความสามารถในการรับแรงดึงของเส้นลวด

4. เมื่อยึดเส้นลวดให้ติดกับหัวจับอย่างมั่นคงแล้ว ทำการเปิดเครื่อง Universal Testing Machine เครื่องจะปล่อยแรงดึงตามความเร็วที่ต้องการตามที่ต้องการที่ได้ตั้งไว้ในโปรแกรม คอมพิวเตอร์ รวมทั้งบนจอ Monitor ของเครื่องคอมพิวเตอร์จะแสดงการ load-deflection ของการทำงาน ในขณะนั้น ขณะเดียวกันก็จะพิมพ์ข้อมูลออกมาทาง printer เมื่อการดึงสิ้นสุด



รูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแถบตะแกรงเหล็ก

5. เมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน เราจะได้ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ ที่ส่งออกมาทาง printer คือค่า load, % strain, elongation, stress, energy

6. การคำนวณค่า tensile strength ของลวดจากสมการ

$$f = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

(ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542)

โดยที่ P = แรงกระทำสูงสุดต่อการทดลอง 1 ตัวอย่าง (ค่าจากคอมพิวเตอร์)
A = พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด, $A = \frac{\pi D^2}{4}$
D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยจากการวัดสองทิศทางตั้งฉากกับที่
กึ่งกลางความสูงของเส้นลวด

3.2.5 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเส้นใยคาร์บอน

ก. มาตรฐานการทดสอบ

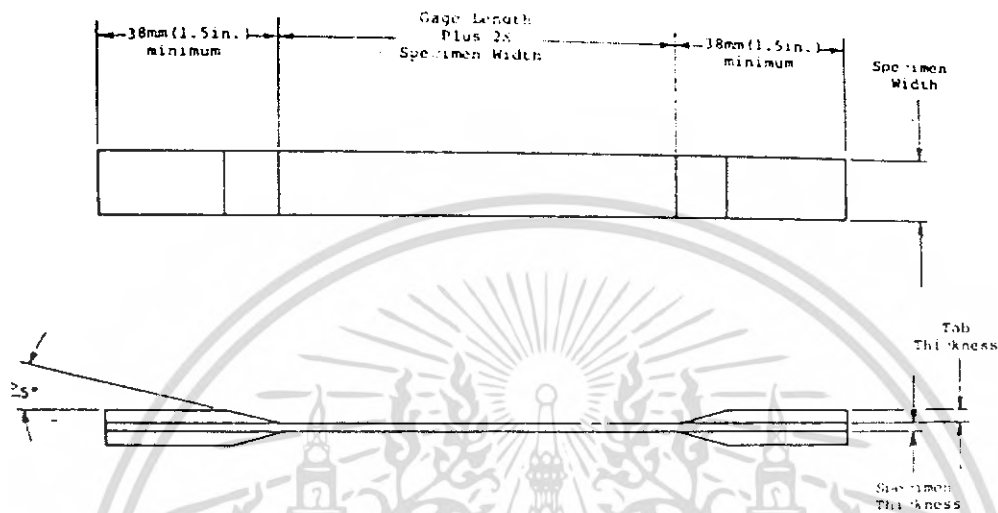
มาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM D-3039

ข. วัสดุและอุปกรณ์

1. Micrometers
2. Testing Machine
3. Fixed member
4. Grips
5. Strain
6. Extension Indicator

ก. ขั้นตอนการทดสอบ

1. ตัดชิ้นส่วนให้ได้ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 3.8 แสดงชิ้นส่วนวัสดุที่ใช้สำหรับทดสอบการรับแรงดึง

2. ความเร็วในการทดสอบ ระหว่าง 16.7 – 33.4 mm/m x s
3. การคำนวณ แรงดึงเท่ากับ

$$S = \frac{P}{bd} \quad (3.5)$$

(ASTM D3039-76 Standard test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composite., 1989)

เมื่อ S = ultimate tensile strength, MPa

P = maximum load, N

b = ความกว้าง, มม.

d = ความหนา, มม.

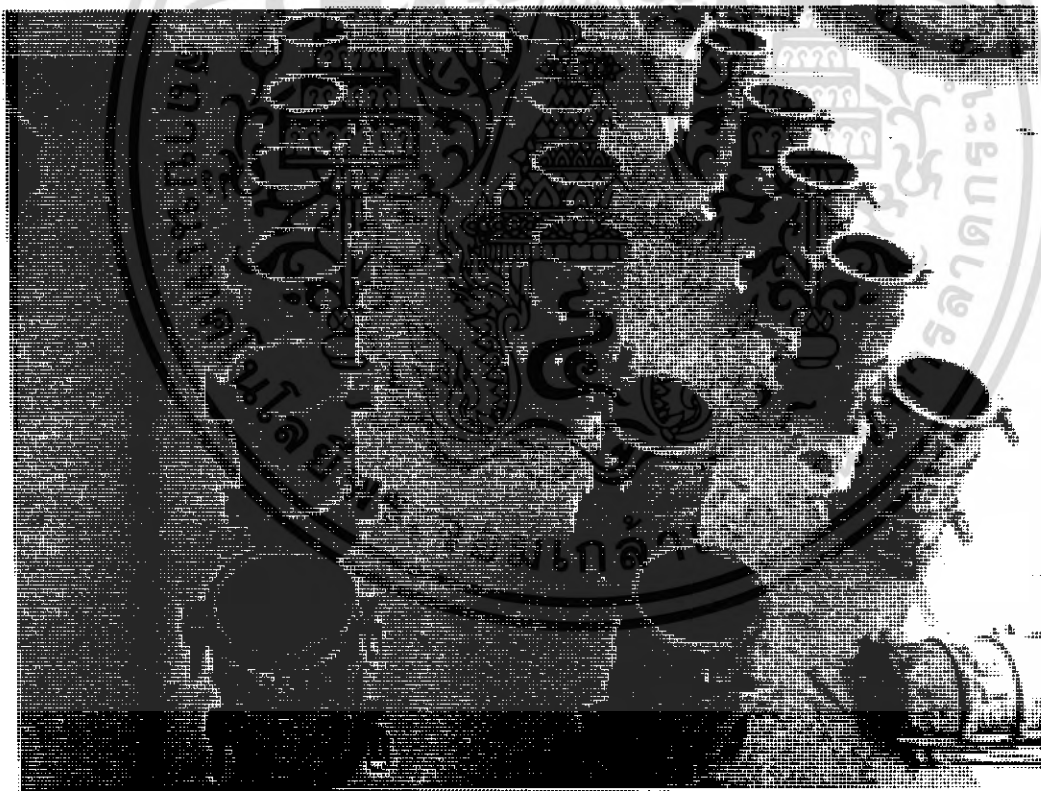
3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก

ก. การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสแบบให้ทั่ว

2. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุด ขณะเทคอนกรีตหรือกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น



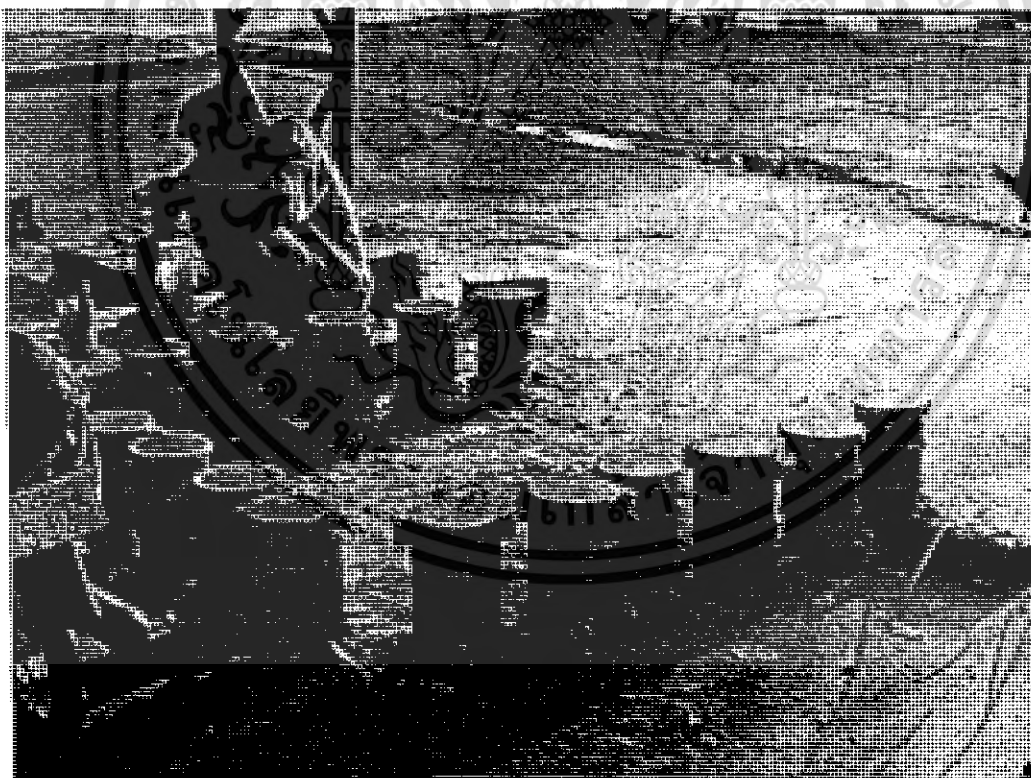
รูปที่ 3.9 แสดงภาพการเตรียมแบบเหล็ก โดยการทำทำความสะอาดและทาน้ำมัน

ข. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

1. สำหรับคอนกรีตที่ให้เครื่องผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่อยู่ตอนกลางที่เทออกมาจากเครื่องผสมใหม่ๆ

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบ และให้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทุ้งเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้ว จึงปาดผิวหน้าให้เรียบ

3. ทั้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้ในร่มเฉย ๆ ประมาณ 24 ชม. จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่มโดยแช่ในถังบ่มจนถึงอายุที่ต้องการทดสอบและการทดสอบก่อนตัวอย่างจะแห้งสนิท ตัวอย่างคอนกรีตที่จะนำมาทดสอบ 1 ชุด ควรมีอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง



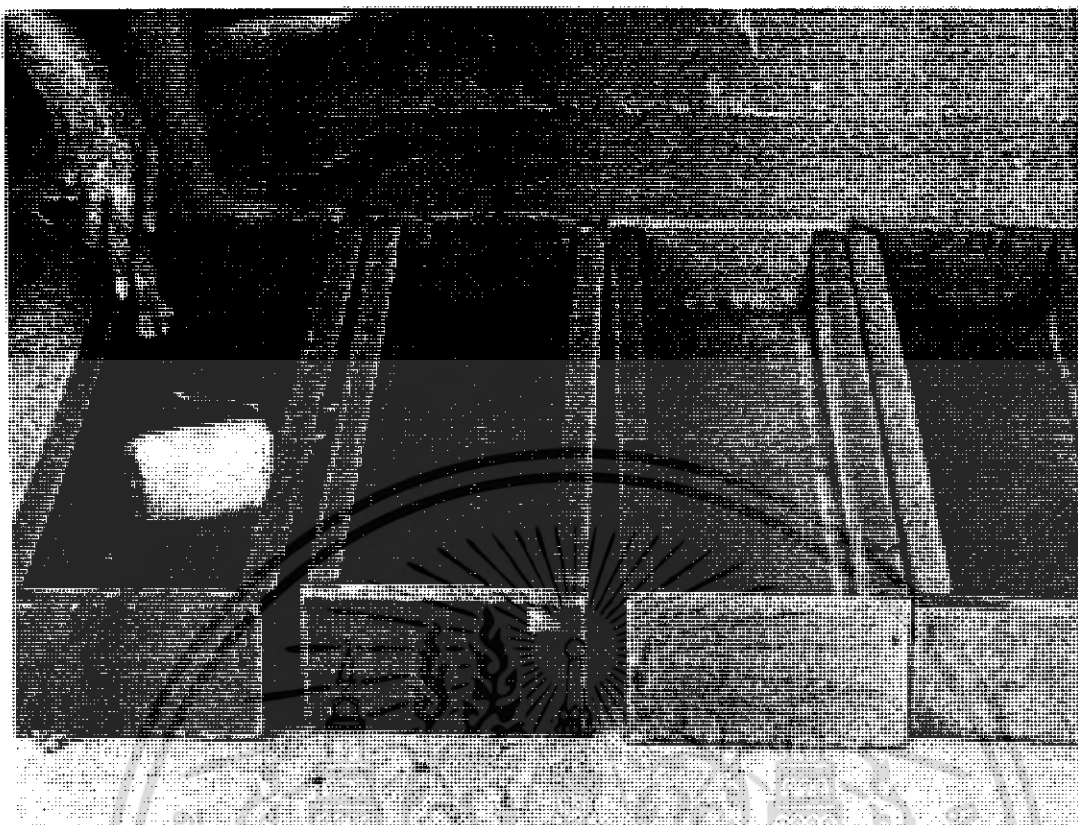
รูปที่ 3.10 แสดงภาพการปาดผิวให้แบบเหล็กให้เรียบ

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต

ก. เตรียมไม้แบบสำหรับหล่อคอนกรีตคานขนาด $7.5 \times 15 \times 75$ ซม. และแบบเหล็กทรงกระบอก โดยไม้แบบจะทำการแช่น้ำทิ้งไว้ก่อนเป็นเวลา 1 วัน ให้ไม้แบบชุ่มน้ำไม่ดูดซึมน้ำคอนกรีต และทำการทาน้ำมัน แบบเหล็กทรงกระบอก ทำความสะอาดและทาน้ำมัน



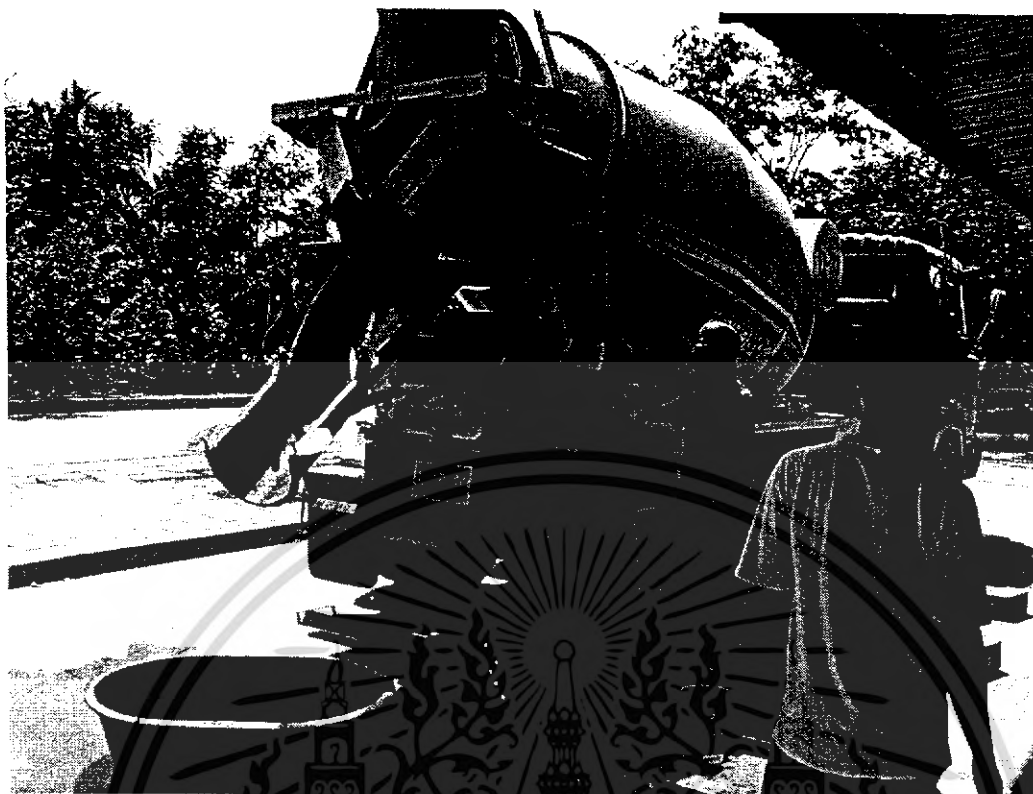
รูปที่ 3.11 แสดงภาพไม้แบบที่ทำการแช่น้ำแล้ว



รูปที่ 3.12 แสดงภาพการทาน้ำมันที่ไม้แบบ

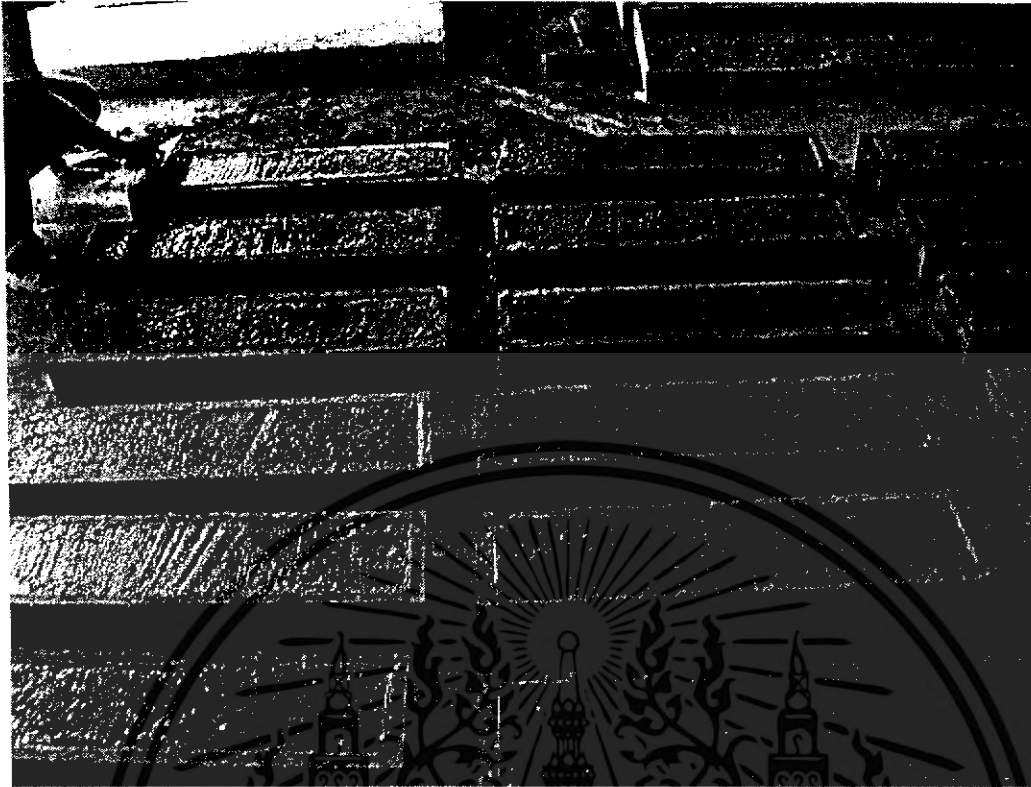
ข. คอนกรีต จะทำการผสมจากโรงผสม โดยใช้คอนกรีตของบริษัท โออาร์ซี จำกัด กำกับการรับแรงอัดคอนกรีตที่ออกแบบไว้ ที่ 28 วัน f_c' เท่า 240 ksc เหตุผลที่ใช้คอนกรีตสำเร็จรูปจากโรงผสม เนื่องจาก

1. คอนกรีตที่ใช้ปริมาณ 0.5 ลูกบาศก์เมตร แต่เครื่องผสมคอนกรีตของที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธานั้น สามารถผสมคอนกรีตต่อครั้งได้เท่ากับ 0.3 ลูกบาศก์เมตร จึงต้องควบคุมตัวแปรให้คอนกรีตเป็นส่วนผสมเดียวกัน
2. หากทำการผสมคอนกรีตที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธานั้นจากการผสมที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำการสั่งคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อเป็นการตัดปัญหาในเรื่อง ความสม่ำเสมอของคอนกรีต



รูปที่ 3.13 แสดงภาพคอนกรีตสำเร็จรูปที่ผสมโดยรถผสมคอนกรีตสำเร็จรูป

3. ทำการเทคอนกรีตลงในแบบไม้ และแบบเหล็ก โดยแบ่งเทเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นทำการตักคอนกรีตด้วยเหล็ก ประมาณ 25 ครั้งให้ทั่ว เคาะแบบให้คอนกรีตไม่เกิดโพรง และปาดหน้าให้เรียบ
4. ใช้กระสอบชุบน้ำหมาด ๆ ปิดแบบไว้ ทั้งไว้แบบเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะแบบคอนกรีต นำไปบ่มในน้ำสะอาดเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 3.14 แสดงภาพการปาดหน้าผิวคอนกรีตให้เรียบ

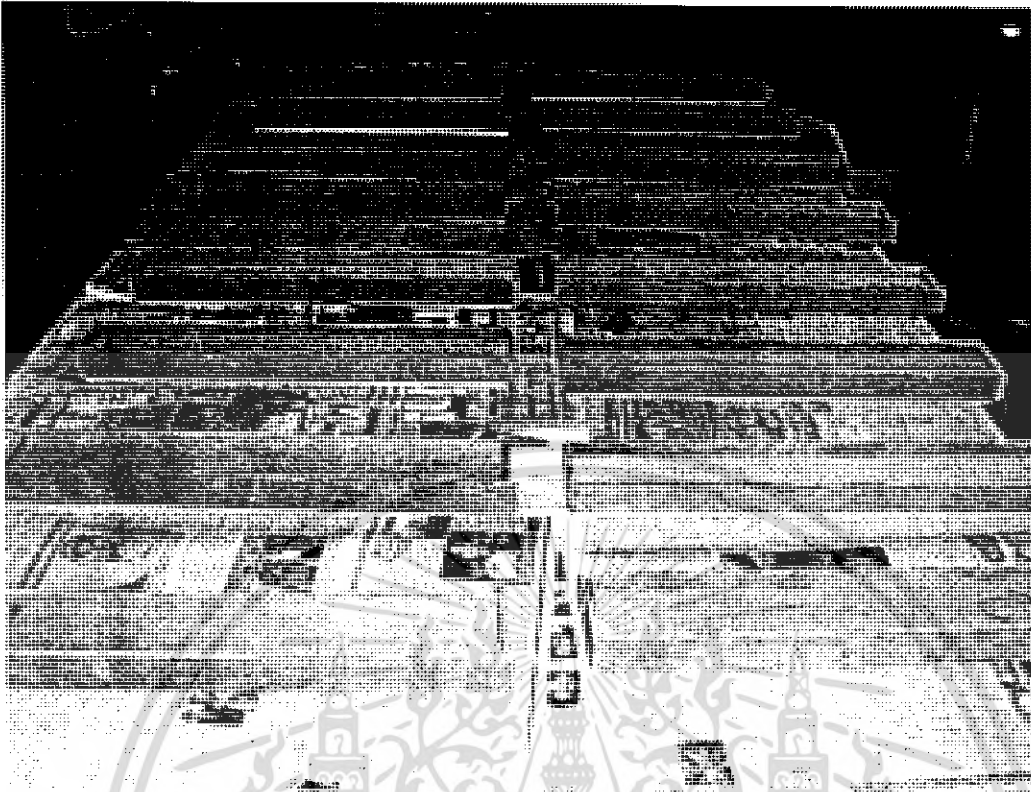
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของแผ่นซีเมนต์มอร์ตาร์

ก. ขั้นตอนการเตรียมไม้แบบซีเมนต์มอร์ตาร์

ไม้แบบที่ทำเป็นไม้แบบ หน้า 1 นิ้ว หน้ากว้าง 6 นิ้ว นำมาตัดให้ได้ตามแบบ สิ่งที่ต้อง

เตรียมคือ

1. คำนวณไม้แบบที่ใช้
2. เตรียมวัสดุการทำแบบ เช่น ดินสอพูนไม้ ดลัดเมตร เลื่อยไฟฟ้า ตะปู ก้อน และอื่น ๆ
3. วัดและตัดตามแบบที่ออกแบบไว้
4. ตีตะปูไม้แบบติดกัน



รูปที่ 3.15 แสดงภาพการทำไม้แบบสำหรับแผ่นพื้นซีเมนต์มอร์ตาร์ ขนาด 1 X 5 X 40 ซม.

ข. ขั้นตอนการเทซีเมนต์มอร์ตาร์

1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับงานเทคอนกรีตต่าง ๆ เช่น เกรียงฉาบ กระบะผสม ซีเมนต์มอร์ตาร์ ถังมือ ถังใส่น้ำ

2. เตรียมวัสดุสำหรับทำซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง ปูนต่อทราย (โดยน้ำหนัก) 1 : 3 ใช้เปอร์เซ็นต์ของน้ำ ประมาณ 10 %

3. การผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วยมือ ให้คลุกเคล้าซีเมนต์และทรายเข้าด้วยกันบน ภาชนะหรือ พื้นที่สะอาด ราบเรียบ และไม่ดูดซึมน้ำ เมื่อผสมกันได้ที่แล้วให้เกลี่ยรวมกันเป็นกองและทำ แอ่งตรงกลาง ค่อย ๆ รินน้ำด้วยปริมาณที่คำนวณมาได้ลงตรงกลางแอ่ง ใช้เกรียงเหล็กตักส่วนผสม รอบ นอกเข้าไปในแอ่งให้หมดภายใน 30 วินาที แล้วจึงปล่อยทิ้งให้ส่วนผสมดูดซึมน้ำอีก 30 วินาที แล้วจึง ใช้มือที่สวมถุงมือยางผสมคลุกเคล้าในเป็นมอร์ตาร์ ภายในเวลาประมาณ 90 วินาที

4. การบรรจุซีเมนต์อร์ตาร์ลงในไม้แบบที่เตรียมเอาไว้ โดยไม้แบบต้องทำให้การแช่น้ำไว้ก่อน เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำในซีเมนต์อร์ตาร์ ทำการทำอร์ตาร์ในแบบให้แน่น ไม้ให้เกิดโพรงอากาศ

5. นำผ้าชุบน้ำหมาด ๆ มาปิดคลุม ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงแกะแบบ

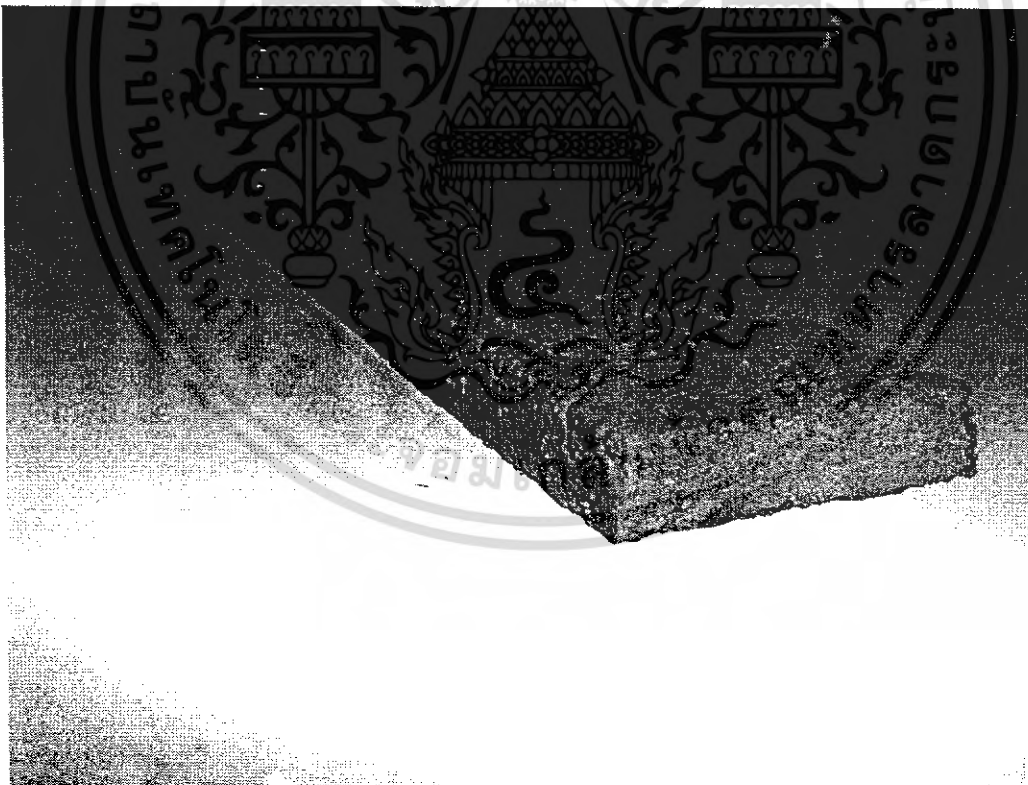
6. นำไปบ่มในน้ำสะอาดให้ครบอายุที่ 28 วันตามต้องการ



รูปที่ 3.16 แสดงวัสดุปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำสำหรับทำซีเมนต์อร์ตาร์



รูปที่ 3.17 แสดงภาพการบรรจุชิ้นเนื้อซีเมนต์ลงในเบกที่ใส่โพลีเอทิลีนไว้แล้ว และทำการจัดให้เป็น



รูปที่ 3.18 แสดงภาพแผ่นซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แกะแบบแล้ว หลังจากเทไว้แล้ว 24 ชั่วโมง

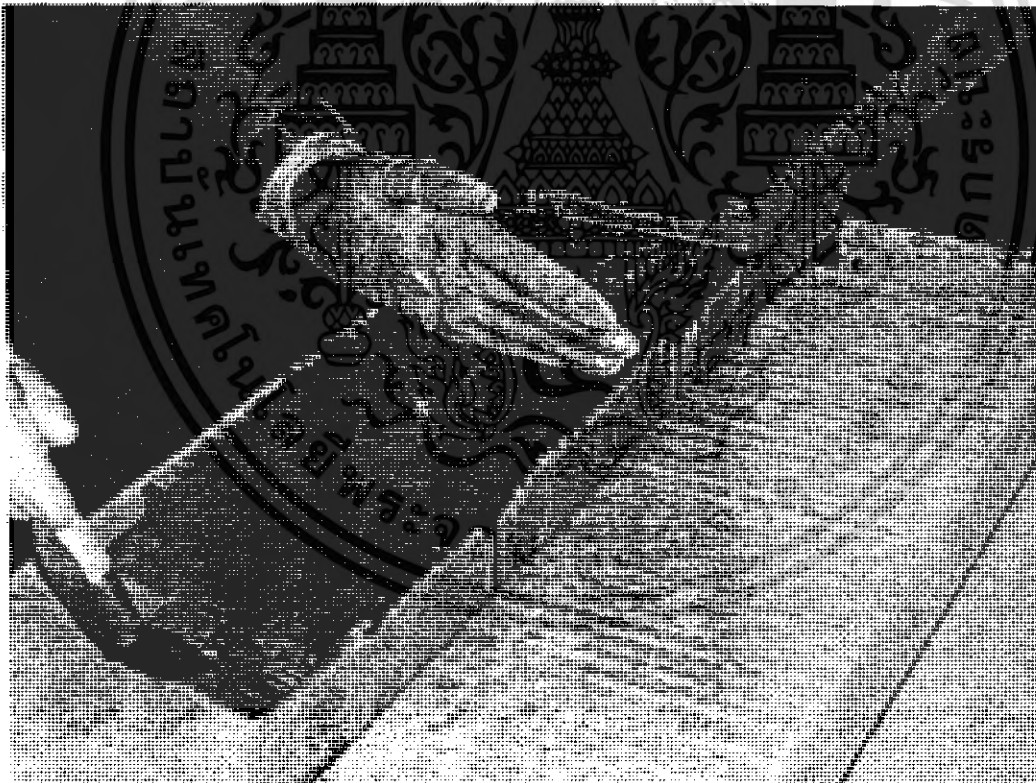
3.3.4 การเตรียมตัวอย่างฉาบวัสดุผสม

3.3.4.1 การติดแผ่นเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็ก

1. ตัด แผ่นเส้นใยคาร์บอนหรือตะแกรงเหล็ก ตามขนาดที่ต้องการ
2. เตรียมผิวคอนกรีตให้สะอาด และเรียบ บริเวณที่เป็นหลุมให้ปรับให้เรียบ

ด้วย Polymer Modified cement Mortar

3. ผสมน้ำยา Epoxy อัตราส่วน $A : B = 3 : 1$
4. ทาน้ำยา Epoxy ลงบนผิวคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่เตรียมไว้เพื่อเป็น Primer ปลดทิ้งไว้ประมาณ 20 – 30 นาที เป็นการให้ Epoxy ให้ซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต หรือมอร์ตาร์



รูปที่ 3.19 แสดงการทากาวน้ำยาอีพอกซีเป็น Primer พื้นคอนกรีต

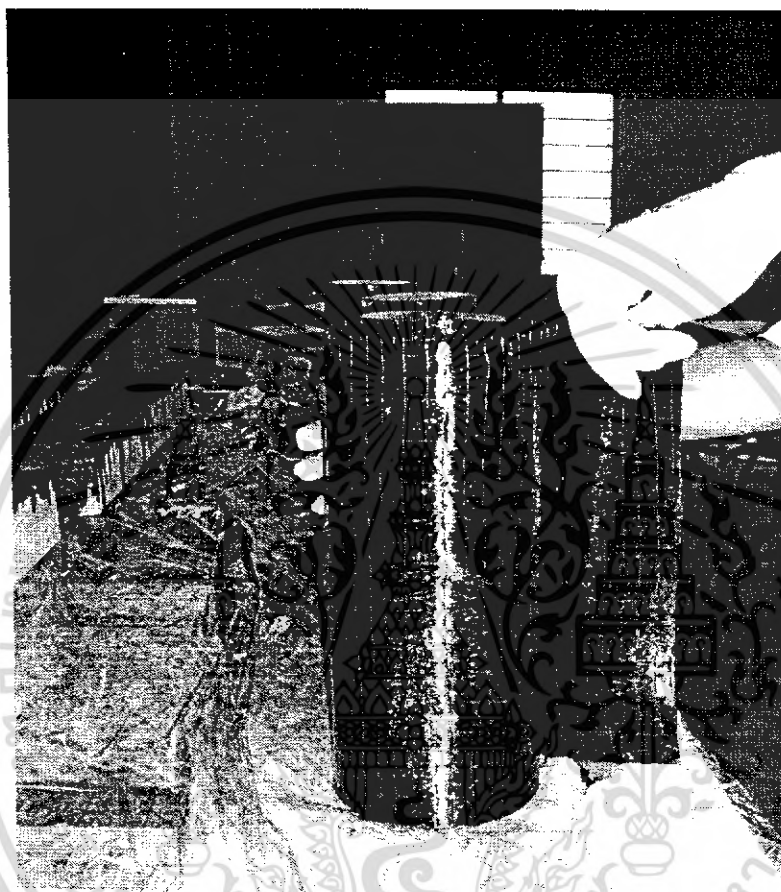
5. หลังจากทาน้ำยา Epoxy ลงบนผิวคอนกรีตแล้ว ให้นำ Epoxy ทาลงบนแผ่นตัวอย่างที่จะทดสอบ ทั้ง 2 ด้าน เพื่อเป็นการ Saturated โดยจะต้องทำให้ ซึมซับ Epoxy ให้ทั่วแผ่น ทั้ง 2 ด้าน



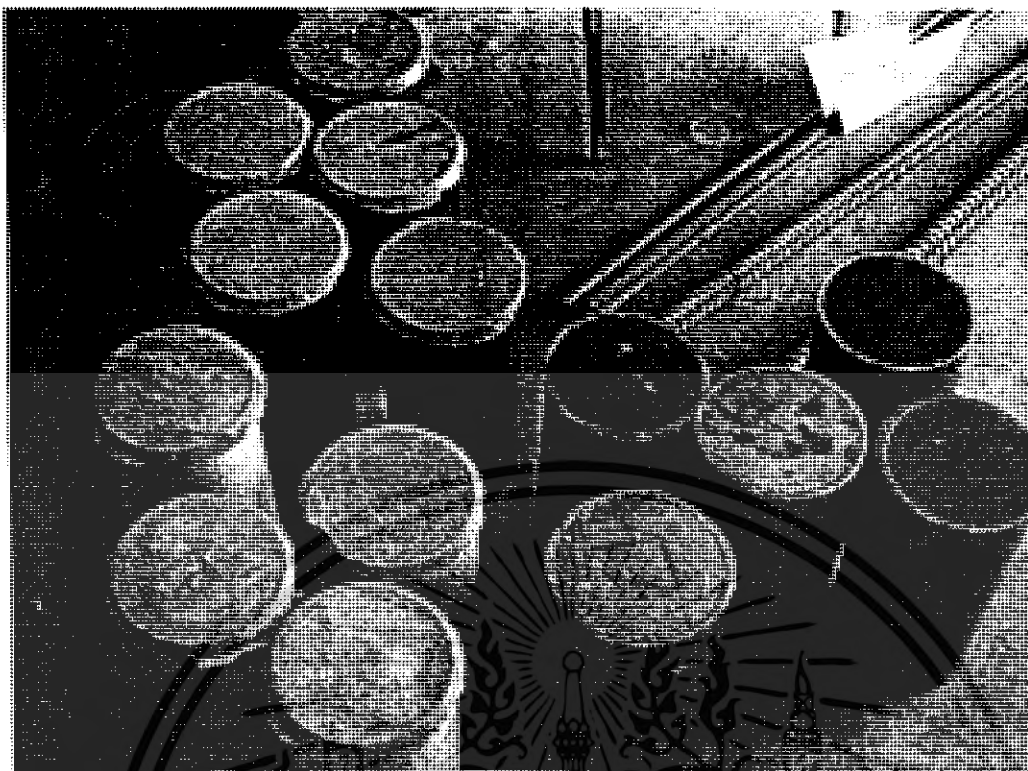
รูปที่ 3.20 แสดงภาพการทาน้ำยาอีพอกซีลงบนแผ่นเส้นใยให้ชุ่มทั้งสองด้าน

6. ทำการติด แผ่นเส้นใยคาร์บอนหรือตะแกรงเหล็ก ลงบนผิวคอนกรีต และ ริดด้วยลูกกลิ้ง เพื่อเป็นการไล่ฟองอากาศ กรณี Wrapping (พันรอบ) ให้รัด แผ่นตัวอย่างไปทางเดียวกัน ทิศทางเดียว และให้มีระยะห่างประมาณ 15 cm

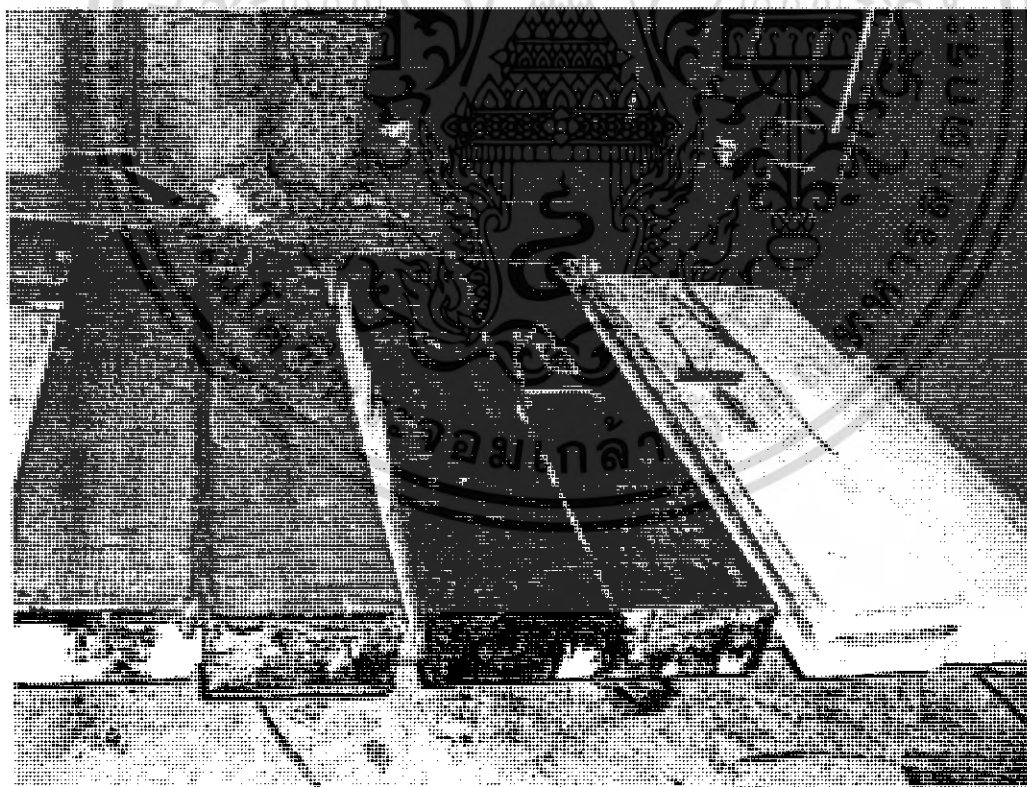
7. ระยะเวลาการบ่มอีพอกซี (Curing time) ประมาณ 48 – 72 ชั่วโมง



รูปที่ 3.21 แสดงภาพการติดแผ่นเส้นใยลงบนก้อนคอนกรีตตัวอย่าง



รูปที่ 3.22 แสดงภาพตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกที่ทำการฉาบด้วยวัสดุผสม



รูปที่ 3.23 แสดงภาพตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตที่ทำการฉาบด้วยวัสดุผสม



รูปที่ 3.24 แสดงภาพตัวอย่างทดสอบแผ่นซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ทำการฉาบด้วยวัสดุผสม

3.3.5 การคำนวณปริมาณการเสริมเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็กในคานคอนกรีต

โดยที่

ขนาดของคานคอนกรีต 7.5 x 15 x 75 ซม.

ค่าการอัดประลัยของคอนกรีต $f_c = f_c' = 240$ ksc

กำลังการรับแรงดึงของเหล็ก $f_s = f_y = 7807$ ksc (ตะแกรงลวดกรงไก่

เล็ก ช่องเปิด 0.5 cm)

กำลังการรับแรงดึงของเส้นใยคาร์บอน = 10620 ksc

การคำนวณการเสริมเหล็กหรือเส้นใยคาร์บอน ให้เป็นกรณีของ Single Reinforce คือ Tensile Stress Control

ค่า Elastic modulus ของคอนกรีต เหล็ก และเส้นใยคาร์บอน

$$E_c = 15,210 \sqrt{f_c'} \quad (3.6)$$

$$= 2.20 \times 10^4 \text{ ksc}$$

$$E_c = 2.01 \times 10^4 \text{ ksc}$$

$$E_{\text{คาร์บอน}} = 2.3 \times 10^4 \text{ ksc}$$

หาค่า n

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.7)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 9.14$$

$$n_{\text{เส้นใยคาร์บอน}} = \frac{E_f}{E_c} = 10.45$$

หาค่า k

$$k = \frac{n f_c}{n f_c + f} \quad (3.8)$$

$$k = \frac{n f_c}{n f_c + f_s} = 0.219$$

$$k_r = \frac{n f_c}{n f_c + f_r} = 0.191$$

หาค่า j

$$j = 1 - \frac{k}{3} \quad (3.9)$$

$$j_s = 1 - \frac{k}{3} = 0.927$$

$$j_r = 1 - \frac{k}{3} = 0.936$$

หาค่า R

$$R = \frac{1}{2} f_c k j \quad (3.10)$$

$$R_s = \frac{1}{2} f_c k j_s = 24.36$$

$$R_r = \frac{1}{2} f_c k j_r = 21.45$$

การคำนวณให้ค่าโมเมนต์ที่สามารถรับได้ของคอนกรีตเท่ากับค่าโมเมนต์ที่สามารถรับได้ของเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็ก

$$M_{max} = M_c = R b d^2 \quad (3.11)$$

ดังนั้นต้องเสริมเหล็ก เพื่อให้

$$A_s f_y (j d) < R b d^2 \quad (3.12)$$

$$\therefore A_s < \frac{R b d^2}{f_y j d} \quad (3.13)$$

$$A_s < 0.38 \text{ cm}^2$$

$$\therefore A_s < \frac{R b d^2}{f_y j d} \quad (3.14)$$

$$A_s < 0.24 \text{ cm}^2$$

นั่นคือ

ต้องเสริมตะแกรงเหล็ก ไม่เกิน 0.38 ตารางเซนติเมตร

ต้องเสริมเส้นใยคาร์บอน ไม่เกิน 0.24 ตารางเซนติเมตร

3.3.6 การคำนวณปริมาณการเสริมเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็กในแผ่นพื้นซีเมนต์บอร์

ดาร์

โดยที่

ขนาดของคานาคอนกรีต 1 x 5 x 40 ซม.

ค่าการอัดประลัยของคอนกรีต $f_c = f_c' = 240$ ksc

กำลังการรับแรงดึงของเหล็ก $f_s = f_y = 7807$ ksc

(ตะแกรงลวดกรงไก่เล็ก ช่องเปิด 0.5 cm)

กำลังการรับแรงดึงของเส้นใยคาร์บอน = 10620 ksc

การคำนวณการเสริมเหล็กหรือเส้นใยคาร์บอน ให้เป็นกรณีของ Single Reinforce คือ Tensile Stress Control

ค่า elastic modulus ของคอนกรีต เหล็ก และเส้นใยคาร์บอน

$$E_c = 15,210 \sqrt{f_c'} \\ = 2.20 \times 10^5 \text{ ksc}$$

$$E_c = 2.01 \times 10^5 \text{ ksc}$$

$$E_{\text{คาร์บอน}} = 2.3 \times 10^5 \text{ ksc}$$

หาค่า n

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} = 9.14$$

$$n_{\text{เส้นใยคาร์บอน}} = \frac{E_f}{E_c} = 10.45$$

หาค่า k

$$k_s = \frac{n f_c}{n f_c + f_s} = 0.219$$

$$k_f = \frac{n f_c}{n f_c + f_f} = 0.191$$

หาค่า j

$$j_s = 1 - \frac{k}{3} = 0.927$$

$$j_r = 1 - \frac{k}{3} = 0.936$$

หาค่า R

$$R_s = \frac{1}{2} f_c k j_s = 24.36$$

$$R_r = \frac{1}{2} f_c k j_r = 21.45$$

การคำนวณให้ค่าโมเมนต์ที่สามารถรับได้ของคอนกรีตเท่ากับค่าโมเมนต์ที่สามารถรับได้
ของเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็ก

$$M_{max} = M_c = R b d^2$$

ดังนั้นต้องเสริมเหล็ก เพื่อให้

$$A_s f_s (j d) < R b d^2$$

$$\therefore A_s < \frac{R b d^2}{f_s j d}$$

$$A_s < 0.0168 \text{ cm}^2$$

$$\therefore A_r < \frac{R b d^2}{f_r j d}$$

$$A_r < 0.0108 \text{ cm}^2$$

นั่นคือ ต้องเสริมตะแกรงเหล็ก ไม่เกิน 0.0168 ตารางเซนติเมตร

ต้องเสริมเส้นใยคาร์บอน ไม่เกิน 0.0108 ตารางเซนติเมตร

3.4 การศึกษาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ

3.4.1 การใช้งานของวัสดุผสมสำหรับงานเสริมแรงคอนกรีต

เส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็กเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งสะดวกในการขนย้าย สามารถจัดเก็บสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากสามารถพับหรือม้วนเก็บได้จึงประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บ

สำหรับการใช้งานเสริมแรงคอนกรีต จะเสริมในลักษณะช่วยของค้ำอาคารรับแรงดึง นั่นคือสำหรับคอนกรีตทรงกระบอกนั้น จะใช้เสริมแรงอัดของคอนกรีตโดยการใช้เส้นใยคาร์บอนหรือตะแกรงเหล็กพันรอบทรงกระบอกไม่ให้คอนกรีตแบ่งตัวแตกออก สำหรับงานคอนกรีตและแผ่นพื้นมอร์ตาร์จะเสริมแรงในส่วนที่เกิดแรงดึงขึ้น คือส่วนของท้องคาน

การใช้งานจะใช้เส้นใยคาร์บอนหรือตะแกรงเหล็ก เป็นตัวช่วยรับแรงดึงของคอนกรีต โดยมีอีพอกซีเรซินเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเส้นใยคาร์บอนหรือตะแกรงเหล็กกับคอนกรีต

3.4.2 ราคาวัสดุ

ราคาของวัสดุผสมในที่นี้ได้ทำการสำรวจราคาต่อหน่วยมาใช้ ในการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของวัสดุผสมที่นำไปเสริมแรง ซึ่งมีรายการวัสดุดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงราคาวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับเสริมแรงคอนกรีต

รายการ	หน่วย	ราคาต่อหน่วย
ตะแกรงลวดกรงไก่ขนาดตาเล็ก	ตรม.	50
ตะแกรงลวดกรงไก่ขนาดตากลาง	ตรม.	70
ตะแกรงลวดกรงไก่ขนาดตาใหญ่	ตรม.	90
ตะแกรงสแตนเลส 8#20	ตรม.	889
ตะแกรงสแตนเลส 20#30	ตรม.	370
ตะแกรงสแตนเลส 50#36	ตรม.	445
ตะแกรงสแตนเลส 16#23	ตรม.	852
ตะแกรงสแตนเลส 20#25	ตรม.	740
ตะแกรงสแตนเลส 40#37	ตรม.	1,037
ตะแกรงสแตนเลส 30#32	ตรม.	445
เส้นใยคาร์บอน	ตรม.	2,000
อีพอกซี	กก.	400

เมื่อพิจารณาราคาของวัสดุผสมที่ใช้ในการเสริมแรงคอนกรีตและมอร์ตาร์ จะได้ราคาที่ใช้ในการเสริมแรงดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงราคาของวัสดุผสมที่ใช้ในการเสริมแรงคอนกรีตและมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	วัสดุผสม				
	fiber phase	ราคา	matrix phase	ราคา	ราคารวม
คอนกรีตทรงกระบอก	เส้นใยคาร์บอน	282.74	อีพอกซี	124.41	407.15
คอนกรีตทรงกระบอก	ตะแกรงเหล็ก	21.21	อีพอกซี	186.61	207.82
คอนกรีตคานขนาด 7.5 × 15 × 75 cm	เส้นใยคาร์บอน	180.00	อีพอกซี	79.20	259.20
คอนกรีตคานขนาด 7.5 × 15 × 75 cm	ตะแกรงเหล็ก	13.50	อีพอกซี	79.2	92.7
มอร์ตาร์แผ่นพื้นขนาด 1 × 5 × 40 cm	เส้นใยคาร์บอน	30.00	อีพอกซี	13.20	43.20
มอร์ตาร์แผ่นพื้นขนาด 1 × 5 × 40 cm	ตะแกรงเหล็ก	2.25	อีพอกซี	19.80	22.05

บทที่ 4

ผลการทดสอบวัสดุ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน

(<http://www.fyfeco.com>)

TYPICAL DRY FIBER PROPERTIES	
Tensile Strength	37,900 ksc
Tensile Modulus	2.3×10^6 ksc
Ultimate Elongation	1.7%
ความหนาแน่น	1.74 g/cm^3
Weight per sq. yd.	300 g/m^2
Fiber thickness	0.127 mm

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอน

(<http://www.fyfeco.com>)

COMPOSITE GROSS LAMINATE PROPERTIES			
PROPERTY	ASTM METHOD	TYPICAL TEST VALUE	DESIGN VALUE*
Ultimate tensile strength in primary fiber direction	D-3039	10,620 ksc	9,030 ksc
Elongation at break	D-3039	1.05%	1.05%
Tensile Modulus	D-3039	1.02×10^6 ksc	8.69×10^5 ksc
Ultimate tensile strength 90 degrees to primary fiber	D-3039	0	0
Laminate Thickness		0.17 mm	0.17 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบอีพอกซี (มาตรฐาน ASTM D-638 และ ASTM D-790)

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอีพอกซี

(<http://www.fyfeco.com>)

EPOXY MATERIAL PROPERTIES		
Curing Schedule 72 hours post cure at 60 °C.		
PROPERTY	ASTM METHOD	TYPICAL TEST VALUE*
Tg 60 °C. Post Cure (24 hours)	D-4065	82 °C
Tensile Strength	D-638 Type 1	724 ksc
Tensile Modulus	D-638 Type 1	3.18 X 10 ⁴ ksc
Elongation Percent	D-638 Type 1	5.0%
Flexural Strength	D-790	1,234 ksc
Flexural Modulus	D-790	3.12 X 10 ⁴ ksc

4.3 ผลการทดสอบการรับกำลังดึงของแถบตะแกรงเหล็ก

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแถบตะแกรงเหล็ก

วัสดุทดสอบ	Stress (ksc)
ตะแกรงลวดกรงไก่ขนาดตาเล็ก	7,871
ตะแกรงลวดกรงไก่ขนาดตากลาง	6,511
ตะแกรงลวดกรงไก่ขนาดตาใหญ่	6,062
ตะแกรงสแตนเลส 8#20	4,958
ตะแกรงสแตนเลส 20#30	8,119
ตะแกรงสแตนเลส 50#36	7,050
ตะแกรงสแตนเลส 16#23	5,350
ตะแกรงสแตนเลส 20#25	6,926
ตะแกรงสแตนเลส 40#37	8,394
ตะแกรงสแตนเลส 30#32	5,810

4.4 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก

Spec. No.	Diameter (cm)	Cross Section (cm ²)	Height (cm)	weight (kg)	Ultimate load (kgf)	Compressive Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/m ³)	Remarks
-----------	---------------	----------------------------------	-------------	-------------	---------------------	----------------------------	--	---------

Concrete เสริม Steel-Epoxy Composite

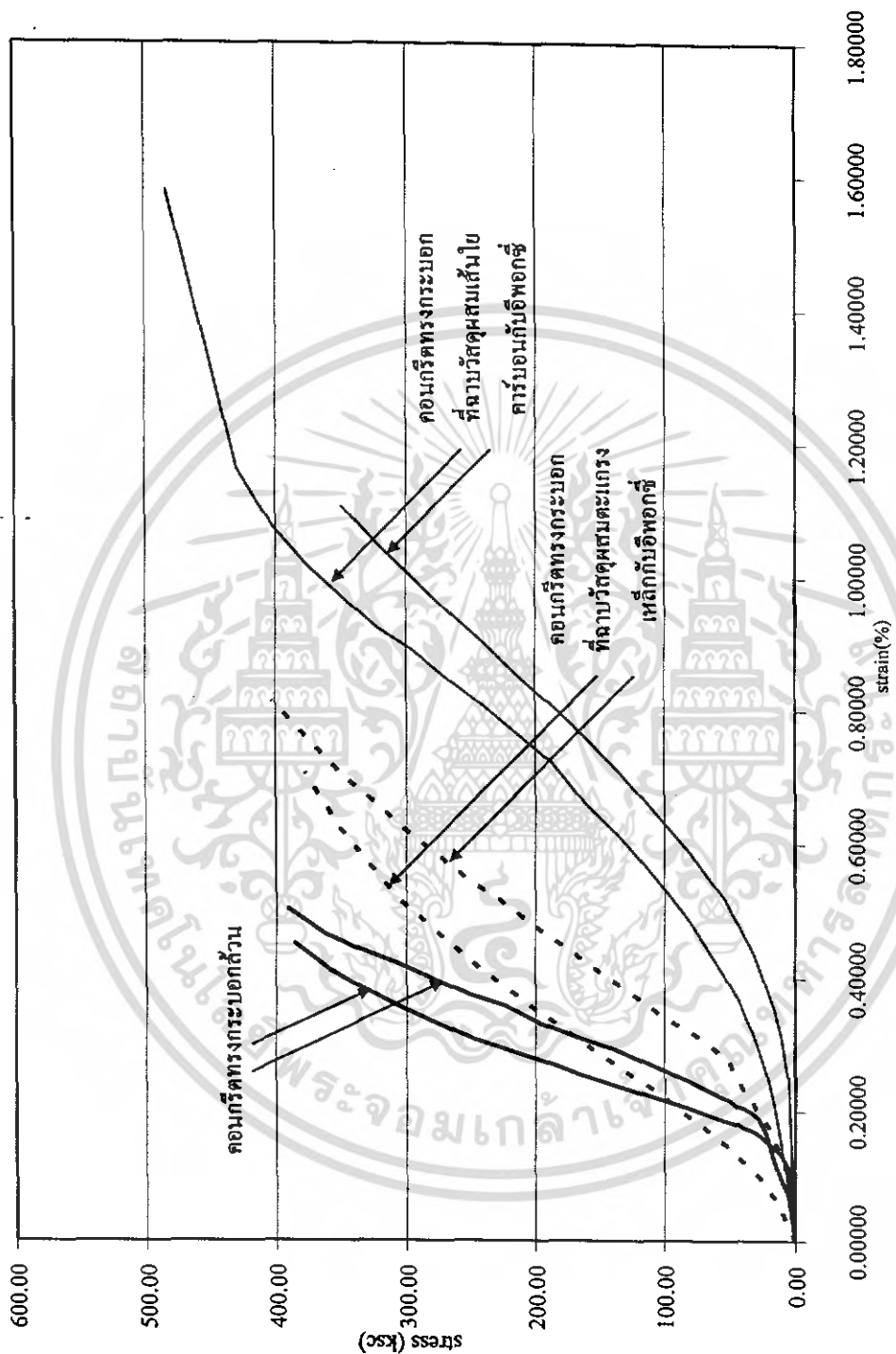
12	15.70	193.59	30.10	13.15	79,300	409.6	2,257	
13	15.90	198.56	30.20	13.20	79,720	401.5	2,201	
14	15.90	198.56	29.90	13.11	84,600	426.1	2,208	
15	15.90	198.56	29.90	13.33	81,220	409.1	2,245	
16	15.80	196.07	30.10	13.50	82,690	421.7	2,288	
average					81,506	413.6	2,240	

Concrete เสริม Carbon fiber -Epoxy Composite

6	15.40	186.27	30.20	12.19	63,590	341.4	2,167	ตัดออก
7	15.40	186.27	30.30	12.21	67,390	361.8	2,163	ตัดออก
8	15.40	186.27	30.30	12.25	91,450	491.0	2,171	
9	15.50	188.69	30.30	12.29	86,750	459.7	2,150	
10	15.40	186.27	29.90	12.11	88,550	475.4	2,174	
average					83,535	475.4	2,165	

Concrete ทั่วไป

1	15.10	179.08	30.00	12.12	66,750	372.7	2,256	
2	15.20	181.46	30.20	12.20	70,060	386.1	2,226	
3	15.10	179.08	30.00	12.16	68,770	384.0	2,263	
4	15.10	179.08	30.00	12.20	68,950	385.0	2,271	
5	15.10	179.08	29.90	12.16	70,300	392.6	2,271	
average					68,966	384.1	2,258	



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress strain การทดสอบกำลังรับอัดของคอนกรีตทรงกระบอกล้อมลวดเสริมเหล็ก

4.5 ผลการทดสอบการรับกำลังดัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบแรงกระทำจุดเดียวที่กึ่งกลาง

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีต

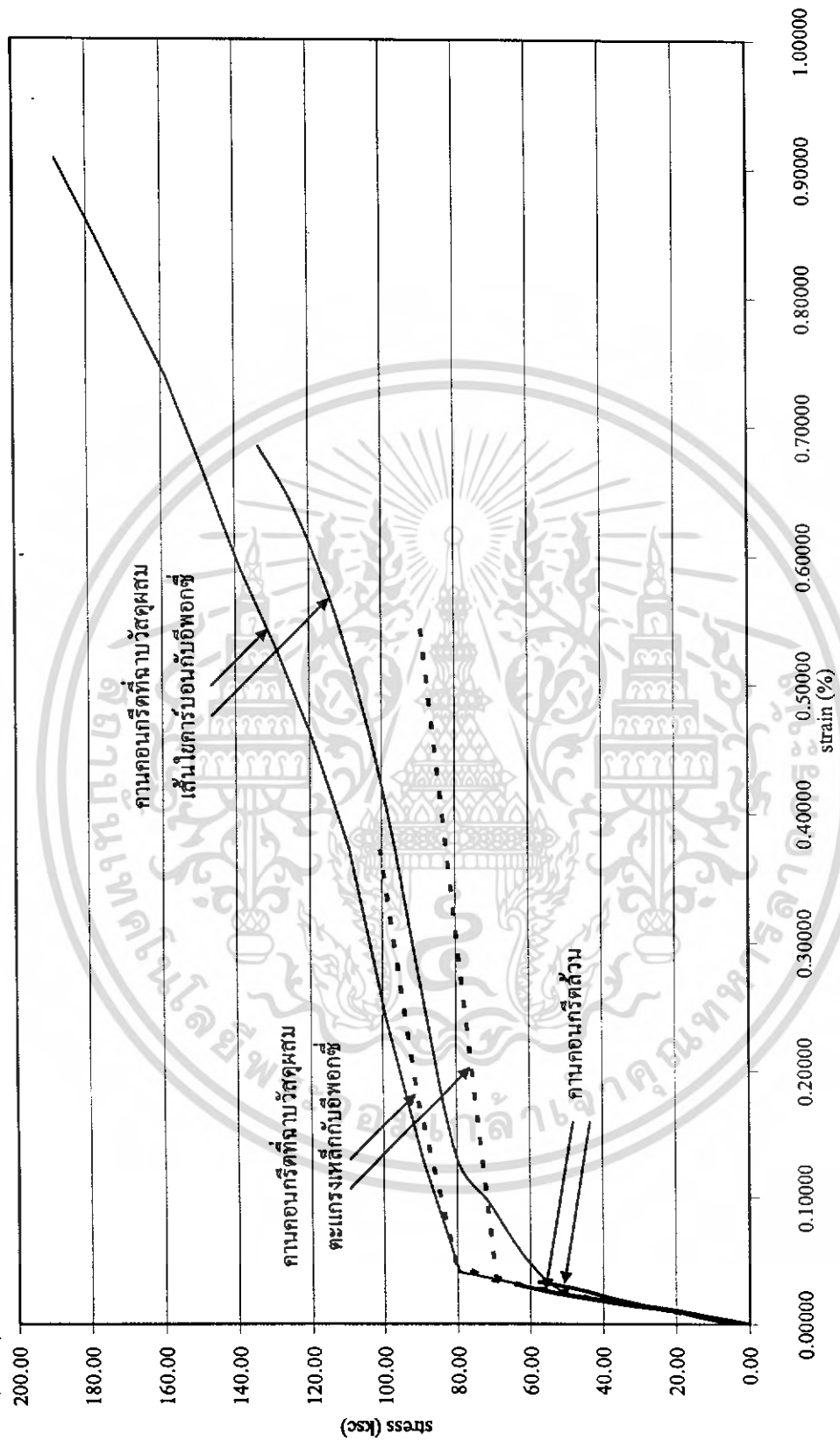
โดยวิธีการทดสอบแรงกระทำจุดเดียวที่กึ่งกลาง

ลำดับการทดสอบ	ชนิดคอนกรีต	ขนาดคาน	ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเหล็กเสริม
Order	Concrete	Beam Size	Reinforcement Size	Reinforcement Size	Reinforcement Size	Reinforcement Size	Reinforcement Size	Reinforcement Size	Reinforcement Size

Concrete ทั่วไป								
6	7.60	14.90	75.20	19.68	653	68	2,311	
5	7.50	15.20	74.80	19.94	611	64	2,338	
17	7.80	14.90	75.30	19.78	666	66	2,260	
2	7.30	15.20	75.00	19.54	544	60	2,348	
1	7.40	15.20	75.20	19.34	565	61	2,286	
15	7.80	15.40	74.80	19.94	846	81	2,219	ตัดออก
Average					607.9	64.1	2,308	

Concrete เสริม Carbon fiber -Epoxy Composite								
11	7.60	15.30	75.30	20.48	1,965	200	2,339	
12	7.60	15.30	75.20	19.38	1,577	161	2,216	
13	7.70	15.30	75.00	19.96	1,900	189	2,259	
14	7.70	15.50	75.20	20.88	1,931	189	2,326	
16	8.00	15.80	75.30	19.34	1,528	136	2,032	
Average					1,802	179.4	2,267	

Concrete เสริม Steel-Epoxy Composite								
4	7.50	15.20	75.10	20.38	1,113	117	2,380	
7	7.20	15.10	75.00	19.18	966	111	2,352	
8	7.40	14.90	75.60	19.96	967	107	2,395	
10	7.60	15.50	75.10	20.82	1,003	101	2,353	
9	7.70	14.90	75.60	19.96	998	102	2,301	
Average					1,009	107	2,356	



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress Strain การทดสอบกำลังรับดัดของกานคอนกรีต

4.6 ผลการทดสอบการรับกำลังค้ำของแผ่นมอร์ตาร์

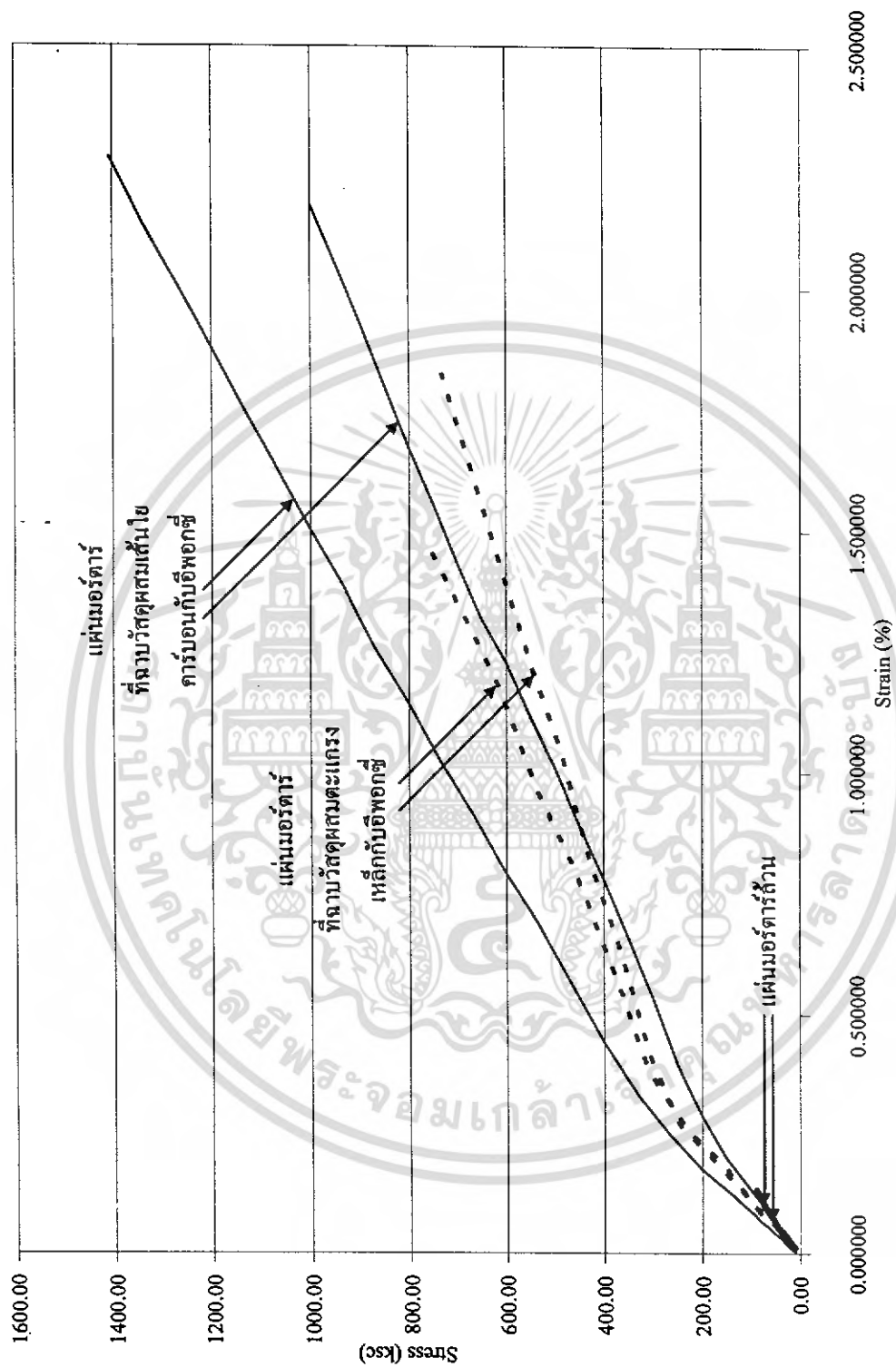
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบการรับกำลังค้ำของแผ่นมอร์ตาร์

หมายเลข	ความหนา	ความยาว	ความกว้าง	ความสูง	ความหนา	ความยาว	ความกว้าง	ความสูง
11	1.18	5.28	40.00	0.441	-	-	1,770	เสีย
12	1.16	5.18	40.00	0.479	110.1	710.7	1,993	
13	1.13	5.45	40.00	0.492	133.2	861.1	1,997	
14+	1.11	5.31	40.00	0.470	114.3	786.5	1,994	
15+	1.00	5.20	40.00	0.412	89.5	774.4	1,981	
Average					111.8	783.2	1,991	

มอร์ตาร์ เสริม Steel-Epoxy Composite								
11	1.18	5.28	40.00	0.441	-	-	1,770	เสีย
12	1.16	5.18	40.00	0.479	110.1	710.7	1,993	
13	1.13	5.45	40.00	0.492	133.2	861.1	1,997	
14+	1.11	5.31	40.00	0.470	114.3	786.5	1,994	
15+	1.00	5.20	40.00	0.412	89.5	774.4	1,981	
Average					111.8	783.2	1,991	

มอร์ตาร์ เสริม Carbon fiber -Epoxy Composite								
6	1.08	5.32	40.00	0.469	183.9	1,333.9	2,041	
7	1.14	5.60	40.00	0.493	197.4	1,220.8	1,931	
8+	1.06	5.31	40.00	0.469	192.8	1,454.3	2,083	ตัดออก
9+	1.23	5.28	40.00	0.454	176.1	992.2	1,748	ตัดออก
10	1.15	5.40	40.00	0.479	202.4	1,275.4	1,928	
Average					194.6	1,276.7	1,967	

มอร์ตาร์ ล้วน								
1+	1.19	5.19	39.80	0.454	12.8	78.3	1,847	
2	1.10	5.46	40.10	0.463	12.4	84.7	1,922	
3+	1.16	5.29	40.50	0.482	15.3	96.5	1,939	ตัดออก
4	1.07	5.46	40.50	0.474	9.9	71.6	2,003	ตัดออก
5	1.09	5.32	40.90	0.478	11.4	80.9	2,015	
Average					12.2	81.3	1,945	



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress Strain การทดสอบกำลังรับแรงดัดของแผ่นซีเมนต์มอร์ตาร์

บทที่ 5

การวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเหล็กตะแกรงที่นำมาทดสอบ

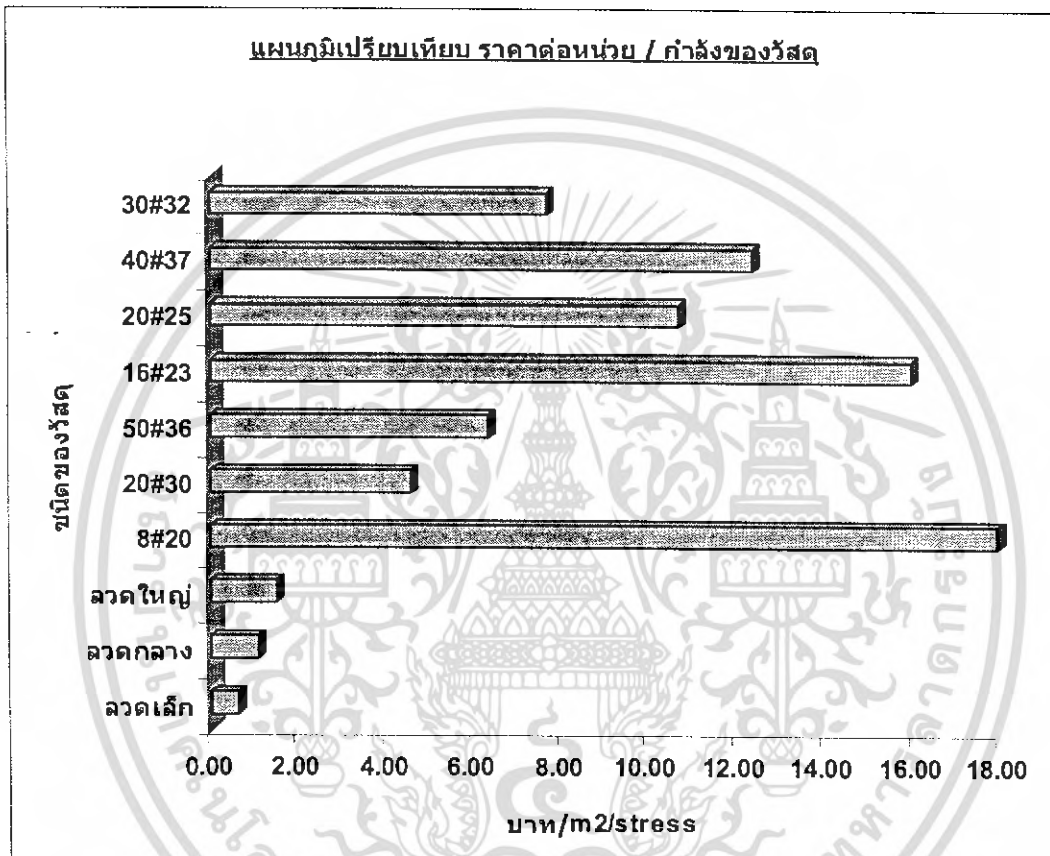
การผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง และราคาของตะแกรงเหล็กต่าง ๆ จะพบว่า ลวดกรงไก่เล็ก (ช่อง 0.5 ซม.) มีความน่าสนใจในการนำมาเป็นตัวแทนใช้ในโครงการพิเศษนี้ เนื่องจากอัตราส่วนของ ราคาต่อ กำลังรับแรงดึงของเหล็กตะแกรงต่ำสุด

ดังนั้นจึงได้เลือกลวดกรงไก่เล็กเป็นเหล็กตะแกรงสำหรับเปรียบเทียบกับเส้นใยคาร์บอนในการซ่อมแซมคอนกรีต

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึง ราคาและราคาต่อกำลังรับแรงดึงของเหล็กตะแกรง

Type	Tensile Strength (ksc)	ราคา(บาท/ม ²)	ราคา/stress (บาท/ม ² /ksc)
ลวดเล็ก	7,871	50	0.64
ลวดกลาง	6,511	70	1.08
ลวดใหญ่	6,062	90	1.48
8#20	4,958	889	17.93
20#30	8,119	370	4.56
50#36	7,050	445	6.31
16#23	5,350	852	15.93
20#25	6,926	740	10.68
40#37	8,394	1037	12.35
30#32	5,810	445	7.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 แสดงภาพผลการเปรียบเทียบราคาต่อหน่วย/กำลังรับแรงดึงของเหล็กตะแกรงต่าง ๆ

5.2 สรุปผลการทดสอบในการใช้งานในการรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก

ตารางที่ 5.2 สรุปประสิทธิภาพในการใช้งานในการรับแรงอัด(คอนกรีต)

วัสดุ	compressive strength (ksc)	เปอร์เซ็นต์กำลังการรับแรงเทียบกับคอนกรีตล้วน (%)	ราคาที่ใช้ในวัสดุเสริม/ ตัวอย่าง (บาท)	ราคา/กำลังที่เพิ่มขึ้น (บาท/ksc)
CONCRETE	384.1	100	-	-
CFEC	475.4	123.8	407	4.459
SMEC	413.6	107.7	207	3.160

ตารางที่ 5.3 สรุปประสิทธิภาพการใช้เส้นใยในการเสริมกำลังคอนกรีตรับแรงอัด

วัสดุ	compressive strength (ksc)	พท.หน้าตัดเส้นใยที่ใช้เสริม (cm ²)	เปรียบเทียบกำลังที่เส้นใยรับได้ต่อ 1cm ² (ksc/cm ²)
CONCRETE	384.1	-	-
CFEC	475.4	0.51	179.0
SMEC	413.6	0.359	82.1

หมายเหตุ

CFEC : Carbon Fiber-Epoxy Composite

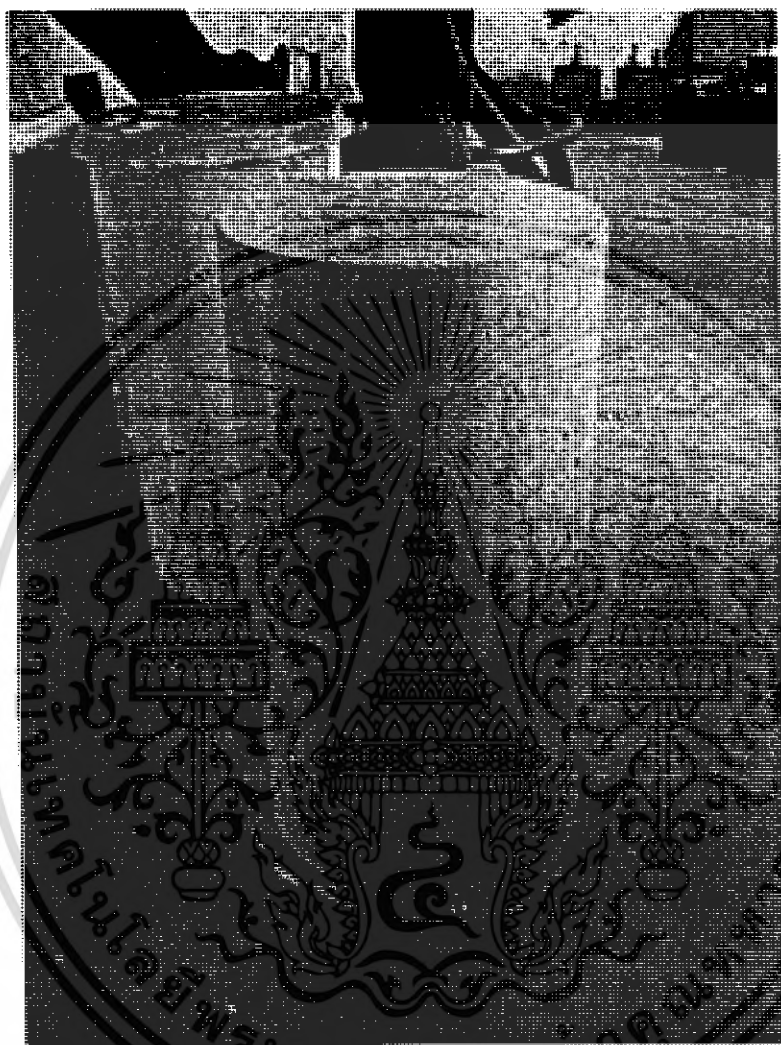
SMEC : Steel Mesh-Epoxy Composite

กำลังรับแรงอัดคอนกรีตทรงกระบอกโดยการเสริมแรงกำลังแบบ CFEC และ SMEC เป็นการเสริมกำลังแบบ Confined Compressive Strength จึงทำให้สามารถรับกำลังได้มากกว่าคอนกรีตทรงกระบอกล้วน ซึ่งเป็นแบบ Unconfined Compressive Strength

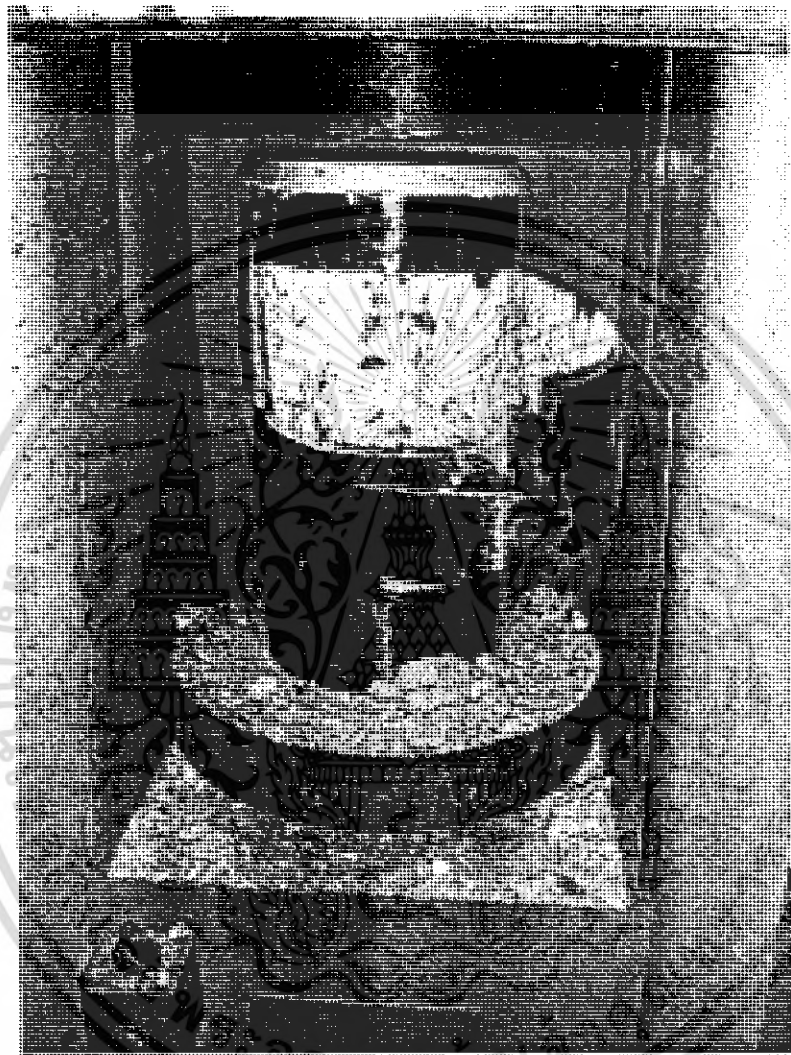
จากตารางที่ 5.2 สรุปผลการศึกษาการใช้งานในการรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่เสริมแบบ CFEC เสริมความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตล้วน 23.8 % ในขณะที่แบบ SMEC เสริมความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้น 7.7% แสดงว่าเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็กสามารถเสริมแรงในลักษณะ Composite ได้ และจากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเป็นการเพิ่มการรับกำลังแบบ SMEC ได้อีกเมื่อเพิ่มหน้าตัดเหล็ก

ลักษณะการวิบัติของการรับแรงอัดในคอนกรีตทรงกระบอกจะพบว่า เมื่อเสริมแรงคอนกรีตทรงกระบอกด้วย SMEC จะเกิดการวิบัติเนื่องจากตะแกรงเหล็กที่เสริมกำลังขาดก่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ CFEC เกิดการวิบัติเนื่องจากเส้นใยคาร์บอนขาด แสดงในรูปที่ 5.4





รูปที่ 5.2 แสดงภาพการวิบัติของคอนกรีตทรงกระบอกฉนวน



รูปที่ 5.3 แสดงภาพการวิบัติของคอนกรีตทรงกระบอกเสริมเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 5.4 แสดงภาพการวิบัติของคอนกรีตทรงกระบอกเสริมตะแกรงเหล็ก

5.3 สรุปผลการทดสอบในการใช้งานในการรับแรงดัดของแผ่นมอร์ตาร์

ตารางที่ 5.4 สรุปประสิทธิภาพในการใช้งานในการรับแรงดัด(มอร์ตาร์)

วัสดุ	Modulus of Rupture (ksc)	เปอร์เซ็นต์กำลัง การรับแรงเทียบกับ มอร์ตาร์ล้วน (%)	ราคาที่ใช้ในวัสดุ เสริม/1ตัวอย่าง (บาท)	ราคา/กำลังที่เพิ่มขึ้น (บาท/ksc)
MORTAR	81.3	100	-	-
CFEC	1,276.7	1,570.4	43.2	0.036
SMEC	783.2	963.3	22.05	0.031

ตารางที่ 5.5 สรุปประสิทธิภาพการใส่เส้นใยในการเสริมกำลังมอร์ตาร์รับแรงดัด

วัสดุ	Modulus of Rupture (ksc)	พท.หน้าตัดเส้นใย ที่ใช้เสริม (cm ²)	เปรียบเทียบกำลังที่เส้นใยรับได้ ต่อ1cm ² (ksc/cm ²)
MORTAR	81.3		
CFEC	1,276.7	0.085	14,063.5
SMEC	783.2	0.068	10,337.3

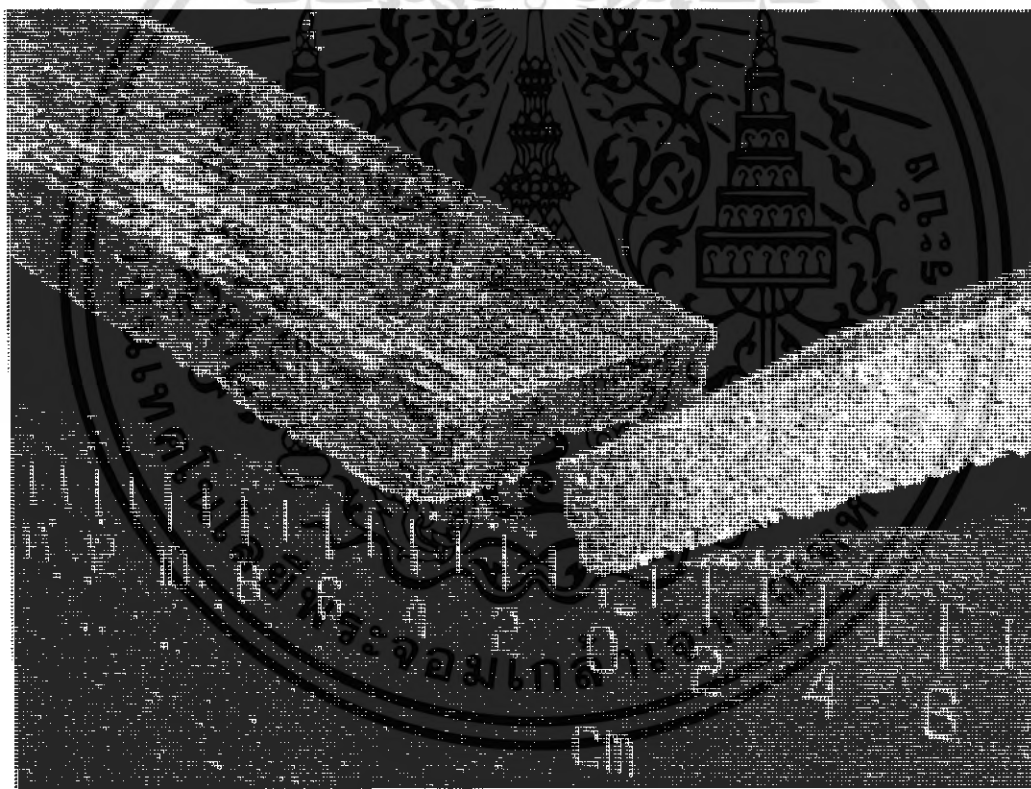
หมายเหตุ

CFEC : Carbon Fiber-Epoxy Composite

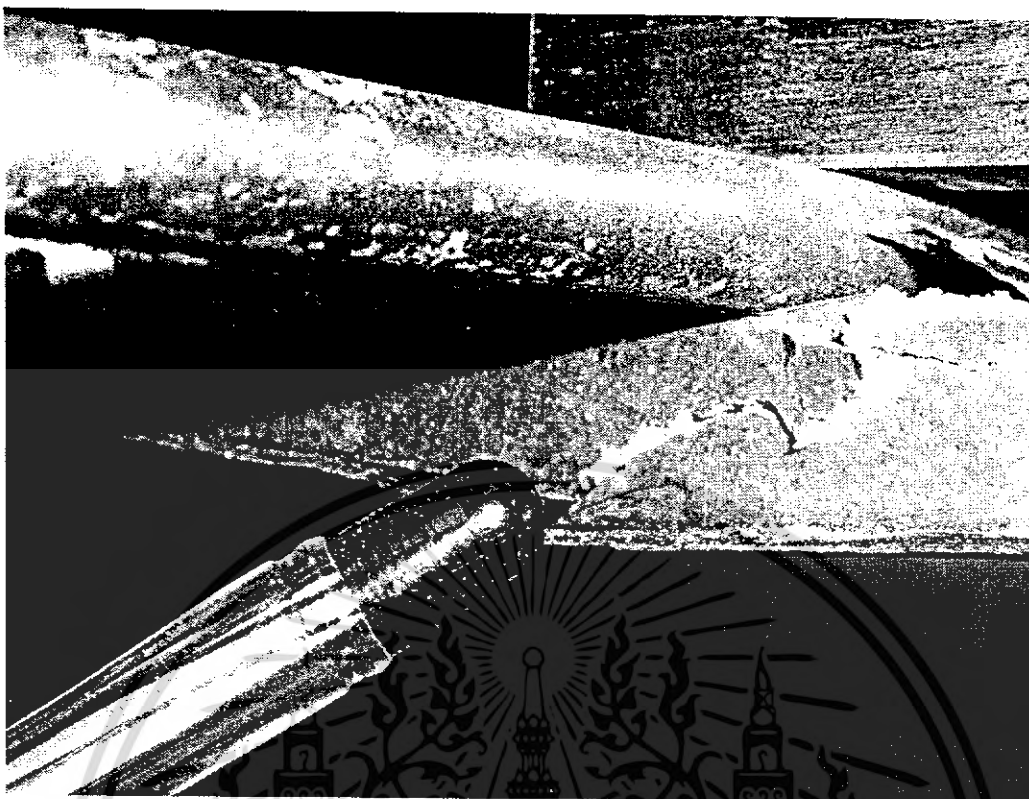
SMEC : Steel Mesh-Epoxy Composite

จากตารางที่ 5.4 สรุปผลการศึกษาการใช้งานในการรับแรงดัดของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่เสริมแบบ CFEC เสริมความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตล้วน 1,470.4 % ในขณะที่แบบ SMEC เสริมความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้น 863.3 % แสดงว่าเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็กสามารถเสริมแรงในลักษณะ Composite ได้ และจากตารางที่ 5.5

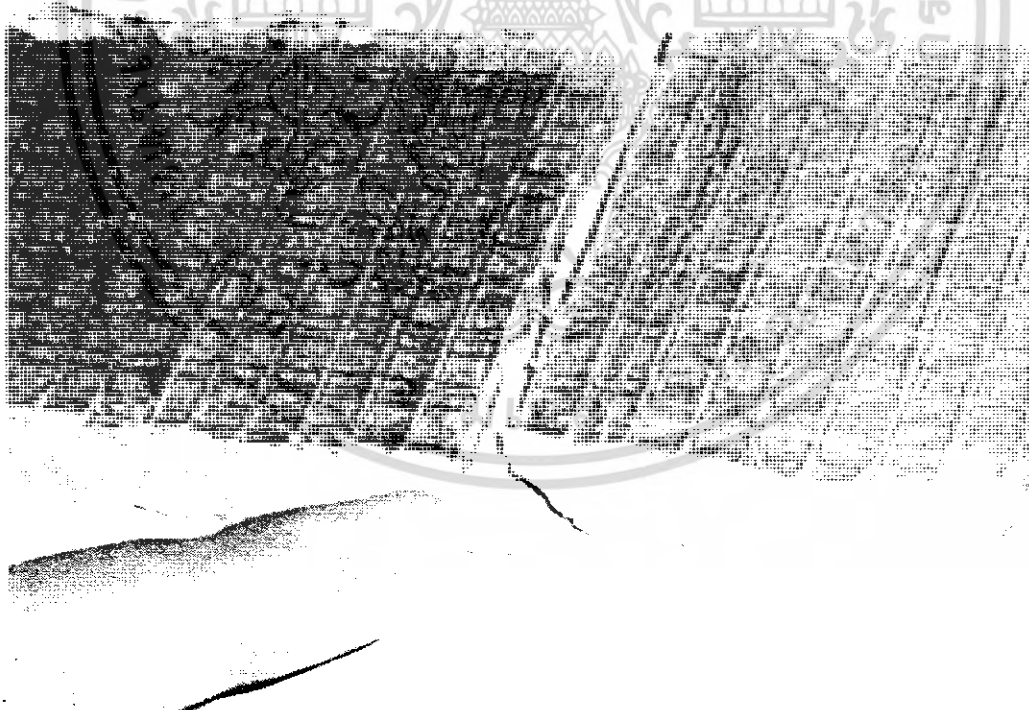
ลักษณะการวิบัติของการรับแรงดัดในแผ่นซีเมนต์บอร์ดจะพบว่า เมื่อเสริมแรงแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้วย SMEC จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแผ่นซีเมนต์บอร์ดถูกอัดแตก (Compression Failure) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และ CFEC เกิดการวิบัติเนื่องจากแผ่นซีเมนต์บอร์ดถูกอัดแตก ดังแสดงในรูปที่ 5.7 เนื่องจากการเสริมทั้ง 2 เป็นการเสริมแรงแบบ Over Reinforcement เนื่องจากการเตรียมเส้นใยให้มีหน้าตัดที่ไว้ในกรณี Tension Control นั้นทำได้ยากเพราะหน้าตัดของเส้นใยมีขนาดเล็กและจำเป็นต้องเสริมให้ระยะเรียงอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.5 แสดงภาพการวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์ฉาบ



รูปที่ 5.6 แสดงภาพการวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์เสริมใยคาร์บอน



รูปที่ 5.7 แสดงภาพการวิบัติของแผ่นมอร์ตาร์เสริมตะแกรงเหล็ก

5.4 สรุปผลการทดสอบในการใช้งานในการรับแรงดัดของคานคอนกรีต

ตารางที่ 5.6 สรุปประสิทธิภาพในการใช้งานในการรับแรงดัด(คอนกรีต)

วัสดุ	Modulus of Rupture (ksc)	เปอร์เซ็นต์กำลัง การรับแรงเทียบกับ กับคอนกรีตล้วน (%)	ราคาที่ใช้ในวัสดุ เสริม/1ตัวอย่าง (บาท)	ราคา/กำลังที่เพิ่มขึ้น (บาท/ksc)
CONCRETE	67	100	-	-
CFEC	174.9	261.0	259	2.400
SMEC	107.5	160.4	92.7	2.289

ตารางที่ 5.7 สรุปประสิทธิภาพการใช้เส้นใยในการเสริมกำลังคอนกรีตรับแรงดัด

วัสดุ	Modulus of Rupture (ksc)	พท.หน้าตัดเส้นใย ที่ใช้เสริม (cm ²)	เปรียบเทียบกำลังที่เส้นใยรับได้ ต่อ1cm ² (ksc/cm ²)
CONCRETE	67	-	-
CFEC	174.9	0.255	423.1
SMEC	107.5	0.182	222.5

หมายเหตุ

CFEC : Carbon Fiber-Epoxy Composite

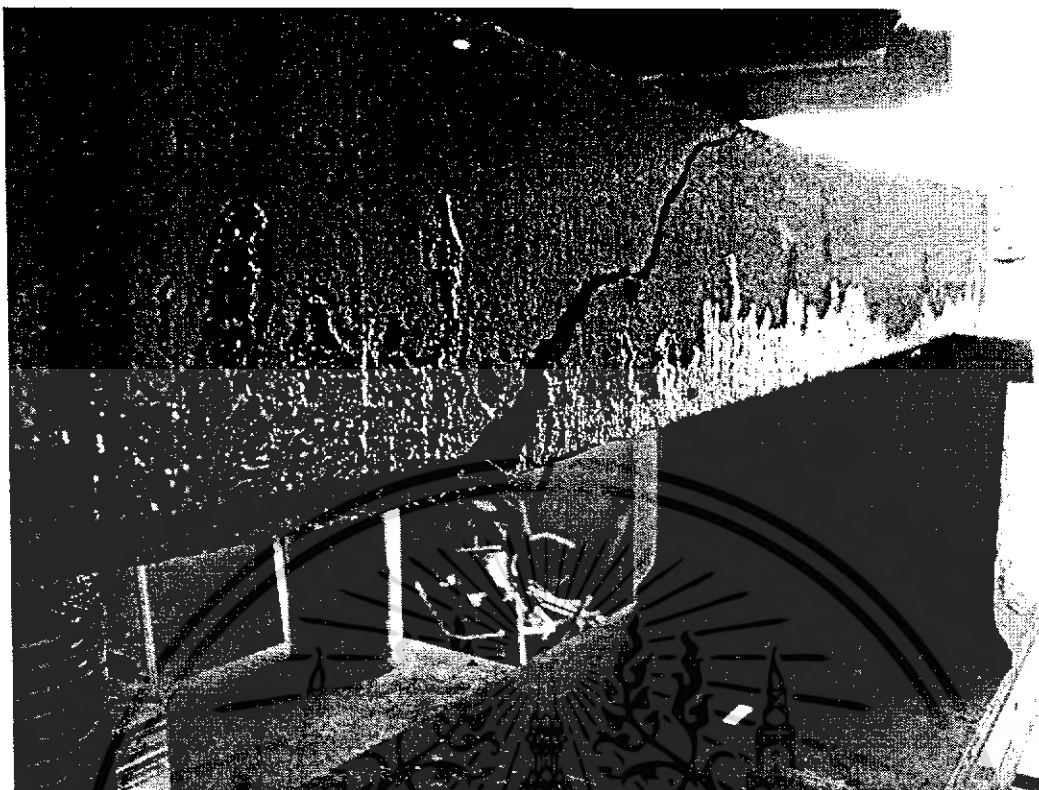
SMEC : Steel Mesh-Epoxy Composite

จากตารางที่ 5.6 สรุปผลการศึกษาการใช้งานในการรับแรงดัดของคานคอนกรีตจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพที่เสริมแบบ CFEC เสริมความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตล้วน 161.0 % ในขณะที่แบบ SMEC เสริมความแข็งแรงได้เพิ่มขึ้น 60.4 % แสดงว่าเส้นใยคาร์บอนและตะแกรงเหล็กสามารถเสริมแรงในลักษณะ Composite ได้ และจากตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าสามารถเพิ่มการรับกำลังแบบ SMEC ได้อีกเมื่อเพิ่มหน้าตัดเหล็ก

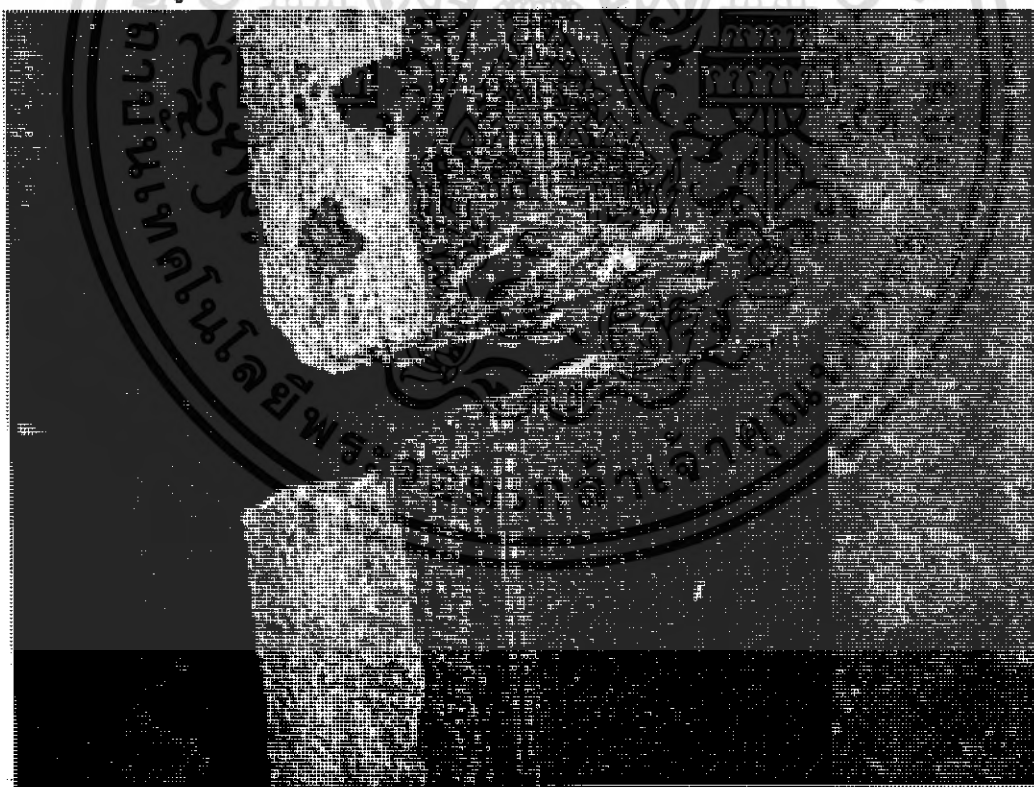
ลักษณะการวิบัติของการรับแรงดัดในคานคอนกรีตจะพบว่า เมื่อเสริมแรงคานคอนกรีตด้วย SMEC จะเกิดการวิบัติเนื่องจากตะแกรงเหล็กที่เสริมกำลังขาดก่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และ CFEC เกิดการวิบัติแบบ Horizontal Shearing Stress เนื่องจากการซึมของอิพอกซีลงในเนื้อคอนกรีตเพียง 5 มิลลิเมตร ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยคาร์บอนกับคอนกรีต ไม่เพียงพอจึงเกิดการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.8 แสดงภาพการวิบัติของคานคอนกรีตล้วน



รูปที่ 5.9 แสดงภาพการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 5.10 แสดงภาพการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมตะแกรงเหล็ก

5.5 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการนำวัสดุผสม ระหว่างเหล็กกับอีพอกซี มาใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็ก ในลักษณะเดียวกับวัสดุผสมระหว่าง เส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการรับแรงของวัสดุผสมกับราคาต่อหน่วยปริมาณที่ใช้ (จำนวนราคาเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเสริมแรงต่อค่าหน่วยแรงที่เพิ่ม) จะพบว่าการใช้วัสดุผสมระหว่างเหล็กกับอีพอกซีมาใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีต สามารถใช้ได้จริง และราคาต่อกำลังที่เสริมมีแนวโน้มถูกกว่าการใช้วัสดุผสมระหว่างเส้นใยคาร์บอนกับอีพอกซี

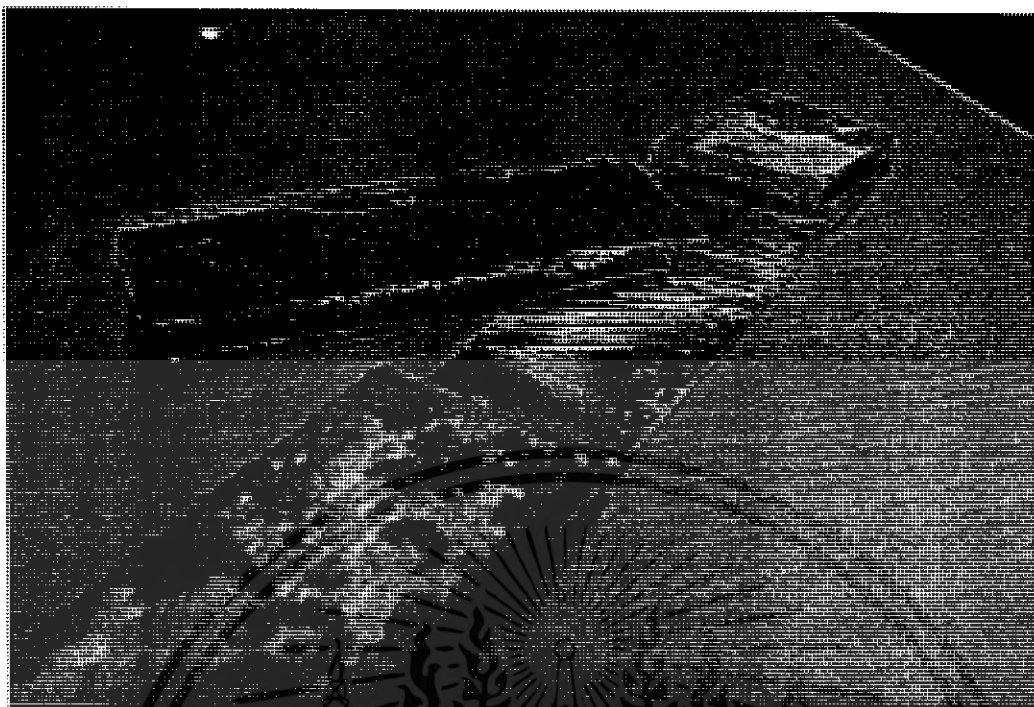
และการลดปริมาณอีพอกซีที่ใช้เสริม ทำได้โดยการผสม Filler (ยิปซัมหรือทราย) ร่วมกับอีพอกซี ทำให้อีพอกซีที่ได้จากการส่วนผสม Filler จะมีความหนืด ยืดต่อการฉาบ และทำให้ค่าใช้จ่ายถูกลงอีก

5.6 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากการทดสอบการเสริมเส้นใยเหล็ก และ ใยคาร์บอน ในลักษณะ Composite นั้น จะเห็นว่า พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเหล็กที่เสริมน้อยกว่าคาร์บอน แต่ปริมาณของอีพอกซีที่ใช้เสริมกับเส้นใยเหล็กนั้นมากกว่าเส้นใยคาร์บอนจึงทำให้มีราคาแพงเพื่อเทียบกับกำลังที่ได้

ดังนั้น หากจะเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายของการเสริมเส้นใยเหล็กในลักษณะ Composite นั้นมีแนวทางการพัฒนาได้โดย

1. การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเหล็กที่ใช้เสริม ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงแรงยึดเหนี่ยวของเหล็ก กับอีพอกซี ด้วยหากเหล็กที่ใช้เสริมเป็นแผ่นมีผิวเรียบ หรือ มัน จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับอีพอกซี ไม่ยึดเกาะกัน นั่นคือเกิดการวิบัติแบบเกิดการรูด ดังแสดงในรูปที่ 5.11 จึงควรมีการสั่งทำจากโรงงานโดยสานเส้นใยเหล็กให้มีลักษณะที่ขรุขระ แต่ยังคงมีช่องว่างไว้สำหรับการยึดจับของอีพอกซีกับเหล็ก และเป็นการลดปริมาณการใช้อีพอกซี เนื่องจากจำนวนชั้นที่ทำการเสริมน้อยลง



รูปที่ ๑.๑๑ มอดูลการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ส่วนเครื่องกลไฟฟ้าที่มีไฟไหม้

2. ศึกษาวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวประสานในลักษณะ Composite เช่นสามารถในการเชื่อมได้ กำลังในการรับแรง ความทนทานต่อการกัดกร่อน ความทนไฟ

เอกสารอ้างอิง

- E.I.Du Point de Nemours&Co., 1974. After Kevlar 49 Data Manual.
- McGraw-Hill, 1984. M.M.Schwartz. Composite Meterial Handbook.
- Callister , W , D , 2003. Materials Science and Engineering an Introcuuction.6th Ed., New York
- ฌัฐสม สงวนวงษ์, 2546. การวิเคราะห์และวิจัยพฤติกรรมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กเพื่อนำมาใช้งานถนนคอนกรีต.กรุงเทพฯ
- นท นิ่มสมบูรณ์และสมพร เชื้อขนิณ, “การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอีพอกซี” (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จกล., 2543)
- แม้น อมรสิทธิ์และสมชัย อัครทิวา, 2546. วัสดุวิศวกรรม-Principles of materials Science and Engineering – กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542. ปฏิบัติการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2 . กรุงเทพฯ: บริษัท เอส.เอส.บุ๊คเฮาส์ จำกัด
- http://www.nationalpark.go.th/biocom/garbage_sermlang.html
- <http://isit.or.th/index.asp>
- <http://kahuna.sdsu.edu/~sfrc/Constuction%20Phases.html>
- <http://www.engin.umich.edu/dept/cee/research/sme/facilities/ccl.html>
- http://www.michelin.co.th/thai/michelin_club/downloads.jsp
- <http://www.fyfeco.com>

บรรณานุกรม

- ชลิดา อุตะภาและแหลมทอง เหล่าคงถาวร, 2547. พิมพ์ครั้งที่ 1. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ
- บริษัท ผลิตภัณฑ์ และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2541 . คู่มือการทดสอบหินทรายและคอนกรีต. กรุงเทพฯ
- บริษัท ผลิตภัณฑ์ และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2541 . คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ
- ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2542. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 7 . บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. กรุงเทพฯ
- ประกิจศาสน์ ประสงค์จรรยาและนายสิทธิชัย บังใบ, “แผ่นพื้นคอนกรีตเส้นใยพลาสติก” (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2543)
- วินิต ช่อวิเชียร , 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8 . กรุงเทพฯ : บ.สัมพันธ์พานิชย์
- เมธิ บุญเลี้ยงอุปถัมภ์และฉัตรชัย ชูพานิช, 2541. คู่มือการทดสอบ หิน ทราย และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด
- บุทธนา จิระธนาไพบุลย์และอุทุมพร ศรีวิชัย, “การศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของไฟเบอร์โกละในคอนกรีตเสริมเส้นใย” (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2536)
- <http://www.edgefrp.com>
- <http://www.thaiperforate.com>
- http://www.forest.go.th/biocom/garbage_theory.html
- <http://www.fastech.co.th/technical.htm>

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : วัสดุทรงได้(เล็ก)

Diameter : 0.5 mm

Area : 0.196 mm²

Length : 50 mm

แบบ 1 cm. # 2 เส้น Area : 0.392 mm²

ตารางที่ ผศ.1 แสดงผล การทดสอบวัสดุทรงได้(เล็ก)ที่ใช้เสริมเป็นComposite

Sp No .	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	UppperYield (kgf)	LowerYield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	31.62	31.62	31.62	31.56	31.62	80.66	ราคา 50 บาท/m ²
2	30.03	30.03	30.03		30.03	76.6	
3	30.35	14.94	30.35	13.67	30.35	77.42	
4	30.64	14.93	30.64	14.41	30.64	78.16	
5	31.64	16.69	31.64	13.39	31.64	80.71	
					เฉลี่ย	78.71	

ผศ2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลส A304 8#20

Diameter : 0.91 mm

Area : 0.650 mm²

Length : 50 mm

แถบ 1 cm. # 2 เส้น Area : 2.602 mm²

ตารางที่ผนก.2 แสดงผลการทดสอบวัสดุสแตนเลส A304 8#20 ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No.	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	Upper Yield (kgf)	Lower Yield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	129.9	93.9	129.9	77.78	18.34	49.92	ราคา 889 บาท/ม ²
2	119.9	119.9	119.8	116.7	16.54	46.08	
3	128.2	79.39	128.2	76.63	18.53	49.27	
4	132.2	132.2	132.2	127.7	18.36	50.81	
5	134.8	134.8	134.8	79.4	18.23	51.8	
					เฉลี่ย	49.58	

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลส A304 20#30

Diameter : 0.31 mm

Area : 0.075 mm²

Length : 50 mm

แถบ 1 cm. # 2 ด้าน Area : 0.679 mm²

ตารางที่ ผก.3 แสดงผลการทดสอบวัสดุสแตนเลส A304 20 # 30 ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No .	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	Upper Yield (kgf)	Lower Yield (kgf)	2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	54.3	50.73	54.3	45.76		79.97	ราคา 370 บาท/m2
2	51.58	37.88	48.65	40.84		75.96	
3	56.77	37.63	56.77	33.28		83.6	
4	59.82	54.19	59.82	50.14		88.1	
5	53.19	53.19	49.23	40.67		78.33	
					เฉลี่ย	81.19	

ผก4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สวดกรงไก่(กลาง)

Diameter : 0.644 mm

Area : 0.326 mm²

Length : 50 mm

แบบ 1 cm. # 2 เส้น Area : 0.326 mm²

ตารางที่ ผค.4 แสดงผลการทดสอบวัสดุสวดกรงไก่(กลาง)ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No.	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	UpperYield (kgf)	LowerYield (kgf)	2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	21.23	21.23			37.45	65.12	ราคา 70 บาท/m2
2	21.21	21.21			27.51	65	
3	20.24	20.24			34.02	62.08	
4	21.39	21.39			35.82	65.61	
5	22.09	22.09			48.96	67.76	
					เฉลี่ย	65.11	

ผค5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : วัสดุทรงใด(ใหญ่)
 Diameter : 0.9 mm
 Area : 0.636 mm²
 Length : 50 mm
 แอป 1 cm. # 2 เส้น Area : 0.636 mm²

ตารางที่ ผก.5 แสดงผลการทดสอบวัสดุทรงใด(ใหญ่)ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No.	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	Upper Yield (kgf)	Lower Yield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	43.51	43.51	43.51		38.09	68.44	ราคา 90 บาท/m2
2	40.92	40.92	40.92		38.62	63.34	
3	44.66	44.66	44.66		32.33	70.22	
4	23.01	23.01			32.79	36.18	
5	40.15	40.15	31.13		31.87	63.12	
					เฉลี่ย	60.62	

ผก6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลส A304 50#36

Diameter : 0.193 mm

Area : 0.0293 mm²

Length : 50 mm

แถบ 1 cm. # 2 เส้น Area : 0.585 mm²

ตารางที่ ผก.6 แสดงผลการทดสอบวัสดุสแตนเลส A304 50#36 ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No.	Max Load (kg)	Ultimate (kg)	Upper Yield (kg)	Lower Yield (kg)	.2% Yd str (kg/mm ²)	Stress (kg/mm ²)	Remark
1	43.89	43.89			1.046	75.03	ราคา 445 บาท/m ²
2	41.59	41.59			1.087	71.09	
3	38.86	38.86			1	66.43	
4	37.43	37.43			0.0984	63.98	
5	44.43	44.43			1.106	75.95	
					เฉลี่ย	70.5	

กท 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลสA304 16#23

Diameter : 0.61 mm

Area : 0.292 mm²

Length : 50 mm

แถบ 1 cm. # 2 เส้น Area : 2.046 mm²

ตารางที่ ผก.7 แสดงผลการทดสอบวัสดุสแตนเลสA304 16#23ที่ใช้เสริมเป็นComposite

Sp No .	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	UppperYield (kgf)	LowerYield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	112.8	67.44	112.8	66.68	25.51	55.13	ราคา852บาท/ม2
2	110.1	97.27	110.1	94.68	50.52	53.81	
3	107	95.91	107	91.87	53.62	52.29	
4	111.1	111	111.1	102.2	33.44	54.3	
5	106.34	92.66	104.7	92.45	54.2	51.97	
					เฉลี่ย	53.5	

ผก8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลสA304 20#25

Diameter : 0.51 mm

Area : 0.204 mm²

Length : 50 mm

แบบ 1 cm. # 2 เส้น Area : Area : 1.839 mm²

ตารางที่ ผก.8 แสดงผลการทดสอบวัสดุสแตนเลสA304 20#25ที่ใช้เสริมเป็นComposite

Sp No.	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	UppperYield (kgf)	LowerYield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	130.1	130.1			29.79	70.74	ราคา 740 บาท/m2
2	127.2	127.2			13.24	69.17	
3	130.1	130.1			13.85	70.4	
4	126.7	126.7			23.21	68.89	
5	123.4	123.4			13.73	67.1	
					เฉลี่ย	69.26	

ผก9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลส A304 40#37

Diameter : 0.172 mm

Area : 0.023 mm²

Length : 50 mm

แบบ 1 cm. # 2 เส้น Area : Area : 0.372 mm²

ตารางที่ ผก.9 แสดงผลการทดสอบวัสดุสแตนเลส A304 40#37 ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No .	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	UppperYield (kgf)	LowerYield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	31.84	31.84				85.59	ราคา 1037 บาท/ม2
2	28.66	28.66				77.04	
3	29.95	29.95				80.51	
4	35.36	35.36				95	
5	30.34	30.34				81.56	
					เฉลี่ย	83.94	

ผก10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้เสริมเป็น Composite

sample type : สแตนเลส A304 30#32

Diameter : 0.274mm

Area : 0.059 mm²

Length : 50 mm

แถบ 1 cm. # 2 เส้น Area : Area : 0.707mm²

ตารางที่ ผก.10 การทดสอบวัสดุสแตนเลส A304 30#32 ที่ใช้เสริมเป็น Composite

Sp No.	Max Load (kgf)	Ultimate (kgf)	UpperYield (kgf)	LowerYield (kgf)	.2% Yd str (kgf/mm ²)	Stress (kgf/mm ²)	Remark
1	41.15	41.15			9.129	58.2	ราคา 445 บาท/ม2
2	38.18	38.18			9.226	54	
3	40.73	40.73			9.572	57.6	
4	44.3	44.3			11.17	62.66	
5	40.9	40.9			14.18	57.85	
					เฉลี่ย	58.1	

ผก11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.1 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.1

คอนกรีตทรงกระบอก 240 ksc			
Type: คอนกรีตฉนวน		No:	2
นน.(Kgf)	ระยะ (0.01mm)	Max Load (kgf) : Ultimate (kgf) 70060	
0	0		
1000	34		
2000	40		
3000	43		
4000	46		
5000	49		
6000	51		
7000	52		
8000	54		
9000	55		
10000	56		
15000	62		
20000	67		
25000	72		
30000	77		
35000	83		
40000	88		
45000	93		
50000	100		
55000	107		
60000	115		
65000	124		
70000	136		
75000			
80000			
85000			
90000			

ผข2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.2แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.5

คอนกรีตทรงกระบอก 240 ksc			
Type: คอนกรีตฉั่วน		No:	5
นน.(Kg)	ระยะ (0.01mm)		
0	0		
1000	21		
2000	28		
3000	38		
4000	49		
5000	56		
6000	59		
7000	61		
8000	62		
9000	65		
10000	66		
15000	74		
20000	81		
25000	88		
30000	93		
35000	99		
40000	107		
45000	112		
50000	119		
55000	126		
60000	132		
65000	139		
70000	150		
75000			
80000			
85000			
90000			

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf) 70300

ผข3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.3 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.7

คอนกรีตทรงกระบอก 240 ksc			
Type:	เส้นใยคาร์บอน	No:	7
นน.(Kg)	ระยะ (0.01mm)		
0	5		
1000	80		
2000	100		
3000	112		
4000	121		
5000	130		
6000	138		
7000	144		
8000	150		
9000	156		
10000	162		
15000	183		
20000	201		
25000	219		
30000	235		
35000	250		
40000	264		
45000	279		
50000	293		
55000	308		
60000	323		
65000	340		
70000			
75000			
80000			
85000			
90000			

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf) 67390

ผข4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.4 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.8

คอนกรีตทรงกระบอก 240 ksc			
Type:	เส้นใยคาร์บอน	No:	8
นน.(Kgf)	ระยะ (0.01mm)		
0	20		
1000	42		
2000	65		
3000	83		
4000	97		
5000	107	Max Load (kgf) :	
6000	116		
7000	123	Ultimate (kgf) 91450	
8000	131		
9000	137		
10000	142		
15000	167		
20000	187		
25000	205		
30000	220		
35000	239		
40000	252		
45000	265		
50000	277		
55000	290		
60000	300		
65000	314		
70000	328		
75000	346		
80000	372		
85000	435		
90000	498		

ผข5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.5 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.15

คอนกรีตทรงกระบอก 240 ksc			
Type: เส้นใยเหล็ก		No:	13
นน.(Kgf)	ระยะ (0.01mm)	Max Load (kgf) : Ultimate (kgf) 78720	
0	36		
1000	42		
2000	49		
3000	55		
4000	59		
5000	64		
6000	67		
7000	70		
8000	73		
9000	76		
10000	79		
15000	91		
20000	103		
25000	113		
30000	123		
35000	133		
40000	143		
45000	154		
50000	165		
55000	178		
60000	190		
65000	207		
70000	225		
75000	249		
80000			
85000			
90000			

ผข6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.6 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก No.14

คอนกรีตทรงกระบอก 240 ksc			
Type:	เส้นใยเหล็ก	No:	14
นน.(Kgf)	ระยะ (0.01mm)	Max Load (kgf) : Ultimate (kgf) 84600	
0	13		
1000	42		
2000	51		
3000	58		
4000	65		
5000	70		
6000	74		
7000	81		
8000	83		
9000	89		
10000	96		
15000	107		
20000	115		
25000	126		
30000	136		
35000	146		
40000	156		
45000	167		
50000	176		
55000	188		
60000	199		
65000	212		
70000	225		
75000	240		
80000	256		
85000			
90000			

ผข7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผข.7 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต No.6

กานกรีดกรีด 7.5*15*75			
Type:	คอนกรีตฉั่วน	No:	6
นน.(Kgf)	ระยะ (0.001mm.)	Modulus of Rupture (ksc)	strain
0	0	0.00	0.00000
100	22	10.46	0.00004
200	63	20.92	0.00011
300	85	31.37	0.00014
400	112	41.83	0.00019
500	143	52.29	0.00024
600	182	62.75	0.00030
700			
800			
900			
1000			
1100			
1200			
1300			
1400			
1500			
1600			
1700			
1800			
1900			

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf) 653.4

ผข8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผษ.8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต No.15

[illegible]

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf)	611.4
----------------	-------

၈၅၅

ตารางที่ ผข.9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต No.13

กานกรีดกรีด 7.5*15*75			
Type:	คอนกรีตฉนวน	No:	13
นน.(Kg)	ระยะ (0.001mm.)	Modulus of Rupture (ksc)	strain
0	0	0.00	0.00000
100	29	9.92	0.00005
200	56	19.84	0.00009
300	89	29.76	0.00015
400	116	39.69	0.00019
500	142	49.61	0.00024
600	172	59.53	0.00029
700	213	69.45	0.00036
800	245	79.37	0.00041
900	774	89.29	0.00129
1000	1454	99.21	0.00242
1100	2232	109.13	0.00372
1200	2734	119.06	0.00456
1300	3164	128.98	0.00527
1400	3552	138.90	0.00592
1500	4004	148.82	0.00667
1600	4436	158.74	0.00739
1700	4772	168.66	0.00795
1800	5116	178.58	0.00853
1900	5446	188.51	0.00908

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf) 1900.2

ผข10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.11 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต No.8

[illegible]

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf)	967
----------------	-----

ตารางที่ ผข.12 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต No.10

[illegible]

Max Load (kgf) :

Ultimate (kgf)	1003
----------------	------

ឆ្នាំ ១៣

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์มอร์ตาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค.1 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.1

NO: 1

Type:

มอร์ตาร์ล้วน

นน.ตัวอย่าง: 0.454 kg

ความลึกมอร์ตาร์ :

1.19 cm

ความกว้างมอร์ตาร์: 5.19 cm

<i>force (kgf)</i>	<i>การทรุดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>
1.78	0.140	10.87	0.000090
3.55	0.230	21.74	0.000227
5.33	0.310	32.61	0.000320
7.10	0.400	43.48	0.000497
8.88	0.490	54.36	0.000683
10.65	0.570	65.23	0.000840
12.43	0.650	76.10	0.001017
14.20	0.720	86.97	0.001323

Ultimate Load :

12.7836 kg

ผค2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.2

NO: 2

Type: มอร์ตาร์ล้วน

หน.ตัวอย่าง: 0.463 kg

ความลึกมอร์ตาร์: 1.10 cm ความกว้างมอร์ตาร์: 5.46 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.120	12.09	
3.55	0.220	24.19	
5.33	0.300	36.28	
7.10	0.380	48.37	
8.88	0.470	60.47	
10.65	0.610	72.56	
12.43	0.740	84.66	

Ultimate Load : 12.4285 kg

ผก3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผศ.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.3

NO: 3

Type: มอร์ตาร์ล้วน

นน.ตัวอย่าง: 0.482 kg

ความลึกมอดาร์: 1.16 cm ความกว้างมอดาร์: 5.29 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.130	11.22	0.000127
3.55	0.220	22.45	0.000287
5.33	0.340	33.67	0.000440
7.10	0.410	44.90	0.000550
8.88	0.480	56.12	0.000743
10.65	0.580	67.35	0.000923
12.43	0.660	78.57	0.001127
14.20	0.770	89.79	0.001353

Ultimate Load : 15.2693 kg

ผศ4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.4

NO: 4

Type: มอร์ตาร์ล้วน

นน.ตัวอย่าง: 0.474 kg

ความลึกมอร์ตาร์: 1.07 cm ความกว้างมอร์ตาร์: 5.46 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.200	12.78	
3.55	0.330	25.56	
5.33	0.420	38.34	
7.10	0.500	51.12	
8.88	0.590	63.91	

Ultimate Load : 9.9428 kg

ผค5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.5

NO: 5

Type: นอตาร์ฉนวน

นน.ตัวอย่าง:

0.478 kg

ความลึกมอร์ตาร์:

1.09 cm

ความกว้างมอร์ตาร์:

5.32 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain(Mm)
1.78	0.200	12.64	
3.55	0.310	25.28	
5.33	0.400	37.92	
7.10	0.500	50.56	
8.88	0.570	63.20	
10.65	0.660	75.84	

Ultimate Load :

11.3632

kg

ผก6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.6 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.6

NO: 6

Type: เส้นใยคาร์บอน

นน.ตัวอย่าง: 0.469 kg

ความลึกมอดาร์: 1.08 cm ความกว้างมอดาร์: 5.32 cm

<i>force (kgf)</i>	<i>การทรุดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>
1.78	0.080	12.88	
3.55	0.090	25.75	
5.33	0.210	38.63	
7.10	0.290	51.50	
8.88	0.340	64.38	
10.65	0.410	77.25	
12.43	0.460	90.13	
14.20	0.560	103.01	
15.98	0.600	115.88	
17.76	0.700	128.76	
26.63	1.090	193.14	
35.51	1.440	257.52	
44.39	1.820	321.89	
53.27	2.270	386.27	
62.14	2.750	450.65	
71.02	3.210	515.03	
79.90	3.710	579.41	
88.78	4.200	643.79	
97.65	4.660	708.17	
106.53	5.200	772.55	
115.41	5.630	836.93	
124.29	6.020	901.31	
133.16	6.450	965.68	
142.04	6.940	1030.06	
150.92	7.450	1094.44	

ผก7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>force (kgf)</i>	การทรุดตัว(mm)	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>
159.80	7.940	1158.82	
168.67	8.430	1223.20	
177.55	8.980	1287.58	

Ultimate Load : 183.9418 kg



ผศ8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผศ.7 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.7

NO: 7

Type: เส้นใยคาร์บอน

หน.ตัวอย่าง: 0.493 kg

ความลึกมอร์ตาร์: 1.14 cm ความกว้างมอร์ตาร์: 5.60 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.050	10.98	
3.55	0.150	21.96	
5.33	0.230	32.93	
7.10	0.300	43.91	
8.88	0.370	54.89	
10.65	0.410	65.87	
12.43	0.470	76.85	
14.20	0.520	87.83	
15.98	0.590	98.80	
17.76	0.640	109.78	
26.63	0.880	164.67	
35.51	1.160	219.57	
44.39	1.490	274.46	
53.27	1.860	329.35	
62.14	2.220	384.24	
71.02	2.600	439.13	
79.90	2.970	494.02	
88.78	3.350	548.92	
97.65	3.720	603.81	
106.53	4.150	658.70	
115.41	4.530	713.59	
124.29	5.000	768.48	
133.16	5.330	823.37	
142.04	5.750	878.26	
150.92	6.190	933.16	

ผศ9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>force (kgf)</i>	<i>การทรุดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>
159.80	6.600	988.05	
168.67	7.010	1042.94	
177.55	7.490	1097.83	
186.43	7.950	1152.72	
195.31	8.500	1207.61	

Ultimate Load : 197.4356 kg



ผศ10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผศ.8 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.8

NO: 8

Type: เส้นใยคาร์บอน

นน.ตัวอย่าง:

0.469 kg

ความลึกมอร์ตาร์:

1.06 cm

ความกว้างมอร์ตาร์:

5.31 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.110	13.39	0.000057
3.55	0.170	26.78	0.000183
5.33	0.220	40.17	0.000327
7.10	0.290	53.57	0.000440
8.88	0.340	66.96	0.000577
10.65	0.400	80.35	0.000677
12.43	0.470	93.74	0.000830
14.20	0.520	107.13	0.000950
15.98	0.590	120.52	0.001073
17.76	0.650	133.91	0.001203
26.63	0.960	200.87	0.001780
35.51	1.300	267.83	0.002533
44.39	1.620	334.79	0.003403
53.27	2.000	401.74	0.004440
62.14	2.400	468.70	0.005673
71.02	2.820	535.66	0.006897
79.90	3.250	602.61	0.007950
88.78	3.670	669.57	0.009147
97.65	4.100	736.53	0.010233
106.53	4.560	803.49	0.011463
115.41	4.990	870.44	0.012580
124.29	5.470	937.40	0.013917
133.16	5.930	1004.36	0.015083
142.04	6.440	1071.31	0.016320

ผศ11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>force (kgf)</i>	<i>การทรุดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>	
150.92	6.960	1138.27	0.017553	
159.80	7.350	1205.23	0.018853	
168.67	8.000	1272.19	0.020127	
177.55	8.580	1339.14	0.021327	
186.43	9.120	1406.10	0.022700	

Ultimate Load : 192.8193 kg



ผศ12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค.9 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.9

NO: 9

Type: เส้นใยคาร์บอน

นน.ตัวอย่าง:

0.454 kg

ความลึกมอร์ตาร์:

1.23 cm

ความกว้างมอร์ตาร์:

5.28 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain	
1.78	0.090	10.00	0.000043	
3.55	0.180	20.00	0.000240	
5.33	0.260	30.01	0.000380	
7.10	0.360	40.01	0.000543	
8.88	0.540	50.01	0.000710	
10.65	0.620	60.01	0.000810	
12.43	0.710	70.01	0.000937	
14.20	0.790	80.02	0.001070	
15.98	0.890	90.02	0.001207	
17.76	0.970	100.02	0.001340	
26.63	1.440	150.03	0.002013	
35.51	1.850	200.04	0.002887	
44.39	2.300	250.05	0.003970	
53.27	2.770	300.06	0.005357	
62.14	3.230	350.07	0.006580	
71.02	3.750	400.08	0.007797	
79.90	4.200	450.09	0.008920	
88.78	4.680	500.10	0.010100	
97.65	5.060	550.11	0.011137	
106.53	5.690	600.12	0.012260	
115.41	6.230	650.13	0.013153	
124.29	6.770	700.14	0.014313	
133.16	7.340	750.15	0.015550	
142.04	7.940	800.16	0.016697	
150.92	8.540	850.17	0.018003	

ผค13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>force (kgf)</i>	<i>การรูดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>	
159.80	9.210	900.18	0.019310	
168.67	9.900	950.19	0.020527	
177.55	10.750	1000.21	0.021723	

Ultimate Load : 176.1296 kg



ผศ14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผศ.10แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.10

NO: 10

Type: เส้นใยคาร์บอน

นน.ตัวอย่าง: 0.479 kg

ความลึกมอร์ตาร์: 1.15 cm ความกว้างมอร์ตาร์: 5.40 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.230	11.19	
3.55	0.280	22.38	
5.33	0.340	33.56	
7.10	0.380	44.75	
8.88	0.420	55.94	
10.65	0.480	67.13	
12.43	0.540	78.31	
14.20	0.610	89.50	
15.98	0.660	100.69	
17.76	0.700	111.88	
26.63	0.960	167.82	
35.51	1.250	223.76	
44.39	1.580	279.69	
53.27	1.980	335.63	
62.14	2.310	391.57	
71.02	2.650	447.51	
79.90	3.000	503.45	
88.78	3.350	559.39	
97.65	3.700	615.33	
106.53	4.080	671.27	
115.41	4.480	727.21	
124.29	4.860	783.14	
133.16	5.260	839.08	
142.04	5.650	895.02	
150.92	6.050	950.96	

ผศ15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>force (kgf)</i>	<i>การทรุดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>
159.80	6.440	1006.90	
168.67	6.820	1062.84	
177.55	7.250	1118.78	
186.43	7.670	1174.72	
195.31	8.090	1230.66	
204.18	8.510	1286.59	

Ultimate Load : 202.407 kg



ผศ16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.11 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.12

NO: 12

Type: เสาใยเหล็ก

นน.ตัวอย่าง: 0.48 kg

ความลึกมอดาร์:

1.16 cm

ความกว้างมอดาร์: 5.18 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.130	11.46	
3.55	0.280	22.93	
5.33	0.410	34.39	
7.10	0.490	45.85	
8.88	0.560	57.31	
10.65	0.610	68.78	
12.43	0.670	80.24	
14.20	0.720	91.70	
15.98	0.780	103.16	
17.76	0.840	114.63	
26.63	1.100	171.94	
35.51	1.370	229.25	
44.39	1.720	286.57	
53.27	2.150	343.88	
62.14	2.570	401.19	
71.02	3.050	458.51	
79.90	3.490	515.82	
88.78	3.980	573.14	
97.65	4.550	630.45	
106.53	5.280	687.76	

Ultimate Load : 110.081 kg

ผก17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.12 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.13

NO: 13

Type: เส้นใยเหล็ก

นน.ตัวอย่าง: 0.49 kg

ความลึกมอดาร์: 1.13 cm ความกว้างมอดาร์: 5.45 cm

<i>force (kgf)</i>	<i>การทรุดตัว(mm)</i>	<i>stress(ksc)</i>	<i>strain</i>
1.78	0.070	11.48	
3.55	0.150	22.96	
5.33	0.220	34.44	
7.10	0.270	45.92	
8.88	0.320	57.41	
10.65	0.370	68.89	
12.43	0.430	80.37	
14.20	0.480	91.85	
15.98	0.560	103.33	
17.76	0.600	114.81	
26.63	0.900	172.22	
35.51	1.200	229.62	
44.39	1.550	287.03	
53.27	1.970	344.43	
62.14	2.380	401.84	
71.02	2.850	459.24	
79.90	3.400	516.65	
88.78	3.900	574.05	
97.65	4.430	631.46	
106.53	5.100	688.86	
115.41	5.920	746.27	
124.29	6.810	803.67	
133.16	7.900	861.08	

Ultimate Load : 133.1625 kg

ผก18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผค.13 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.14

NO: 14

Type: เส้นใยเหล็ก

นน.ตัวอย่าง: 0.47 kg

ความลึกมอดาร์:

1.11 cm ความกว้างมอดาร์: 5.31 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.100	12.21	0.000110
3.55	0.220	24.42	0.000280
5.33	0.310	36.64	0.000370
7.10	0.370	48.85	0.000557
8.88	0.450	61.06	0.000690
10.65	0.510	73.27	0.000777
12.43	0.570	85.49	0.000910
14.20	0.650	97.70	0.001070
15.98	0.720	109.91	0.001227
17.76	0.760	122.12	0.001367
26.63	1.060	183.18	0.002057
35.51	1.370	244.24	0.002700
44.39	1.860	305.30	0.004153
53.27	2.290	366.36	0.006343
62.14	2.780	427.43	0.008163
71.02	3.350	488.49	0.010483
79.90	4.030	549.55	0.012233
88.78	4.700	610.61	0.014240
97.65	5.380	671.67	0.016243
106.53	6.030	732.73	0.018250

Ultimate Load : 114.3422 kg

ผค19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผก.14 แสดงผลการทดสอบกำลังแรงรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ No.15

NO: 15

Type: เส้นใยเหล็ก

นน.ตัวอย่าง: 0.41 kg

ความลึกมอดาร์:

1.00 cm ความกว้างมอดาร์: 5.20 cm

force (kgf)	การทรุดตัว(mm)	stress(ksc)	strain
1.78	0.130	15.36	0.000140
3.55	0.250	30.73	0.000310
5.33	0.370	46.09	0.000517
7.10	0.500	61.46	0.000707
8.88	0.590	76.82	0.000893
10.65	0.710	92.19	0.000997
12.43	0.800	107.55	0.001233
14.20	0.890	122.92	0.001437
15.98	0.980	138.28	0.001620
17.76	1.070	153.65	0.001867
26.63	1.450	230.47	0.002607
35.51	1.930	307.30	0.003840
44.39	2.460	384.12	0.005987
53.27	3.020	460.95	0.008050
62.14	3.570	537.77	0.009660
71.02	4.200	614.60	0.011757
79.90	4.980	691.42	0.013350
88.78	5.940	768.25	0.014840

Ultimate Load :

89.4852 kg

ผก20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้