

การศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของไฟเบอร์โลหะในคอนกรีตเสริมเส้นใย  
A STUDY OF APPROPRIATE VOLUME FRACTION OF STEEL FIBER  
IN FIBER REINFORCED CONCRETE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

033403

**A STUDY OF APPROPRIATE VOLUME FRACTION OF STEEL FIBER  
IN FIBER REINFORCED CONCRETE**



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

**1993**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

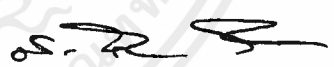
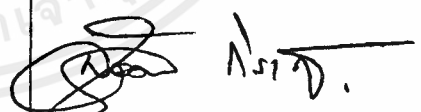
หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของไฟเบอร์โกละในคอนกรีตเสริมเส้นใย

นักศึกษา นายอุกฤษา จิระธนาไพบุลย์ รหัสประจำตัว 33100311  
นางสาวอุกฤษา ศรีวิชัย รหัสประจำตัว 33100527

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สุวัฒน์ ภิรเศรษฐ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
อาจารย์ สุวัฒน์ หวังเจริญ	
อาจารย์ ศักดิ์ชัย สกานพงษ์	
อาจารย์ สุวัฒน์ ภิรเศรษฐ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

.....

(นายสุวัฒน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ เดือน พ.ศ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของไฟเบอร์โลหะในคอนกรีตเสริมเส้นใย  
 A STUDY OF APPROPRIATE VOLUME FRACTION OF STEEL FIBER  
 IN FIBER REINFORCED CONCRETE

โดย นายยุทธนา จิระธนาไพบูลย์  
 นางสาวอุทุมพร ศรีวิชัย  
 อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุวัฒน์ กิระเศรษฐ์

บทคัดย่อ

คอนกรีตเสริมเส้นใย คือ คอนกรีตที่ได้จากการนำปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาผสมกับวัสดุมวลรวม และเส้นใยสั้นให้มีคุณสมบัติต่างๆ กัน ซึ่งได้มีการประยุกต์ไปใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ ในต่างประเทศ เช่น พนังอุโมงค์, พนัสยามบิน, งานอาคารสูง ฯลฯ ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของไฟเบอร์โลหะในคอนกรีตเสริมเส้นใย และศึกษาคุณสมบัติในการรับแรงอัด, แรงดึง, แรงดัด และความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะที่อัตราส่วนผสมนั้น จากผลการศึกษาปรากฏว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 1.4% - 1.5% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนผสมวิกฤตที่ได้จากการคำนวณ ในด้านค่าใช้จ่ายของคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะ พบว่ามีราคาแพงกว่าคอนกรีตธรรมดา 8-11 เท่า

ABSTRACT

"FIBER REINFORCED CONCRETE" IS CONCRETE MADE OF HYDRAULIC CEMENTS CONTAINING FINE OR FINE AND COARSE AGGREGATE AND DISCONTINUOUS DISCRETE FIBER, THAT THE PROPERTIES ARE BETTER THAN NORMAL CONCRETE. "FRC" IS APPLIED TO USE IN MANY TYPES OF CONSTRUCTION WORK IN FOREIGN COUNTRY. FOR INSTANCE TUNNEL WALL, AIRFIELD PAVEMENT, HIGHRISE BUILDING ETC. IN THIS SPECIAL PROJECT, WE STUDY ABOUT AN APPROPRIATE VOLUME FRACTION OF STEEL FIBER IN "FRC" AND THEIR COMPRESSIVE STRENGTH, TENSILE STRENGTH, FLEXURAL STRENGTH, TOUGHNESS AT THAT VOLUME FRACTION. THE STUDY SHOWS THAT AN APPROPRIATE VOLUME FRACTION IS 1.4%-1.5%. IT CLOSES TO THE CRITICAL VOLUME FRACTION THAT CAN CALCULATE FROM THEORY. THE COST OF FRC IS 8-11 TIMES THAT OF NORMAL CONCRETE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

การที่รายงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้นั้น มิได้เกิดจากผู้ทำการศึกษาเพียงลำพัง จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุคคล ผู้มีส่วนให้รายงานฉบับนี้บรรลุผลสำเร็จ ดังนี้

อาจารย์ สุวัฒน์ ภิรเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความสะดวกในการติดต่อและประสานงาน

ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณบุคคลเหล่านี้อีกครั้ง และจะระลึกถึงตลอดไป

นางสุกฤษฎา จิระธนาไพบลูย์

นางสาวอุทุมพร ศรีวิชัย

5 เมษายน 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 นิยาม	1
1.2 ส่วนประกอบของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย	1
1.3 ประเภทของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย	2
1.4 คุณสมบัติของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย	3
1.5 ความมุ่งหมายของโครงการพิเศษ	4
<b>บทที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบฯ</b>	<b>5</b>
2.1 สารเมตริกซ์	5
2.2 สารไฟเบอร์	7
2.3 การคำนวณอัตราส่วนผสม	9
2.4 น้ำและสารลดน้ำ	10
2.5 วัสดุผสมเพิ่มเติม	11
2.6 สารเคมีผสมเพิ่มอื่นๆ	11
2.7 คุณสมบัติของสารผสมเสริมเส้นใย	11
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย</b>	<b>15</b>
3.1 ทฤษฎีรับแรงดึงตามแนวแกน	15
3.2 ทฤษฎีการรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย	42
3.3 คุณสมบัติของ FRC (ที่ใช้วัสดุมวลรวมขนาดใหญ่) ที่เพิ่มผสมเสริม	57
<b>บทที่ 4 วิธีทำการทดลอง</b>	<b>59</b>
4.1 สัดส่วนการผสม, ขั้นตอนการผสมและการเท	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 คุณสมบัติของไฟเบอร์โกละ, ปฏิภาคส่วนผสมและวิธีการคำนวณ	63
4.3 วิธีทดลอง	71
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง</b>	86
ค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของไฟเบอร์	87
ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์กับคอนกรีต	90
ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (ตัวอย่างขนาด 4")	108
ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของ FRC	113
ค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของ FRC (Splitting)	117
ค่าความยาววิกฤตของไฟเบอร์	121
ค่ากำลังรับแรงดัด และความเหนียวของ FRC	124
กราฟความสัมพันธ์ Load-Deflection ของ FRC	131
กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยว	179
การหาค่า $V_f$ ( $\frac{f_{ct}}{f_c}$ )	182
<b>บทที่ 6 บทสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	184
6.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	184
6.2 สรุปผลการทดลอง	191
<b>บทที่ 7 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการใช้ SFRC จากการทดลองในด้านต่างๆ</b>	203
7.1 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละที่ค่า อัตราส่วนปริมาตรไฟเบอร์โกละ	203
7.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตเสริม ไฟเบอร์โกละ	204
7.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเมื่อใช้คอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ จากการทดลองแทนคอนกรีตที่บ้นหน้า	206
7.4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเมื่อใช้คอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ จากการทดลองแทนคอนกรีตพื้นทาง	207
7.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อซีเมนต์ไยหนักกับต่อที่ผลิตจากคอน กรีตเสริมไฟเบอร์โกละ	208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
<b>บทที่ 8 การใช้งาน</b>	<b>212</b>
8.1 ไฟเบอร์โลหะ	212
8.2 ไฟเบอร์ใยแก้ว	218
8.3 ไฟเบอร์ Polymeric	219
8.4 ไฟเบอร์ Carbon Steel	219
<b>บทที่ 9 ภาพประกอบการทดลอง</b>	<b>231</b>
<b>บทที่ 10 ข้อผิดพลาด และอุปสรรคในการทำงาน</b>	<b>239</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>240</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
2.1 แสดงไฟเบอร์โหละในรูปแบบต่างๆที่ใช้ในสารผสมคอนกรีตเสริมเส้นใย	6
3.1 แสดงการทดสอบสารผสมเสริมเส้นใยด้วยแรงตามแนวแกน	24
3.2 แสดงกราฟ load-extention ของการทดสอบด้วยแรงดึงตามแนวแกน	24
3.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ fiber volume fraction และ strength ที่แสดงตำแหน่งของ critical volume fraction	27
3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในอุดมคติของวัสดุสารผสมเสริมเส้นใย	30
3.5 แสดงผังการกระจายหน่วยความเครียดหลังจากเกิดการแตกหักของสารผสมเส้นใยต่อเนื่อง	31
3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดที่เป็นจริงของสารผสม 4 อย่าง	34
3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรอยแตกร้าวของไฟเบอร์ต่อเนื่องและไฟเบอร์เส้นสั้น	41
3.8 แสดงการเปรียบเทียบทิศทางของไฟเบอร์ต่อเนื่องจากรอยแตกร้าว	41
3.9 แสดงการกระจายความเค้นและความเครียดในการแตกของซีเมนต์	51
3.10 แสดงผังการกระจายหน่วยความเค้นของแรงตัด	51
3.11 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของแรงดึงตามแนวแกน	52
3.12 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสการแตกร้าวและกำลังรับแรงดึง กับค่า $\alpha = E_m V_m / E_f V_f$ ที่ค่าต่างๆ	53
3.13 แสดงปริมาตรของไฟเบอร์ที่น้อยที่สุดสำหรับกำลังรับแรงตัด	54
3.14 แสดงปริมาตรของไฟเบอร์ที่น้อยที่สุดสำหรับกำลังรับแรงดึง ที่ $\sigma_c / \tau$	55
3.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการแตกร้าวกับปริมาตรไฟเบอร์	55
3.16 แสดงผลกระทบของ bond strength ที่มีต่อโมดูลัสการแตกร้าว	56

	หน้า
6.1 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ จากสมการ 3.2.8 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตกำลัง อัดประลัย 200 ksc) -	194
6.2 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ จากสมการ 3.2.8 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตกำลัง อัดประลัย 450 ksc)	195
6.3 แสดงค่า First Crack Flexural Strength ที่ได้จากการ คำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตกำลังอัดประลัย 200 ksc)	196
6.4 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตกำลังอัดประลัย 200 ksc)	197
6.5 แสดงค่า First Crack Flexural Strength ที่ได้จากการ คำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตกำลังอัดประลัย 450 ksc)	198
6.6 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตกำลังอัดประลัย 450 ksc)	199
6.7 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงดัด และ ค่าความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใย (200, 450 ksc)	200
6.8 แสดงความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นใน element	202
7.1 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบราคาของ FRC ตามเปอร์เซ็นต์ ของไฟเบอร์ที่ผสม	210
7.2 แสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบราคาของ FRC กับ คอนกรีตล้วน	211
8.1 แสดงภาพรวมของบันได SFRC ก่อนประกอบเพื่อใช้งาน	220
8.2 แสดงภาพโดยรวมของกำแพง SFRC ชนิดไม่มีโครงยึด	221
8.3 แสดงรายละเอียดผนัง SFRC ชนิดต่างๆ	222
8.4 แสดงภาพโดยรวมของกำแพง SFRC ชนิดมีโครงยึด	223
8.5 แสดงตัวอย่างการใช้งานของผนัง SFRC ชนิดมีโครงยึดของอาคารพัก อาศัยในโตเกียว	224

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
8.6 แสดงตัวอย่างการใช้งาน-V <sup>u</sup> ผนัง SFRC ชนิดไม่มีโครงยึดของอาคาร พักอาศัยในชั้นโพล	226
8.7 แสดงกราฟของชั้นบันไดประเภทเสริมไฟเบอร์และไม่เสริมไฟเบอร์	228
8.8, 8.9 แสดงการใช้งานบันได SFRC	
9.1 แสดงเครื่อง UTM สำหรับทดสอบ BOND STRENGTH ของลวด	231
9.2 แสดงเครื่องคอมพิวเตอร์ ควบคุมเครื่อง UTM ที่ใช้ทดสอบ BOND STRENGTH	231
9.3 แสดงการเตรียมเครื่องมือสำหรับทดสอบ BOND STRENGTH	232
9.4 แสดงไฟเบอร์ที่เตรียมไว้ผสมกับคอนกรีต	232
9.5 แสดงการผสมส่วนผสมของคอนกรีตกับไฟเบอร์ในโมผสม	233
9.6 แสดงคอนกรีตเสริมเส้นใยที่เพิ่งผสมเสร็จ	233
9.7 แสดงการเทคอนกรีตเสริมเส้นใยลงในแบบคาน	234
9.8 แสดงการทดสอบ COMPRESSIVE STRENGTH ของคอนกรีตเสริมเส้นใย	234
9.9 แสดงการทดสอบ COMPRESSIVE STRENGTH ของลูกปูนขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลาง 4"	235
9.10 แสดงการพังทลายด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ 45 องศาของการทดสอบ COMPRESSIVE STRENGTH	235
9.11 แสดงการทดสอบ SPLITTING TENSILE STRENGTH ของคอนกรีต เสริมเส้นใย	236
9.12 แสดงการทดสอบ FLEXURAL STRENGTH และ TOUGHNESS ของคาน คอนกรีตเสริมเส้นใย	236
9.13 แสดงตำแหน่งการวัดค่า DEFLECTION ของคานในการทดสอบ FLEXURAL STRENGTH และ TOUGHNESS	237
9.14 แสดงการพังทลายของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่เกิดขึ้นบริเวณกลางคาน	237
9.15 แสดงรูปคานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ผ่านการทดสอบแล้ว	238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของไฟเบอร์	13
2.2 แสดงขนาดคละของมวลหยาบ	14
3.1 แสดงองค์ประกอบประสิทธิภาพการวางตัวของไฟเบอร์	20
3.2 แสดงประสิทธิภาพของไฟเบอร์ที่มีความยาวเกินความยาววิกฤต	40
4.1 แสดงอัตราส่วนผสมของ SFRC	61
6.1 แสดงค่า Direct Tensile Strength ก่อนการแตกร้าว ที่ได้จากการคำนวณ	192
6.2 แสดงค่า Flexural Tensile Strength ก่อนการแตกร้าว ที่ได้จากการคำนวณ	193
6.3 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตเสริมเส้นใย ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 6.6	202
7.1 แสดงค่าใช้จ่ายของ SFRC เมื่อ %V มีค่าสูงขึ้น	203
7.2 แสดงค่าใช้จ่ายของ คอนกรีตล้วนและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โหละ	204
7.3 แสดงค่าใช้จ่ายของ คอนกรีตทับหน้าแบบใช้เสริมเหล็กและแบบเสริมเส้นลวด	206
7.4 แสดงค่าใช้จ่ายของ คอนกรีตพื้นทางแบบใช้เหล็กเสริมและแบบเสริมเส้นลวด	207
7.5 แสดงค่าใช้จ่ายของ ท่อซีเมนต์ใยหินและท่อคอนกรีตเสริมเส้นใย	208

## บทที่ 1 บทนำ

โดยแท้จริงแล้ว แนวความคิดเกี่ยวกับการนำเอาเส้นใยชนิดต่าง ๆ มาผสมรวมกับสารต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสารนั้น ๆ ได้มีกันมานานแล้ว เช่น การผสมผงข้าวหรือขมิ้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอิฐที่ทำจากดินเหนียว เป็นต้น ซึ่งมีการทำกันมาเป็นเวลากว่าพันปีแล้ว

ในปัจจุบันได้มีการนำเอา "สารผสมเสริมเส้นใย" (Fiber Reinforced Composites) มาใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านต่าง ๆ เช่น การนำเอาเส้นใยกำลังสูงผสมกับสารเคมีเพื่อใช้ทำแผ่นเซรามิคพิเศษที่ใช้กับยานอวกาศ แต่ส่วนที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการพิเศษนี้ จะเป็นการนำเอาเส้นใยผสมรวมกับสารผสมของซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า "สารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย" (Fiber Reinforced Cement Composites)

### 1.1 นิยาม

"สารผสมเสริมเส้นใย" (Fiber Reinforced Composites) หมายถึง สารตั้งแต่ 2 ชนิด ขึ้นไป นำมาผสมรวมกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสารเมตริกซ์ให้ดีขึ้น โดยใช้คุณสมบัติของสารที่เป็นไฟเบอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ไม่มีความต่อเนื่อง

"สารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย" (Fiber Reinforced Cement Composites) หมายถึง สารผสมเสริมเส้นใยที่มีสารเมตริกซ์ที่มี ส่วนประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นพื้นฐาน

### 1.2 ส่วนประกอบของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย

1. สารเมตริกซ์ (Matrix) หมายถึง สารที่เป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งของสารผสมที่มีคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการให้มีการปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยใช้สารไฟเบอร์ผสม ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซีเมนต์มอร์ต้า, silica fume, คอนกรีต

2. สารไฟเบอร์ (Fiber) หมายถึง สารที่เป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งของสารผสมที่ถูกใช้ผสมเข้าไปในสารผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของสารเมตริกซ์ มีลักษณะเส้นยาว ๆ ที่ไม่มีความต่อเนื่อง ได้แก่ เส้นใยโกลทะเล, เส้นใย Polymeric, เส้นใย Mineral และเส้นใยจากธรรมชาติ

3. สารผสมเพิ่ม (Admixture) หมายถึง สารผสมเพิ่มเติม, นอกจากสารเมตริกซ์ และสารไฟเบอร์ เพื่อให้ปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของสารผสม ได้แก่ High-range water-reducing admixtures, Retarder

4. น้ำ หมายถึง น้ำสะอาดที่ใช้ผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

### 1.3 ประเภทของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย

การแยกประเภทของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย สามารถทำได้หลายลักษณะ ดังนี้

1.3.1 ประเภทของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย แบ่งตามสารเมตริกซ์ที่เป็น ส่วนประกอบ

1. สารผสมที่มี ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เป็นสารเมตริกซ์
2. สารผสมที่มี fly ash หรือ Silica fume เป็นสารเมตริกซ์
3. สารผสมที่มี ซีเมนต์มอร์ต้า เป็นสารเมตริกซ์
4. สารผสมที่มี คอนกรีต เป็นสารเมตริกซ์

1.3.2 ประเภทของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย แบ่งตามสารไฟเบอร์ที่เป็น ส่วนประกอบ

1. สารที่ผสมกับไฟเบอร์โลหะ เช่น Steel Fiber Reinforced Concrete
2. สารที่ผสมกับไฟเบอร์ Polymeric เช่น Polypropyrene Fiber Reinforced Cement Mortar
3. สารที่ผสมกับไฟเบอร์ Mineral เช่น Glass Fiber Reinforced Cement Mortar
4. สารที่ผสมกับไฟเบอร์จากธรรมชาติ เช่น cellulose Fiber Reinforced Cement Mortar

1.3.3 ประเภทของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย แบ่งตามปริมาณของไฟเบอร์ที่ผสมในสารผสม

1. Low Volume Fraction - เป็นสารผสมที่มีปริมาณของไฟเบอร์ต่ำกว่า 1 % โดยปริมาตร ซึ่งมักใช้สารผสมที่มี concrete เป็นสารเมตริกซ์

2. Moderate Volume Fraction - เป็นสารผสมที่มีปริมาณของไฟเบอร์ปานกลาง คืออยู่ระหว่าง 1-5 % โดยปริมาตร มักใช้ในกรณีพิเศษ สำหรับการสร้างห้องหลบภัยใต้ดิน

3. High Volume Fraction - เป็นสารผสมที่มี ปริมาณของไฟเบอร์สูงอยู่ระหว่าง 5-15 % โดยปริมาตร ซึ่งมักใช้สารผสมที่มีปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือซีเมนต์มอร์ต้าเป็นสารเมตริกซ์ ใช้ทำโครงสร้างแผ่นบาง

#### 1.4 คุณสมบัติของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า สารผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะมีคุณสมบัติเมื่อแข็งตัวแล้วเป็นวัสดุที่มีความแข็ง แต่เปราะ (Brittle) ซึ่งเมื่อถูกแรงกระทำที่เป็นแรงดึง หรือแรงกระทบ (impact) ก็มักจะแตกร้าวได้ง่าย จึงได้มีแนวความคิดที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของสารปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้สามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้น รวมทั้งมีความเหนียวเพิ่มขึ้นด้วย (toughness) ด้วยสารผสมไฟเบอร์ รวมกับสารผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

คุณสมบัติของสารผสมซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากการผสมไฟเบอร์แล้ว ได้แก่

1. ความแข็งแรงในการรับแรงดึง และความแข็งแรงในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น
2. ความแข็งแรงในการรับแรงกระทบเพิ่มขึ้น
3. ลักษณะของรอยแตกร้าว และลักษณะของการพังทลายของสารผสมเปลี่ยนไปจากเดิม
4. คุณสมบัติในการไหล (Flow characteristics) ของสารผสมขณะยังไม่แข็งตัวเปลี่ยนไปจากเดิม

การศึกษาทำความเข้าใจสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย (FRCC) ได้มีการทำกันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ แต่ยังมีปัญหาอีกเรื่องหนึ่งที่สำคัญมาก คือ พฤติกรรมในระยะยาวของ FRCC เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดใหม่ และในทางวิศวกรรมโยธา นั้น คุณสมบัติของวัสดุนั้นต้องเหมือนเดิมเป็นเวลาอย่างน้อย 50 ปี เป็นอย่างต่ำ ดังนั้น จึงยังไม่มี การนำเอา FRCC ไปใช้

ทำโครงสร้างสำคัญ ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจาก การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ FRCC ตาม เวลา ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้

### 1.5 ความมุ่งหมายของโครงการงานพิเศษและขอบเขตการศึกษา

โครงการงานพิเศษนี้ มีชื่อหัวข้อว่า "การศึกษาหาอัตราส่วนผสมของไฟเบอร์โพลีเอทิลีนที่เหมาะสมในคอนกรีตเสริมเส้นใย" จากหัวข้อข้างต้น ทำให้ทราบว่า ในโครงการนี้จะทำการ ศึกษาเกี่ยวกับ "สารผสมของซีเมนต์เส้นใย" (FRCC) ในส่วนที่ใช้คอนกรีตเป็นสารเมตริกซ์ และใช้ Steel ไฟเบอร์เป็นสารไฟเบอร์ ที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต

ความมุ่งหมายของโครงการงานพิเศษนี้ ก็คือ การหาอัตราส่วนผสมของไฟเบอร์ใน คอนกรีตเสริมเส้นใย ที่ค่าที่สุด ที่ทำให้กำลังต้านทานในการรับแรงดัดยังมีค่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และมีความเหนียวแข็ง (toughness) เพิ่มขึ้น เพื่อให้เสริมความปลอดภัย ความคงทน ของ โครงสร้างต่าง ๆ รวมทั้ง หาค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในการทำคอนกรีตเสริมเส้นใย และแสดงตัว อย่างการประยุกต์ใช้ของคอนกรีตเสริมเส้นใยประเภทต่าง ๆ

## บทที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบฯ

เราได้ทราบจากบทที่แล้วว่า องค์ประกอบของสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใยมีอะไรบ้าง แต่ในบทนี้ จะอธิบายถึงรายละเอียดเพิ่มเติม และกล่าวถึงประเภทและคุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของสาร ซึ่งเป็นองค์ประกอบด้วย

### 2.1 สารเมตริกซ์ (Matrix)

#### 2.1.1 ซีเมนต์ (cement)

สารเมตริกซ์ที่ใช้กันส่วนใหญ่ จะต้องมีส่วนประกอบของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์หรือสารบางอย่างที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน และเป็นสารที่ต้องปรับปรุงคุณสมบัติในการรับแรงให้ดีขึ้น โดยทั่วไปแล้ว พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่จะใช้จะเป็น พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดธรรมดา (TYPE I) ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งคอนกรีตที่ทำจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดนี้ ตามมาตรฐานแล้ว จะได้กำลังตามที่ออกแบบไว้หลังจาก การบ่มเป็นเวลา 28 วัน ส่วนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ เช่น high early strength cement, low heat cement, sulfate-resistant cement สามารถนำมาทำเป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยได้ทุกชนิด โดยที่มีปัจจัยบางอย่าง เช่น ประเภทของโครงสร้าง สภาพแวดล้อม และความต้องการกำลังของคอนกรีต เป็นตัวบ่งชี้ว่า ควรเลือกซีเมนต์ชนิดใดในการทำ

ในโครงการพิเศษนี้ คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ทดสอบ ได้ทำจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิด high early strength (TYPE III) ของบริษัทปูนซีเมนต์ TPI เนื่องจาก ข้อจำกัดทางด้านเวลา ในการทำโครงการพิเศษ ซึ่งการเลือกใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ดังกล่าว ได้ช่วยลดเวลาทำงานของโครงการนี้ลงอย่างมาก

#### 2.1.2 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมที่เหมาะสมสำหรับการทำคอนกรีตล้วน (plain concrete) ก็มีความเหมาะสมที่จะใช้ทำคอนกรีตเสริมเส้นใยเช่นกัน ซึ่งตามปกติ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ

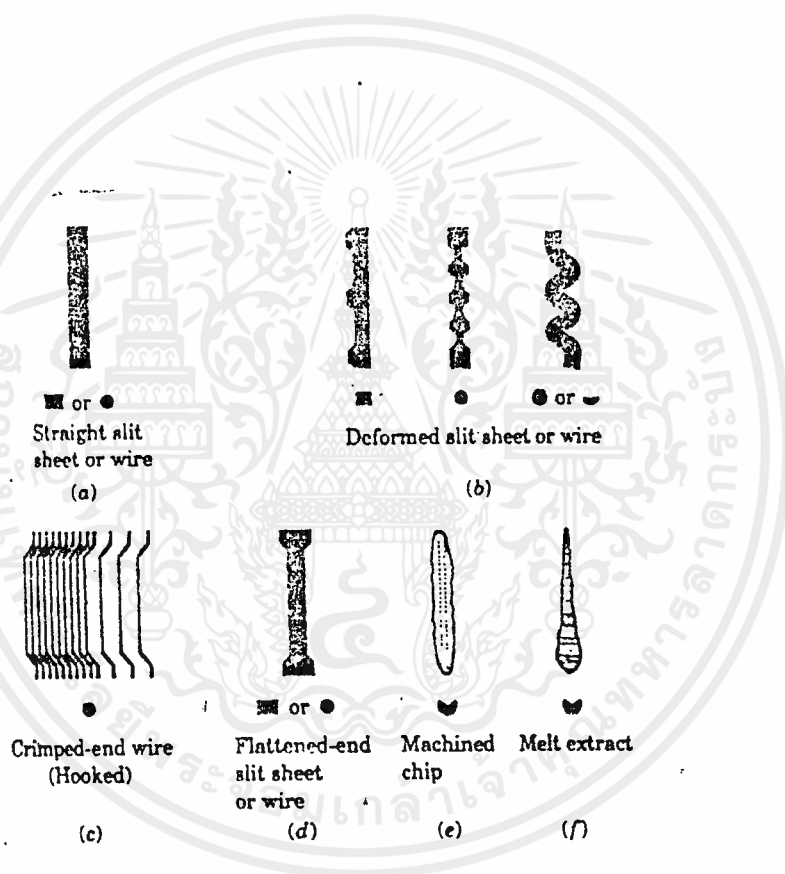
##### 2.1.2.1 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

โดยปกติแล้วมวลรวมละเอียดจะหมายถึง ทรายที่ได้มาจากธรรมชาติ

หรือ 50-200 ksi ซึ่งกำลังรับแรงดึงต่ำสุดที่ ASTM กำหนดไว้ ต้องไม่ต่ำกว่า 345 MPa (50 ksi) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น มีค่าประมาณ 200 Gpa หรือ 29,000 ksi

รูปร่างหน้าตัดของไฟเบอร์ อาจจะเป็นวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปร่างบิด เบี้ยว ฯลฯ ส่วนความยาวของไฟเบอร์ โดยปกติ ต้องไม่เกิน 3 นิ้ว หรือ 75 มม ถึงแม้ว่า บางครั้งจะสามารถใช้ไฟเบอร์ที่มีความยาวมากกว่านี้ได้ก็ตาม ค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของไฟเบอร์ มีค่าตั้งแต่ 30-100 หรืออาจมากกว่านั้นก็ได้

ชนิดของไฟเบอร์โลหะ และรูปร่าง สามารถดูได้จากรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 2.1 แสดงไฟเบอร์โลหะในรูปต่างๆ ที่ใช้ในสารผสมคอนกรีตเสริมไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชาติหรือได้มาจากการย่อยหิน หรือบางทีก็ได้มาจากการผลิตทางอุตสาหกรรม ทรายที่ได้จากธรรมชาติจะนำไปทำคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal-weight concrete) แต่ในการผลิตคอนกรีตหรือมอร์ตาร์น้ำหนักเบา (light-weight concrete or mortar) จะใช้มวลรวมละเอียดน้ำหนักเบาที่ได้จากการผลิตทางอุตสาหกรรม และยังมีการใช้มวลรวมละเอียดที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักในการทำคอนกรีต (heavy-weight concrete) สำหรับเป็นกำแพงป้องกันในโรงงานนิวเคลียร์ด้วย

ขนาดมวลรวมละเอียดหรือทราย มีความสัมพันธ์กับการนำไปประยุกต์ใช้ด้วย อย่างเช่น ทรายละเอียด จะใช้ในการทำโครงสร้างแผ่นบาง (thin sheet) และท่อ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก ๆ ขณะที่ทรายหยาบ จะใช้ในการทำ shotcrete , ท่อซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางมาก ๆ และกำแพงที่มีความหนา มากกว่า 1 นิ้ว ส่วนเรื่องขนาดละเอียดและความสะอาด ของมวลรวมละเอียดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-33

#### 2.1.2.2 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

มวลรวมหยาบในธรรมชาติมีทั้งชนิด น้ำหนักเบา น้ำหนักธรรมดา น้ำหนักมาก อยู่แล้ว แต่สำหรับชนิดน้ำหนักมาก มักจะมีการใช้กันมาก มวลรวมหยาบ น้ำหนักปกติจะทำจากกรวด หรือหินย่อยต่าง ๆ ส่วนมวลรวมหยาบ น้ำหนักเบาจะใช้หินชนวน หินดินดาน หรือหินทัมมิส (pumice) ในการทำ ในการนำไปประยุกต์ ใช้ทำเป็นผนังเบาสำหรับป้องกันเสียงนั้น มักใช้มวลรวมหยาบน้ำหนักเบา ซึ่งมักมีปัญหาที่มีกำลังต่ำ การผสมไฟเบอร์เข้าไปในคอนกรีตชนิดนี้ ก็จะช่วยเพิ่มกำลังได้ นอกจากนี้ การใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยกับมวลรวมหยาบน้ำหนักปกติ ก็มีการทำกันในภาคสนามในต่างประเทศแล้ว เช่น การทำผิว pavement ของถนน เป็นต้น

ส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบ สามารถดูรายละเอียดได้จากตารางข้างล่างนี้ ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับผสมคอนกรีต จัดทำโดย ACI Committee

## 2.2 สารไฟเบอร์ (Fiber)

### 2.2.1 ไฟเบอร์โลหะ (Metallic Fiber)

ไฟเบอร์โลหะ สามารถทำได้จาก ทั้งเหล็กผสมคาร์บอนและเหล็กสแตนเลส (carbon steel or stainless steel) กำลังรับแรงดึง อยู่ในระหว่าง 345-1380 MPa

### 2.2.2 ไฟเบอร์ Polymeric

ไฟเบอร์ polymeric เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยและพัฒนา ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและสิ่งทอ ตัวอย่างไฟเบอร์ Polymeric ที่ใช้กับสารผสมซีเมนต์ ได้แก่ acrylic, aramidnylon, polyester, polyethylene และ polypropylene ซึ่งไฟเบอร์เหล่านี้ล้วนแต่มีกำลังรับแรงดึงสูงทั้งสิ้น (ยกเว้น aramid) และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำมาก คุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์อย่างมากของไฟเบอร์ Polymeric คือค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งมีค่าสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของไฟเบอร์ Polymeric มีค่าอยู่ในระดับไมโครเมตรเท่านั้น ตารางข้างล่างนี้จะแสดงคุณสมบัติที่สำคัญของไฟเบอร์ Polymeric ชนิดต่างๆ

ความยาวของไฟเบอร์ Polymeric จะอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 นิ้ว (12-50 mm) แต่ไฟเบอร์บางชนิดก็มีความยาวไฟเบอร์สั้นมาก (pulp form) คือประมาณ 2-3 mm นอกจากนี้ยังมีไฟเบอร์ที่มีความยาวมาก ๆ ด้วยสำหรับการใช้ในการเสริมแรงคอนกรีตไฟเบอร์ต่อเนื่อง (continuous fiber reinforcement)

### 2.2.3 ไฟเบอร์คาร์บอน

ไฟเบอร์คาร์บอนเป็นไฟเบอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ก็มีปัญหาในเรื่องราคาซึ่งแพงมาก จึงทำให้การประยุกต์ใช้ไฟเบอร์คาร์บอนที่ผ่านๆมามีน้อยมาก จนเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการผลิตไฟเบอร์คาร์บอนราคาถูกขึ้นมาใช้กันโดยผลิตจากน้ำมันและถ่านหิน อย่างไรก็ตามราคาที่ว่าถูกลงนั้นก็ยิ่งสูงกว่าราคาของไฟเบอร์ Polymeric อยู่มาก ไฟเบอร์คาร์บอนมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงกว่าเส้นใยเหล็ก (steel fiber) ประมาณ 2-3 เท่า มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับเส้นใยเหล็ก รวมทั้งมีน้ำหนักเบา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.9 และเป็นวัสดุเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาของสารเคมี

ไฟเบอร์คาร์บอนมักจะผลิตอยู่ในรูปของเส้นใยตีเกลียว (strand) ที่ใช้เส้นใยถึง 12,000 เส้นในการทำเส้นใยตีเกลียวเพียงหนึ่งเส้นเท่านั้น ซึ่งเส้นใยตีเกลียวนี้จะต้องถูกแกะออกเสียก่อนที่จะนำไปผสมกับสารผสมของซีเมนต์

### 2.2.4 ไฟเบอร์ใยแก้ว

โดยแรกเริ่มไฟเบอร์เส้นใยแก้วถูกใช้ในการทำแผ่นบาง (glass fiber-reinforcement cement sheet) โดยปกติไฟเบอร์เส้นใยแก้วชนิด E จะถูกทำลายเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีในการผสมคอนกรีตซึ่งมีค่าต่างสูง ซึ่งด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาไฟเบอร์เส้นใยแก้วชนิด AR



2.2.5 ไฟเบอร์เส้นใยจากธรรมชาติ

เทคนิคของการเสริมเส้นใยในสารผสม โดยแรกเริ่มเกิดจากการนำเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น ฟางข้าว, ขนม้ามาทำเป็นเส้นใยเสริมแรงในอิฐ เทคโนโลยีสมัยใหม่ได้ทำให้มีการนำเอาเส้นใยไฟเบอร์จากพืชชนิดต่างๆมาใช้เพิ่มขึ้น เช่น ไม้ไผ่, ปอกระเจาในการทำสารผสมของซีเมนต์ แต่ไฟเบอร์ที่ถูกนำไปใช้นี้ต่างมีค่ากำลังรับแรงดึงต่ำทั้งสิ้น แต่ก็สามารถนำไปใช้ในกรณีที่สารผสมของซีเมนต์ที่ไม่ต้องการความเหนียวมากนัก ปัญหาสำคัญอีกอย่างของการใช้เส้นใยจากธรรมชาติก็คือ เมื่อเวลาผ่านไปเส้นใยจะถูกทำให้สลายตัวไปเนื่องจากความต่างของคอนกรีต ได้มีความพยายามที่จะปรับปรุงให้เส้นใยประเภทนี้ มีความทนทานสูงขึ้นกว่าเดิม โดยการผสมน้ำยาที่ช่วยลดความเป็นด่างหรือ โดยการนำเอาเส้นใยไปผ่านกระบวนการพิเศษ

เส้นใยธรรมชาติที่ใช้ผสมกับสารผสมของซีเมนต์ ได้แก่ เส้นใยจากต้นไผ่, ต้นมะพร้าว, ต้นปอ, ต้นอ้อ เป็นต้น ตารางข้างล่างนี้แสดงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของเส้นใยชนิดต่างๆ

2.3 การคำนวณอัตราส่วนผสม

- $W_{f,pr}$  = % น้ำหนักของไฟเบอร์ (ทางปฏิบัติ) แปรผันตามน้ำหนักของสารเมตริกซ์
- $W_{f,th}$  = % น้ำหนักของไฟเบอร์ (ทางทฤษฎี) แปรผันตามน้ำหนักและปริมาตรของสารผสมทั้งหมด (สารเมตริกซ์ + สารไฟเบอร์)
- $V_{f,pr}$  = อัตราส่วนปริมาตรของไฟเบอร์เทียบกับปริมาตรทั้งหมดของสารผสม
- $V_{f,th}$  = อัตราส่วนปริมาตรของเมตริกซ์เทียบกับปริมาตรทั้งหมดของสารผสม
- $D_{f,pr}$  = ค่าความหนาแน่นของไฟเบอร์
- $D_{f,th}$  = ค่าความหนาแน่นของเมตริกซ์

$$\begin{aligned} \text{ทางปฏิบัติ} \quad W_{f,pr} &= \frac{\text{น้ำหนักของไฟเบอร์}}{\text{น้ำหนักของเมตริกซ์}} * 100\% \\ &= (V_{f,pr} D_{f,pr} / V_{f,th} D_{f,th}) * 100\% \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} \text{ทางทฤษฎี} \quad W_{f,th} &= \frac{\text{น้ำหนักของไฟเบอร์}}{(\text{น้ำหนักของเมตริกซ์} + \text{น้ำหนักของไฟเบอร์})} * 100\% \\ &= (V_{f,th} D_{f,th} / (V_{f,th} D_{f,th} + V_{f,pr} D_{f,pr})) * 100\% \end{aligned} \tag{2.2}$$

ทดลองคำนวณสมการ (2.1) และ (2.2) โดยใช้ไฟเบอร์เส้นใยเหล็กที่ปริมาตร

2 % ( $V_f = 0.02$ ) ในการผสมกับคอนกรีต ค่า  $D_s = 7860 \text{ kg/m}^3$  ,  $D_m = 2350 \text{ kg/m}^3$

$$\text{สมการ 2.1} \quad W_{f,} = \frac{0.02 * 7860 * 100}{0.98 * 2350} = 6.84\%$$

$$\text{สมการ 2.2} \quad W_{f,} = \frac{0.02 * 7860}{(0.98 * 2350 + 0.02 * 7860)} * 100 = 6.42\%$$

เพราะฉะนั้นค่าอัตราส่วนของปริมาณของไฟเบอร์เพียงค่าเดียว อาจหมายถึงค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไฟเบอร์ได้ถึงสองค่า ขึ้นอยู่กับว่าจะเป็นการคำนวณเพื่อการผสมหรือเพื่อการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

การคำนวณอัตราส่วนผสมของไฟเบอร์ชนิดอื่นๆก็ทำได้ โดยกระบวนการเดียวกันนี้

## 2.4 น้ำและสารลดน้ำ

น้ำมีความจำเป็นสำหรับการผสมสารผสมของซีเมนต์ในเรื่องสำคัญ 2 ประการก็คือ น้ำที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยา ไฮเดรชัน และน้ำที่ใช้สำหรับเพิ่มความสะดวกในการเทลงแบบ (workability) เราทราบคืออยู่แล้วว่ากำลังรับแรงอัดของของสารผสมของซีเมนต์แปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) ซึ่งโดยแท้จริงแล้วอัตราส่วน W/C ratio เพียง 0.28 ก็เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว แต่อย่างไรก็ตามความสะดวกในการทำงานก็เกี่ยวกับสารผสมของซีเมนต์นี้ (เช่นการเท, การขนส่ง, การทำคอนกรีตให้แน่น) ก็เป็นข้อจำกัดซึ่งอย่างน้อยค่า W/C ratio ต้องมีค่า 0.6 จึงจะทำงานได้สะดวก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสารเคมีที่จะช่วยเพิ่มความสะดวกในการทำงาน (workability) โดยยังคงอัตราส่วน W/C ratio ในดั้งเดิมเอาไว้ นั่นก็คือสารลดน้ำ (water-reducing admixture)

เนื่องจากการผสมไฟเบอร์ลงไปในการผสมของซีเมนต์จะทำให้ ลดความสะดวกในการทำงานลง ทำให้สารลดน้ำเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการทำสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย (FRCC) เพราะจะทำให้การเพิ่มปริมาณไฟเบอร์ไม่เป็นอุปสรรคกับการทำงานอีกต่อไป

สารลดน้ำในปัจจุบันอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกจะสามารถลดปริมาณน้ำที่ต้องการได้ประมาณ 10%-20% ส่วนประเภทที่สองมีชื่อว่า Super plasticizers หรือ high-range water-reducing admixture ซึ่งสามารถลดน้ำจนถึงอัตราส่วน W/C ratio เท่ากับ 0.28 เลยทีเดียว ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำงานภาคสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 วัสดุผสมเพิ่มเติม

วัสดุผสมเพิ่มที่เป็นที่รู้จักมีอยู่ 2 ชนิดก็คือ fly ash และ silica fume fly ash นั้นใช้ในการเพิ่มความเสถียรในการทำงานให้กับคอนกรีตสด, ไล่ลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, ช่วยประหยัดซีเมนต์และช่วยกั้นน้ำซึมด้วย ส่วน silica fume มักผสมเพื่อช่วยเพิ่มกำลังของรับแรงของคอนกรีตหรือสารเมตริกซ์อื่นๆ

นอกจากนั้นการใช้ silica fume ผสมเพิ่มเข้าไปจะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์เมตริกซ์ อีกทั้งช่วยเพิ่มความคงทนของไฟเบอร์ในคอนกรีตด้วย

## 2.6 สารเคมีผสมเพิ่มอื่นๆ

สารเคมีอื่นๆที่ใช้กับ FRCC ก็คือสารกระจายกักฟองอากาศ (air entraining) สารเร่งหรือหน่วงการแข็งตัวของคอนกรีต (Accelerating and Retarding admixture) โดยสารกระจายกักฟองอากาศจะใช้ในการทำโครงสร้างภายนอก ที่มีสภาวะเปิดเผชิญแรง (exposed structure) เช่น การทำผิวถนน (pavement) และ ท่อขนส่ง (lining) ส่วนสารเร่งการแข็งตัวจะใช้ในกรณีการทำ shotcrete เพื่อเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต และสารหน่วงจะใช้ในการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

## 2.7 คุณสมบัติของสารผสมเสริมเส้นใย

เราได้กล่าวถึงคุณสมบัติอย่างคร่าวๆมาแล้ว ในบทที่แล้วแต่มีสิ่งหนึ่งที่ผู้ศึกษาควรจะรู้จักคือ คุณสมบัติต่างๆของสารผสมมีค่าขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ทดสอบด้วย

เป็นที่รู้กันดีอยู่แล้วว่าเทคนิคการทดสอบแบบ "สถิตย์" (static) ให้ค่าที่ไม่ค่อยตรงกับความเป็นจริงนัก ในการทดสอบคอนกรีตล้วนอยู่แล้วเพราะว่า คอนกรีตล้วนเป็นวัสดุที่เปราะมาก แต่ก็มีกรรมวิธี ให้การพังทลายเป็นแบบยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับแรงที่กระทำอีกด้วย ถึงแม้ว่าจะเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่าค่าที่ได้เป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงใช้ได้แต่เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตเสริมเส้นใย ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งเหนียว (quasi-ductile) ด้วยแล้วก็ยิ่งทำให้ผลลัพธ์ไม่ตรงกับความเป็นจริงยิ่งขึ้นไปอีก เพราะฉะนั้นวิธีการทดสอบที่ไม่ใช่วิธีโดยตรง เช่น splitting tensile strength หรือ Modulus of rupture มีค่าต่างจากค่า tensile strength ที่หาได้จากวิธีการโดยตรงเกือบ 100% ที่เดียว

อย่างไรก็ตามก็ยังมีเทคนิคที่เหมาะสม ในการทดสอบคอนกรีตเส้นใยโดยตรง ที่เป็นที่ยอมรับของสถาบันมาตรฐานใดๆ

ในโครงการงานพิเศษได้ใช้วิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐานของ ASTM ซึ่งบางครั้งให้ค่าไม่ตรงกับความเป็นจริงเท่าใด แต่อย่างไรก็ตามยังมีวิธีประมาณค่าต่างๆอย่างเหมาะสมพอสมควร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical fibre properties

Fibre	Diameter $\mu\text{m}$	Length mm	Density $\text{Kg/m}^3 \cdot 10^3$	Young's Modulus $\text{GN/m}^2$	Poisson's Ratio	Tensile Strength $\text{MN/m}^2$	Elongation at break %	Typical. Volum in composite %
Chrysotile (white)	0.02-30	$\leq 40$	2.55	164	0.3	200-1800 (fibre bundles)	2-3	10
Asbestos Crocidolite (blue)	0.1-20	-	3.37	196	-	3,500	2-3	-
Type 1 (High modulus)	8		1.90	380		1,800	~0.5	
Carbon Type 2 (High strength)	9	10-continuous	1.90	230	0.35	2,600	~1.0	2-12
Cellulose			1.2	10		300-500		10-20
E	8-10		2.54	72	0.25	3,500	4.8	
Glass Cem-Fil filament	12.5	10-50		80	0.22	2,500	3.6	2-8
204 filament strand	110 x 650		2.7	70	-	1,250	-	
PRD 49	10		1.45	133	0.32	2,900	2.1	
Kevlar PRD 29	12	6-65	1.44	69	-	2,900	4.0	<2
Nylon (Type 242)	>4	5-50	1.14	Rate dependent up to 4	0.40	750-900	13.5	0.1-6
Monofilament	100-200	5-50	0.9	Rate dependent up to 5	-	400	18	0.1-6
Polypropylene					0.29-			
Fibrillated	500-4000	20-75	0.9	up to 8	0.46	400	8	0.2-1.2
High tensile	100-600			200		700-2000	3.5	
Steel		10-60	7.86		0.28			0.5-2
Stainless	10-330			160		2,100	3	

\*Note: one per cent elongation =  $10,000 \times 10^{-6}$  strain

ตาราง 2.1 แสดงคุณสมบัติของไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U.S. sieve	Standard size (mm)	Percent passing for maximum size of				
		3/8" (10 mm)	1/2" (13 mm)	3/4" (19 mm)	1" (25 mm)	1 1/2" (38 mm)
2	51	100	100	100	100	100
1 1/2	38	100	100	100	100	85-100
1	25	100	100	100	94-100	65-85
3/4	19	100	100	94-100	76-82	58-77
1/2	13	100	93-100	70-88	65-76	50-68
3/8	10	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
# 4	5	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
# 8	2.4	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
# 16	1.1	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
# 30	0.6	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
# 50	0.3	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
# 100	0.15	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
# 200	0.08	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

Note: Aggregates should be well graded from the largest to the smallest size. Aggregate should not vary from near the maximum allowable percent passing one sieve to near the minimum allowable percent passing the next sieve size.

## ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดคละของมวลรวมทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้นใย (FRCC)

#### 3.1 ทฤษฎีการรับแรงดึงตามแนวแกน

##### 3.1.1 สิ่งที่ต้องรู้สำหรับทฤษฎี

ในสมัยแรก ๆ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของสารผสมเสริมเส้นใยโดยส่วนใหญ่ มักจะใช้ระบบของสารเรซินเสริมเส้นใย (fiber-resin system) ซึ่งมีปริมาณไฟเบอร์เกิน 50% โดยไฟเบอร์ที่ใช้ผสมจะช่วยเพิ่มแข็งแรงให้กับเรซิน และได้วัสดุที่มีความแข็ง, น้ำหนักเบา, มีกำลังรับแรงดึงสูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยานอวกาศ อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของปริมาณของไฟเบอร์ที่ผสมกับซีเมนต์ หรือคอนกรีตที่มีค่าน้อย และด้วยเหตุนี้ซีเมนต์ และคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความแข็งมาก (stiffness) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางอย่างคือ จุดเน้นของทฤษฎีได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นพฤติกรรมหลังการร้าวของคอนกรีต เนื่องจาก FRCC มีความเหนียวหลังการแตกร้าวเพิ่มขึ้น

เนื่องจากซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต มีข้อจำกัดของตัวเองเกี่ยวกับผสมเส้นใยเพื่อเสริมแรง ดังนั้นเราควรจะทราบข้อจำกัดเหล่านี้เสียก่อน ก่อนที่จะศึกษาทฤษฎีในขั้นต่อไป

ข้อจำกัดที่สำคัญ ๆ ได้แก่

1. ทั้งซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต มีค่าความเครียด ที่จุดหักทลายต่ำ ( $< 500 \times 10^{-6}$ )
2. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูง (7-40 GN/m<sup>2</sup>) ซึ่งถึงแม้ว่าสิ่งนี้จะมีประโยชน์ในเรื่องการลดค่าการโก่งตัวของโครงสร้างได้ จึงเป็นผลให้ไม่ใคร่มีคนสนใจถึงความสามารถของไฟเบอร์ ในการรับแรงต่ออย่างใด จนกว่าจะเกิดรอยร้าวขึ้นเท่านั้น
3. ข้อจำกัดในด้านการผสมกับไฟเบอร์ (โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์ผสมได้ไม่เกิน 10 % สำหรับคอนกรีตผสมได้ไม่เกิน 2 % โดยปริมาตร)
4. ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์กับเมตริกซ์ (ซีเมนต์, คอนกรีต) มีค่าน้อย
5. ค่าความเป็นด่างสูงของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต (PH 12-13) ซึ่งช่วยป้องกันไฟเบอร์เส้นใยเหล็ก แต่กลับทำลายไฟเบอร์ใยแก้วได้เมื่อเวลาผ่านไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทั้งหมดจะสังเกตได้ว่า ข้อ 1, 2, 3, แสดงข้อจำกัดของคอนกรีตที่มีมากกว่าซีเมนต์ในการผสมกับไฟเบอร์

ทฤษฎีเกี่ยวกับการเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ได้มีอยู่แล้ว แต่ว่าสำหรับสารผสมของซีเมนต์ ซึ่งมีค่าความเครียดที่จุดหักงอต่ำกว่าไฟเบอร์มาก และยังมีข้อจำกัดที่ว่าผสมไฟเบอร์ได้ไม่เกิน 10 % แกรมด้วยการกระจายของตัวไฟเบอร์ที่จะเป็นแบบ 2 มิติ หรือเป็นแบบ 3 มิติทำให้ประสิทธิภาพของไฟเบอร์ลดลง จากการพิสูจน์ทำให้ทราบว่าทฤษฎีเหล่านี้ไม่ค่อยมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายคุณสมบัติของวัสดุนี้ นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอีกอย่างที่ยึดขวางการทำนายคุณสมบัติของวัสดุนี้ นั่นก็คือเวลา เพราะว่าค่าแรงยึดเหนี่ยว สถิตย และแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากความเสียหายระหว่างไฟเบอร์และเมตริกซ์ ซึ่งแปรตามปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในเมตริกซ์แต่เรื่องที่ว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นจริง ณ เวลาใด ๆ นั้น แทบจะเป็นไปไม่ได้

แต่อย่างไรก็ตาม มันก็เป็นการศึกษาที่เราจะใช้ทฤษฎีแบบง่าย ๆ (Simplified theories) เพราะที่จะทำนายค่าระดับ (order) ของความเป็นไปได้ของคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของเมตริกซ์

### 3.1.2 ทฤษฎีง่าย ๆ สำหรับแรงดึงและแนวแกนก่อนเกิดการร้าว

(Simplified theory for Uniaxial Tension before cracking)

ทฤษฎีต่อไปนี้เป็นกฎของสารผสม (law of mixture) ถึงแม้ว่าหลักการจะเหมือนกับที่ใช้ทฤษฎีในคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่สมมติฐานเหล่านี้ไม่มีข้อไหนที่เป็นจริงเลยสักข้อเดียว

#### สมมติฐาน

1. ไฟเบอร์จะวางตัวอยู่ในแนวและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้น
2. ก่อนที่จะเกิดการร้าวขึ้น ไฟเบอร์จะยังมีแรงยึดเหนี่ยวอย่างเต็มที่กับเมตริกซ์ (ส่งผลให้ความเครียดของไฟเบอร์เท่ากับเมตริกซ์)
3. ค่าอัตราส่วน ปัวซอง (Poisson's ration) มีค่าเท่ากับศูนย์

#### นิยาม

$A$	=	พื้นที่หน้าตัด	$\delta$	=	ความเค้น
$V$	=	ปริมาตร	$\epsilon$	=	ความเครียด

$E$  = โมดูลัสยืดหยุ่น       $F$  = แรงกระทำ

ปัจจัยต่อไปนี้ใช้ต่อหลังค่าเพื่อแสดงที่มา (suffix)

$f$  = เป็นของไฟเบอร์       $C$  = เป็นของสารผสม (composite)

$m$  = เป็นของเมตริกซ์

สมมติฐานให้พื้นที่หน้าตัดของสารผสม  $A_c = 1$

เพราะฉะนั้นค่าปริมาณไฟเบอร์เป็นปริมาตร,  $V_f$  สามารถแสดงเป็นอัตราส่วนของสารผสมได้ คือ

$$\frac{V_f}{V_c} = \frac{V_f}{1} = V_f$$

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m = \frac{\delta_c}{E_c} = \frac{\delta_f}{E_f} = \frac{\delta_m}{E_m} \quad (3.1)$$

$$F = \delta_c A_c = \delta_f A_f + \delta_m A_m$$

ค่าความเค้นเฉลี่ย ( $\delta_c$ ) ที่รับโดยสารผสมที่มีพื้นที่ 1 หน่วย ( $A_c = 1$ )

ที่จุดความเครียดใด ๆ ก่อนเกิดการร้าว เท่ากับ

$$\delta_c = \delta_f A_f + \delta_m (1 - A_f)$$

แต่ในทางเทคโนโลยีเส้นใยแล้ว เรานิยมใช้ค่าอัตราส่วนปริมาตร (Volume Fraction) แทนพื้นที่ ดังนั้นในหนึ่งหน่วยความยาว

$$V_c = A_c = 1 \text{ และ } V_f = A_f \quad (3.2)$$

$$\delta_c = \delta_f V_f + \delta_m (1 - V_f)$$

$$\frac{\delta_c}{\delta_m} = \frac{\delta_f}{\delta_m} V_f + 1 - V_f$$

$$\delta_m \quad \delta_m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.1)  $\frac{\delta_f}{\delta_m} = \frac{E_f}{E_m} = M$  คือค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modular ratio)

$$\frac{\delta_c}{\delta_m} = 1 + V_f(M-1) \quad (3.3)$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_c} = \frac{\delta_c}{1 + V_f(M-1)} \quad (3.4)$$

$$\frac{\delta_c}{\delta_m} = \frac{E_c}{E_m} = 1 + V_f \frac{E_f - E_m}{E_m} \quad (3.5)$$

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

จากสมการ (3.4) ผลลัพธ์ที่ได้จากการผสมไฟเบอร์ลงในสารผสมมีผลต่อความเค้นที่จุดแตกร้าวของสารเมตริกซ์ ดังนี้

(ก) สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel-fiber concrete)

$$V_f = 0.02 \quad E_f = 200 \text{ GN/m}^2 \quad E_m = 30 \text{ GN/m}^2$$

จากสมการ (3.4)

$$\frac{\delta_m}{\delta_c} = \frac{\delta_c}{1 + 0.02(6.7-1)} = \frac{\delta_c}{1.11}$$

(ข) สำหรับซีเมนต์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass-reinforced cement)

$$V_f = 0.05 \quad E_f = 70 \text{ GN/m}^2 \quad E_m = 17 \text{ GN/m}^2$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_c} = \frac{\delta_c}{1 + 0.05(4.12-1)} = \frac{\delta_c}{1.16}$$

สมมติให้ความเค้นของเมตริกซ์ที่จุดแตกร้าว ไม่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการวางตัวของไฟเบอร์แล้ว จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ไฟเบอร์กำลังสูงในอัตราส่วนที่สูงมาก และแรงยึดเหนี่ยวเต็มที่ยาวทั้งไฟเบอร์วางตัวอยู่ในทิศทางที่ค้ำที่สุดแล้ว ค่าความเค้นของสารผสมก็ได้เพิ่มขึ้นจากความเค้นของสารเมตริกซ์เพียง 11 และ 16 % เท่านั้น จากตัวอย่าง ก. และ ข. ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความเค้นในระดับนี้ สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยวิธีอื่นที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า เช่น การลดค่า W/C ratio

และเช่นกันเมื่อไฟเบอร์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าเมตริกซ์ ค่าอัตราส่วนโมดูลัสก็จะมีค่านี้ออกว่าหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้น ณ จุดแตกร้าวของสารผสมต่ำกว่าค่าความเค้นของเมตริกซ์เพียงอย่างเดียว และยิ่งเพิ่มจำนวนปริมาตรไฟเบอร์ ก็ยิ่งทำให้ค่าความเค้น นี้ออกลง

เราสามารถดูความเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของสารผสม ได้จากการผสมไฟเบอร์ลงไปว่ามีผลอย่างไรบ้าง จากสมการ (3.5)

(ก) สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

$$\begin{aligned} E_c &= 200 \times 10^9 \times 0.02 + 30(0.98)10^9 \\ &= 33.4 \text{ GN/m}^2 \end{aligned}$$

(ข) สำหรับซีเมนต์เสริมเส้นใยแก้ว

$$\begin{aligned} E_c &= 70 \times 10^9 \times 0.05 + 17(0.95)10^9 \\ &= 19.6 \text{ GN/m}^2 \end{aligned}$$

จากการคำนวณดังกล่าวด้วยสภาวะที่คิดที่สุดตามข้อสมมติฐาน จะเห็นว่าพฤติกรรมก่อนการร้าวของ FRCC ในด้านความแข็งแรงหรือความเค้นของจุดแตกร้าวไม่ได้เพิ่มขึ้นมากเท่าใดนักเมื่อผสมไฟเบอร์ลงไปเป็น FRCC ตามความเป็นจริง แม้กระทั่งการผสมไฟเบอร์ใย

แก้วลงไปด้วย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสารผสมยังมีค่าต่ำกว่าเมตริกซ์เสียอีก ถ้ามีการใช้ปัจจัยทางด้านประสิทธิภาพของทิศทางที่จะกล่าวต่อไป

### 3.1.2.1 ทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์ (Fiber Orientation)

ทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์เมื่อเทียบกับทิศทางของความเค้น เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึงของสารผสม (จากข้อสมมติฐานในตอนแรก ทิศทางของไฟเบอร์ขนานหรือเป็นทิศเดียวกับความเค้น แต่ในความเป็นจริงไม่ใช่เช่นนั้น) ทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์จะขึ้นอยู่กับการเทคอนกรีต, รูปร่างของแบบหล่อ, การเขย่า และการจัดคอนกรีต ฯลฯ

ถ้าทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์ ไม่ได้อยู่ในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ส่อมแสดงว่าประสิทธิภาพการรับแรงดึงในทิศทางนั้นของไฟเบอร์ได้ลดลงจากเดิม ซึ่งสามารถแสดงค่าประสิทธิภาพของทิศทางของไฟเบอร์ได้เป็นค่าคงที่ตัวหนึ่ง ( $\eta_1$ ) เพื่อใช้คูณกับค่าอัตราส่วนปริมาตรของไฟเบอร์ ( $V_f$ ) ตารางข้างล่างนี้ แสดงค่าปัจจัยประสิทธิภาพของทิศ

ทางการวางตัวของไฟเบอร์ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าขึ้นกับวิธีการที่ใช้วิเคราะห์ ค่าในตารางเป็นค่าโดยทั่วไป ซึ่งหาโดย Cox และ Krenchel  
ตารางที่ 3.1

Efficiency factors,  $\eta_1$ , for a given fibre orientation relative to the direction of stress

Fibre orientation	$\eta_1$ according to	
	Cox <sup>5</sup>	Krenchel <sup>6</sup>
1-D aligned	1	1
2-D random in plane	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$
3-D random	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$

จากตารางจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการวางตัวของไฟเบอร์ที่ดีที่สุดก็คือ การวางตัวตามแนวทิศทางของความเค้นที่กระทำในขณะที่ยังไม่มีการร้าวเกิดขึ้น

### 3.1.2.2 ความยาวของไฟเบอร์

ในสภาวะที่เมตริกซ์ยังมีค่าความเครียดไม่ถึงจุดพังทลาย ซึ่งได้มีผู้ศึกษาแล้วว่าปัจจัยประสิทธิผล เนื่องจากความยาวของไฟเบอร์สำหรับสารผสมเสริมเส้นใยสั้น (align short fiber composite) ที่มีแรงยึดเหนี่ยวเสียดทานที่ผิวไฟเบอร์ มีค่าเกือบเท่ากับหนึ่ง ( $\eta_2=0.98$ )

แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีผู้ศึกษาต่อไปว่าสำหรับโครงสร้างแผ่นบาง (thin composite) ปัจจัยประสิทธิผลเนื่องมาจากความยาวของไฟเบอร์จะเริ่มมีผลคุณสมบัติของสารผสม ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta_c = \eta_1 \eta_c \delta_r V_r + \delta_m (1 - V_r) \quad (3.6)$$

$$E_c = \eta_1 \eta_c E_r V_r + E_m (1 - V_r) \quad (3.7)$$

- ค่าของ  $\eta_c$  สามารถหาได้จากค่าความยาวของไฟเบอร์ (1)

และค่าความยาววิกฤติของไฟเบอร์ ( $l_c$ ) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } l \leq l_c \quad \eta_c = l/2l_c \quad (3.8)$$

$$\text{เมื่อ } l > l_c \quad \eta_c = 1 - l_c/2l \quad (3.9)$$

และความเค้นของสารผสมก็จะมีค่าเท่ากับ ค่าความเค้นประลัย

( $\delta_{r,c}$ ) ของไฟเบอร์หรือความเค้นเนื่องจากแรงถอนสูงสุดของไฟเบอร์

นอกจากนี้ Aveston ยังแสดงให้เห็นอีกว่า ค่าความเครียด

ของเมตริกซ์จะเพิ่มขึ้น ถ้าลดเส้นผ่าศูนย์กลางของไฟเบอร์และให้ค่าปริมาตรไฟเบอร์

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว แทนจะไม่ต้องกังวลถึงค่าที่ถูกต้องของ  $\eta_c$  ใน

การคำนวณค่าความเค้นที่จุดแตกร้าวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสารผสมเลย เพราะว่าค่าความ

ยาววิกฤติที่แท้จริงก็ยากที่จะหาได้ถูกต้องอยู่แล้ว (เนื่องจาก  $l_c$  ขึ้นกับค่า bond strength

ซึ่งมีความไม่แน่นอนสูง) และเนื่องจากค่า  $\delta_c$  และ  $E_c$  ของสารผสมมีค่าใกล้เคียงกับ

สารเมตริกซ์อยู่แล้ว (second order)

### 3.1.3 ความยาววิกฤติของไฟเบอร์

(Critical fiber length)  $l_c$

ในสารผสมเสริมเส้นใย พฤติกรรมของมันเมื่อได้รับแรงกระทำ (แรงดึง)

จนกระทั่งเมตริกซ์เกิดการแตกร้าว แต่เนื่องจากค่าความเครียดที่จุดกลางของเมตริกซ์ต่ำกว่า

ของไฟเบอร์มาก ดังนั้นจึงทำให้ไฟเบอร์ทำหน้าที่รับแรงกระทำต่อจากเมตริกซ์ ลักษณะการรับแรง

ของไฟเบอร์ก็คือ แรงดึงในเนื้อไฟเบอร์จะถูกถ่ายทอดไปให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของไฟ

เบอร์กับเมตริกซ์ ซึ่งถ้าความยาวของไฟเบอร์ที่ใช้ผสมกับเมตริกซ์สั้นเกินไป ก็จะทำให้มีพื้นที่

ผิวของไฟเบอร์ที่จะสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับเมตริกซ์ได้ไม่เท่ากับค่าของแรงกระทำที่ทำให้ไฟเบอร์ขาด

ดังนั้น สารผสมก็จะเกิดพังทลายเนื่องจากไฟเบอร์ถูกดึงหลุดออกจากเมตริกซ์ (bond strength

control critical length) แทนที่จะเกิดการขาดของไฟเบอร์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความยาว

ของไฟเบอร์มีค่าเพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาววิกฤตของไฟเบอร์ หมายถึง ค่าความยาวที่น้อยที่สุดของไฟเบอร์ที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์กับเมตริกซ์ ให้มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึงของไฟเบอร์ที่จะประลัย

3.1.3.1 การหาค่าความยาววิกฤต

การหาค่าความยาววิกฤตของไฟเบอร์สามารถกระทำได้โดยการทดสอบแรงถอนของไฟเบอร์ (pull-out test) โดยการฝังไฟเบอร์ลงในเนื้อสารเมตริกซ์ และให้แรงกระทำจนไฟเบอร์ออกจากสารเมตริกซ์ (ดูรายละเอียดการทดลองในส่วนของวิธีทดลอง) ค่าแรงถอนดังกล่าวจะนำไปใช้คำนวณค่าความยาววิกฤต ต่อไป

ลองพิจารณาไฟเบอร์ขนาด  $1 * d$  ฝังลงในเมตริกซ์ ค่าแรงกระทำจะถูกถ่ายไปเป็นความเค้นระหว่างไฟเบอร์กับเมตริกซ์ ( $\tau$ , average interfacial shear stress) ค่าความเค้นตามแนวยาวของไฟเบอร์ ( $\sigma$ , longitudinal tensile stress) จะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ที่ปลายไฟเบอร์ข้างหนึ่งและมีค่าเท่ากับความเค้นประลัยของไฟเบอร์ที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ถ้าไฟเบอร์นั้นมีความยาวเพียงพอ

สำหรับไฟเบอร์ที่สั้นค่าความเค้น อาจจะมีค่าไม่ถึงความเค้นประลัย แต่จะเกิดการดึงเลื่อนไกลของไฟเบอร์แทนค่า  $l_c/2$  ถูกกำหนดให้เป็นความยาวของไฟเบอร์ที่ใช้ในการถ่ายแรง (transfer length) และ  $l_c$  คือค่าความยาววิกฤตของไฟเบอร์

$$\frac{\pi D^2}{4} \frac{d\sigma}{dl} = \pi D \tau$$

$$\frac{dl}{d\sigma} = \frac{D}{4\tau} \tag{1*}$$

ค่าความเค้นพังทลายที่เกิดขึ้นกับความยาวครึ่งหนึ่งของความยาววิกฤต

$$\frac{l_c}{2} = \frac{\sigma_{cu}}{4\tau} \cdot D$$

$$l_c = \frac{\delta_{ru} \cdot D}{2\tau} \quad (2*)$$

∴ ค่า aspect ratio (l/d) ของไฟเบอร์จะต้อง

$$\frac{l_c}{D} \geq \frac{\delta_{ru}}{2\tau} \quad (3*)$$

ถ้าไฟเบอร์มีรูปร่างหน้าตัดไม่เป็นวงกลม ค่า  $l_c$  จะเปลี่ยนไป

$$l_c = \frac{2 \delta_{ru} A}{P\tau} \quad (4*)$$

P = เส้นรอบวงของหน้าตัดของไฟเบอร์

D = เส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัดของไฟเบอร์

### 3.1.4 ค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤตของไฟเบอร์

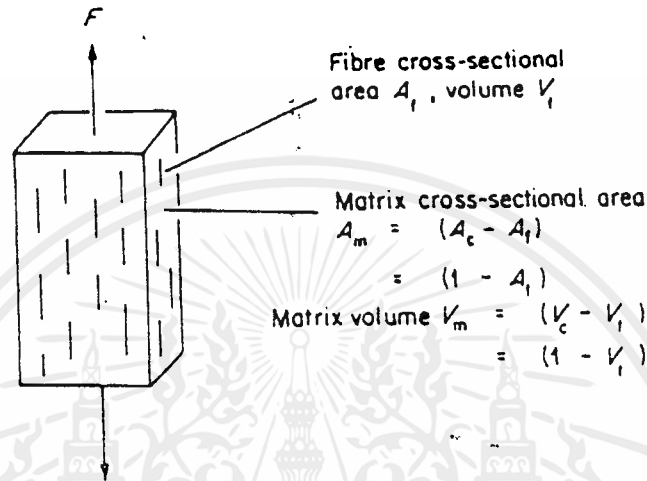
(Critical Fiber Volume,  $V_{critical}$ )

จากหัวข้อที่แล้ว มาทำให้เราทราบแล้วว่าการเพิ่มความแข็งแรงหรือกำลังรับแรงดึงของสารผสมซีเมนต์ โดยการผสมไฟเบอร์ลงไปนั้นให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีนักและไม่ค่อยคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ข้อดีของการผสมไฟเบอร์ลงในสารผสมของซีเมนต์ก็คือความสามารถในการรับแรงกระทำหลังจากเกิดการร้าวของเมตริกซ์

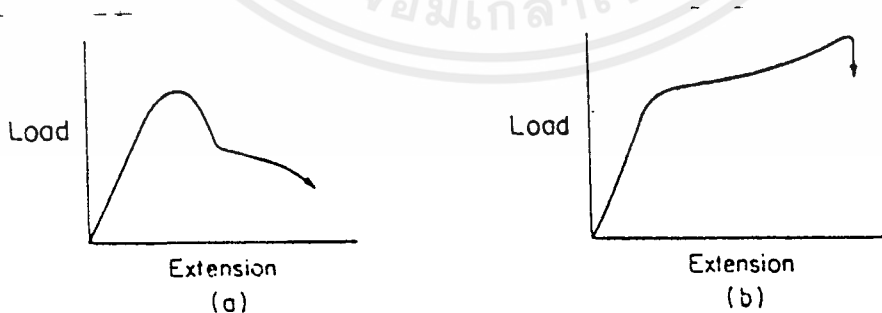
หลังจากเกิดการแตกร้าวขึ้นในสารผสมแล้วสารผสมอาจจะรับแรงกระทำได้มากกว่าหรือน้อยกว่าเดิมก่อนเกิดการแตกร้าว ที่แสดงดังรูป 3.2 (a) และ 3.2 (b) กราฟในรูปทั้งสองแสดงถึงคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยในรูปที่ 3.2 (b) แสดงการเกิดการแตกร้าวแบบ multiple cracking มากกว่า รูปที่ 3.2 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าหรือน้อยกว่าเดิมก่อนเกิดการแตกร้าว ที่แสดงดังรูป 3.2 (a) และ 3.2 (b) กราฟ  
 ในรูปทั้งสองแสดงถึงคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยในรูปที่ 3.2 (b)  
 แสดงการเกิดการแตกร้าวแบบ multiple cracking มากกว่า รูปที่ 3.2 (a)



รูปที่ 3.1 แสดงการทดสอบสารผสมเสริมเส้นใยด้วยแรงตามแนวแกน(uniaxial tension)



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟ load-extension ของการทดสอบด้วยแรงดึงตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ถ้าต้องการให้สารผสมมีลักษณะของกราฟเช่นเดียวกับรูปที่ 3.2 (b) จะต้องผสมไฟเบอร์ในอัตราส่วนของปริมาตรที่เกินค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤต  $V_{f(crit)}$

อัตราส่วนปริมาตรวิกฤต หมายถึง ปริมาณของไฟเบอร์โดยปริมาตรที่ทำให้สารผสมยังสามารถรับแรงได้หลังจากเกิดการแตกร้าว เท่ากับก่อนหน้าที่จะเกิดการแตกร้าวในสารผสม

ใช้สมมติฐานที่กล่าวไว้ในตอนที่แล้ว เราสามารถหาค่า อัตราส่วนปริมาตรวิกฤต ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_{mu} &= \text{ความเครียดที่จุดแตกร้าวของเมตริกซ์} \\ \epsilon_{mu} &= \text{ความเค้นที่จุดแตกร้าวของเมตริกซ์} \\ V_{f(crit)} &= \text{อัตราส่วนปริมาตรวิกฤตของไฟเบอร์} \\ \delta_{fu} &= \text{ความเค้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด, ความเค้นเนื่องจากการดึงหลุดของไฟเบอร์} \end{aligned}$$

ที่จุดแตกร้าว

$$\begin{aligned} \epsilon_f &= \epsilon_{mu} \\ \delta_f &= \epsilon_{mu} E_f \\ \delta_{mu} &= \epsilon_{mu} E_m \end{aligned}$$

แทนค่าเหล่านี้ในสมการ (3.2) ซึ่งแสดงสภาวะก่อนการแตกร้าว

$$\delta_c = \epsilon_{mu} E_f V_{f(crit)} + \delta_{mu} (1 - V_{f(crit)}) \tag{3.10}$$

หลังจากเกิดการแตกร้าว  $\delta_{mu} = 0$  , ดังนั้นจะมีเพียงไฟเบอร์เท่านั้นที่ยังคงรับความเค้น  $\delta_c$  จากสารผสม

$$V_{f(crit)} \delta_{fu} = \epsilon_{mu} E_f V_{f(crit)} + \delta_{mu} (1 - V_{f(crit)}) \tag{3.11}$$

$$V_{f(crit)} = \frac{\delta_{mu}}{\delta_{fu} - \epsilon_{mu} E_f + \delta_{mu}} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$V_{f(critical)} = \frac{E_c \in_{mu}}{\delta_{fu}} \quad (3.13)$$

โดยแทนค่า  $E_c$  จากสมการ (3.5)

ด้วยเหตุผลด้านค่าใช้จ่าย ดังนั้น  $V_{f(critical)}$  ควรจะมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สมการ (3.12) ถูกควบคุมด้วยตัวแปร  $\delta_{mu}$  และ  $\delta_{fu}$  เพราะโดยทั่วไป  $\delta_{fu} > \delta_{mu}$  มาก และสามารถตีความได้จากสมการดังนี้

ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่า  $V_{f(critical)}$  น้อยลง ได้แก่

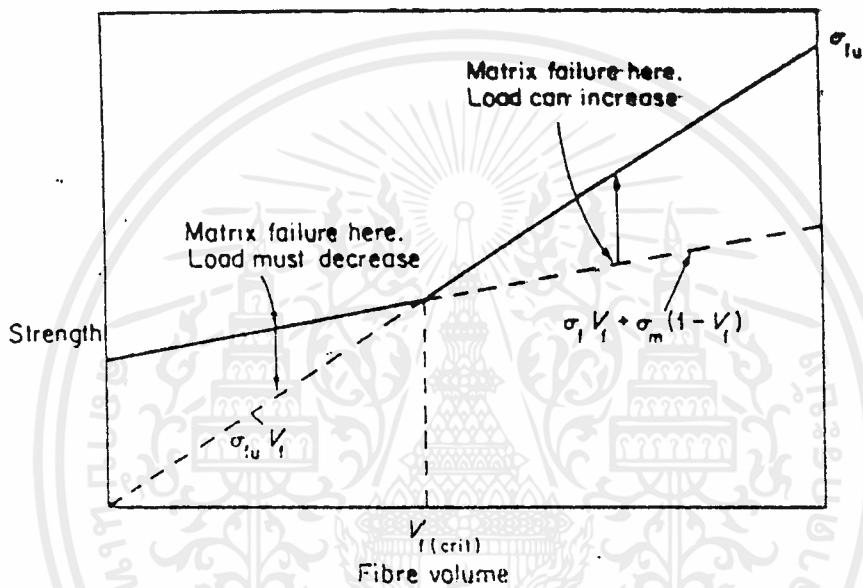
1. การลดค่า  $\delta_{mu}$  (1st order) ลง เนื่องจากการใช้เมตริกซ์ที่มีค่าความเค้นต่ำลงทำให้ปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้ลดลง
2. การเพิ่มค่า  $\delta_{fu}$  (1st order) ขึ้น เพราะการเพิ่มค่าแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์ทำให้ปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้ลดลง
3. การลดค่า  $\in_{mu}$  หรือ  $E_f$  (2nd order)

ปัจจัยที่ผลทำให้ค่า  $V_{f(critical)}$  เพิ่มขึ้น

1. การวางแผนทิศทางของไฟเบอร์แบบสุ่ม (Random Fiber)
2. แรงยึดเหนี่ยวที่ไม่ดีของไฟเบอร์

#### 3.1.4.1 การหาค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติด้วยกราฟ (Graphic - Representation of Critical Fiber Volumn)

การหาค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติ โดยวิธีพลอตกราฟ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.2) แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูป 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ fibre volume และ strength และตำแหน่งของ critical fibre volume

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าค่าความชันของเส้นตรง  $\epsilon_{cu} V_f$  มีผลต่อจุดตัดซึ่งเป็นจุดที่ตรงกับอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติของไฟเบอร์ และดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์กับเมตริกซ์ (bond strength) เป็นอิทธิพลสำคัญที่ควบคุมอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติ เพราะหลังจากเกิดการแตกร้าวจะมีแต่ไฟเบอร์ระหว่างรอสร้าวเท่านั้นที่ทำหน้าที่รับแรงกระทำไว้ ซึ่งจะเห็นได้จากรูปอีกว่า กำลังรับแรงดึงของสารผสมที่มีค่าปริมาณไฟเบอร์เกินค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติแล้ว จะมีค่าขึ้นอยู่กับ  $\epsilon_{cu} V_f$  ซึ่ง  $\epsilon_{cu}$  คือค่าความเค้นเนื่องจากถูกดึงหลุดหรือความเค้นประลัยของไฟเบอร์ (pull out or break stress)

3.1.4.2 การคำนวณค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติ สำหรับการเสริมแรงดึงโดยตรง (ในอุดมคติ)

สมมติให้ปัจจัยเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวมีค่าสมบูรณ์เต็มที่, เส้นใยต่อเนื่องและวางแนวตามทิศทางของความเค้นที่กระทำ สามารถคำนวณหาอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติที่น้อยที่สุดได้ดังนี้

ตัวอย่างที่ 1.

คอนกรีตเสริมใยเหล็ก

$$\begin{aligned} \epsilon_{mu} &= 100 * 10^{-6} & \delta_{mu} &= 3 \text{ MN/m}^2 \\ E_f &= 200 \text{ GN/m}^2 & \delta_{fu} &= 100 \text{ MN/m}^2 \end{aligned}$$

จากสมการ (3.12)

$$\begin{aligned} V_{f(cr16)} &= \frac{3 * 10^6}{1000 * 10^6 - 100 * 10^{-6} * 200 * 10^9 + 3 * 10^6} \\ &= 3 & &= 0.31 \text{ percent} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2. เส้นใยแก้วในซีเมนต์เพสต์

$$\begin{aligned} \epsilon_{mu} &= 300 * 10^{-6} & \delta_{mu} &= 5 \text{ MN/m}^2 \\ E_f &= 70 \text{ GN/m}^2 & \delta_{fu} &= 1250 \text{ MN/m}^2 \end{aligned}$$

$$V_{f(critical)} = \frac{3 * 10^8}{1250 * 10^8 - 300 * 10^{-8} * 70 * 10^8 + 5 * 10^8}$$

$$= \frac{3}{1234} \sim 0.4 \text{ percent}$$

### ตัวอย่างที่ 3

คอนกรีตเสริมเส้นใย polypropylene

$$\epsilon_{mu} = 100 * 10^{-6} \quad \sigma_{mu} = 3 \text{ MN/m}^2$$

$$E_f = 8 \text{ GN/m}^2 \quad \sigma_{fu} = 400 \text{ MN/m}^2$$

$$V_{f(critical)} = \frac{3 * 10^8}{400 * 10^8 - 100 * 10^{-6} * 8 * 10^8 + 3 * 10^8}$$

$$= \frac{3}{402.2} \sim 0.75 \text{ percent}$$

ถึงแม้ว่าจากตัวอย่างทั้ง 3 ข้อ จะแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน ปริมาตรวิกฤตที่ได้มีค่าน้อยก็ตาม แต่ในความเป็นจริงแล้ว ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่ทำให้อัตรา ส่วนปริมาตรวิกฤตมีค่าสูงขึ้นจากค่านี้

#### 3.1.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

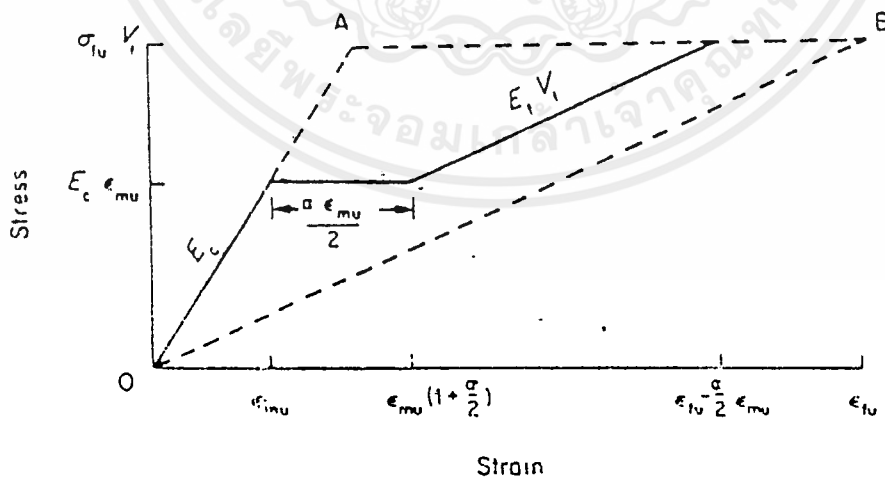
ถ้าสารผสมเสริมเส้นใยมีปริมาณไฟเบอร์ถึงจะวิกฤตแล้ว ก็เกิด การแตกร้าวแบบ multiple cracking ในสารเมตริกซ์ นี่เป็นสภาวะที่ต้องการให้เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงวัสดุเปราะที่มีการหน้าตัดแตกร้าวเดียว (single fracture surface) และใช้พลังงานน้อยในการทำให้พังทลาย ให้กลายเป็นวัสดุกึ่งเหนียว (pseudo-ductile material) ซึ่งสามารถดูดซับแรงกระทำชั่วคราวหรือแรงกระแทกโดยแทบไม่ได้รับความเสียหาย จุดมุ่งหมายของนักวัสดุศาสตร์ก็คือ ลดค่าความกว้างของรอยแตกให้เล็กที่สุด โดยให้มีจำนวนรอยแตกมากที่สุด ( $w < 0.1 \text{ มม.}$ ) ซึ่งรอยแตกเหล่านี้แทบจะมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น และช่วยลดอันตรายลง จากการแทรกซึมของสารอันตรายที่จะทำต่อโครงสร้าง เพราะความกว้างรอยแตกน้อย เมื่อเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ที่อนุญาตให้รอยแตกกว้าง  $0.3 \text{ มม.}$

Aveston คือ ผู้ที่ให้คำอธิบายอย่างละเอียดเกี่ยวกับหลักการของการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ความกว้างของรอยแตกร้าว และแสดงกราฟได้ดังที่จะกล่าวในตอนต่อไป

3.1.4.3.1 ไฟเบอร์ยาวที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงเสียดทาน  
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด ใน  
อุดมคติของวัสดุสารผสมเสริมเส้นใย แสดงในรูป 3.4



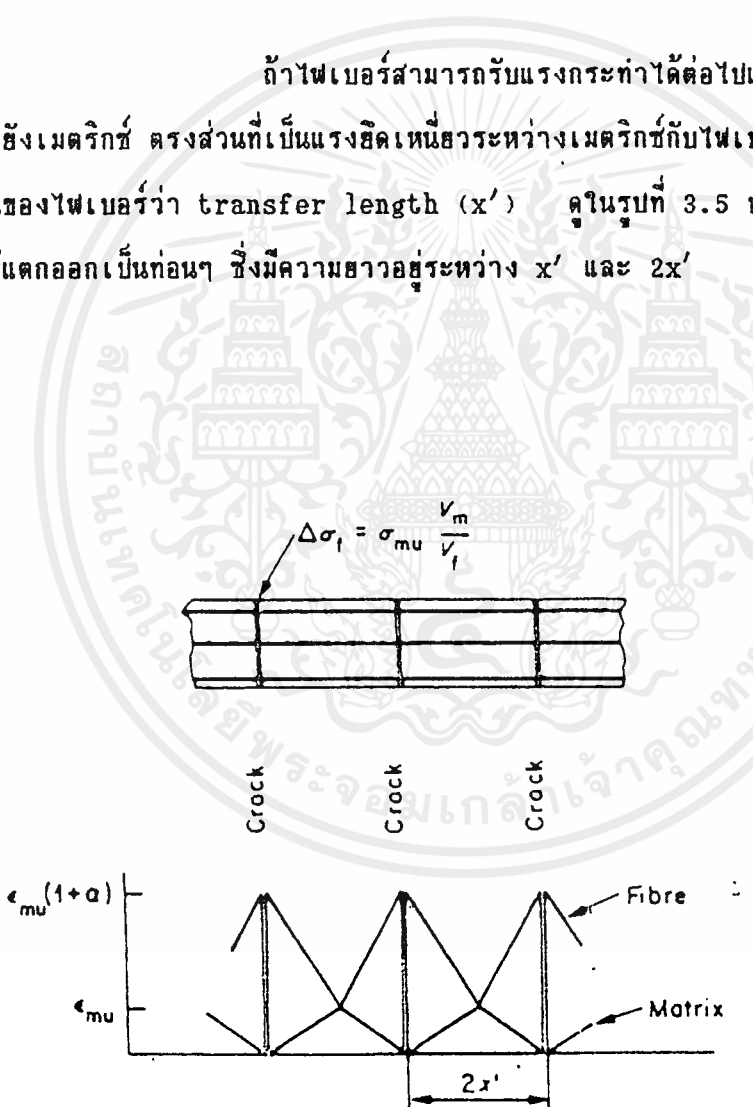
รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในอุดมคติของวัสดุสารผสมเสริมเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าโมดูลัสของ Young ของสารผสม ( $E_c$ ) สามารถรู้ได้จากสมการ (3.5) และขออธิบายที่มาของกราฟทั้งหมด ดังนี้ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไฟเบอร์ไม่เล็กจนเกินไป เมตริกซ์ก็จะเกิดการหักงอที่ค่าความเครียดปกติของเมตริกซ์ ( $\epsilon_{mu}$ ) และพฤติกรรมของสารผสมในขั้นต่อไปนี้จะขึ้นอยู่กับว่าไฟเบอร์จะสามารถรับแรงกระทำต่อจากเมตริกซ์ โดยไม่ขาดเสียก่อนหรือไม่ ถ้าเป็นเช่นนั้น

$$\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu} \quad (3.14)$$

ถ้าไฟเบอร์สามารถรับแรงกระทำได้ต่อไปแล้ว แรงนี้ก็จะถูกถ่ายกลับไปยังเมตริกซ์ ตรงส่วนที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมตริกซ์กับไฟเบอร์ เรียกความยาวตรงส่วนนั้นของไฟเบอร์ว่า transfer length ( $x'$ ) จากรูปที่ 3.5 ประกอบ และเมตริกซ์จะถูกทำให้แตกออกเป็นก้อนๆ ซึ่งมีความยาวอยู่ระหว่าง  $x'$  และ  $2x'$



รูปที่ 3.5 แสดงถึงการกระจายหน่วยความเครียดหลังจากเกิดการแตกหักของสารผสมเส้นใยต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถคำนวณค่า  $x'$  จากหลักการสมดุลของแรงธรรมดา โดยให้แรงกระทำ (มีค่าเท่ากับ  $\delta_{mu} V_m$ ) ที่ทำให้เมตริกซ์ที่มีพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยเกิดการแตกร้าว เท่ากับแรงกระทำที่จะรับไว้โดยไฟเบอร์จำนวน  $N$  เส้น รัศมีหน้าตัดของไฟเบอร์มีค่าเท่ากับ  $r$  ซึ่งวางตัวอยู่ระหว่างรอยแตกร้าว แรงกระทำนี้จะถูกถ่ายทอดไปตลอดความยาว  $x'$  โดยมีความเค้นเฉือนสูงสุดระหว่างไฟเบอร์และเมตริกซ์เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 N &= V_f / \pi r^2 \\
 2 \pi r N x' &= \delta_{mu} V_m \\
 x' &= \frac{V_m \cdot \delta_{mu} r}{V_f \cdot 2\pi} \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

ค่าการกระจายของความเค้นในไฟเบอร์และเมตริกซ์ (โดยให้ระยะระหว่างรอยร้าว =  $2x'$ ) แสดงอยู่ในรูปที่ 3.5

มีความเค้นเพิ่ม (additional stress) เกิดขึ้นบนตัวไฟเบอร์เนื่องจากการแตกร้าวของเมตริกซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\delta_{mu} V_m / V_f$  ที่จุดแตกร้าวและค่อยๆ ลดลงจนเท่ากับศูนย์ บริเวณที่ห่างจากรอยแตกร้าวเป็นระยะ  $x'$  เพราะฉะนั้นความเค้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค้นเพิ่มนั้น (โดยค่าเฉลี่ย) จะมีค่าเท่ากับระยะยึดต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสารผสมที่ระดับความเค้นคงที่มีค่าเท่ากับ  $E_c \epsilon_{mu}$

$$\Delta \epsilon_c = \frac{1}{2} \delta_{mu} \cdot \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{1}{E_f}$$

$$\Delta \epsilon_c = \frac{\epsilon_{mu} E_m V_m}{2 E_f V_f} = \frac{\alpha \epsilon_{mu}}{2} \tag{3.16}$$

$$\text{โดย } \alpha = \frac{E_m V_m}{E_f V_f} \tag{3.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความกว้างของรอยแตกร้าวของสารผสมมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความ

เครียดที่เพิ่มขึ้นมา

$$w = \frac{2x'(\alpha \epsilon_{mu} + \epsilon_{mu})}{2}$$

$$w = \epsilon_{mu} (1 + \alpha) x' \tag{3.18}$$

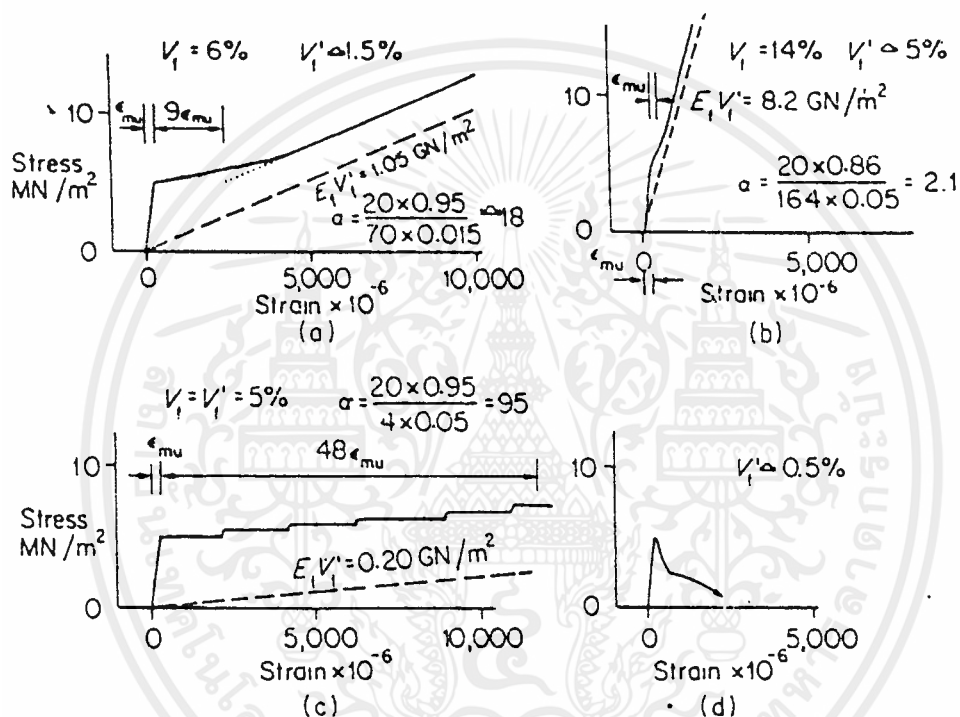
หลังจากเสร็จสิ้นการแตกร้าวแล้ว ระยะห่างของรอยแตกร้าว จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $2x$  ซึ่งใช้ในการถ่ายแรงกระทำที่อยู่ในเมตริกซ์  $(\sigma_{mu}, V_m)$  และหลังจากนั้นแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นก็จะถูกรับไว้โดยแรงเสียดทานระหว่างไฟเบอร์และเมตริกซ์ ดังนั้นค่าในโมดูลัสยืดหยุ่นของสารผสม จะมีค่าเท่ากับ  $E_c V_c$

3.1.4.4 การประยุกต์ใช้กับสารผสมจริงๆ

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในรูป 3.4 จะมีค่าความเค้นที่จุดแตกร้าวเพียงค่าเดียวเท่านั้น ขณะที่ในความเป็นจริงแล้วเมตริกซ์สามารถเปลี่ยนแปลงความเค้นไปตามแต่ละจุด ดังนั้นรูปร่างที่แท้จริงของกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดจะมีค่าขึ้นอยู่กับ กำลังแรงยึดเหนี่ยวของเมตริกซ์และไฟเบอร์ และขึ้นอยู่กับปริมาณของไฟเบอร์ที่ผสม ตัวแปรเหล่านี้รวมทั้งปัจจัยประสิทธิผล เนื่องจากทิศทางและความยาวของไฟเบอร์จะมีผลต่อกราฟความเค้น-ความเครียด ให้ตกลงจากเดิมแต่จะยังคงอยู่ในสามเหลี่ยม OAB ในรูป 3.4 OB เป็นเส้นตรงของไฟเบอร์เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการถ่ายแรงให้เมตริกซ์

ในรูปที่ 3.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดที่เป็นจริงของสารผสม 4 อย่าง โดยที่  $V_c$  คือ ปริมาตรของไฟเบอร์ประสิทธิผล (ซึ่งคำนวณโดยคูณปัจจัยประสิทธิผลกับค่า  $V_c$ ) ค่า  $\alpha$  ที่แสดงในรูป 3.6 คำนวณได้จากสมการ (3.16) และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.15) ซึ่งมันจะเป็นตัวบ่งชี้ที่เป็นไปได้ของวัสดุจริงที่เป็นช่วงแนวราบ  $(\alpha E_{mu}/2)$  ในรูป 3.4

ในรูปที่ 3.6(a) แสดงว่าค่าความเครียดของไฟเบอร์ไอแกนมีค่าเป็น 9 เท่าของความเครียดของเมตริกซ์ (ซีเมนต์) ขณะที่เส้นใยแอสเบสตอสในซีเมนต์มี



รูป 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดที่เป็นจริงของสารผสม 4 อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเครียดเท่ากับค่าความเครียดในซีเมนต์ ในขณะที่ถ้าใช้ไฟเบอร์ Polypropylene ที่อัตราส่วนปริมาตรเดียวกัน ค่าความเครียดมีค่าเกือบถึง 50 เท่าของความเครียดของเมตริกซ์ นอกจากนี้เรายังสามารถทราบคุณสมบัติอื่น ๆ ของเมตริกซ์จากรูปภาพความเค้น-ความเครียด สำหรับเส้นใยแก้วเสริมซีเมนต์ (รูปที่ 3.6 (a)) ค่าแรงยึดเหนี่ยวมีค่าสูงพอสมควร รอยร้าวที่เกิดขึ้นก็เป็นแบบ multiple cracking (สมการ (3.14)) รอยร้าวแต่ละรอยเกิดขึ้นในความเค้นระดับสูง และไฟเบอร์จะทนแรงได้ไม่นานก็จะเกิดการพังทลายของไฟเบอร์เองหรือไม่ก็ถูกดึงหลุด (pull out)

สำหรับซีเมนต์เสริมเส้นใยแอสบอสตอส (รูปที่ 3.6 b) ค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์ชนิดนี้ดีมาก ส่งผลให้รอยแตกร้าวมีขนาดเล็กลง และค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่ทำนายไว้ในสมการ (3.16) เพราะว่าค่าความชันของกราฟความเค้น-ความเครียดช่วงหลังการแตกร้าว มีค่าไม่แตกต่างจากค่าความชันของสารเมตริกซ์ เพราะฉะนั้นช่วงเปลี่ยนแปลงของกราฟรูปนี้จึงค่อนข้างเรียบ จากรูปที่ 3.6 b กราฟในรูปดังกล่าวไม่มีส่วนที่เป็นแนวราบเลยซึ่งกลับเป็นผลเสียอย่างหนึ่งที่ว่า สารผสมดังกล่าวมีความสามารถที่จะดูดซับพลังงานเนื่องจากแรงกระแทก และการมีความเครียดเกิดขึ้นสูงเกินไปได้น้อยกว่าสารผสมอื่น เส้นใยแอสบอสตอสอาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.002-20  $\mu\text{m}$ . สารเมตริกซ์เกิดการแตกร้าวเป็นรอยแตกมากกว่าที่จะเป็นแบบ multiple cracking

ในรูปที่ 3.6 (c) กราฟในรูปจะมีส่วนของเส้นซึ่งอยู่ในแนวราบค่อนข้างยาวมาก ตามสมการที่ 3.16 ในแต่ละช่วงในเส้นของแนวราบดังกล่าว เกิดจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวที่บริเวณรอยแตกนั่นเอง ค่าความชัน  $E_c V_c$  ไม่มีทางที่จะเกิดขึ้นได้ ในทางปฏิบัติเนื่องจากการเสีอรูปร่างจนเกินไป

ส่วนรูปที่ 3.6 (d) เป็นของคอนกรีตเสริมใยเหล็ก (random short fiber reinforced concrete) เมื่อสารเมตริกซ์เกิดการแตกร้าวขึ้นไฟเบอร์จะไม่สามารถที่จะรับแรงกระทำหลังจากการแตกร้าวได้และค่อยลดลงอย่างช้า ๆ ต่อไป

#### 3.1.4.5 การหาค่าระยะห่างและค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของไฟเบอร์สั้น

อย่างที่ได้ทราบก่อนหน้านี้แล้วว่า หลังจากสารเมตริกซ์เกิดการแตกร้าว จะมีการถ่ายความเค้นจากตัวไฟเบอร์ข้ามไปยังเมตริกซ์ ดังนั้นเราสามารถทำนายค่าคุณสมบัติของซีเมนต์เสริมใยเหล็กสั้นได้ โดยอาศัยทฤษฎีดังกล่าวมาแล้ว

ตัวอย่างของการคำนวณระยะห่างระหว่างรอยแตกริ้ว อาจทำได้โดยพิจารณาค่า  $X_d$  คือ ทางที่ต้องการในการถ่ายแรงกระทำ ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยกลับเข้าไปยังสารเมตริกซ์ เช่นเดียวกับที่คำนวณแบบที่มีเส้นใยต่อเนื่องที่เคสคำนวณมาแล้ว จำนวนไฟเบอร์ที่ปลายทั้งสองข้างยาวกว่าค่า  $X_d$  วัดจากรอยแตก ซึ่งสามารถถ่ายแรงกระทำได้เต็มที่ มีอยู่จำนวนเท่ากับ  $(2X_d N/l)$  จะมีปลายข้างหนึ่งของไฟเบอร์สั้นกว่าค่า  $X_d$  วัดจากรอยแตกและสามารถถ่ายแรงกระทำด้วยระยะทางเฉลี่ย  $(X_d)/2$  เราสามารถคิดได้ว่าแรงทั้งหมดมีค่าเท่ากับ  $\delta_{cu} V_m$  ดังนั้น

$$2\pi r X_d N (1-X_d/l) = \delta_{cu} V_m$$

$$X_d = 1/(1-X_d/l) * V_m / V_p * \delta_{cu} r/2 = X'/(1-X_d/l)$$
(3.19)

ซึ่ง  $(X')$  สามารถหาได้จากสมการ (3.14) หลังจากสมการ (3.19)

$$X_d = 1 \pm (1^2 - 4X')^{1/2}$$
(3.20)

และค่า  $X_d < 1$  จะเป็นรากสมการที่น้อยเกินไป

สมการ (3.20) ซึ่งถูกพล็อตอยู่ในรูป 3.7 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างรอยแตกจะใกล้เคียงกับวัสดุที่เสริมด้วยเส้นใยต่อเนื่อง เมื่อใช้ความยาวของไฟเบอร์เท่ากับ  $4X'$  หรือเมื่อความยาวของไฟเบอร์ (ที่ใช้ในการถ่ายแรง) โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างรอยแตกสำหรับวัสดุที่เสริมเส้นใยต่อเนื่อง

ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย ( $\delta_{cu}$ ) จะมีค่าน้อยกว่า  $\delta_{cu} V_p$  เมื่อความยาวของไฟเบอร์ ( $l$ ) มีค่ามากกว่าความยาววิกฤตของไฟเบอร์ ( $l_c$ ) โดยที่

$$l_c = \delta_{cu} r$$
(3.21)

นี่เป็นเพราะว่าอัตราส่วนความยาวของไฟเบอร์ ( $l_c/l$ ) จะมีปลายข้างหนึ่งมีความยาวน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $l_c/2$  วัดจากรอยแตก ทำให้ไฟเบอร์ดังกล่าวจะถูกดึงจนขาด โดยที่ค่าความเค้นโดยเฉลี่ยในไฟเบอร์ที่ถูกดึงหลุดออกมีค่าเท่ากับ ตามทฤษฎี เพราะฉะนั้นค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของสารผสมจะมีค่าเท่ากับ

$$\phi_{cu} = (1 - (1 - \phi_c)/21) \phi_{cu} V_r \quad (3.22)$$

### 3.1.4.6 เส้นใยไฟเบอร์สั้นซึ่งเกิดการหลุดก่อนการขาด

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงในการรับแรงดึง และอัตราปริมาตร

วิกฤติ  $V_{rc(=r_{10})}$  ได้แก่

#### 3.1.4.6.1 จำนวนไฟเบอร์ที่อยู่ระหว่างรอยแตก และทิศทางประสิทธิผลของไฟเบอร์

สภาพการที่เกิดขึ้นในรอยแตกของสารผสมถูกแสดงในรูปที่ 3.7 ก่อนเกิดการแตกร้าว ค่าปัจจัยประสิทธิผล ( $\eta_l$ ) จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 แต่หลังจากเกิดการแตกร้าวรอยแตกดังกล่าว จะทำให้ไฟเบอร์ถูกดึงอยู่ในทิศทางของความเค้นดังรูป 3.7

สำหรับไฟเบอร์สั้นและผสมแบบ 3 มิติ เช่น ไฟเบอร์เส้นใยเหล็ก, เส้นใย polypropylene ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าความยาวน้อยกว่าค่าความยาววิกฤติทำให้เมื่อรับแรงไฟเบอร์จะถูกดึงหลุดออกก่อนจะเกิดการขาด การประมาณค่าแรงกระทำที่จะรับไว้ได้หลังจากเกิดการแตกร้าว สามารถคำนวณได้จากการคูณจำนวนของไฟเบอร์ที่อยู่ระหว่างรอยแตกในพื้นที่ 1 หน่วย กับค่าเฉลี่ยของแรงดึงต่อไฟเบอร์ 1 เส้น ส่วนไฟเบอร์ที่เกิดการขาดก่อนการดึงหลุดนั้นจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่านี้

จำนวนไฟเบอร์ที่เหมาะสม ที่อยู่ระหว่างรอยแตกในพื้นที่ 1 หน่วยเท่ากับ รัศมีหน้าตัดของไฟเบอร์ =  $r$

$$1 - D, N = \frac{V_r}{\pi r^2} \quad (3.23)$$

$$2 - D, N = \frac{2 V_r}{\pi r^2} \quad (3.24)$$

$$3 - D, N = \frac{1 V_r}{2 \pi r^2} \quad (3.25)$$

#### 3.1.4.6.2 แรงดึงในไฟเบอร์และกำลังยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์

ดังรูปที่ 3.8 ถ้าการพังทลายของสารผสม เกิด

ขึ้นเนื่องจากการหลุดแล้ว ค่าความยาวของไฟเบอร์ที่ถูกดึงหลุดโดยเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ  $l/4$

สมมติให้ค่ามุมของไฟเบอร์ที่กำกับรอยแตก ไม่มีผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงเสียดทานโดยเฉลี่ย ( $\tau$ ) ดังนั้นแรงดึงหลุดของไฟเบอร์ต่อหนึ่งเส้น ( $F$ ) เท่ากับ

$$F = \tau \pi d l / 4 \tag{3.26}$$

ค่าความเค้นประลัยต่อพื้นที่สารผสม 1 หน่วย หลังการแตกร้าวเท่ากับ  $N \times F$

$$\sigma_{cu} = \frac{N \tau \pi d l}{4} \tag{3.27}$$

ค่าความเค้นของไฟเบอร์โดยเฉลี่ยที่จุดที่ถูกดึงหลุดเท่ากับ

$$\begin{aligned} \sigma_{fu} &= \pi d l / 4 \times 4 / \pi d^2 \\ \sigma_f &= \tau \times l / d \end{aligned} \tag{3.28}$$

แทนค่า  $N$  จากสมการ (3.23), (3.24) และ (3.25) ลงในสมการ (3.27)

ดังนั้น  $1 - D, \sigma_{cu} = V_f \tau l / d \tag{3.29}$

$2 - D, \sigma_{cu} = \frac{2}{\pi} V_f \tau l / d \tag{3.30}$

$3 - D, \sigma_{cu} = \frac{1}{2} V_f \tau l / d \tag{3.31}$

3.1.4.7 ค่าปัจจัยประสิทธิผลสำหรับทิศทาง และความยาวของไฟเบอร์ที่มี

ค่าเกินความยาววิกฤติ

สำหรับสารผสมซึ่งใช้ไฟเบอร์ ที่มีความยาวเกินค่าความยาววิกฤติ ( $l_c$ ) ซึ่งจะทำให้ไฟเบอร์ถูกดึงขาดก่อนที่จะหลุดออกจากสารเมตริกซ์ การศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยประสิทธิผลที่เหมาะสม ( $\eta_2$ ) ที่จะใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ ได้กระทำโดย LAWS โดยเขาได้แสดงไว้ว่า ค่าปัจจัยดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง  $(1-l_c/2l)$  และ  $(1-l_c/l)$  ขึ้นอยู่กับค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวก่อนการเลื่อนตัว ( $\tau_u$ ) และหลังการเลื่อนตัว ( $\tau_d$ )

ค่าปัจจัยทั้งหมดสำหรับพฤติกรรมหลังการแตกร้าว ของสารผสม

ทั้งนี้เนื่องจากทิศทางและความยาวของไฟเบอร์ถูกแสดงไว้ในตาราง 3.2

ค่าปัจจัยประสิทธิผลนี้สามารถใช้กับค่า  $V_r$  ในสมการ 3.2 และ 3.5 ในการหาค่าคุณสมบัติของสารผสมหลังการแตกเร็ว ค่า  $\phi_m$  และ  $E_m$  มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ค่าความถูกต้องจะถูกจำกัดไว้เนื่องจาก การขาดข้อมูลที่ถูกต้องของข้อมูล  $V_m$  และ  $V_r$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Orientation	Efficiency factor	
	Continuous fibres	Short fibres
Aligned	1	$\frac{l}{4l_c'}$ ( $l \leq 2l_c'$ )
		$1 - \frac{l_c'}{l}$ ( $l \geq 2l_c'$ )
Random 2-D	$\frac{3}{8}$	$\frac{9l}{80l_c'}$ ( $l \leq \frac{5}{3}l_c'$ )
		$\frac{3}{8} \left(1 - \frac{l_c'}{l}\right)$ ( $l \geq \frac{5}{3}l_c'$ )
Random 3-D	$\frac{1}{3}$	$\frac{7l}{100l_c'}$ ( $l \leq \frac{10l_c'}{7}$ )
		$\frac{1}{3} \left(1 - \frac{5l_c'}{7l}\right)$ ( $l \geq \frac{10l_c'}{7}$ )

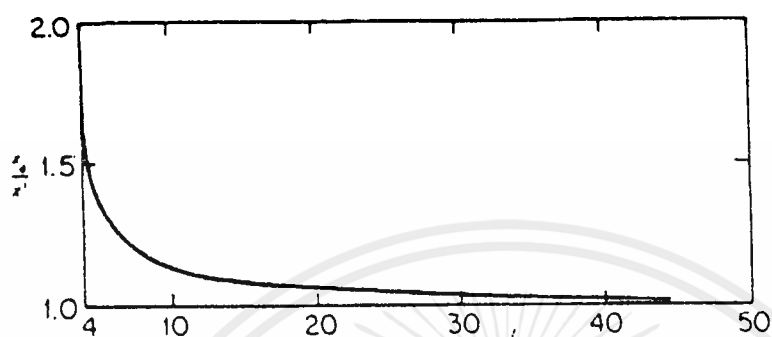
where  $l_c' = \frac{l_c}{2} \left(2 - \frac{\tau_d}{\tau_s}\right)$

$\tau_s$  = static interfacial bond force.  
 $\tau_d$  = sliding frictional bond force.

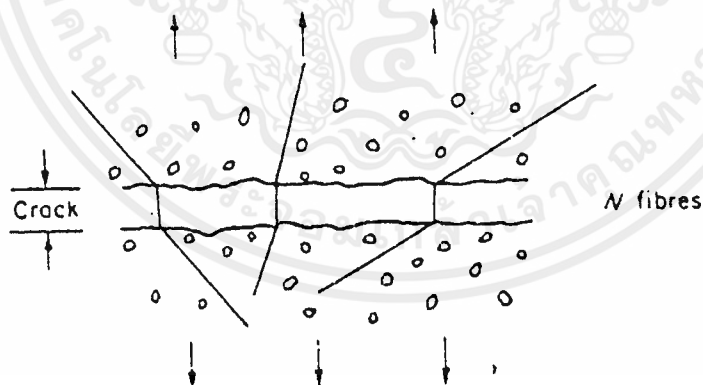
*Footnote:* In a personal communication, Laws has stated that when  $l < l_c$  a higher factor,  $\beta \cdot (\tau_d/\tau_s) \cdot (l/l_c)$ , where  $\beta = \frac{1}{4}$  for 2-D or  $\beta = \frac{1}{6}$  for 3-D fibres, can in theory apply in some cases if the requisite high strain ratio can be achieved.

ตาราง 3.2 แสดงประสิทธิภาพของไฟเบอร์ที่มีความยาวเกินความยาววิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของรอยแตกยาวของไฟเบอร์ต่อเนื่องและไฟเบอร์เส้นสั้น



รูปที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบทิศทางของไฟเบอร์เนื่องจากรอยแตกยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ทฤษฎีการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย

### 3.2.1 บททั่วไป

ในการประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างจริงๆแล้ว โดยส่วนใหญ่สารผสมเสริมเส้นใยจะถูกนำไปใช้ในการรับแรงดัดมากกว่านำไปใช้ในการรับแรงดึงโดยตรง ดังนั้นเราควรทำความเข้าใจในลักษณะพฤติกรรมการรับแรงดัดของสารผสมเสริมเส้นใยด้วย ให้เข้าใจด้วยว่า คำว่า flexural strength, bending strength และ modulus of rupture หมายถึงสิ่งเดียวกัน คือ กำลังแรงดัดประลัยของสารผสมเสริมเส้นใย

ความต้องการทฤษฎีพิเศษ อธิบายการรับแรงดัดของสารผสมเสริมเส้นใย เกิดขึ้นเพราะว่า ได้มีการสังเกตจากการทดลองแล้วว่า มีความแตกต่างกันมาก ระหว่างค่าโมดูลัสแตกร้าวและค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรง ซึ่งเป็นจริงทั้งใน ซีเมนต์เสริมใยแก้วและคอนกรีตเสริมใยเหล็ก ซึ่งปรากฏว่าค่าโมดูลัสแตกร้าวมีค่าเกือบ 3 เท่า ของค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรง ทั้งที่ตามทฤษฎีคลาสสิกแล้ว ค่าทั้งสองมีค่าเท่ากัน ซึ่งความแตกต่างจะเกิดขึ้นน้อยลงใน plain concrete

เหตุผลสำคัญของข้อขัดแย้งดังกล่าวมาจากความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดหลังเกิดการแตกร้าวของสารผสมเสริมเส้นใย ดังรูปที่ 3.6 โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความแตกต่างกันอย่างมาก ระหว่างด้านที่เป็นแรงอัด และด้านที่เป็นแรงดึงของคานคอนกรีต ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีคลาสสิก โดยที่พฤติกรรมการรับแรงดัดดังกล่าวเป็นแบบ quasi-plastic ทางด้านรับแรงดึงของคอนกรีต มีผลอย่างมากต่อกำลังรับแรงดัดของสารผสมเสริมเส้นใย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไฟเบอร์ถูกดึงหลุดจากเมตริกซ์และการยึดตัวของไฟเบอร์หลังจากเมตริกซ์เกิดการแตกร้าว ซึ่งหลักการดังกล่าวอยู่ในตอนถัดไป

ลองพิจารณาคานคอนกรีตเสริมเส้นใยซึ่งได้รับแรงกระทำ ตามรูปที่ 3.9 ขณะที่ความเครียดทางด้านรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ก็จะมีรอยแตก แต่จะไม่เหมือนกับของซีเมนต์หรือคอนกรีตล้วน โดยแรงกระทำดังกล่าวจะถูกรับไว้โดยเส้นใยไฟเบอร์ที่อยู่ระหว่างรอยแตก เนื่องจากรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นดังกล่าว เมื่อค่าความเครียดของด้านที่รับแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าของระยะทางจากผิวรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าของแรงกระทำจากผิวรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าของระยะทางจากผิวรับแรงดึงถึงแกนสะเทินจะเพิ่มขึ้นด้วย ( $d_n$ )

เมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นกับคาน ค่าความเครียดเนื่องจากแรงดึงจะเพิ่มขึ้น ในอัตราที่สูงกว่าความเครียดด้านรับแรงอัด ตามรูปที่ 3.9(b) จนกระทั่งความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเค้นและความเครียดไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป ผังกระจายหน่วยแรงในส่วนรับแรงดึง อาจจะเป็นรูปใดรูปหนึ่งในรูป 3.9(c), (d), (e) ขึ้นอยู่กับว่าชนิดของสารผสมที่ใช้จะรับแรงกระทำได้ เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิม เมื่อเกิดการแตกร้าวขึ้น

รูป 3.9(c) หรือ (d) เป็นของคอนกรีตเสริมใยเหล็ก ซึ่งปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้มีค่าน้อยกว่าอัตราอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติของแบบรับแรงดึงโดยตรง ( $V_f(\text{crit})$ ) โดยที่ในรูป 3.9(d) หรือ (e) เป็นแบบที่เหมาะสมกับซีเมนต์เสริมใยแก้ว โดยที่ปริมาณไฟเบอร์จะต่ำกว่าหรือเท่ากับ  $V_f(\text{crit})$  ตามลำดับ ในขั้นแรกผังกระจายหน่วยแรงจะเป็นรูป 3 เหลี่ยมถึงแม้ว่า ค่าที่ได้จะไม่สอดคล้องกับค่าแรงกระทำประลัยก็ตาม

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะใช้ปริมาณไฟเบอร์ไม่ถึงปริมาณวิกฤติ แต่กำลังรับแรงดึงของคานก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของผังกระจายหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากพฤติกรรม pseudo-ductility และการเลื่อนตัวขึ้นของแกนสะเทิน

ดังนั้นถึงแม้ว่าค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ใช้กับซีเมนต์หรือคอนกรีตเสริมเส้นใย จะใช้พื้นฐานจากทฤษฎีคลาสสิก แต่ค่าที่ได้ไม่ตรงกับความเป็นจริงและไม่เท่ากับกำลังรับแรงดึงโดยตรงด้วย และแม้ว่าจะมีผังการกระจายหน่วยแรงที่ถูกต้องก็ตามก็ใช้ว่าจะสามารถคำนวณค่าที่ถูกต้องได้ เนื่องจากโดยแท้จริงแล้ว แรงจริงจะถูกรับไว้โดยไฟเบอร์แต่ละเส้นที่อยู่ระหว่างรอยแยก ซึ่งมีความซับซ้อนอย่างมาก ดังนั้นควรนำแรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของคาน จะทำให้ค่าเฉลี่ยซึ่งให้ความสะดวกในการทำงานมากกว่า ค่าที่ได้นั้นเป็นค่ากำลังรับแรงดึงโดยเฉลี่ยของสารผสมเสริมเส้นใย อธิบายกับค่าโมดูลัสแตกร้าวในทฤษฎีคลาสสิก

### 3.2.2 การวิเคราะห์การรับแรงดัดหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใย

การทำนายค่ากำลังรับแรงดัดของสารผสมเสริมเส้นใยถูกวางรูปแบบเอาไว้แล้วโดยใช้ข้อสมมุติฐานขั้นต้นที่กล่าวในตอนที่แล้ว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดได้แก่ กำลังแรงยึดเหนี่ยว การเพิ่มขึ้นของความเครียด ผลของแรงปฏิริยาระหว่างไฟเบอร์และมวลรวม การกระจายตัวของไฟเบอร์และปัจจัยประสิทธิผลเนื่องจากทิศทาง และความยาวของไฟเบอร์ ทฤษฎีที่ถูกต้องได้มีคนหาไว้แล้วบอกเป็นนัยๆว่า ค่าโมดูลัสแตกร้าวของสารผสมเสริมเส้นใยอาจมีค่าถึง 3 เท่าของค่ากำลังรับแรงดึง

ทฤษฎีที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็น การประมาณค่าโดยให้หลักการของ Aveston ซึ่งคิดโดย Hannant ค่าที่ได้จะบอกถึงระดับของค่าที่เพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด

3.2.2.1 การใช้ฟังก์ชันกระจายหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในส่วนรับแรงดึงของคาน การวิเคราะห์นั้นตั้งอยู่บนพื้นฐานของการตั้งสมมติฐาน เกี่ยวกับรูปร่างของฟังก์ชันการกระจายหน่วยแรงในส่วนรับแรงดึง หลังจากการแตกร้า ซึ่งสมมติฐานดังกล่าวไม่ใช่ค่าที่แท้จริง เนื่องจากฟังก์ชันการกระจายหน่วยแรง จะมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดและปริมาณของไฟเบอร์ที่ใช้ ความยาวไฟเบอร์ ค่า W/C ratio การบ่ม ความกว้างของรอยแตก อย่างไรก็ตามค่าที่ได้มีประโยชน์ในระดับหนึ่ง เพราะการเปลี่ยนรูปร่างของฟังก์ชันการกระจายหน่วยแรงเพียงเล็กน้อยก็ไม่กระทบกับผลที่ได้มากนัก

การพิจารณารูปที่ 3.10 (a) ซึ่งเป็นฟังก์ชันการกระจายหน่วยแรงของวัสดุอีลาสติก โดยมีแกนสะเทินอยู่ตรงกลางของความลึกคาน และค่ากำลังรับแรงดัดของสารผสม ( $\sigma_c$ ) จะมีค่าเท่ากับโมดูลัสแตกร้า ( $\sigma_{cr}$ ) ส่วนรูปที่ 3.10 (b) แสดงรูปฟังก์ชันการกระจายหน่วยแรงของสารผสมเสริมเส้นใยหลังการแตกร้า โดยที่ไฟเบอร์จะถูกดึงจนยึดออกหรือหลุดจากเมตริกซ์ ผ่านรอยตลอดหน้าตัดรับแรงดึง ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงหลังการแตกร้าของสารผสม ( $\sigma_{cu}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากตอนที่ 3.4 และ  $\sigma_{comp}$  คือค่าความเค้นอัดที่หน้าตัดบนของคาน ในรูป 3.10 (b) และบอกถึงค่าโดยประมาณของความเค้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กจะมีแกนสะเทินอยู่ที่ประมาณ  $0.2D$  จากผิวรับแรงอัด แต่เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจเพิ่มขึ้นจึงให้ค่าแกนสะเทินมีค่า  $D/4$  จากผิวรับแรงอัดแทนและจะใช้ข้อสมมติฐานข้อนี้ในการคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดของสารผสมเสริมเส้นใย

พิจารณารูปที่ 3.10 (a)

$$\text{แรง } T = C$$

$$T = \sigma_c / 2 \times D/2 = \sigma_c \times D/4$$

$$\text{แขนโมเมนต์ } l_m = 2D/3$$

$$\text{ค่าความต้านทานโมเมนต์} = \sigma_c (D/4) \times (2D/3)$$

$$= \sigma_c D^2 / 6$$

$$(3.2.1)$$

พิจารณาจากรูปที่ 3.10 (b)

ให้  $\sigma_{cu}$  เป็นค่าของแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของส่วนที่รับโดยไฟเบอร์ ซึ่งเปรียบเสมือนค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรง

$$T = \sigma_{cu} (3D/4)$$

$$\text{แขนโมเมนต์ } l_m = ((1/2) \times (3D/4)) + ((2/3) \times (D/4))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 13D/24$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานโมเมนต์} &= \phi_{cu} (3D/4) \times (13D/24) \\ &= \phi_{cu} 13D^2/32 \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

เพื่อที่ว่าคานที่แสดงในรูป 3.10 (a) และ 3.10 (b) จะมีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากัน

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \phi_{cu} D^2/6 &= \phi_{cu} 13xD^2/32 \\ \phi_{cu} &= 16x \phi_{cu}/39 \\ &= 0.41 \phi_{cu} \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

สมการ 3.2.3 บอกเป็นนัยว่า ถ้าให้กำลังรับแรงหลังการแตกร้าวของคาน มีค่าเท่ากับ 0.41 เท่าของกำลังรับแรงดัดโดยตรง กำลังรับแรงของแรงดัดของคาน จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม

ดังนั้น ถ้าวัสดุใดที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในการรับแรงดัดดังในรูปที่ 3.11 (a) จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดของคาน หลังการแตกร้าว และนี่เป็นกราฟความสัมพันธ์ของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

สมมุติว่า เราทราบค่าระยะทาง ( $d_u$ ) จากผิวรับแรงดัดถึงแกนสะเทิน โดยหลักการเดิมเราสามารถพิจารณาหาค่า  $\phi_{cu}$  ที่เหมาะสมและปริมาณไฟเบอร์วิกฤติ ในการที่จะเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคาน ค่าอัตราส่วนปริมาตรวิกฤติของกำลังรับแรงดัดโดยปกตินี้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ( $V_{f,crit}$ ) ของกำลังรับแรงดัดโดยตรง

โดยหลักเดียวกันนี้ สามารถใช้ในการแสดงให้เห็นว่า ถ้าโมดูลัสแตกร้าว ( $\phi_{HR}$ ) ถูกคำนวณจากทฤษฎีอัสติก โดยทั่วไปแล้วจะมีค่ามากกว่าค่ารับแรงดัดโดยตรง ยกตัวอย่าง เช่น ถ้ากราฟความเค้น-ความเครียด ในรูป 3.11 (b) และผังการกระจายหน่วยแรง ในรูปที่ 3.10 (a) และรูปที่ 3.10 (b) เป็นของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุเดียวกัน และเกิดการพังทลายที่แรงกระทำเช่นกัน ดังนั้นผังการกระจายในรูปที่ 3.10 (a) จะไม่ใช่ผังการกระจายที่แท้จริง อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสแตกร้าว ( $\phi_{HR}$ )

แทนค่า ( $\phi_{cu}$ ) ในสมการที่ 3.2.3 โดยใช้  $\phi_{HR}$

$$\phi_{HR} = 39 \phi_{cu}/16 = 2.44 \phi_{cu} \quad (3.2.4)$$

จากรูปที่ 3.11 (b) แสดงให้เห็นว่า ค่าปริมาณไฟเบอร์วิกฤติ และค่าโมดูลัสแตก ร้าวที่คำนวณได้หลังจากเกิดการแตกร้าว จะมีค่าประมาณ 2.4 เท่าของกำลังรับแรงดึงโดยตรง ซึ่งหมายความว่า คานสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นเป็น 2.4 เท่าของแรงกระทำ ซึ่งใช้ในการรับแรงกระทำโดยตรง

นอกจากนี้ ถ้าใช้วิธีวิเคราะห์อย่างเดิม จะได้ว่า อัตราส่วนสูงสุดของโมดูลัสแตก ร้าวและกำลังรับแรงดึง ( $\sigma_{MR} / \sigma_{cu}$ ) มีค่า = 3 สิ่งนี้เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อแกนสะเทิน เคลื่อนที่ไปอยู่ที่ผิวบนสุด (ผิวรับแรงอัด) ของคาน และค่ากำลังรับแรงดึงหลังการแตกร้าวสูงสุดของ สารผสม ( $\sigma_{cu}$ ) เกิดขึ้นตลอดหน้าตัดของความลึกของคาน

$$\sigma_{cu} \times D \times D/2 = \sigma_{MR} \times D^2 / 6$$

$$\sigma_{MR} / \sigma_{cu} = 3 \quad (3.2.5)$$

ซึ่งเหตุการณ์นี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ยาก เพราะว่าจะเกิดการพังทลายของหน้าตัดรับ แรงอัดขึ้นก่อน ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องระหว่างค่าโมดูลัสแตกร้าวและค่ากำลังรับแรงดึง สำหรับสาร ผสมที่มีสารเมตริกซ์ เป็นสารเปราะได้ถูกหาไว้แล้ว โดย Aveston, Mercer, Sillwood ในรูปของ  $\alpha$  และอัตราส่วนของความเครียดที่จุดพังทลายของไฟเบอร์ และของเมตริกซ์ ( $\sigma_{fu} / \sigma_{mn}$ )

$$\alpha = E_m V_m / E_f V_f$$

ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงอยู่ในรูปที่ 3.12 ส่วนค่า  $\alpha$  อยู่ในรูป 3.6

สมการ 3.2.2, 3.2.3, และ 3.2.4 ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า สารผสมมีความเหนียว หลังการแตกร้าวและการพังทลายไม่ได้เริ่มต้นที่ หน้าตัดรับแรงอัดของคาน และค่าความเค้นใน การรับแรงอัด ( $\sigma_{comp}$ ) สามารถคำนวณจากรูป 3.10(b) โดยให้  $C = T$

$$1/2 \sigma_{comp} D/4 = \sigma_{cu} 3D/4$$

$$\sigma_{comp} \quad (3.2.6)$$

$$= 6$$

$$\sigma_{cu}$$

สิ่งนี้เป็นสิ่งปกติสำหรับสารเมตริกซ์ในสารผสมของซีเมนต์เสริมเส้น แต่มันก็เป็นไป ได้สำหรับที่จะเกิด การพังทลายเนื่องจากการอัด ที่ปริมาณไฟเบอร์สูงๆ เพราะว่าไฟเบอร์มิได้ ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดในอัตราเดียวกับการดึง

3.2.3 ค่าโมดูลัสการแตกตัวของสารผสมเสริมเส้นใย

3.2.3.1 เส้นใยต่อเนื่อง

ถ้าใช้สมมติฐานที่ให้ไว้ในตอนที่แล้ว ค่าโมดูลัสการแตกตัวของสารผสมเสริมเส้นใย ( $\delta_{FR}$ ) จะหาได้โดยประมาณ โดยการแทนค่า  $\delta_{cu}$  จากสมการ 3.18 เข้าไปในสมการ 3.2.4

$$\delta_{FR} = 2.44 \delta_{cu} V_f \tag{3.2.7}$$

3.2.3.2 เส้นใยสั้น

เช่นเดียวกับ 3.2.3.1 โดยการแทนค่า สมการ 3.22 ในสมการ 3.2.4

$$\delta_{FR} = 2.44(1-lc/2l) \delta_{cu} V_f \tag{3.2.8}$$

3.2.4 ไฟเบอร์สั้นที่เกิดการหลุดก่อนการขาด

3.2.4.1 ค่าปริมาณไฟเบอร์ที่น้อยที่สุดและ  $l/d$  ที่เหมาะสมในการเสริมกำลังรับแรงดัด

ถึงแม้ว่าจะมีปัจจัยอื่นๆ อีก ที่ควบคุมพฤติกรรมของการรับแรงดัดของสารผสมเสริมเส้นใย นอกจากกำลังรับแรงดัดก็ตาม มันก็ยังคงมีความสำคัญที่ต้องพิจารณาค่าปริมาณไฟเบอร์ที่น้อยที่สุดที่สามารถเสริมกำลังรับแรงดัดได้

สมมติฐาน คือไฟเบอร์จะถูกดึงหลุดออกจากเมตริกซ์ และแกนสะเทินอยู่ที่ระยะ  $3D/4$  จากผิวรับแรงดึงหลังการแตกตัวของ

แทนค่าสมการ 3.29, 3.30 และ 3.31 ในสมการ 3.2.3 จะได้

$$1-D \quad V_{f(min)} = \frac{16\delta_c}{39\tau} \frac{1}{(l/d)} \sim 0.41 \frac{\delta_c}{\tau} \frac{1}{(l/d)} \tag{3.2.9}$$

$$2-D \quad V_{f(min)} = \frac{8\delta_c}{39\tau} \frac{1}{(l/d)} \sim 0.64 \frac{\delta_c}{\tau} \frac{1}{(l/d)} \tag{3.2.10}$$

$$3-D \quad V_{f(min)} = \frac{32\delta_c}{39\tau} \frac{1}{(l/d)} \sim 0.84 \frac{\delta_c}{\tau} \frac{1}{(l/d)} \tag{3.2.11}$$

มันแสดงอยู่ในส่วน ที่กล่าวผ่านมามีค่า  $\delta_c$  ค่าความเค้นเนื่องจากการแตกตัวของสารผสมจะมีค่าเท่ากับ  $\delta_{cu}$  ซึ่งเป็นความเค้นแตกตัวของเมตริกซ์ จากสมการ 3.2.9 ถึง 3.2.11 ได้บอกเป็นนัยว่า

1.)  $V_{f(\min)} \propto \phi_c$  หรือ  $\phi_{\max}$  สำหรับค่า  $l/d$ , และทิศทาง  
คงที่

2.)  $V_{f(\min)} \propto \frac{1}{(l/d)}$  ซึ่งเป็นที่อมรับกันทั่วไปสำหรับ

คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

3.)  $V_{f(\min)}$  สำหรับไฟเบอร์ในแนว 1 มิติ จะมีค่าเป็น  
ครึ่งหนึ่งของแบบในแนว 3 มิติ

3.2.4.2 ค่าโมดูลัสแตกร้าว  $\phi_{HR}$  หลังจากแตกร้าวสามารถคำนวณได้  
จากปริมาณไฟเบอร์และจัดรูปสมการ 3.2.9 , 3.2.10, 3.2.11. และกำหนดให้ค่า  $\phi_c = \phi_{HR}$   
เพราะว่าผังการกระจายหน่วยแรงไม่เป็นแบบอิลาสติกอีกต่อไป

$$1-D \quad \phi_{HR} = \frac{V_f \tau l}{d} \frac{39}{16} \sim 2.44 V_f \tau l / d \quad (3.2.12)$$

$$2-D \quad \phi_{HR} = \frac{V_f \tau l}{d} \frac{39}{8\pi} \sim 1.55 V_f \tau l / d \quad (3.2.13)$$

$$3-D \quad \phi_{HR} = \frac{V_f \tau l}{d} \frac{39}{32} \sim 1.22 V_f \tau l / d \quad (3.2.14)$$

จากสมการ 3.2.12, 3.2.13 และ 3.2.14 ได้บอกเราว่า

1.) ค่าโมดูลัสหลังการแตกร้าว นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับ ปริมาณ, รูปร่าง  
ทิศทาง การวางตัวของไฟเบอร์ และค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยว  
แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงของสารเมตริกซ์เลย ถึง  
แม้จะมีผลต่อกำลังแรงยึดเหนี่ยว และการแตกร้าวของสาร  
ผสมก็ตาม

2.) ค่าโมดูลัสแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง แปรผันตามค่า  $V_f$  และ  
 $l/d$

3.) ค่าโมดูลัสแตกร้าวของ สารผสมที่ไฟเบอร์วางตัวอยู่ในแนว  
1 มิติ จะมีค่าเป็น 2 เท่าของสารผสมที่มีไฟเบอร์วางตัว  
ในแนว

### 3.2.5 การประยุกต์ทฤษฎีการรับแรงดัดกับวัสดุผสมจริง

3.2.5.1 ปริมาณไฟเบอร์ที่น้อยที่สุด ที่จะใช้ในการเสริมกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก จากสมการ 3.2.9 ถึง 3.2.11 ซึ่งให้เห็นว่า ค่า  $V_{f, min}$  มีค่าขึ้นอยู่กับ  $\sigma_c / \tau$  อัตราส่วนของค่าความเค้นในการรับแรงดัด ( $\sigma_c$ ) กับค่ากำลังแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงเสียดทาน ( $\tau$ )

ในทางปฏิบัติ  $\sigma_c$  มีค่าระดับเดียวกับ และรูปที่ 3.13 เป็นกราฟที่พล็อตสำหรับค่า  $\sigma_c / \tau = 1$  สำหรับค่าปัจจัยทิศทางทุกค่า จะเห็นได้จากรูป 3.13 ว่า การเสริมกำลังรับแรงดัดจะเกิดขึ้นในสารผสมจริง ๆ ระหว่างค่าปริมาณไฟเบอร์ที่ 0.3- 1.3 % ขึ้นอยู่กับค่า l/d ratio และทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์

จุดที่น่าสนใจในสมการ 3.2.9 ถึง 3.2.11 และกราฟในรูป 3.13 คือถ้าค่าของ  $\sigma_c$  และ  $\tau$  มีค่าคงที่แล้ว ผลคูณระหว่างค่าอัตราส่วน l/d และค่าปริมาณไฟเบอร์ที่น้อยที่สุด ที่ใช้ในการเสริมกำลังรับแรงดัด จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งตรงกับผลการทดลองทั่วไป

สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ น้ำหนักของไฟเบอร์ (w) จะเป็นสัดส่วนกับค่าปริมาตร และเพราะว่าค่าน้ำหนักเหมาะสำหรับในทางปฏิบัติมากกว่า จึงมีการใช้ค่า w/l/d ในรูป 3.13 และ 3.14 โดย  $w =$  เปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์โดยน้ำหนัก

ผลกระทบของการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัด ของสารผสมจะมีค่าสัมพันธ์กับค่า  $\tau$  ซึ่งแสดงในรูป 3.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สำหรับวัสดุที่อ่อนแอเช่น คอนกรีตหยาบ ( $\sigma_c \sim 1.0 \text{ MN/m}^2$ ) สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้ที่ เปอร์เซ็นต์ปริมาตรไฟเบอร์น้อยกว่า 0.5 % ถ้า l/d และอีกอย่างก็คือ วัสดุมีค่ากำลังรับแรงดัดสูง เมื่อเทียบกับกำลังแรงยึดเหนี่ยวค่า  $V_{f, min}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก

### 3.2.5.2 โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก หลังการแตกร้าว

รูปร่างของความสัมพันธ์ ระหว่างค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ปรากฏและปริมาณของไฟเบอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.2.12 ถึง 3.2.14 และแสดงดังรูป 3.15 โดยสมมติให้ค่า มีค่าเท่ากับ  $3.5 \text{ MN/m}^2$  ซึ่งกราฟที่ได้ในรูป 3.15 เป็นข้อสรุปที่ได้จากการทดลองจำนวนมาก

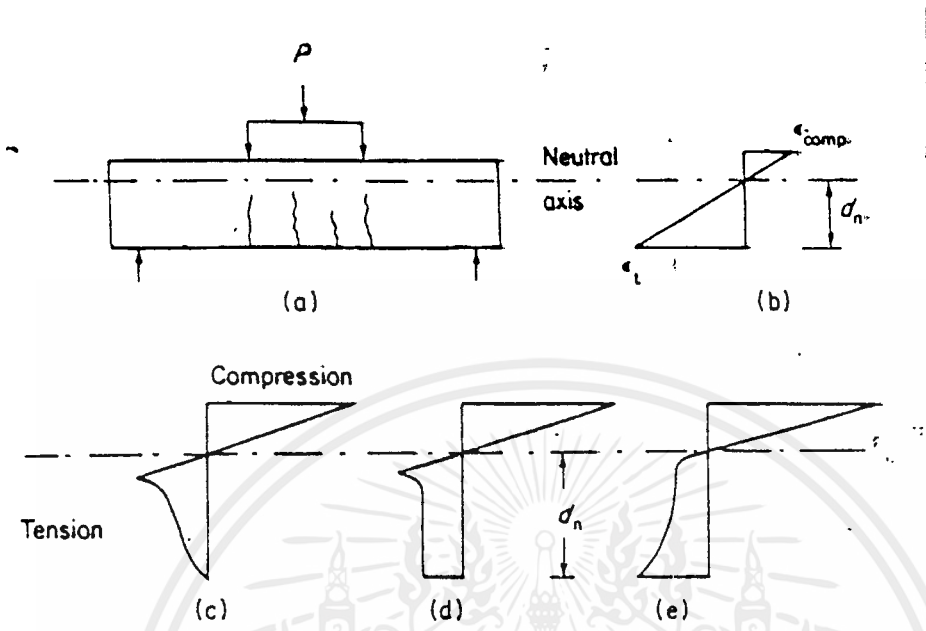
ปัจจัยที่ควบคุมการคำนวณค่าโมดูลัสแตกร้าว ในสมการ 3.2.12 3.2.13 และ 3.2.14 ก็คือค่า คือ ค่าความเค้นเฉลี่ยของแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงเสียด

โดยรูปร่างของไฟเบอร์สามารถเพิ่มค่า ได้ โดยอาศัย mechanical interlock กับสาร  
เมตริกซ์โดยขณะที่ยังคงให้มีการเคลื่อนตัว และมีการยึดหยุ่นเพียงพอ เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้สาร  
เมตริกซ์เกิดการแตกเสียก่อน ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า ที่มีต่อค่า  $\sigma_{HR}$  ตามทฤษฎีแสดง  
ในรูป 3.16 สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

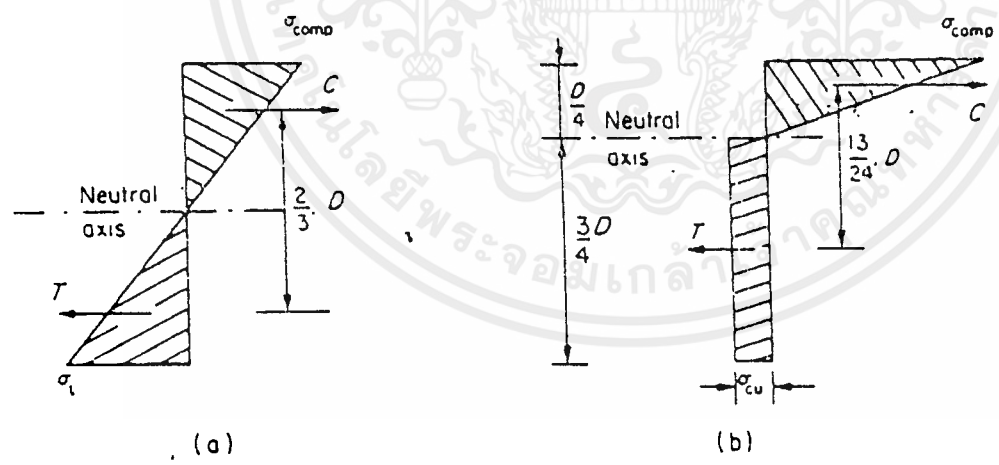
จะเห็นได้จากรูปที่ 3.16 ว่าการเพิ่มกำลังรับแรงดัดของสาร  
ผสม สามารถเป็นไปได้ โดยการปรับปรุงรูปร่างของไฟเบอร์ ให้มีลักษณะที่จะช่วยเพิ่มแรงยึด  
เหนี่ยวให้สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

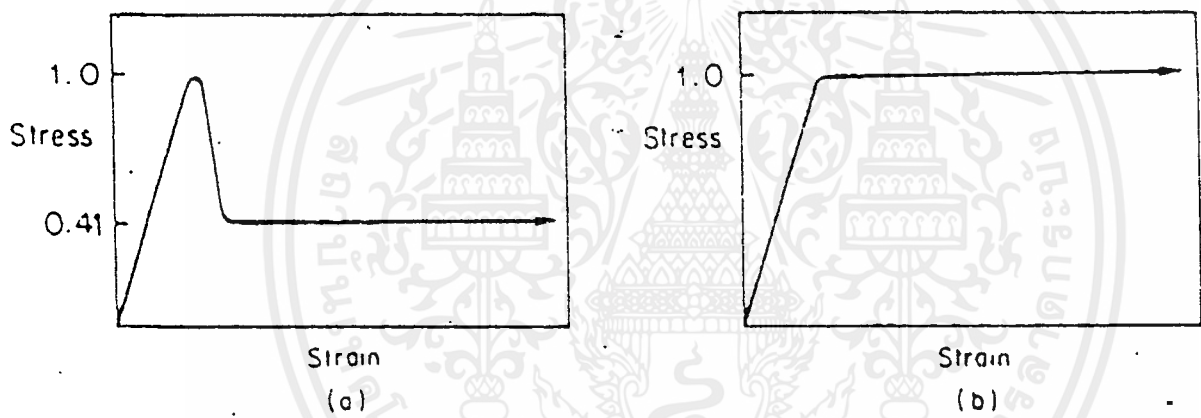


รูป 3.9 แสดงการกระจายความเค้นและความเครียดในการแตกของซีเมนต์ไฟเบอร์



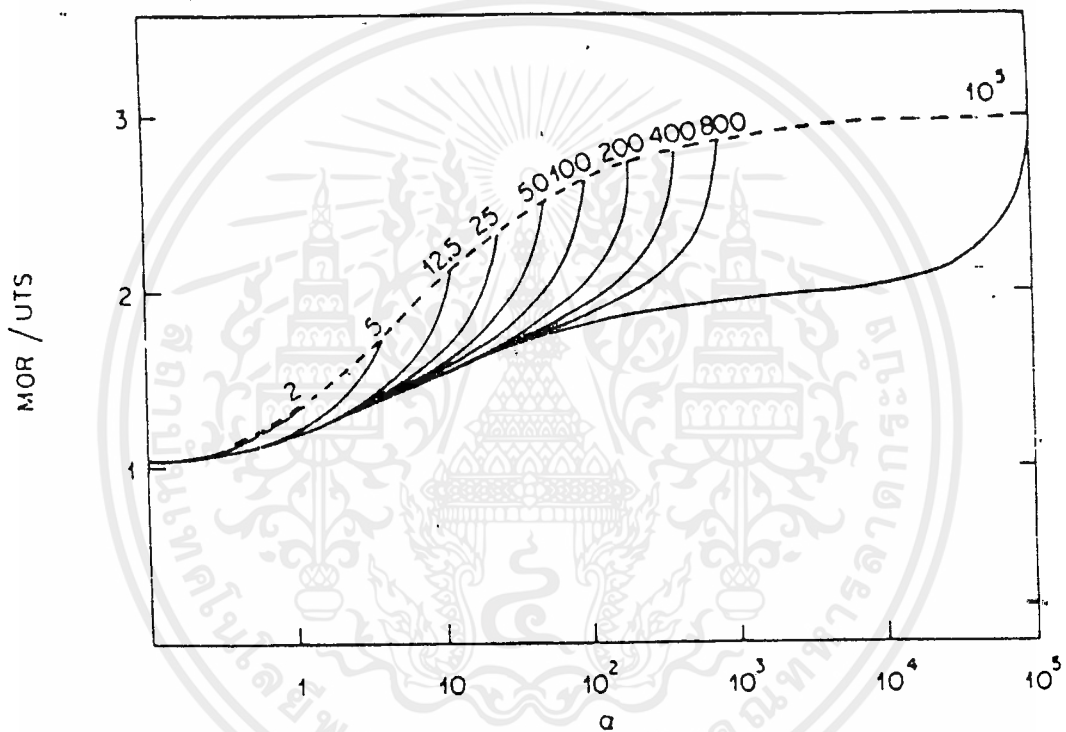
รูป 3.10 แสดงผังการกระจายหน่วยความเค้นของแรงดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



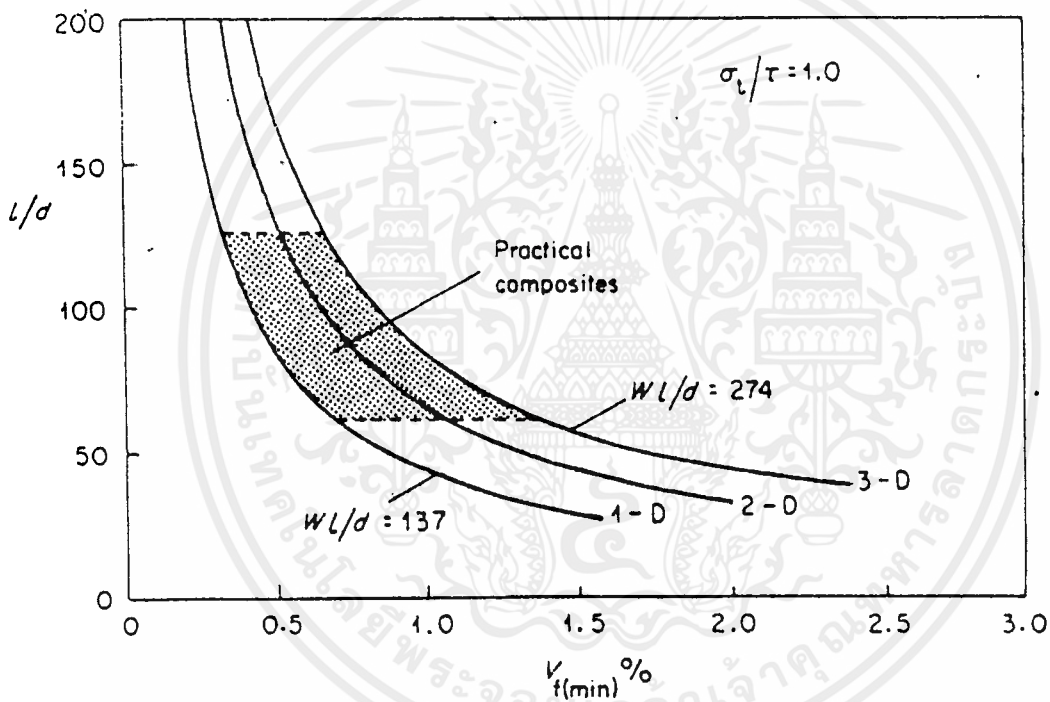
รูปที่ 3.11 กราฟความเค้น - ความเครียด ของแรงดึงตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



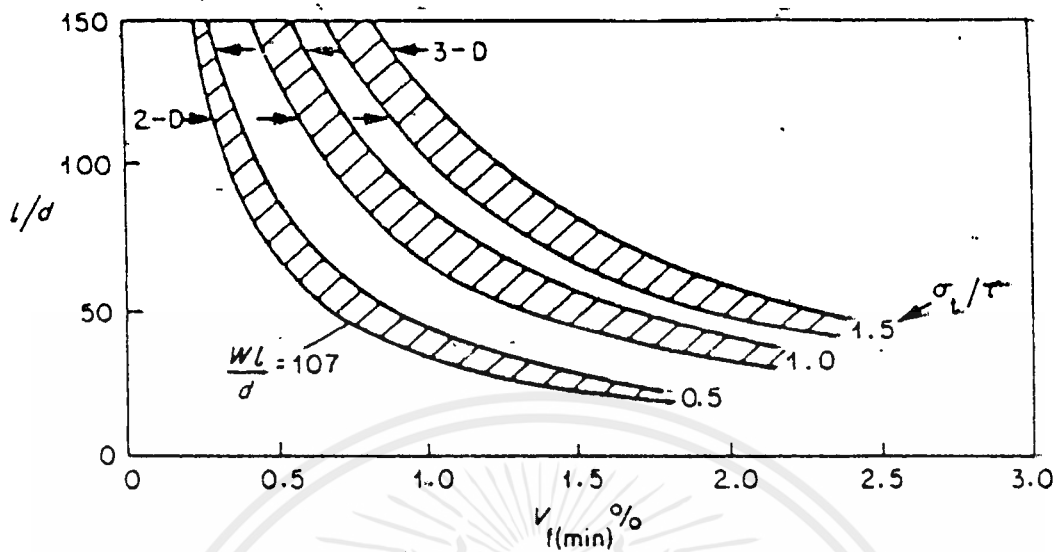
รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสการแตกหักกับกำลังรับแรงดึง  
กับค่า  $\alpha = E_m V_m / E_c V_c$  ที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

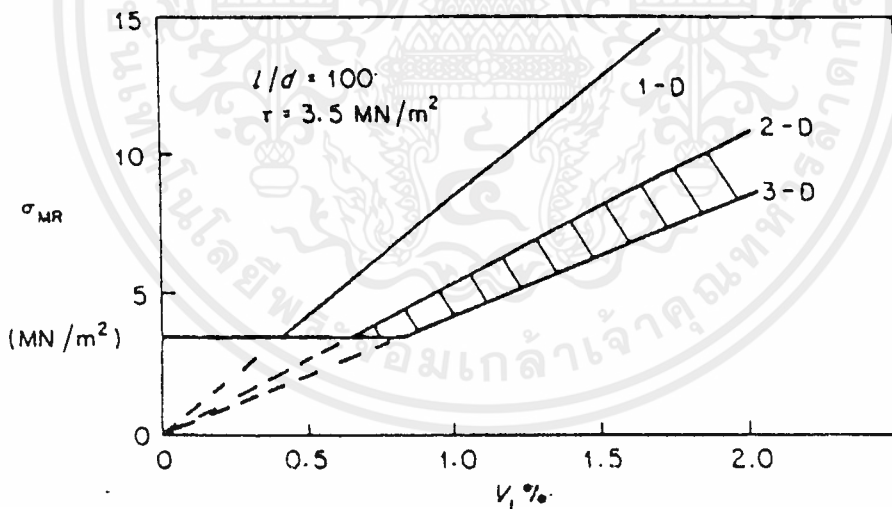


รูปที่ 3.13 แสดงปริมาณของไฟเบอร์น้อยสุดสำหรับกำลังรับแรงตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

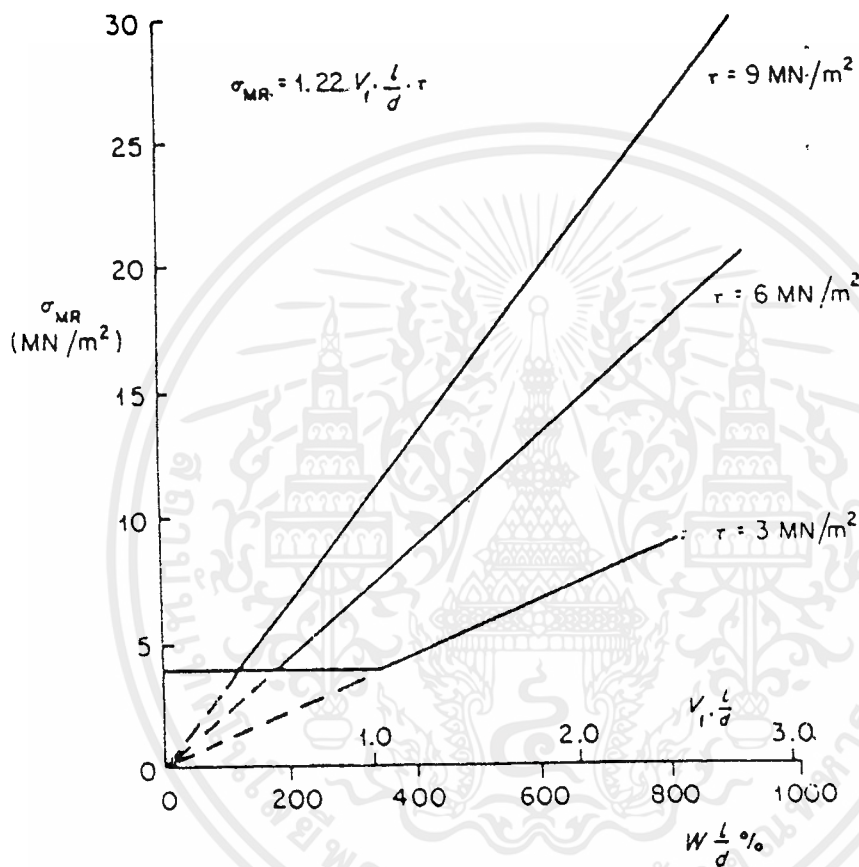


รูปที่ 3.14 แสดงปริมาณไฟเบอร์น้อยที่สุดสำหรับกำลังรับแรงดัด ที่ค่า  $\sigma_L/r$



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการแตกหักกับปริมาณไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงผลกระทบของ bond strength ที่มีต่อโมดูลัสการแตกร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 คุณสมบัติของ FRC (ที่ใช้วัสดุผสมรวมขนาดใหญ่) ที่เพิ่งผสมเสร็จ

บทนี้จะกล่าวถึง คุณสมบัติของ FRC ผสมใหม่ที่บรรจุวัสดุผสมรวมขนาดใหญ่ ใช้สำหรับหล่อในที่ ชนิดของไฟเบอร์เป็นไปตามน้ำหนักบรรทุก ดังนี้ ไฟเบอร์โลหะ 30-150 kg/m<sup>3</sup>, ไฟเบอร์ใยสังเคราะห์ 0.6 - 4.8 kg/m<sup>3</sup> ความยาวของไฟเบอร์ 0.5"-2.5" (12-64 มม) คุณสมบัติของ cement composite จะบรรจุเปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์ในปริมาณสูงและในทางอุตสาหกรรมใช้เทคนิคพิเศษ เช่น shortcrete

ตัวองค์ประกอบที่ใช้ควบคุมคุณภาพของคอนกรีตสด (ผสมเสร็จใหม่) ที่ใช้ส่วนมากคือ ความสามารถทำงานได้ และปริมาณอากาศ องค์ประกอบตัวอื่นที่สามารถวัดได้เช่น หน่วยน้ำหนัก อลูมิเนียมคอนกรีต อลูมิเนียมอากาศฯ ความสามารถในการทำงานได้สามารถวัดจาก standard slump cone test, inverted slump cone test, v-b test

สำหรับ FRC ที่ matrix แข็งมาก วิธี standard slump cone test จะไม่สามารถชี้การทำงานได้ชัดเจน ดังนั้น การใช้ inverted slump cone test และวิธี v-b test จึงเหมาะสมมากกว่า แต่ถ้าได้ส่วนผสมที่เหลวขึ้น ผลของ standard slump cone test จะสามารถทดสอบได้ดีกว่า

โดยทั่วไปการเพิ่มไฟเบอร์ จะทำให้ส่วนผสมแข็งขึ้น water-reducing admixture จะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงาน หรือ workability ให้ดีขึ้น

SFRC (steel fiber reinforced concrete) มีความต้องการปริมาณ air-entraining admixture สูง เพื่อช่วยในการบรรจุอากาศ

#### 3.3.1 การทดสอบความสามารถในการทำงานได้

ความสามารถในการทำงานได้ดี เป็นที่ต้องการในการทำงานทั้งการหล่อในที่ และการตกแต่ง โดยน้ำจะถูก ต้องการในปริมาณน้อยที่สุดในส่วนผสม เพราะการเพิ่มน้ำ (น้ำมากเกินไป) จะส่งผลต่อการแยกตัว (segregation and bleeding) และยิ่งส่งผลต่อคอนกรีตแข็งตัวใหม่ ในแง่ความทนทานและความแข็งแรง (durability-strength)

วิธีการทดสอบที่จะกล่าวต่อไปนี้ ใช้ประมาณความสามารถในการทำงาน และการควบคุมปริมาณน้ำ ใช้ทดสอบได้ทั้ง SFRC, PFRC โดยที่จำกัดเปอร์เซ็นต์ของ SFRC ไม่เกิน 2 % และ PFRC ไม่เกิน 0.5 %

### 3.3.1.1 Slump cone test (ASTM C143)

เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบความสามารถความสามารถในการทำงานมากที่สุด มีกล่าวในตำราทั่วไป ใช้ทดสอบ FRC ที่มี slump ไม่เกิน 2" (5cm)

### 3.3.1.2 Inverted slump cone test

การทดสอบนี้ ถูกพัฒนาเพื่อ FRC โดยเฉพาะ อธิบายใน ASTM C945 การทดลองนี้ ใช้เวลาในหน่วยวินาที (second) มาใช้ช่วยในช่วงที่คอนกรีตไหล(พัง) จาก cone slump มาตรฐาน ในทิศทางตรงข้าม แล้วนำมาเขียนกราฟ

การทดสอบนี้ไม่เหมาะกับคอนกรีตที่มีค่า slump เกิน 4" (10 cm) หรือเกิดจากการใช้ water-reducing admixture เพราะคอนกรีตจะพังเร็วมาก ดังนั้นกรณี คอนกรีตเหลวจะใช้การทดลอง 1.1

### 3.3.2 SFRC (Steel Fiber Reinforced-Concrete)

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของ steel fiber reinforced concrete สด คือ ชนิดของไฟเบอร์, รูปร่างทางเรขาคณิตของไฟเบอร์, ขนาดปริมาตรของไฟเบอร์ และค่าแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์และ matrix จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การเพิ่มไฟเบอร์ จะทำให้ composite แข็งแรงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การผสมสามารถทำงานได้สูงถ้าใช้เครื่องจักร (vibrators) สำหรับการเขย่าและอัดแน่น

ไฟเบอร์ทุกลักษณะ ที่กล่าวมาในบทก่อนหน้าถูกนำมาใช้ในคอนกรีต ไฟเบอร์ที่ยาวและมีค่า aspect ratio ( $l/d$ ) สูง จะลดความสามารถในการทำงานได้ดีของคอนกรีตลง การจับตัวเป็นก้อนระหว่างการผสมและการเท อาจต้องถูกพิจารณาสำหรับการนำไฟเบอร์มาใช้ โดยเฉพาะการเลือกใช้วัสดุรวมขนาดเล็กที่สุด, aspect ratio ต่ำที่สุด และมีปริมาณ volume fraction น้อยที่สุดด้วย

จากการวิเคราะห์จากค่าตัวแปรหลายค่า แสดงถึงองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อ slump ดังนี้

- water-cement ratio
- พฤติกรรมตอบสนองร่วมกันของค่า w/c และปริมาณซีเมนต์
- ปริมาณ water-reducing admixture ที่อยู่ในช่วงสูง
- ปริมาณไฟเบอร์
- การทำงานร่วมกันของ w/c , ปริมาณซีเมนต์ และ ปริมาณไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 วิธีทำการทดลอง

### 4.1 สัดส่วนการผสม, ขั้นตอนการผสมและการเท

FRC ที่ใช้วัสดุรวมขนาดใหญ่นั้น เราจะพบว่า composite ชนิดนี้ ประกอบด้วย วัสดุรวมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่รวมกัน และไฟเบอร์ที่ใช้จะเป็นลักษณะต่อเนื่อง matrix จะใช้อัตราส่วนตามขั้นตอนการใช้เหมือน plain concrete อัตราส่วนปริมาตรของไฟเบอร์ (fiber volum fraction) อยู่ในช่วง 0.4 % - 2 % สำหรับ steel fiber อัตราส่วนผสมสำหรับ plain concrete จะมีการดัดแปลงเล็กน้อย เพื่อที่จะได้การทำงานที่ดี, การผสมไฟเบอร์ง่ายขึ้น และก่อให้เกิดการกระจายไฟเบอร์สม่ำเสมอ

#### 1. สัดส่วนการผสมสำหรับ FRC ที่ใช้วัสดุรวมขนาดใหญ่

ตามที่กล่าวมา วัสดุที่ใช้สำหรับ FRC คือ ซีเมนต์, วัสดุรวมอย่างละเอียด, วัสดุรวมขนาดใหญ่, น้ำ, admixture, ไฟเบอร์

ตัวแรกที่เราควบคุมคือ อัตราส่วน W/C ซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรควบคุม Compressive Strength ตัวแปรอื่นที่ควบคุม Strength และความสามารถในการทำงานได้ (Workability) คือ cement content, ขนาด aggregate ที่ใหญ่ที่สุด, gradation และปริมาณอากาศที่ใส่เข้าไป

ใน FRC ตัวแปรหลักที่ควบคุมคือ ปริมาณไฟเบอร์ และอัตราส่วน l/d โดยมีวัตถุประสงค์คือ การได้ส่วนผสมที่ผลิตหรือสร้าง compression strength ได้ตามต้องการ ทำงานได้ดีและใช้ปริมาณซีเมนต์น้อยที่สุด เพราะ ราคาของซีเมนต์มีค่าสูงใน plain concrete

ขั้นตอนในการทำงานเหมือนกับงานคอนกรีตทั่วไป

ขั้นตอนที่ 1 เลือก slump ที่เหมาะสม สำหรับชนิดการก่อสร้าง

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดใหญ่ที่สุดของวัสดุรวม (aggregate) โดยต้องเป็นไปตามนี้

- น้อยกว่า 1/5 ของขนาดแคบสุดระหว่างไม้แบบ

- น้อยกว่า 1/3 ของความมาลึกของคาน

- น้อยกว่า 3/5 ของระยะเหล็กเสริม

(ให้เลือกขนาดหินใหญ่สุดไม่เกิน 1.5")

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาปริมาณน้ำและอากาศ ปริมาณที่ต้องพิจารณาจาก slump, ขนาดวัสดุรวมใหญ่ที่สุด กรณีที่ค่า slump ที่สูงกว่ามีขนาดวัสดุ

รวมที่เล็กและปริมาณอากาศต่ำ ซึ่งจะนำไปสู่ความต้องการน้ำมาก ปริมาณอากาศขึ้นอยู่กับ ชนิดของช่องว่าง และวัตถุประสงค์ทางโครงสร้าง เพื่อรักษาสภาพ freezing, thawing, wetting และ drying จะมีความต้องการอากาศสูง และนอกจากนั้นปริมาณอากาศที่มากช่วยให้งานเป็นไปด้วยดี แต่จะลด compressive strength

\*การเพิ่มไฟเบอร์ จะส่งผลต่อความสามารถในการทำงาน และการเพิ่มอากาศ  
ขั้นตอนที่ 4 เลือกปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ เพื่อให้ได้ค่า compressive strength ที่ต้องการ ค่า W/C จะถูกเลือกเพื่อให้ได้ strength ที่ต้องการ และปริมาณน้ำจะถูกประมาณแล้ว จากขั้นตอนที่ 3 ดังนั้น ปริมาณซีเมนต์หาจาก W/C ได้

ขั้นตอนที่ 5 เลือกปริมาตรของ วัสดุมวลรวมทั้งขนาดใหญ่และเล็ก อัตราส่วนวัสดุ มวลรวมขนาดใหญ่ต่อขนาดเล็กถูกพิจารณาอีกครั้ง ตามความสามารถในการทำงานได้ที่ต้องการ ปริมาณทรายที่ค่อนข้างสูงกว่าที่ใช้ใน plain concrete จะใช้ได้ผลดีต่อ FRC

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปริมาณที่เหมาะสม โดยการเพิ่มน้ำจากปริมาณความชื้นเดิมของ หินและทราย

#### 1.1 ความต้องการพิเศษสำหรับ SFRC

การทดสอบ slump บางทีอาจไม่พอเพียง สำหรับตรวจสอบความสามารถในการทำงานได้ของ SFRC เพราะมีการจั่นคอนกรีต เพื่อให้เกิดการอัดแน่นที่เหมาะสม ดังนั้น การทดสอบด้วยวิธี inverted slump cone test หรือ v-b test อาจถูกนำมาใช้วัดความสามารถในการทำงานได้

สำหรับ SFRC มีส่วนผสมที่ต้องการ ปริมาณซีเมนต์และวัสดุมวลรวมอย่างละเอียดสูงเพื่อให้ได้ strength และความสามารถในการทำงานได้ ตาราง และแนวทางในการเลือกขนาดคละของวัสดุ เพื่อให้ได้ SFRC ที่สามารถทำงานได้ดี คุณสมบัติของไฟเบอร์ เช่น ความยาว, l/d ratio, และรูปร่างมีบทบาทสำคัญ

ตาราง แสดงขอบเขตที่เป็นไปได้ สำหรับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ ไฟเบอร์โหละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$\frac{3}{8}$ in. max sized aggregate	$\frac{3}{4}$ in. max sized aggregate	$1\frac{1}{2}$ in. max sized aggregate
Cement (lb/yd <sup>3</sup> )	600–1000	500–900	470–700
W/C ratio	0.35–0.45	0.35–0.50	0.35–0.55
Percentage of fine to coarse aggregate	45–60	45–55	40–55
Entrained air content (%)	4–8	4–6	4–5
Fiber content (volume percent)			
deformed fiber	0.4–1.0	0.3–0.8	0.2–0.7
smooth fiber	0.8–2.0	0.6–1.6	0.4–1.4

1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.59 kg/m<sup>3</sup>  
1 in. = 25.4 mm  
1 steel fiber volume percent = 132.3 lb/yd<sup>3</sup> (78.5 kg/m<sup>3</sup>)

ตาราง 4.1 แสดงอัตราส่วนผสมของ SFRC

## 2. ขั้นตอนในการผสมและการเท

2.1 การผสม เริ่มต้นของการผสม คือ การกระจายไฟเบอร์ให้ทั่ว mixture ไฟเบอร์โรดเส้นยาวเล็ก และมีค่า aspect ratio มากกว่า 100 จะเกาะกลุ่มเป็นก้อน หรือ เป็นก้อนคล้ายลูกบอล ในระหว่างการผสม เมื่อก้อนกลุ่มนี้ถูกสร้างขึ้น จะแยกไฟเบอร์ออกจากกัน ในลักษณะที่แตกต่างจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ไฟเบอร์ที่มีลักษณะเส้นตรง ไม่ประสบความสำเร็จเท่าใด

อัตราส่วน  $l/d$  ที่ใช้จะมีค่าสูงเพื่อให้ได้ ประสิทธิภาพของแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างไฟเบอร์และ matrix ค่า  $l/d$  ที่มีมากกว่าหรือเท่ากับ 100 และปริมาตรอัตราส่วนของ ไฟเบอร์ 2% จะถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของความทนทาน (ductivity)

ความสัมพันธ์ของค่า aspect ratio และ fiber volume fraction ที่มีค่าสูงจะเป็นที่ต้องการสำหรับไฟเบอร์เส้นตรง เพราะสามารถทำการผสมและใช้งานได้ดี

จากค่า aspect ratio การเกาะกันเป็นก้อนของไฟเบอร์ เกิดจาก พฤติกรรมของ fiber volume fraction ขนาดละเอียดของวัสดุรวมที่ใช้ในการผสม, ลักษณะ ทางเรขาคณิตของไฟเบอร์และขั้นตอนที่ใช้สำหรับเพิ่ม fiber ลงในเครื่องผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า aspect ratio ที่สูงและขนาดวัสดุรวมที่มีขนาดใหญ่ จะลดค่าอัตราส่วนปริมาตรสูงสุดของไฟเบอร์ ซึ่งจะสามารถใช้งานร่วมกันได้โดยปราศจากการเกาะกันเป็นกลุ่มของไฟเบอร์ สำหรับไฟเบอร์ชนิดต่างๆ การผสมเป็นไปได้อีก โดยเฉพาะค่า aspect ratio สูง สำหรับ aspect ratio ที่ใช้ไฟเบอร์ที่แข็งแรงจะผสมได้ดีกว่า เพราะจะไม่เกิดการเกาะพันกันง่าย

ใน ค.ศ. 1970 มีการพัฒนารูปร่างไฟเบอร์ ให้มีการงอ ด้วยรูปร่างต่างๆ ไป ซึ่งจะก่อให้เกิดพฤติกรรมที่ดีกว่า นอกจากนั้นยังจำกัดความยาวของไฟเบอร์ได้อีกด้วย

เราสามารถหลีกเลี่ยงพฤติกรรม การพันเป็นกลุ่มของไฟเบอร์ในการผสม จากความเป็นไปได้ต่อไปนี้ ที่จะก่อให้เกิดการพันกัน

- a) ไฟเบอร์จะตกจากด้านหนึ่งของ ภาชนะใส่ (conveyer) สู่อีกด้าน
- b) ไฟเบอร์จะพันรอบลูกล้อของเครื่องผสม (โม่)
- c) ปริมาณที่มากเกินไป (น้ำหนักมาก) ของไฟเบอร์
- d) ไฟเบอร์จะเหวี่ยงตนเองกับด้านข้างของภาชนะ
- e) ไฟเบอร์จะเคลื่อนที่จากที่มีความเร็วสูงสู่ส่วนที่มีความเร็วต่ำ

การผสมทำตามลำดับต่อไปนี้ ถูกค้นพบเพื่อให้ใช้งานได้ประสิทธิภาพที่สุด

สำหรับอัตราส่วนผสมทั่วไป

2.1.1 ใส่ไฟเบอร์ที่แยกตัวกันเป็นอย่างดี ลงโดยตรง ในส่วนผสมที่ได้ผสมส่วนอื่นๆ เข้าที่ เรียบร้อยแล้ว ข้อแนะนำอัตราการใช้ คือ 45 กก/นาที ไฟเบอร์สามารถ เพิ่มโดยใช้มือ และอัตราส่วนผสมต้องหมุนด้วยความเร็วเต็มที่เมื่อเติมไฟเบอร์อยู่ หลังจากเติมไฟเบอร์เสร็จ จะหมุนอีก 50 รอบ

2.1.2 ใส่ไฟเบอร์ในวัสดุรวมก่อนที่จะใส่ลงในโม่หรือเครื่องผสม ขึ้นตอนทั่วไปคือใส่ไฟเบอร์ในวัสดุรวมก่อนที่จะใส่ลงในโม่หรือเครื่องผสม ขึ้นตอนทั่วไปคือ ใส่ไฟเบอร์ลงบนวัสดุรวมโดยตรง หรือกระจายบนสายพานลำเลียงเพื่อนำไปผสม

2.1.3 วางไฟเบอร์บนวัสดุรวม, ซึ่งน้ำหนัก ให้พร้อมที่จะบรรจุลงบนเครื่องผสม การเทวัสดุรวมจากเครื่องซึ่งลงในเครื่องผสมจะกระจายไฟเบอร์ในวัสดุรวม

2.1.4 ผสมไฟเบอร์ โดยการเติมมันอย่างสม่ำเสมอพร้อมกับวัสดุรวม, ซีเมนต์, admixture และน้ำประมาณ 90% วิธีนี้จะได้ผลเมื่อค่อยๆ ใส่วัสดุรวม และเพิ่มองค์ประกอบอื่นที่ละเอียดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 คุณสมบัติไฟเบอร์, ปริภาคส่วนผสมและวิธีการทดลอง

### 4.2.1 ไฟเบอร์โลหะ (Steel Fiber)

ไฟเบอร์โลหะ คือ ไฟเบอร์ที่สร้างมาจากโลหะหรือเศษเหล็ก ผ่านกระบวนการผ่าและตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ในการทดลองนี้เลือกใช้ลวดชุบแข็ง

คุณสมบัติเฉพาะของไฟเบอร์โลหะที่นำมาใช้ในการทดลอง

รายละเอียด	ลวดเบอร์ 15	ลวดเบอร์ 20	ลวดผูกเหล็ก
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	0.5055 ม.ม.	0.8600 ม.ม.	1.3200 ม.ม.
ความหนาแน่น	8,719.70	8,154.46	7,350.00
อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect Ratio)	-	46.5-63.9	-
ความยาว	-	4.0-5.5 ซม.	-
YOUNG 'S MODULUS	-	$29 \times 10^3$ KSI	-
Load	10.1446 KGF	30.1934 KGF	40.0160 KGF
การยืดตัวสูงสุด	9.0184 ม.ม.	9.7370 ม.ม.	17.8118 ม.ม.
Tensile Stress	5,064.30 KSC	5,197.87 KSC	2,925.15 KSC
ความทนทานต่อการเกิดสนิม	สูง	สูง	ต่ำ
Specific Gravity	8.7197	8.1546	7.3500
% Strain	10.0200 %	10.8186 %	19.7904 %

หมายเหตุ : ในการทำงานเลือกลวดเบอร์ 20 มาใช้ในการทดสอบการรับกำลังอัดและการทดสอบการรับกำลังดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและวิธีทำการทดลอง

##### การคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐาน AC

ชุดที่ 1

- กำหนดค่าการยุบตัว 8-10 cm .
- กำหนดขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 25 มม. (1 นิ้ว)
- จากตารางแสดงปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและขนาดวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ คือ 195 ลิตร/ลบ.ม. ของคอนกรีต

- จากตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สำหรับกำลังประลัยของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดเฉลี่ย 200, 300 และ 450 ksc จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักต้องใช้เท่ากับ 0.7, 0.55 และ 0.38 ตามลำดับ

- ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ =

$$\text{สำหรับกำลังอัด 200 ksc เท่ากับ } 195/0.07 = 278.57 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{กำลังอัด 300 ksc เท่ากับ } 195/0.55 = 354.55 \text{ "}$$

$$\text{กำลังอัด 450 ksc เท่ากับ } 195/0.38 = 513.16 \text{ "}$$

- หาปริมาตรวัสดุผสมหยาบจากตารางแสดงปริมาตรของวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรคอนกรีต เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.65 และขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 25 มม. จะได้ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งที่อัดแน่น = 0.68 ลบ.ม./ลบ.ม. ของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของหิน = 1,569.015 kg/m<sup>3</sup>

ดังนั้นวัสดุผสมหยาบที่ใช้เท่ากับ  $0.68 \times 1569.015 = 1,066 \text{ kg/m}^3$  ของคอนกรีต

- หาปริมาตรของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

$$\text{ปริมาตรของน้ำ} = 195/1000 = 0.195 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของซีเมนต์} = 278.57/(3.33 \times 1000) = 0.084 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 200 ksc

$$= 354.55/(3.33 \times 1000) = 0.11 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 300 ksc

$$= 513.16/(3.33 \times 1000) = 0.15 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 450 ksc

$$\text{ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ} = 1066.9 / (2.658 \times 1000) = 0.401 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของอากาศ} = 0.01 \times 1.5 = 0.015 \text{ m}^3$$

$$\text{ดังนั้นปริมาตรรวมทั้งหมดยกเว้นทราย} = 0.6949, 0.7170, 0.7657 \text{ m}^3$$

เมื่อกำลังอัดเท่ากับ 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณทรายที่ต้องใช้} = 1 - 0.6949 = 0.3051 \text{ m}^3$$

$$1 - 0.7170 = 0.2830 \text{ m}^3$$

$$1 - 0.7651 = 0.2349 \text{ m}^3$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

น้ำหนักทรายที่จะใช้

$$= 0.305 \times 2.445 \times 1000 = 745.97 \text{ kg}$$

$$= 0.283 \times 2.445 \times 1000 = 691.94 \text{ kg}$$

$$= 0.234 \times 2.445 \times 1000 = 574.33 \text{ kg}$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

#### 8. ปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้น

$$\text{ความชื้นมวลรวม} = 4.14 \%$$

$$\text{อัตราการดูดซึมของทราย} = 2.167 \%$$

$$\text{อัตราการดูดซึมของหิน} = 0.384 \%$$

$$\text{ปริมาณหิน} = 1,066.9 \times 1.011 = 1,078.63 \text{ kg}$$

$$\text{น้ำเคลือบผิวหิน} = 4.14 - 0.384 = 3.756$$

$$\text{น้ำเคลือบผิวทราย} = 4.14 - 2.167 = 1.973$$

$$\text{ปริมาณน้ำจริง} = 195 - (1066.9 \times 3.75 / 100) - (745.97 \times 1.973 / 100)$$

$$= 169.65 \text{ kg}$$

$$= 195 - (1066.9 \times 3.756 / 100) - (691.94 \times 1.973 / 100)$$

$$= 168.58 \text{ kg}$$

$$= 195 - (1066.9 \times 3.756 / 100) - (574.33 \times 1.973 / 100)$$

$$= 166.26 \text{ kg}$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

ปริมาณส่วนผสมที่ใช้สำหรับคอนกรีต 1 m<sup>3</sup>

น้ำ 169.65, 168.58, 166.26 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเมนต์	278.57, 354.55, 513.16 kg
หิน	1,078.63 kg
ทราย	745.97, 691.94, 574.33 kg
	สำหรับกำลังอัด 200, 300, และ 450 ksc ตามลำดับ

## ชุดที่ 2

- กำหนดค่าการยุบตัว 8-10 cm
- กำหนดขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 18.75 mm. (0.75 นิ้ว)
- จากตารางแสดงปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและขนาดวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ คือ 200 ลิตร/ลบ.ม. ของคอนกรีต
- จากตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สำหรับกำลังประลัยของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดเฉลี่ย 200, 300 และ 450 ksc จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักต้องใช้เท่ากับ 0.7, 0.55, 0.38 ตามลำดับ
- ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ =

$$\text{สำหรับกำลังอัด 200 ksc เท่ากับ } 200/0.07 = 285.71 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{กำลังอัด 300 ksc เท่ากับ } 200/0.55 = 363.64 \text{ "}$$

$$\text{กำลังอัด 450 ksc เท่ากับ } 200/0.38 = 526.32 \text{ "}$$

- หาปริมาณวัสดุผสมหยาบจากตารางแสดงปริมาตรของวัสดุผสมต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรคอนกรีต เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.65 และขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 18.75 mm. จะได้ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งที่อัดแน่น = 0.64 ลบ.ม./ลบ.ม. ของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของหิน = 1,550 kg/m<sup>3</sup>

ดังนั้นวัสดุผสมหยาบที่ใช้เท่ากับ  $0.64 \times 1550 = 992 \text{ kg/m}^3$  ของคอนกรีต

- หาปริมาตรของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

$$\text{ปริมาตรของน้ำ} = 200/1000 = 0.195 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของซีเมนต์} = 285.71/(3.33 \times 1000) = 0.086 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 200 ksc

$$= 363.64/(3.33 \times 1000) = 0.109 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 300 ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 526.32 / (3.33 \times 1000) = 0.158 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 450 ksc

$$\text{ปริมาตรของวัสดุผสมทาบ} = 992 / (2.658 \times 1000) = 0.373 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของอากาศ} = 0.01 \times 2.0 = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{ดังนั้นปริมาตรรวมทั้งหมดสกเว้นทราย} = 0.679, 0.703, 0.751 \text{ m}^3$$

เมื่อกำลังอัดเท่ากับ 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

$$\text{ปริมาตรทรายที่ต้องใช้} = 1 - 0.679 = 0.321 \text{ m}^3$$

$$1 - 0.703 = 0.297 \text{ m}^3$$

$$1 - 0.751 = 0.249 \text{ m}^3$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

น้ำหนักทรายที่จะใช้

$$= 0.321 \times 2.445 \times 1000 = 784.85 \text{ kg}$$

$$= 0.297 \times 2.445 \times 1000 = 726.17 \text{ kg}$$

$$= 0.249 \times 2.445 \times 1000 = 608.81 \text{ kg}$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

#### 8. ปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้น

$$\text{ความชื้นมวลรวม} = 4.14 \%$$

$$\text{อัตราการดูดซึมของทราย} = 2.167 \%$$

$$\text{อัตราการดูดซึมของหิน} = 0.384 \%$$

$$\text{ปริมาณหิน} = 992 \times 1.011 = 1,002.912 \text{ kg}$$

$$\text{น้ำเคลือบผิวหิน} = 4.14 - 0.384 = 3.756$$

$$\text{น้ำเคลือบผิวทราย} = 4.14 - 2.167 = 1.973$$

$$\text{ปริมาณน้ำจริง} = 200 - (200 \times 3.75 / 100) - (784.85 \times 1.973 / 100)$$

$$= 178.23 \text{ kg}$$

$$= 200 - 37.25 - 14.33 = 177.07 \text{ kg}$$

$$= 200 - 37.26 - 12.01 = 174.75 \text{ kg}$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

ปริมาณส่วนผสมที่ใช้สำหรับคอนกรีต 1 m<sup>3</sup>

$$\text{น้ำ} \quad 78.235, 177.07, 174.75 \text{ kg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเมนต์	285.71, 363.64, 526.32 kg
หิน	1,002.91 kg
ทราย	784.85, 726.17, 606.81 kg
	สำหรับกำลังอัด 200, 300, และ 450 ksc ตามลำดับ

### ชุดที่ 3

- กำหนดค่าการยุบตัว 8-10 cm
- กำหนดขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 9.375 มม. (3/8 นิ้ว)
- จากตารางแสดงปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและขนาดวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ คือ 225 ลิตร/ลบ.ม. ของคอนกรีต
- จากตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สำหรับกำลังประลัยของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดเฉลี่ย 200, 300 และ 450 ksc จะได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ต้องใช้เท่ากับ 0.7, 0.55 และ 0.38 ตามลำดับ
- ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ =

$$\text{สำหรับกำลังอัด 200 ksc เท่ากับ } 225/0.07 = 321.43 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{กำลังอัด 300 ksc เท่ากับ } 225/0.55 = 409.09 \text{ "}$$

$$\text{กำลังอัด 450 ksc เท่ากับ } 225/0.38 = 592.11 \text{ "}$$

- หาปริมาณวัสดุผสมหยาบจากตารางแสดงปริมาตรของวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรคอนกรีต เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.65 และขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 50 มม. จะได้ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งที่อัดแน่น = 0.48 ลบ.ม./ลบ.ม. ของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของหิน = 1,543.65 kg/m<sup>3</sup>

ดังนั้นวัสดุผสมหยาบที่ใช้เท่ากับ  $0.48 \times 1543.65 = 740.95 \text{ kg/m}^3$  ของคอนกรีต

- หาปริมาตรของวัสดุผสมละเอียด

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม

$$\text{ปริมาตรของน้ำ} = 225/1000 = 0.225 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของซีเมนต์} = 321.43/(3.33 \times 1000) = 0.096 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 200 ksc

$$= 409.09/(3.33 \times 1000) = 0.123 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 300 ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 592.11(3.33 \times 1000) = 0.178 \text{ m}^3$$

สำหรับกำลังอัด 450 ksc

$$\text{ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ} = 740.95 / (2.658 \times 1000) = 0.278 \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรของอากาศ} = 0.01 \times 1.5 = 0.015 \text{ m}^3$$

$$\text{ดังนั้นปริมาตรรวมทั้งหมดยกเว้นทราย} = 0.5657, 0.6250, 0.6960 \text{ m}^3$$

เมื่อกำลังอัดเท่ากับ 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณทรายที่ต้องใช้} = 1 - 0.5657 = 0.4343 \text{ m}^3$$

$$1 - 0.6250 = 0.3750 \text{ m}^3$$

$$1 - 0.6960 = 0.3040 \text{ m}^3$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

น้ำหนักทรายที่จะใช้

$$= 0.434 \times 2.445 \times 1000 = 1,061.00 \text{ kg}$$

$$= 0.375 \times 2.445 \times 1000 = 916.87 \text{ kg}$$

$$= 0.304 \times 2.445 \times 1000 = 743.28 \text{ kg}$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

#### 8. ปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้น

$$\text{ความชื้นมวลรวม} = 4.14 \%$$

$$\text{อัตราการดูดซึมของทราย} = 2.167 \%$$

$$\text{อัตราการดูดซึมของหิน} = 0.384 \%$$

$$\text{ปริมาณหิน} = 740.952 \times 1.011 = 749.10 \text{ kg}$$

$$\text{น้ำเคลือบผิวหิน} = 4.14 - 0.384 = 3.756$$

$$\text{น้ำเคลือบผิวทราย} = 4.14 - 2.167 = 1.973$$

$$\text{ปริมาณน้ำจริง} = 225 - (740.95 \times 3.75 / 100) - (1,061.7 \times 1.973 / 100)$$

$$= 218.10 \text{ kg}$$

$$= 225 - 27.83 - 18.09 = 215.26 \text{ kg}$$

$$= 195 - 27.83 - 14.66 = 211.83 \text{ kg}$$

สำหรับคอนกรีตกำลังอัด 200, 300 และ 450 ksc ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณส่วนผสมที่ใช้สำหรับคอนกรีต 1 m}^3$$

$$\text{น้ำ} \quad 218.10, 215.26, 211.83 \text{ kg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเมนต์	321.43,409.09,592.11 kg
หิน	749.10 kg
ทราย	1,061,916.87,743.28 kg
	สำหรับกำลังอัด 200,300,และ 450 ksc ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองที่ 1

### การทดสอบความสามารถรับแรงดึงของลวด

วัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบหากำลังรับแรงดึงของเส้นลวดขนาดหน้าตัดต่าง ๆ ตามระบุซึ่งโดยทั่วไป กำลังแรงดึงของไฟเบอร์โกลทจะอยู่ในช่วง 40 - 400 ksi

#### วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. เส้นลวด 3 ชนิดคือ ลวดเบอร์ 24, ลวดเบอร์ 20, และลวดผูกเหล็ก
2. เครื่องมือ Universal Testing Machine (รับแรงได้ไม่เกิน 10 ton)
3. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อม Printer ต่อพ่วงเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine

#### ขั้นตอนการทดลอง

(ก) - เตรียมเส้นลวด โดยนำลวดทั้ง 3 ชนิด มาตัดขนาดความยาว 15 ซม ทำการทดสอบลวดชนิดละ 5 ตัวอย่าง

- เตรียมอุปกรณ์โดยเปลี่ยนหัวจับให้เหมาะกับลวด ตั้งเครื่องคอมพิวเตอร์และ Printer จะวัดขนาดเองโดยอัตโนมัติให้พร้อมทำงาน

(ข) การทดสอบหาความสามารถในการรับแรงดึงของเส้นลวด  
เมื่อยึดเส้นลวดให้ติดกับหัวจับอย่างมั่นคงแล้ว ทำการเปิดเครื่อง Universal Testing Machine เครื่องจะปล่อยแรงดึงตามความเร็วที่ต้องการตามที่เรที่ตั้งไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งบนจอ Monitor ของเครื่องคอมพิวเตอร์จะแสดงกราฟ Load-deflection ของการทำงานในขณะนั้น ขณะเดียวกันก็จะพิมพ์ข้อมูลออกมาทาง Printer เมื่อการดึงสิ้นสุด

(ค) เมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน เราจะได้ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ ที่ส่งออกมาทาง printer คือค่า load , % strain, elongation, stress, energy

(ง) การคำนวณ ค่า tensile strength ของลวดจากสูตร  $f = P/A$

โดยที่ P = แรงกระทำสูงสุดต่อการทดลอง 1 ตัวอย่าง (ค่าจากคอมพิวเตอร์)

A = พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด ,  $A = \pi D^2 / 4$

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เฉลี่ยจากการวัดสองทิศทางตั้งฉากกับที่กึ่งกลางความสูงของเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองที่ 2

### การทดสอบหาค่าแรงยึดเหนี่ยว (bond strength) ของ Fiber และ concretes

**วัตถุประสงค์** เพื่อหาค่าแรงยึดเหนี่ยวประลักษ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง ไฟเบอร์และคอนกรีตที่ขนาดหน้าตัดของลวดและอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ต่างกัน โดยจะออกแรงดึงกับเส้นลวดที่ฝังในคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ระยะฝังของลวดต่าง ๆ กันและผลที่ได้จะนำไปคำนวณหาขนาดยาววิกฤติของไฟเบอร์ต่อไป นอกจากนี้เมื่อดึงลวดออกแล้วยังสามารถนำเอาแท่งคอนกรีตมาทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับแรงยึดได้อีกด้วย

### วัสดุและอุปกรณ์

1. เส้นลวด เบอร์ 20, เบอร์ 24 และลวดผูกเหล็ก
2. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4" สูง 20 cm.
3. เครื่องมือทดสอบ Universal testing machine (รับกำลังอัดไม่เกิน 10 ton)
4. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อม PRINTER ต่อพ่วงเข้ากับ ตัวเครื่อง Universal testing Machine
5. เครื่องชั่งขนาดใหญ่
6. เครื่องผสมคอนกรีต
7. เครื่องมือวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง
8. เครื่องหล่อหวมก (capped) หัวท้ายของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง หลังจากการทดลองดึงลวดเสร็จเรียบร้อยแล้ว

### ขั้นตอนการทดลอง

#### ก) การเตรียมแบบหล่อ

1. นำท่อ PVC 4" อย่างบางมาตัดเป็นท่อนเล็กขนาดความยาวท่อนละ 20 cm. แล้วนำมาตัดในแนวตั้งครึ่งซีก ทำความสะอาดแบบอย่างให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสกับแบบให้ทั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการวัดแบบด้วยลวด ผูกให้แน่นทั้งด้านบนและด้านล่าง นำแบบไว้วางรอ การเทคอนกรีตบนแผ่นไม้อัดหรือพื้นที่เรียบ

ข) การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีต

1. ผสมคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนผสมตามค่ากำลังอัดและขนาดหินสูงสุด ดังตาราง

strength (ksc)	Max. agg=2"			Max. agg=3/4"			Max. agg=3/8"		
	ลพ.	No. 20	No. 24	ลพ.	No. 20	No. 24	ลพ.	No. 20	No. 24
450	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300	5	5	5	5	5	5	5	5	5
200	5	5	5	5	5	5	5	5	5

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบและใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดีวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบจึงปาดผิวหน้าให้เรียบ (ขณะกระทุ้งและเทควรมีการจับแบบให้อยู่ในแนวตั้งและมั่นคง)

3. นำเส้นลวดที่เตรียมไว้หน้าตัดละ 15 เส้นต่อค่ากำลังอัด 1 ค่า โดยกำหนดระยะฝังลวดผูกเหล็ก ลวดเบอร์ 20 และลวดเบอร์ 24 เท่ากับ 2.5, 2.0 และ 1.5 cm. ตามลำดับจากนั้นนำลวดมาปักบนคอนกรีต ก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัวตามระยะฝังที่กำหนด

ค) การทดสอบความสามารถรับแรงดึงของลวด

การทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Universal testing machine โดยใช้ตัวจับด้านบนดึงลวด ให้ออกจากแท่งคอนกรีตที่ยึดติดกับตัวจับเครื่องด้านล่าง เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์จะแสดงผลของ load-deflection ของการทำงานเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

ง) การทดสอบการรับกำลังอัดของแท่งคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีต กระทำหลังจากทำการทดสอบความสามารถรับแรงดึงของลวดจนลวดหลุดออกจากแท่งคอนกรีต จึงนำแท่งคอนกรีตมาทดสอบกำลังรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงอัด ก่อนการทดสอบควรตรวจระนาบหัวท้ายของแท่งคอนกรีตว่าแบนราบหรือไม่ ระบุว่า  
 กล่าวไม่ควรเอียงมากกว่า 0.5 องศา หากไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว ให้ทำการหล่อหมวกหัวท้าย  
 เสียด้วย

จ) การคำนวณ

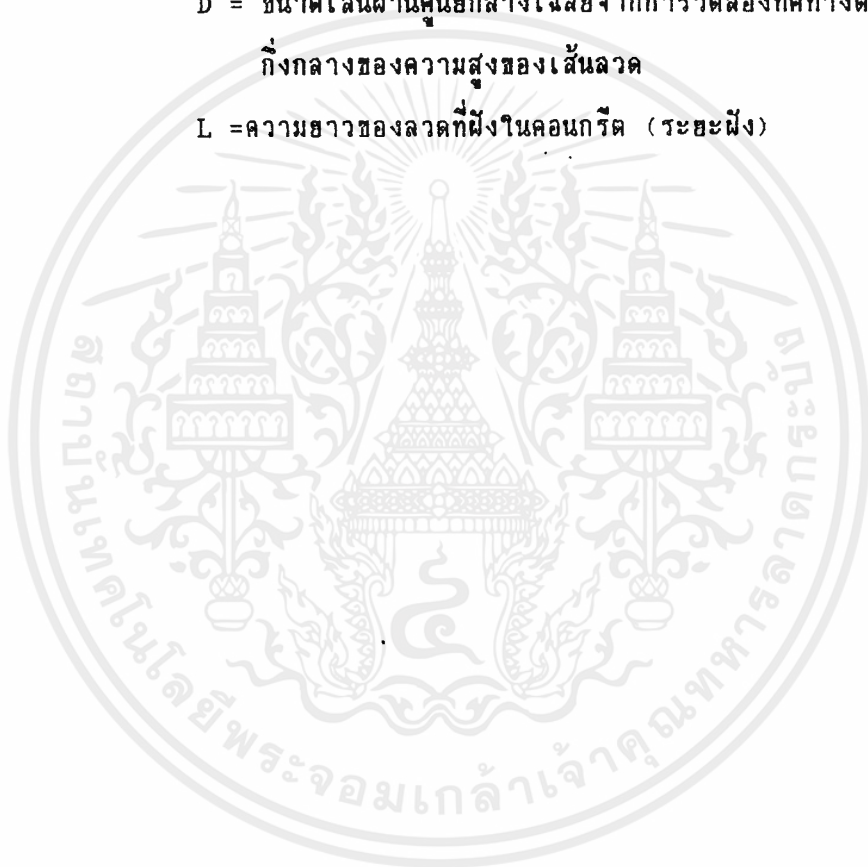
คำนวณค่า bond strength ระหว่างลวดและคอนกรีตจากสูตร  $f = P/A$

เมื่อ  $P$  = แรงกระทำสูงสุดต่อการทดลองดึงลวดออกจากคอนกรีต

$A$  = พื้นที่ผิวรอบเส้นลวดที่ฝังลึกในคอนกรีต,  $A = \pi D \times L$

$D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจากการวัดสองทิศทางตั้งฉากกันที่  
 กึ่งกลางของความสูงของเส้นลวด

$L$  = ความยาวของลวดที่ฝังในคอนกรีต (ระยะฝัง)



### การทดลองที่ 3

#### การทดสอบหาค่าอัตราส่วนปริมาตรของไฟเบอร์ที่เหมาะสมใน FRC

วัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าอัตราส่วนปริมาตรของไฟเบอร์ (fiber volume fraction) ที่มีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยพิจารณาจากกราฟ load-deflection) จากการทดสอบกำลังของคาน โดยอ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ test for flexural strength of concret - ASTM : C 78- 75 แล้วนำผลการทดลองมาเขียนกราฟ strength จากจุด first crack และ fiber volumeจะได้จุดหักของกราฟ เพื่อพิจารณาค่า % V ที่เหมาะสมใน FRC

#### วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. แท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบ
2. เครื่องมือทดสอบกำลังอัด (Universal testing Machine)
3. แบบหล่อคานคอนกรีต 15 x 15 cm. ยาว 60 cm.
4. เครื่องชั่งขนาดใหญ่
5. เครื่องผสมคอนกรีต
6. เครื่องมือวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง
7. Dial gages

#### ขั้นตอนการทดลอง

##### ก) การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสกับแบบให้ทั่ว
2. ตรวจสอบสกรูสำหรับวัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุดขณะเทคอนกรีตหรือกระแทกเพื่อให้คอนกรีตแน่น

##### ข) การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีตผสมเส้นลวด

1. หลังจากผสมคอนกรีต (ใช้อัตราส่วนผสมชุดที่ 2 ที่ขนาดหินใหญ่สุด 3/4") ในโม้เรียบร้อยแล้ว ให้ใส่ลวดเบอร์ 20 ที่ตัดความยาวใช้งานให้ได้ขนาดตามที่ต้องการเรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วลงไป โดยแบ่งการผสมคอนกรีตออกเป็น 2 ชุด

ชุดที่ 1 ที่ค่ากำลังอัด 200 กก/ซม.<sup>2</sup>

ใช้อัตราส่วนปริมาตรของไฟเบอร์แปรจาก 0.5 % ถึง 2 % ดังนี้

% V = 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 2

ในการปฏิบัติงาน ใช้ค่า % V 1 ค่าต่อคาน 1 ชุด ดังนั้นจึงใช้คานรวม 2 ชุด และในการผสมคอนกรีตให้คิดปริมาตรของคอนกรีตรวม 8 ชุด ทำการผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมชุดที่ 2 ค่ากำลังอัด 200 กก/ซม.<sup>2</sup> จากนั้นจึงเติมลดลงไปคิด เริ่มจากค่า % V ต่ำสุดคือ 0.5% ของปริมาณปูนที่มีในโม้ (นำผลลัพธ์คูณด้วยค่าความหนาแน่นของลวดเบอร์ 20 เท่ากับ 8.1546 g/cm<sup>3</sup>) จะได้น้ำหนักของปริมาณลวดที่ใช้ออกมาเมื่อผสมลวดเสร็จ ทำการเทคอนกรีตลงแบบทันที จากนั้นก็เพิ่ม % V ใหม่เป็น 0.7, 0.9 และตัวอื่น ๆ ต่อไปตามปริมาณปูนที่เหลือต่อการเทออกแต่ละครั้ง

ชุดที่ 2 ที่ค่ากำลังอัด 450 กก/ซม.<sup>2</sup>

ทำเช่นเดียวกับการทดลองค่ากำลังอัด 200 กก/ซม.<sup>2</sup> ต่างกันตรงค่ากำลังอัดและขนาดความยาวของลวดที่ใช้

2. เทคอนกรีตดังกล่าวในแต่ละ % V ลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบและใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึงปาดผิวหน้าให้เรียบ

3. ทั้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้ในร่มเงา ๆ ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกนำแท่งคอนกรีตไปบ่ม จนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ

ค) การทดสอบกำลัง

1. ให้จัดตัวอย่างคานที่จะทดลอง วางบนจุดที่รองรับ และแรงกระทำสองจุดตรงตามตำแหน่ง ดังแสดงในรูป จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำบนคานจนกระทั่งคานหัก

2. การวัดขนาดหน้าตัด ให้คิดเฉลี่ยจากการวัด 3 ค่า คือที่ปลายทั้งสองและที่กึ่งกลาง

3. ใช้ dial gages ตรวจสอบค่า deflection ก่อน

ง) การคำนวณ

ปริมาตรไฟเบอร์วิกฤติ

$$V_{f(critical)} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{fu} - \epsilon_{mu} E_f + \sigma_{mu}}$$

$$(\sigma_{fu} - \epsilon_{mu} E_f + \sigma_{mu})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ } V_{\text{certification}} = \frac{E_c E_{mu}}{\delta_{mu}}$$

- เมื่อ  $\delta_{mu}$  = ความเค้นประลัยของ matrix  
 $\delta_{fu}$  = ความเค้นประลัยของไฟเบอร์  
 $E_{mu}$  = ความเค้นประลัยของ matrix  
 $E_f$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของไฟเบอร์  
 $E_c$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของสารผสม

เมื่อคำนวณได้ค่า  $V_{\text{certification}}$  ออกมาจากสารดังกล่าว ซึ่งจะอยู่ในสภาวะ 1 มิติ จะต้องทำการคูณ ค่า  $V_f$  ดังกล่าวด้วย ค่าปัจจัยประสิทธิผลเนื่องทิศทางการวางตัวของไฟเบอร์ตามความเป็นจริง ซึ่งวางเป็น 2 มิติหรือ 3 มิติ สามารถหาได้จากตัวทฤษฎี

#### การทดลองที่ 4

#### การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตลึ้นและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ (ลาว)

(Test for compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen)

ตามมาตรฐาน ASTM: C392-72

วัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตลึ้นและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละที่อายุต่าง ๆ กันโดยการใส่แรงอัดโดยตรงกับตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM.

#### วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. แท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบ
2. เครื่องมือทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine)
3. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำด้วยโลหะที่ซีเมนต์ไปเกาะติด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 12 นิ้ว
4. เครื่องชั่งขนาดใหญ่
5. เครื่องผสมคอนกรีต
6. เครื่องมือวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง
7. เครื่องหล่อหมวก (Capped) หัวท้ายและแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

#### ขั้นตอนการทดลอง

##### ก) การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้ฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสแบบให้ทั่ว
2. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ด้วยการประกอบแบบ แล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกหรือแบบหลุคขณะเทคอนกรีตหรือกระทั่งเพื่อให้คอนกรีตแน่น

##### ข) การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีตลึ้น (ใช้อัตราส่วนผสมคอนกรีตชุดที่ 1)

1. สำหรับคอนกรีตที่ใช้เครื่องผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่อยู่ตอนกลางที่เทออกมาจากเครื่องผสมใหม่ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบและใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึง ปาดผิวหน้าให้เรียบ

3. ทิ้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้ในร่มเงา ๆ ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่ม โดยแช่ในถังบ่ม จนถึงอายุที่ต้องการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่จะนำมาทดสอบ 1 ชุด ควรมีอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง

ค) การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีตผสมเส้นลวด

1. ทำเช่นเดียวกับ การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีตล้วน หลังจากผสมคอนกรีต (ในอัตราส่วนผสมคอนกรีต ชุดที่ 2) ในโม้เรียบร้อยแล้ว ใส่ลวดเบอร์ 20 ที่ตัดตามความยาวใช้งานได้ลงไป

ที่กำลังอัด  $450 \text{ กก./ซม}^2$

- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 2 % ซึ่งเท่ากับ  $163.09 \text{ กก./ลบ.ม.}$

ปริมาณที่ใช้ในปริมาณที่ใช้งานจริง (แบบหล่อ 5 ชุด) ดังนั้นใช้ลวดจำนวน  $4.323 \text{ กก.}$  จากปริมาณคอนกรีต  $0.026 \text{ ม}^3$

- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 1.4 % ซึ่งเท่ากับ  $114.16 \text{ กก./ลบ.ม.}$

ปริมาณที่ใช้งานจริง (แบบหล่อ 5 ชุด) ดังนั้นใช้ลวด  $3.026 \text{ กก.}$  จากปริมาณคอนกรีต  $0.026 \text{ ม}^3$  กำลังอัด  $200 \text{ กก./ซม}^2$

- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 2 % ซึ่งเท่ากับ  $163.09 \text{ กก./ลบ.ม.}$

ปริมาณที่ใช้งานจริง (แบบหล่อ 5 ชุด) ดังนั้นใช้ลวด  $3.026 \text{ กก.}$  จากปริมาณคอนกรีต  $0.026 \text{ ม}^3$

กำลังอัด  $200 \text{ กก./ซม}^2$  ทำงานเช่นเดียวกับ  $450 \text{ กก./ซม}^2$

\* การทำงานต้องผสมคอนกรีตทั้งหมด 4 ครั้ง คือกำลังอัด  $450 \text{ กก./ซม}^2$

อัตราส่วน 2% ,กำลังอัด  $450 \text{ กก./ซม}^2$  -อัตราส่วน 1.4 % ,กำลังอัด  $200 \text{ กก./ซม}^2$  -อัตราส่วน 2.0 % และ กำลังอัด  $200 \text{ กก./ซม}^2$  -อัตราส่วน 1.4 % โดยแต่ละครั้งจะใช้แบบหล่อ 5 ชุด รวมทั้งหมด 20 ชุด

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบและใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึงปาดผิวหน้าให้เรียบ

3. ทิ้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้ในร่มเงา ๆ ประมาณ 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงถอดแบบออกมาแท่งคอนกรีตไปบ่ม โดยแช่ในถังบ่มจนถึงอายุที่ต้องการทดสอบ ตัวอย่างคอนกรีต 1 ชุดมีอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง

ง) การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีต ให้ทดสอบโดยเร็วที่สุด หลังจากนำขึ้นจากราน้ำเมื่อครบอายุ ก่อนทดสอบควรตรวจระนาบหน้าท้ายของแท่งคอนกรีตว่าแบนราบหรือไม่ ระบุว่าดงกล่าวไม่ควรเอียงมากกว่า 0.5 องศา หากไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว ให้ทำการหล่อหมวกหน้าท้ายเสีย ก่อน

จ) การคำนวณ

ค่าความเค้นอัดประลัยของแท่งคอนกรีตหาได้จากสูตร  $f = P/A$

โดยที่ P = แรงกำลังสูงสุดต่อแท่งตัวอย่าง

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง,  $A = \pi D^2 / 4$

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยจากการวัดสองทิศทางตั้งฉากกัน ที่กึ่งกลางความสูงของแท่งตัวอย่าง

## การทดลองที่ 5

### การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตฉนวนและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ (ลาว)

(Test for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete specimens)

ASTM : C496-90

**วัตถุประสงค์** เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จากการทดสอบที่กระทำทางอ้อม คือการทดสอบการปริแตกของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก เนื่องจากการทดสอบโดยตรงกระทำได้ยาก ซึ่งโดยทั่วไปกำลังปริแตกจะอยู่ภายในช่วง 5-12 % สูงกว่ากำลังแรงดึงโดยตรง

#### วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. แท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบ
2. เครื่องมือ Universal Testing Machine
3. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ทำด้วยโลหะที่ซีเมนต์ไม่เกาะติดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6" และสูง 12"
4. เครื่องซึ่งขนาดใหญ่
5. เครื่องผสมคอนกรีต
6. เครื่องมือวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง
7. เครื่องหล่อหว่าก หัวทำของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง
8. ไม้รอง ทำด้วยไม้อัดหนา 1/8" กว้างประมาณ 1" มีความยาวเท่ากับความยาวของแท่งตัวอย่าง หรือยาวกว่าเล็กน้อย เมื่อใช้ทดสอบครั้งหนึ่งแล้ว ไม่ควรใช้กับตัวอย่างอื่นอีก

#### ขั้นตอนการทดลอง

ก) การเตรียมแบบหล่อและการเตรียมแท่งตัวอย่าง เหมือนกับการเตรียมการทดสอบกำลังอัด โดยแบ่งการผสมคอนกรีตออกเป็น 4 ครั้ง ใช้แบบหล่อครึ่งละ 5 ชุด รวมทั้งหมดใช้แบบหล่อ 20 ชุด

ข) การทดสอบกำลังดึงของแท่งตัวอย่างคอนกรีต และแท่งตัวอย่างคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ (เส้นลาว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชีดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางให้ยาวจรดหัวท้ายของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง
2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยจากการวัด 3 ค่า คือที่ใกล้ปลายทั้งสอง และที่กึ่งกลางของแท่งตัวอย่าง พร้อมกับวัดความยาวเฉลี่ยจาก 2 ด้านทางแนวชีดไว้
3. วางแท่งคอนกรีตนอนบนเครื่องกด ให้แนวเส้นที่ลากไว้อยู่ด้านบนและล่าง นำไม้มารองตรงเส้นทั้งด้านบนและด้านล่าง ให้กึ่งกลางของไม้รองตรงแนวเส้น จากนั้นจึงให้แรงกระทำจนกระทั่งคอนกรีตปริแตก

ค) การคำนวณ

กำลังดึงปริแตกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength) จะหาได้

จากสูตร

$$T = 2P/\pi DL$$



## การทดลองที่ 6

### การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ

(โดยการทดลองแบบแรงกระทำสองจุด)

วัตถุประสงค์ - เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตล้วน สำหรับหาค่าโมดูลัสแตกร้าว

- ในกรณีของ FRC การทดสอบนี้จะ เป็นวิธีประเมินค่า flexural toughness ของ FRC ในรูปของพื้นที่ใต้กราฟ load-deflection ซึ่งได้จากการทดสอบ พื้นที่คว้น จะให้เห็นความสามารถของแท่งคอนกรีตตัวอย่างในการดูดซับพลังงาน นอกจากนี้ยัง แสดงตัวเลขของอัตราส่วนที่ใช้งานได้ หรือดัชนีความเหนียวที่แสดงรูปแบบพฤติกรรม ของแท่งคอนกรีต ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเลือกค่าการเสียรูปวิกฤติ (deflection criteria) ดัชนีนี้หาได้โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟ load-deflection จากจุด เริ่มต้นจนถึงจุดวิกฤติจำเพาะ (specified deflection criteria) ด้วยพื้นที่ใต้กราฟจากจุดเริ่มต้นถึงจุดรอยแตกแรก (first crack strength)
- กรณีของ FRC การทดสอบนี้จะใช้แสดงค่า first-crack flexural strength โดยใช้น้ำหนักกระทำบนกราฟ load-deflection ตามนิยาม first crack ที่ จะอธิบายต่อไป และใช้สูตรโมดูลัสแตกร้าว

คำนิยาม :

- first crack คือ จุดบนกราฟ load-deflection ที่รูปแบบของกราฟเริ่มไม่ เป็นเส้นตรง (ประมาณจากการเริ่มแตกในแท่งคอนกรีต)
- first crack deflection คือ ค่าการเสียรูปบนกราฟ load-deflection ที่จุด first - crack
- first crack strength คือ ความเค้นที่ได้รับจากน้ำหนักบรรทุกที่ต้องตอบรับต่อการวัดรอย แตกครั้งแรกน้ำหนักนั้นแทนค่าลงในสูตรโมดูลัสการแตกร้าว
- first crack toughness คือ พลังงานที่มีค่าเทียบเท่าพื้นที่ใต้กราฟ load-deflection ขึ้น อยู่กับค่า first-crack deflection
- toughness คือ พลังงานที่มีค่าเทียบเท่าพื้นที่ใต้กราฟ load - deflection ขึ้นอยู่กับค่า specified deflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

toughners indices คือ ตัวเลขที่ได้จากการหารพื้นที่ใต้กราฟของ specified deflection ด้วย พื้นที่ใต้กราฟของจุด first crack

### วัสดุและอุปกรณ์

เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ยกเว้นในรายการที่ 2 เปลี่ยนเป็นแบบหล่อคานขนาด 15 x 15 ซม. ยาว 60 ซม. และเพิ่มอุปกรณ์ dial gages 1 ชุด

### ขั้นตอนการทดลอง

ก) การเตรียมแบบหล่อและการเตรียมตัวอย่าง เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง แต่มีข้อกำหนด ดังนี้

ที่กำลังอัด 450 กก./ซม<sup>2</sup>

- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 2 % ใช้แบบหล่อทั้งหมด 5 ชุด  
ดังนั้นใช้ลวด 11.0 กก. จากปริมาตรคอนกรีต 0.067 ม<sup>3</sup>
- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 1.4 % ใช้แบบหล่อทั้งหมด 5 ชุด  
ดังนั้นใช้ลวด 7.71 กก. จากปริมาตรคอนกรีต 0.067 ม<sup>3</sup>

ที่กำลังอัด 200 กก. / ซม<sup>2</sup>

- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 2 % ใช้แบบหล่อทั้งหมด 5 ชุด  
ดังนั้นใช้ลวด 11.00 กก. จากปริมาตรคอนกรีต 0.067 ม<sup>3</sup>
- ลวดเบอร์ 20 อัตราส่วน 1.4 % ใช้แบบหล่อทั้งหมด 5 ชุด  
ดังนั้นใช้ลวด 7.71 กก. จากปริมาตรคอนกรีต 0.067 ม<sup>3</sup>

หมายเหตุ : การปฏิบัติงานจริง จะแบ่งการผสมคอนกรีตออกเป็น 4 ครั้ง เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัด และกำลังดึงโดยแต่ละครั้งจะใช้แบบหล่อคาน 5 ชุด รวมทั้งหมดใช้แบบหล่อคาน

ข) การทดสอบกำลังอัด

1. ให้จัดตัวอย่างที่จะทดสอบวางบนจุดที่รองรับและแรงกระทำ 2 จุด ตรงตามตำแหน่งดังแสดงในรูป จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำบนคานจนกระทั่งคานหัก

2. การวัดขนาดหน้าตัด ให้คิดเฉลี่ยจากการวัด 3 ค่า คือที่ปลายทั้งสองและที่

กึ่งกลาง

3. ให้ dial gage ควบคุมตรวจสอบระยะ deflection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค) การคำนวณ

1. การคำนวณ ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture)

1.1 ถ้าจุดเริ่มรอยหักที่ผิวรับแรงดึง เกิดภายในช่วงกลางคาน (middle-third) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการดัดสุกัทธิ (pure bending) จะได้ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (modulus of rupture) ดังนี้

$$R = PL/bd^2$$

1.2 ถ้ารอยหักที่ผิวรับแรงดึงเกิดอยู่นอกช่วงกลาง แต่ไม่เบี่ยงเบนไปเกินกว่า 5 % ของความยาวทั้งหมดของคาน จะหาค่าโมดูลัสการแตกร้าวได้จาก

$$R = 3Pa/bd^2$$

โดยทั้งสองสมการดังกล่าว  $R =$  โมดูลัสการแตกร้าว

$L =$  ความยาวช่วงของคานระหว่างที่รองรับ

$a =$  ระยะเฉลี่ยของรอยหักที่วัดตรงผิวรับแรงดึง ถึงจุดรองรับด้านใกล้

$b =$  ความยาวเฉลี่ยของคานที่จุดแตกหัก

$d =$  ความลึกเฉลี่ยของคานที่จุดแตกหัก

1.3 ถ้ารอยหักที่ผิวรับแรงดึง เกิดอยู่นอกช่วงกลางมากกว่า 5 % ผลที่ได้ไม่สามารถนำมาคำนวณได้ค่าที่ถูกต้อง

2. การคำนวณค่าดัชนีความเหนียว จากสูตร

พื้นที่ใต้กราฟ load-deflection จากค่า deflection=0

ถึง 3 เท่าของ deflection ที่จุด first crack

$$I_{\text{cr}} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ load-deflection จากค่า deflection=0 ถึงค่าที่ deflection ที่จุด first crack}}{\dots}$$

บทที่ 5  
ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1

ผลการทดสอบความสามารถรับกำลังดึงของเส้นลวด

1. ลวดเบอร์ 24

การทดลอง ครั้งที่	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
1	10.080	8.9620	10.080	9.9578	83.504
2	10.080	7.5430	10.080	8.3811	79.136
3	10.403	8.5760	10.403	9.5289	83.703
4	10.080	9.7990	10.080	10.8870	90.826
5	10.000	10.2120	10.000	11.3460	92.392

2. ลวดเบอร์ 20

การทดลอง ครั้งที่	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
1	30.3220	9.6550	30.322	10.7270	287.55
2	30.887	10.5690	30.887	11.7430	313.41
3	30.887	8.6170	30.887	9.5745	262.12
4	29.839	8.6170	29.839	9.5745	259.87
5	29.032	11.227	29.032	12.4740	321.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3. ลวดผูกเหล็ก

การทดลอง ครั้งที่	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
1	37.822	16.394	37.822	18.215	605.53
2	40.806	19.922	40.806	22.135	717.16
3	41.452	19.169	41.452	21.299	765.34
4	41.452	15.000	41.452	16.666	607.20
5	38.548	18.574	38.548	20.637	696.96

หมายเหตุ : ข้อมูลตามตารางได้มาจากข้อมูลการคำนวณจากคอมพิวเตอร์ ขณะปฏิบัติงานส่งออกมาจาก Printer พร้อมกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการคำนวณค่า Ultimate tensile strength ของไฟเบอร์โกละ(เส้นลาด)

No. of fiber	No. Sample	Diameter (cm)	$A = \pi D^2 / 4$ (cm <sup>2</sup> )	Load (KG)	$\sigma = \frac{\text{Load}}{\text{Area}}$	$\bar{\sigma}$ average (KSC)
No. 24	1	0.0505	0.0020	10.0800	5,040.00	5,064.30
	2	0.0505	0.0020	10.0800	5,040.00	
	3	0.0505	0.0020	10.0800	5,201.50	
	4	0.0505	0.0020	10.0800	5,040.00	
	5	0.0505	0.0020	10.0000	5,000.00	
No. 20	1	0.0860	0.0058	30.3220	5,220.00	5,197.87
	2	0.0860	0.0058	30.8870	5,317.27	
	3	0.0860	0.0058	30.8870	5,317.27	
	4	0.0860	0.0058	29.8390	5,316.86	
	5	0.0860	0.0058	29.0320	4,997.993	
No. 18 ลาดผูก- เหล็ก	1	0.1320	0.0136	37.832	2,764.77	2,925.14
	2	0.1320	0.0136	40.806	2,982.89	
	3	0.1320	0.0136	41.452	3,030.11	
	4	0.1320	0.0136	41.452	3,030.11	
	5	0.1320	0.0136	38.548	2,817.84	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2

ผลการทดลองหาค่าแรงยึดเหนี่ยวประลัษระหว่าง ไฟเบอร์ และ Matrix

1) ที่ค่ากำลังอัดประลัษ 200 KSC

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
1"	24	1	5.7351	0.2650	5.7351	0.2650	6.0298
		2	3.3926	0.8120	3.3926	0.8120	1.3021
		3	10.5000	4.7000	10.5000	4.7000	109.6100
		4	7.5929	1.4120	7.5929	1.4120	37.3400
		5	3.2310	0.2930	3.2310	0.2930	0.5098
	20	1	24.959	1.0080	24.959	1.0080	24.959
		2	18.578	1.1180	18.578	1.1180	23.986
		3	23.505	0.8610	23.505	0.8610	71.212
		4	26.817	2.6450	26.817	2.6450	151.710
		5	25.363	1.0790	25.363	1.0790	64.033
	ลวดผูก-เหล็ก	1	33.845	1.7400	33.845	1.7400	240.37
		2	29.402	3.2450	29.402	3.2450	275.38
		3	32.148	1.4840	32.148	1.4840	311.84
		4	-	-	-	-	-
		5	33.845	1.7610	33.845	1.7610	313.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
3/4"	24	1	9.9354	9.2480	9.9354	9.2480	128.830
		2	9.2892	13.8670	9.2892	13.8670	126.130
		3	9.9354	8.4550	9.9354	8.4550	77.061
		4	9.5315	8.0060	9.5315	8.0060	69.342
		5	9.6123	5.6390	9.6123	5.6390	72.412
	20	1	30.210	10.859	30.210	10.859	288.46
		2	28.675	6.446	28.675	6.446	270.52
		3	28.029	4.538	28.029	4.538	281.29
		4	28.917	6.264	28.917	6.264	317.31
		5	30.452	9.210	20.517	9.512	256.93
	ลวดผูก-เหล็ก	1	35.945	10.631	35.945	10.631	326.31
		2	31.421	6.197	31.421	6.197	499.56
		3	18.497	1.730	18.497	1.730	24.69
		4	31.825	10.590	31.825	10.590	291.29
		5	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
3/8"	24	1	9.2084	4.8610	9.2084	4.8610	41.676
		2	9.2892	5.2240	9.2892	5.2240	49.663
		3	8.4007	4.1730	8.4007	4.1730	32.765
		4	8.4815	3.1370	8.4815	3.1370	25.220
		5	-	-	-	-	-
	20	1	-	-	-	-	-
		2	14.943	1.0450	14.943	1.0450	53.285
		3	23.263	1.2330	23.263	1.2330	48.241
		4	19.790	1.4900	19.790	1.4900	33.268
		5	23.586	1.5340	23.586	1.5340	67.164
	ลวดผูก-เหล็ก	1	14.458	0.2630	14.458	0.2630	57.941
		2	22.375	0.7510	22.375	0.7510	9.0382
		3	21.567	1.3390	21.567	1.3390	14.352
		4	13.489	0.5840	13.489	0.5840	46.971
		5	9.370	2.1540	9.370	2.1540	24.505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ที่ค่ากำลังอัดประลัย 300 KSC

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGE)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
1"	24	1	10.2580	7.0810	10.2580	7.0810	80.4670
		2	8.7238	1.3940	8.7238	1.3940	18.4490
		3	8.1583	0.4960	8.1583	0.4960	9.8502
		4	9.2084	9.0480	9.2084	9.0450	98.6230
		5	9.6931	6.5540	9.6931	6.5540	81.2970
	20	1	26.0090	2.1280	26.0090	2.1280	96.4010
		2	26.4130	1.7300	26.4130	1.7300	126.2600
		3	26.4940	1.3090	26.4940	1.3090	108.3900
		4	27.6250	4.0380	27.6250	4.0380	161.7000
		5	21.8900	1.3540	21.3900	1.3540	135.6400
	ลวดผูก-เหล็ก	1	34.7330	3.7100	34.7330	3.7100	101.3600
		2	36.1870	4.5290	36.1870	4.5290	384.5800
		3	35.1370	5.9970	35.1370	5.9970	444.9100
		4	23.9090	0.9690	23.9090	0.9690	13.9780
		5	36.9950	3.8050	36.9950	3.8050	485.9600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
3/4"	24	1	9.4508	8.9780	9.4508	8.9780	79.6730
		2	9.7739	8.6390	9.7739	8.6390	78.1990
		3	10.5000	9.5220	10.5000	9.5220	99.9140
		4	10.2580	11.6490	10.2580	11.6490	129.4400
		5	9.5315	11.2000	9.5315	11.2500	107.9000
	20	1	26.1710	1.1530	26.1710	1.1530	124.1700
		2	28.5940	3.7650	28.5940	3.7650	226.8100
		3	25.9290	1.0110	25.9290	1.0110	134.5400
		4	29.2400	5.8860	29.2400	5.8860	306.0200
		5	30.2100	8.2050	30.2100	8.2050	427.6100
	ลวดผูก-เหล็ก	1	35.7030	5.9590	35.7030	5.9590	382.7200
		2	34.0870	6.3760	34.0870	6.3760	170.1900
		3	24.2520	2.0680	24.2320	2.0680	360.7200
		4	38.5300	10.2300	38.5300	10.2300	942.2800
		5	24.7980	1.5260	24.7980	1.5260	254.0400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
3/8"	24	1	3.6349	0.3090	3.6345	0.3090	1.4844
		2	2.6000	0.2010	2.6000	0.2010	1.5428
		3	1.6000	0.1540	1.6000	0.1540	0.5341
		4	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-
	20	1	25.6060	3.0190	25.6060	3.0190	91.3030
		2	7.7545	0.5750	7.7545	0.5750	7.0744
		3	11.8740	0.6970	11.8740	0.6970	18.1210
		4	15.3470	0.8230	15.3470	0.8230	41.1730
		5	20.2740	0.7520	20.2740	0.7520	7.6897
	ลวดผูก-เหล็ก	1	12.6810	0.6860	12.6810	0.6860	21.2530
		2	38.6910	3.0620	38.6910	3.3282	90.4020
		3	17.1240	0.5740	17.1240	0.6239	183.1900
		4	5.8158	0.1890	5.8158	0.1890	0.8000
		5	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3) ที่ค่ากำลังอัดประลัย 450 KSC

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
1"	24	1	10.5000	9.9200	10.5000	9.9200	96.4020
		2	10.8240	9.5430	10.8240	9.5430	86.3690
		3	9.7739	6.2460	9.3739	6.2460	55.0470
		4	10.4200	12.9610	10.4200	12.9610	128.1100
		5	10.9040	12.1260	10.9040	12.1260	119.7700
	20	1	29.7250	13.4900	29.7250	13.4900	374.9600
		2	28.9170	5.2070	28.9170	5.2070	139.7500
		3	30.4520	10.7430	30.4520	10.7430	312.6600
		4	29.2400	9.1240	29.2400	9.1240	236.7700
		5	27.2210	5.4110	27.2210	5.4110	357.0000
ลวดผูก- เหล็ก		1	35.2180	4.3510	35.2180	4.3510	728.6300
		2	42.2450	9.0220	42.2450	9.0220	799.7500
		3	37.8030	5.7860	37.8030	5.7860	678.3200
		4	43.8610	9.5300	43.8610	9.5300	1159.200
		5	39.4990	5.6670	39.4990	5.6670	639.3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
3/4"	24	1	9.0469	8.1380	9.0469	8.1380	87.0010
		2	8.9661	8.6700	8.9661	8.6700	104.5700
		3	10.5810	6.5050	10.5810	6.5050	109.7000
		4	10.0970	6.1390	10.0970	6.1390	144.1200
		5	9.2084	3.2790	9.2084	3.2790	57.9290
	20	1	31.0980	9.2090	31.0980	9.2090	234.6400
		2	23.0210	1.5900	23.0210	1.5900	175.1100
		3	21.9710	1.4000	21.9710	1.4000	208.6100
		4	30.0480	6.5230	30.0480	6.5230	318.4100
		5	-	-	-	-	-
	ลวดผูก-เหล็ก	1	27.3830	2.8380	27.3830	2.8380	261.8100
		2	33.1180	5.6490	33.1180	5.6490	585.2600
		3	35.7030	9.1330	35.7030	9.1330	469.4300
		4	35.5410	9.0960	35.5410	9.0960	266.4000
		5	36.0260	8.5650	36.0260	8.5650	253.2400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Max. Aggrigate	NO. Fiber	NO. Experiment	LOAD (KGF)	ELONG (MM)	STRESS (KGF/MM <sup>2</sup> )	STRAIN (%)	ENERGY (KGF-MM)
3/8"	24	1	9.3700	10.6150	9.3700	10.6150	91.3780
		2	7.8352	3.1610	7.8352	3.1610	28.9910
		3	8.5622	7.0408	8.5622	7.0480	57.7240
		4	-	-	-	-	-
		5	-	-	-	-	-
	20	1	18.4970	0.9110	18.4970	0.9110	84.6880
		2	20.4360	0.9620	20.4360	0.9620	43.5300
		3	25.0400	1.4150	25.0400	1.4150	89.9800
		4	15.3470	0.7460	15.3470	0.7460	34.3180
		5	12.3580	0.8620	12.3580	0.8620	50.5710
	ลวดผูก- เหล็ก	1	33.8450	7.6590	33.8450	7.6590	208.2200
		2	31.0180	1.2820	31.0180	1.2820	28.6560
		3	22.7780	1.7740	22.7780	1.7740	79.5020
		4	39.6610	10.9540	39.6610	10.9540	386.7600
		5	25.9290	0.6290	25.9290	0.6290	9.7724

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(bond strength -  $\tau$ )

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	A= $\pi$ DL (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau$ =Load/Area (KSC)	$\tau$ average (KSC)
Max. Aggregate = 1" 200 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	5.735	24.097	33.370
		2	0.050	1.5	0.238	7.592	31.903	
		3	0.050	1.5	0.238	10.500	44.118	
		4	0.050	1.5	0.238	-	-	
		5	0.050	1.5	0.238	-	-	
	20	1	0.086	2.0	0.540	24.959	46.190	44.127
		2	0.086	2.0	0.540	18.578	34.381	
		3	0.086	2.0	0.540	25.363	46.938	
		4	0.086	2.0	0.540	26.817	49.629	
		5	0.086	2.0	0.540	23.505	43.500	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	33.845	32.647	31.163
		2	0.132	2.5	1.306	29.402	28.361	
		3	0.132	2.5	1.306	32.148	31.000	
		4	0.132	2.5	1.306	33.845	32.647	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	A= $\pi$ DL (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau$ =Load/Area (KSC)	$\tau$ average (KSC)
Max. Aggregate = 1" 300 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	10.258	43.100	38.690
		2	0.050	1.5	0.238	8.723	36.650	
		3	0.050	1.5	0.238	8.158	34.278	
		4	0.050	1.5	0.238	9.201	38.690	
		5	0.050	1.5	0.238	9.693	40.723	
	20	1	0.086	2.0	0.540	26.009	48.134	47.535
		2	0.086	2.0	0.540	26.413	48.880	
		3	0.086	2.0	0.540	26.449	49.030	
		4	0.086	2.0	0.540	27.625	51.124	
		5	0.086	2.0	0.540	21.890	40.510	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	34.733	33.503	34.720
		2	0.132	2.5	1.306	36.187	34.906	
		3	0.132	2.5	1.306	35.137	33.809	
		4	0.132	2.5	1.306	36.995	35.680	
		5	0.132	2.5	1.306	36.026	34.650	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	A= $\pi$ DL (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau$ =Load/Area (KSC)	average (KSC)
Max. Aggrigate = 1" 450 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	10.500	44.120	43.653
		2	0.050	1.5	0.238	9.734	40.890	
		3	0.050	1.5	0.238	10.420	43.780	
		4	0.050	1.5	0.238	10.904	45.820	
		5	0.050	1.5	0.238	-	-	
	20	1	0.086	2.0	0.540	28.917	53.515	53.880
		2	0.086	2.0	0.540	30.452	56.356	
		3	0.086	2.0	0.540	29.240	54.113	
		4	0.086	2.0	0.540	27.221	50.380	
		5	0.086	2.0	0.540	29.724	55.046	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	35.218	33.970	38.318
		2	0.132	2.5	1.306	42.245	40.750	
		3	0.132	2.5	1.306	37.803	36.460	
		4	0.132	2.5	1.306	43.861	42.310	
		5	0.132	2.5	1.306	39.499	38.100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	A= $\pi$ DL (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau$ =Load/Area (KSC)	average (KSC)
Max. Aggregate = 3/4" 200 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	9.935	41.745	40.300
		2	0.050	1.5	0.238	9.287	39.329	
		3	0.050	1.5	0.238	-	-	
		4	0.050	1.5	0.238	9.530	40.048	
		5	0.050	1.5	0.238	9.612	40.387	
	20	1	0.086	2.0	0.540	28.675	53.067	52.818
		2	0.086	2.0	0.540	28.029	51.872	
		3	0.086	2.0	0.540	28.917	53.515	
		4	0.086	2.0	0.540	-	-	
		5	0.086	2.0	0.540	-	-	
	18 ลาดผูก เหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	35.700	34.459	27.545
		2	0.132	2.5	1.306	31.421	30.329	
		3	0.132	2.5	1.306	18.490	17.847	
		4	0.132	2.5	1.306	-	-	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	$A=\pi DL$ (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau = \text{Load/Area}$ (KSC)	average (KSC)
Max. Aggregate = 3/4" 300 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	9.450	39.700	40.975
		2	0.050	1.5	0.238	9.770	41.050	
		3	0.050	1.5	0.238	-	-	
		4	0.050	1.5	0.238	10.258	43.110	
		5	0.050	1.5	0.238	9.531	40.050	
	20	1	0.086	2.0	0.540	26.171	48.430	51.865
		2	0.086	2.0	0.540	28.594	52.917	
		3	0.086	2.0	0.540	25.929	47.956	
		4	0.086	2.0	0.540	29.240	54.113	
		5	0.086	2.0	0.540	30.210	55.910	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	35.703	34.439	34.828
		2	0.132	2.5	1.306	34.087	32.880	
		3	0.132	2.5	1.306	38.530	37.166	
		4	0.132	2.5	1.306	-	-	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	A= $\pi$ DL (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau$ =Load/Area (KSC)	average (KSC)
Max. Aggrigate = 3/4" 450 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	9.046	38.010	40.250
		2	0.050	1.5	0.238	8.966	37.673	
		3	0.050	1.5	0.238	10.581	44.458	
		4	0.050	1.5	0.238	10.097	42.420	
		5	0.050	1.5	0.238	9.208	38.690	
	20	1	0.086	2.0	0.540	23.021	42.600	46.608
		2	0.086	2.0	0.540	21.971	40.660	
		3	0.086	2.0	0.540	30.048	55.608	
		4	0.086	2.0	0.540	-	-	
		5	0.086	2.0	0.540	-	-	
18 ลวดผูกเหล็ก		1	0.132	2.5	1.306	33.118	31.945	33.855
		2	0.132	2.5	1.306	35.703	34.439	
		3	0.132	2.5	1.306	35.541	34.283	
		4	0.132	2.5	1.306	36.026	34.751	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	$A=\pi DL$ (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\tau = \text{Load/Area}$ (KSC)	average (KSC)
Max. Aggrigate = 3/8" 200 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	9.208	38.690	37.163
		2	0.050	1.5	0.238	9.289	39.030	
		3	0.050	1.5	0.238	8.401	35.290	
		4	0.050	1.5	0.238	8.482	35.640	
		5	0.050	1.5	0.238	-	-	
	20	1	0.086	2.0	0.540	-	-	41.107
		2	0.086	2.0	0.540	-	-	
		3	0.086	2.0	0.540	23.263	43.050	
		4	0.086	2.0	0.540	19.790	36.620	
		5	0.086	2.0	0.540	23.586	43.650	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	14.458	13.947	17.340
		2	0.132	2.5	1.306	22.375	21.583	
		3	0.132	2.5	1.306	21.567	20.800	
		4	0.132	2.5	1.306	13.489	13.010	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	$A=\pi DL$ (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\zeta=Load/Area$ (KSC)	average (KSC)
Max. Aggrigate = 3/8" 300 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	2.600	10.924	10.970
		2	0.050	1.5	0.238	1.600	6.723	
		3	0.050	1.5	0.238	3.635	15.273	
		4	0.050	1.5	0.238	-	-	
		5	0.050	1.5	0.238	-	-	
	20	1	0.086	2.0	0.540	11.874	21.974	29.545
		2	0.086	2.0	0.540	15.347	28.402	
		3	0.086	2.0	0.540	20.678	38.260	
		4	0.086	2.0	0.540	-	-	
		5	0.086	2.0	0.540	-	-	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	12.681	12.230	24.775
		2	0.132	2.5	1.306	38.691	37.320	
		3	0.132	2.5	1.306	5.816	5.610	
		4	0.132	2.5	1.306	-	-	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	No. Example	Diameter (cm)	Length	A= $\pi$ DL (cm <sup>2</sup> )	Load (cm)	$\zeta$ =Load/Area (KSC)	average (KSC)
Max. Aggrigate = 3/8" 450 KSC	24	1	0.050	1.5	0.238	9.370	39.370	36.145
		2	0.050	1.5	0.238	7.835	32.920	
		3	0.050	1.5	0.238	-	-	
		4	0.050	1.5	0.238	-	-	
		5	0.050	1.5	0.238	-	-	
	20	1	0.086	2.0	0.540	18.497	34.232	36.698
		2	0.086	2.0	0.540	20.436	37.820	
		3	0.086	2.0	0.540	25.240	46.340	
		4	0.086	2.0	0.540	15.347	28.402	
		5	0.086	2.0	0.540	-	-	
	18 ลวดผูกเหล็ก	1	0.132	2.5	1.306	33.845	32.647	33.608
		2	0.132	2.5	1.306	31.018	29.920	
		3	0.132	2.5	1.306	39.661	38.527	
		4	0.132	2.5	1.306	-	-	
		5	0.132	2.5	1.306	-	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ Compressive Strength ลุกปูนเส้นผ่านศูนย์กลาง 4"

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength KSC	Weight Per Volumn $\text{kg/m}^3$	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height							
	Max. Aggregate = 3/8" ก้างอัด 200KSC									
1		85.276			8	7	18,900	221.630		
2		85.603			8	7	34,620	404.420		
3		86.590			8	7	24,270	280.280		277.999
4		86.425			8	7	20,470	236.853		
5		86.210			8	7	21,278	246.816		
	ก้างอัด 300KSC									
1		85.603			8	7	35,655	416.500		
2		86.920			8	7	30,630	352.390		
3		86.261			8	7	36,660	424.984		394.123
4		86.590			8	7	36,840	425.453		
5		86.425			8	7	30,360	351.286		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength KSC	Weight Per Volume kg/m <sup>3</sup>	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height							
1	กำลังอัด 450KSC	86.261			8	7	30,600	354.740		347.200
2		87.251			8	7	31,680	363.089		
3		86.590			8	7	24,900	287.562		
4		86.210			8	7	30,541	354.263		
5		87.101			8	7	32,780	376.345		
1	Max. Aggrigate =3/4" กำลังอัด 200KSC	86.425			8	7	20,481	236.980		223.733
2		85.603			8	7	21,002	245.342		
3		86.096			8	7	19,586	227.490		
4		87.421			8	7	18,993	217.259		
5		86.261			8	7	16,527	191.593		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No.	Code of Structure	Dimension (cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength KSC	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height							
	กำลังอัด 300KSC									
1		86.096			8	7	24,180	280.850		
2		85.439			8	7	28,860	337.780		
3		87.087			8	7	35,460	407.184		337.567
4		86.425			8	7	36,675	424.350		
5		86.590			8	7	20,580	237.672		
	กำลังอัด 450KSC									
1		86.590			8	7	30,650	353.967		
2		86.087			8	7	34,786	404.080		
3		86.210			8	7	28,511	330.716		366.314
4		85.603			8	7	32,752	382.603		
5		87.251			8	7	31,428	360.202		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No.	Code of Structure	Dimension (cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height							
	Max. Aggregate = 1" กิ่งอัด 200KSC									
1		86.420			8	7	18,000	208.280		215.996
2		87.740			8	7	17,880	203.780		
3		86.150			8	7	18,540	215.200		
4		87.080			8	7	19,800	227.370		
5		86.530			8	7	19,500	225.350		
	กิ่งอัด 300KSC									
1		87.360			8	7	26,040	298.070		302.720
2		87.800			8	7	23,940	272.660		
3		86.310			8	7	24,660	285.710		
4		86.370			8	7	31,080	359.840		
5		86.370			8	7	25,680	297.320		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No.	Code of Structure	Dimension (cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength KSC	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height							
1	กำลังอัด 450KSC	84.785			8	7	21,600	254.760		
2		85.767			8	7	25,920	302.210		
3		86.021			8	7	30,001	348.764		326.897
4		85.120			8	7	29,875	350.975		
5		84.998			8	7	32,110	377.774		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองค่า Compressive Strength ของ Plain Concrete  
200 KSC

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height					KSC		
1		172.877		12.863	8	7	39,000	225.593		
2		172.789		12.904	8	7	37,980	219.805		
3		176.420		13.172	8	7	31,422	178.137		205.344
4		173.752		13.005	8	7	35,580	204.774		
5		179.197		13.434	8	7	35,555	198.413		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 4 ค่า Compressive Strength ของ Plain Concrete  
450 ksc

Specimen No.	Code of Structure	Dimension (cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength	Weight Per Volume kg/m <sup>3</sup>	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height					KSC		
1		172.877		12.863		7	58,000	337.451		
2		172.089		12.904		7	58,150	338.004		
3		174.440		13.172		7	57,461	329.407		335.885
4		173.751		13.005		7	59,642	343.261		
5		178.137		13.434		7	59,007	331.243		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองที่ 4 ค่า Compressive Strength ที่กำลังอัด 200 KSC

ของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์ (เส้นลาด)

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compres- sive Strength	Weight Per Volumn kg/m <sup>3</sup>	Compre- ssive Avera- ge KSC
		Cross Section	Height					KSC		
	ที่ % V=1.4%									
1		171.439		12.754	8	7	39,320	229.360		
2		171.530		12.761	8	7	40,550	236.402		
3		173.353		12.896	8	7	41,730	240.723		238.642
4		170.950		12.718	8	7	44,440	259.959		
5		173.528		12.909	8	7	39,350	226.765		
	ที่ % V=2%									
1		172.828		13.379	8	7	47,480	274.724		
2		172.014		13.315	8	7	45,990	267.362		
3		172.634		13.363	8	7	46,740	270.746		269.913
4		172.945		13.388	8	7	45,180	261.239		
5		173.217		13.409	8	7	47,460	273.992		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 4 ค่า Compressive Strength ที่กำลังอัด 450 KSC  
ของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์

Specimen No.	Code of Structure	Dimension (cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Compressive Average KSC
		Cross Section	Height					KSC		
	ที่ % V=1.4%									
1		174.835		13.148	8	7	57,350	328.023		
2		174.113		13.093	8	7	58,300	334.840		
3		172.344		12.960	8	7	60,475	350.897		342.224
4		174.152		13.096	8	7	62,250	357.446		
5		169.601		12.755	8	7	57,664	340.041		
	ที่ % V=2%									
1		173.509		13.525	8	7	67,780	390.642		
2		176.067		13.724	8	7	65,800	373.721		
3		172.305		13.431	8	7	67,570	392.153		381.656
4		174.093		13.571	8	7	64,900	372.789		
5		177.893		13.633	8	7	66,280	378.976		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองที่ 5 ค่า Tensile Strength ของคอนกรีตล้น 200 ksc

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Tensile Strength	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Ten-sile Average KSC
		Diameter	Height					KSC		KSC
1	171.917	14.795	30.3	12.888	8	7	18,920	26.869		
2	168.851	14.662	30.3	13.082	8	7	19,860	28.459		
3	173.723	14.872	30.2	12.873	8	7	18,900	26.789		28.727
4	172.615	14.825	30.2	12.889	8	7	22,600	32.935		
5	173.694	14.871	30.1	12.712	8	7	20,660	29.384		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองที่ 5 ค่า Tensile Strength ของคอนกรีตล้วน 450 ksc

Specimen No.	Code of Structure	Dimension (cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Tensile Strength	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Ten-sile Average
		Diameter	Height					KSC		KSC
1		14.750	30.2	12.972			21,200	30.298		
2		14.502	30.2	12.767			20,981	30.498		
3		14.436	30.1	12.737			22,685	33.236		30.889
4		14.075	30.0	12.877			19,841	29.914		
5		14.950	30.1	12.828			21,561	30.503		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองที่ 5 ค่า Tensile Strength ที่กำลังอัด 200 KSC

ของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์ โพลี (ลาวด)

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Tensile Strength	Weight Per Volume $\text{kg/m}^3$	Ten-sile Average
		Diameter	Height					KSC		KSC
	V=1.4%									
1		14.845	30.2	12.876	8	7	25,300	35.926	2,463.341	39.098
2		14.853	30.3	12.891	8	7	29,920	42.324	2,455.319	
3		14.795	30.3	12.790	8	7	28,490	40.452	2,455.325	
4		14.901	30.3	12.975	8	7	27,920	39.367	2,455.307	
5		14.798	30.4	12.795	8	7	26,440	37.416	2,447.109	
	V=2%									
1		14.872	30.2	13.448	8	7	34,510	48.915	2,563.476	47.086
2		14.699	30.2	13.138	8	7	31,710	45.476	2,563.812	
3		14.904	30.1	13.507	8	7	31,780	45.099	2,571.812	
4		14.847	30.1	13.403	8	7	33,700	48.007	2,571.820	
5		14.865	30.0	13.436	8	7	33,580	47.937	2,580.367	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์

Specimen No.	Code of Structure	Dimension(cm)		Weight (kg)	Slump (cm)	Ages Days	Ultimate Load (kg)	Tensile Strength	Weight Per Volume kg/m <sup>3</sup>	Tensile Average KSC
		Diameter	Height					KSC		KSC
	V <sub>1</sub> % V=1.4%									
1		14.924	30.3	13.159	8	7	35,260	49.640	2,481.869	45.751
2		14.841	30.3	13.008	8	7	32,440	45.926	2,481.772	
3		14.747	30.2	12.845	8	7	30,060	42.969	2,490.010	
4		14.776	30.3	12.898	8	7	29,100	41.378	2,482.194	
5		14.862	30.3	13.046	8	7	33,070	46.752	2,481.777	
6		14.835	30.3	13.000	8	7	33,780	45.842	2,482.197	
	V <sub>2</sub> % V=2%									
1		14.870	30.1	13.537	8	7	46,472	66.098	2,589.665	64.555
2		14.853	30.3	13.507	8	7	44,700	63.231	2,572.633	
3		14.857	30.4	13.513	8	7	45,460	64.077	2,564.155	
4		14.719	30.2	13.264	8	7	46,400	66.952	2,581.146	
5		14.842	30.3	13.487	8	7	43,660	61.805	2,572.580	
6		14.917	30.3	13.624	8	7	46,620	65.664	2,572.647	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P๗

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด

$\sigma_{fu}$  = Ultimate fiber tensile strength

$\tau$  = Average bond strength

P = เส้นรอบรูปของเส้นลวด

Description	No. of fiber	Diameter (cm)	$A=\pi D^2/4$ (cm <sup>2</sup> )	$P=\pi D$ (cm)	$\sigma_{fu}$ (KSC)	$\tau$ average (KSC)	$l_c$ (cm)
Max. Aggregate = 1" Strength = 200 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	31.1630	6.1940
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	37.7480	5.0600
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	33.3700	3.8400
= 300 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	34.7200	5.5600
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	30.0750	4.7000
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	38.6900	3.3100
= 450 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	38.3180	5.0400
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	33.9330	4.1500
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	43.6530	2.9300

Description	No. of fiber	Diameter (cm)	$A=\pi D^2/4$ (cm <sup>2</sup> )	$P=\pi D$ (cm)	$\sigma_w$ (KSC)	$\tau$ average (KSC)	$l_c$ (cm)
Max. Aggregate = 3/4" Strength = 200 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	27.5450	7.0060
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	52.8180	4.2300
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	40.3000	3.1650
= 300 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	34.8280	5.5400
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	51.8650	4.3090
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	40.9750	3.1100
= 450 KSC	ลวด ลพ.	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	32.8550	5.8730
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	46.2900	4.8000
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	40.2500	3.1690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description	No. of fiber	Diameter (cm)	$A=\pi D^2/4$ (cm <sup>2</sup> )	$P=\pi D$ (cm)	$\sigma_{fu}$ (KSC)	$\tau_{average}$ (KSC)	$l_c$ (cm)
Max. Aggregate = 3/8" Strength = 200 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	18.5270	10.420
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	41.1070	5.4280
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	37.1630	3.4400
= 300 KSC	ลวด 18	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	24.7750	7.7900
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	29.5450	7.5500
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	10.9700	11.660 *
= 450 KSC	ลวด ลพ.	0.1320	0.1360	0.4147	2,925.1468	33.6080	5.7400
	20	0.0860	0.0058	0.2702	5,197.8700	36.6980	6.0810
	24	0.0505	0.0020	0.1588	5,064.3000	36.1450	3.5400

\* bond strength ที่ใช้คำนวณมีค่าผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง  
FLEXURAL STRENGTH & TOUGHNESS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200	KSC	Vf =	0 %
	d	=	15.4 cm.
	b	=	15.53 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	2070 kg
	First crack Deflection	=	0.3 mm.
	First crack Strength	=	28.1 KSC
	Ultimate Load	=	0 kg
	Ultimate Strength	=	0 KSC
	First crack Toughness	=	900 kg-mm.
	15	=	1
	110	=	1
	110/15	=	1

200	KSC	Vf =	0.5 %
	d	=	15.43 cm.
	b	=	15.93 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	3075 kg
	First crack Deflection	=	0.5 mm.
	First crack Strength	=	40.53 KSC
	Ultimate Load	=	2250 kg
	Ultimate Strength	=	29.66 KSC
	First crack Toughness	=	1417.5 kg-mm.
	15	=	4.127
	110	=	7.423
	110/15	=	1.798

200	KSC	Vf =	0.7 %
	d	=	15.23 cm.
	b	=	15.13 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	3180 kg
	First crack Deflection	=	0.4 mm.
	First crack Strength	=	45.306 KSC
	Ultimate Load	=	2490 kg
	Ultimate Strength	=	35.47 KSC
	First crack Toughness	=	1260 kg-mm.
	15	=	3.369
	110	=	7.827
	110/15	=	2.323

200	KSC	Vf =	0.9 %
	d	=	15.4 cm.
	b	=	15.43 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	3345 kg
	First crack Deflection	=	0.4 mm.
	First crack Strength	=	45.7 KSC
	Ultimate Load	=	2640 kg
	Ultimate Strength	=	36.07 KSC
	First crack Toughness	=	1515 kg-mm.
	15	=	3.436
	110	=	5.95
	110/15	=	1.732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200	KSC	Vf =	1.1 %
d	=	15.13	cm.
b	=	15.53	cm.
Span	=	50	cm.
First crack Load	=	3480	kg
First crack Deflection	=	0.4	mm.
First crack Strength	=	48.94	KSC
Ultimate Load	=	3105	kg
Ultimate Strength	=	43.67	KSC
First crack Toughness	=	1290	kg-mm.
I5	=	4.57	
I10	=	8.78	
I10/I5	=	1.919	

200	KSC	Vf =	1.3 %
d	=	15.36	cm.
b	=	15.5	cm.
Span	=	50	cm.
First crack Load	=	3660	kg
First crack Deflection	=	0.5	mm.
First crack Strength	=	50.04	KSC
Ultimate Load	=	3660	kg
Ultimate Strength	=	50.04	KSC
First crack Toughness	=	1537.5	kg-mm.
I5	=	5.405	
I10	=	10.332	
I10/I5	=	1.911	

200	KSC	Vf =	1.5 %
d	=	15.13	cm.
b	=	15.6	cm.
Span	=	50	cm.
First crack Load	=	3375	kg
First crack Deflection	=	0.3	mm.
First crack Strength	=	47.25	KSC
Ultimate Load	=	2850	kg
Ultimate Strength	=	39.75	KSC
First crack Toughness	=	952.5	kg-mm.
I5	=	5.405	
I10	=	10.332	
I10/I5	=	1.911	

200	KSC	Vf =	1.7 %
d	=	15.66	cm.
b	=	15.83	cm.
Span	=	50	cm.
First crack Load	=	4365	kg
First crack Deflection	=	0.5	mm.
First crack Strength	=	56.22	KSC
Ultimate Load	=	4140	kg
Ultimate Strength	=	53.32	KSC
First crack Toughness	=	2122.5	kg-mm.
I5	=	4.802	
I10	=	9.113	
I10/I5	=	1.897	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200	KSC	Vf =	2 %
	d	=	15.23 cm.
	b	=	15.3 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	3705 kg
	First crack Deflection	=	0.5 mm.
	First crack Strength	=	52.19 KSC
	Ultimate Load	=	4515 kg
	Ultimate Strength	=	63.61 KSC
	First crack Toughness	=	4425 kg-mm.
	I5	=	3.797
	I10	=	5.974
	I10/I5	=	1.573

200	KSC	Vf =	1.4 %
	d	=	15.36 cm.
	b	=	15.46 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	3510 kg
	First crack Deflection	=	0.5 mm.
	First crack Strength	=	48.115 KSC
	Ultimate Load	=	3195 kg
	Ultimate Strength	=	43.79 KSC
	First crack Toughness	=	1560 kg-mm.
	I5	=	4.798
	I10	=	9.5336
	I10/I5	=	1.987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450	KSC	Vf =	0 %
d	=		14.73 cm.
b	=		15.03 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		2650 kg
First crack Deflection	=		0.35 mm.
First crack Strength	=		40.63 KSC
Ultimate Load	=		0 kg
Ultimate Strength	=		0 KSC
First crack Toughness	=		1462.5 kg-mm.
I5	=		1
I10	=		1
I10/I5	=		1

450	KSC	Vf =	0.5 %
d	=		15.46 cm.
b	=		15.16 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		3810 kg
First crack Deflection	=		0.6 mm.
First crack Strength	=		52.57 KSC
Ultimate Load	=		1275 kg
Ultimate Strength	=		17.59 KSC
First crack Toughness	=		192.75 kg-mm.
I5	=		2.1
I10	=		2.981
I10/I5	=		1.389

450	KSC	Vf =	0.7 %
d	=		15.2 cm.
b	=		15.46 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		2925 kg
First crack Deflection	=		2.6 mm.
First crack Strength	=		40.94 KSC
Ultimate Load	=		540 kg
Ultimate Strength	=		7.56 KSC
First crack Toughness	=		4785 kg-mm.
I5	=		1.652
I10	=		2.324
I10/I5	=		1.407

450	KSC	Vf =	0.9 %
d	=		15.23 cm.
b	=		15.46 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		3240 kg
First crack Deflection	=		0.5 mm.
First crack Strength	=		45.17 KSC
Ultimate Load	=		3045 kg
Ultimate Strength	=		42.45 KSC
First crack Toughness	=		1590 kg-mm.
I5	=		4.236
I10	=		7.156
I10/I5	=		1.691

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สืบ อีกรทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450	KSC	Vf =	1.1 %
d	=		15.03 cm.
b	=		15.3 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		3405 kg
First crack Deflection	=		0.8 mm.
First crack Strength	=		49.26 KSC
Ultimate Load	=		2640 kg
Ultimate Strength	=		38.19 KSC
First crack Toughness	=		2025 kg-mm.
I5	=		4
I10	=		6.24
I10/I5	=		1.56

450	KSC	Vf =	1.3 %
d	=		15.36 cm.
b	=		15.46 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		3240 kg
First crack Deflection	=		0.7 mm.
First crack Strength	=		44.41 KSC
Ultimate Load	=		2895 kg
Ultimate Strength	=		39.68 KSC
First crack Toughness	=		1605 kg-mm.
I5	=		5.495
I10	=		10.383
I10/I5	=		1.97

450	KSC	Vf =	1.5 %
d	=		15.23 cm.
b	=		15.53 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		4710 kg
First crack Deflection	=		1 mm.
First crack Strength	=		65.37 KSC
Ultimate Load	=		4920 kg
Ultimate Strength	=		68.29 KSC
First crack Toughness	=		5370 kg-mm.
I5	=		4.275
I10	=		8.078
I10/I5	=		1.889

450	KSC	Vf =	1.7 %
d	=		15.43 cm.
b	=		15.6 cm.
Span	=		50 cm.
First crack Load	=		5145 kg
First crack Deflection	=		1 mm.
First crack Strength	=		69.26 KSC
Ultimate Load	=		5520 kg
Ultimate Strength	=		74.31 KSC
First crack Toughness	=		5752.5 kg-mm.
I5	=		4.228
I10	=		7.149
I10/I5	=		1.667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

450	KSC	Vf =	2 %
	d	=	15.16 cm.
	b	=	15.2 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	6015 kg
	First crack Deflection	=	1.4 mm.
	First crack Strength	=	86.092 KSC
	Ultimate Load	=	5985 kg
	Ultimate Strength	=	85.66 KSC
	First crack Toughness	=	9435 kg-mm.
	I5	=	3.907
	I10	=	6.104
	I10/I5	=	1.562

450	KSC	Vf =	1.4 %
	d	=	15.3 cm.
	b	=	15.36 cm.
	Span	=	50 cm.
	First crack Load	=	3570 kg
	First crack Deflection	=	0.5 mm.
	First crack Strength	=	49.64 KSC
	Ultimate Load	=	3105 kg
	Ultimate Strength	=	43.13 KSC
	First crack Toughness	=	1627.5 kg-mm.
	I5	=	4.373
	I10	=	8.912
	I10/I5	=	2.038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

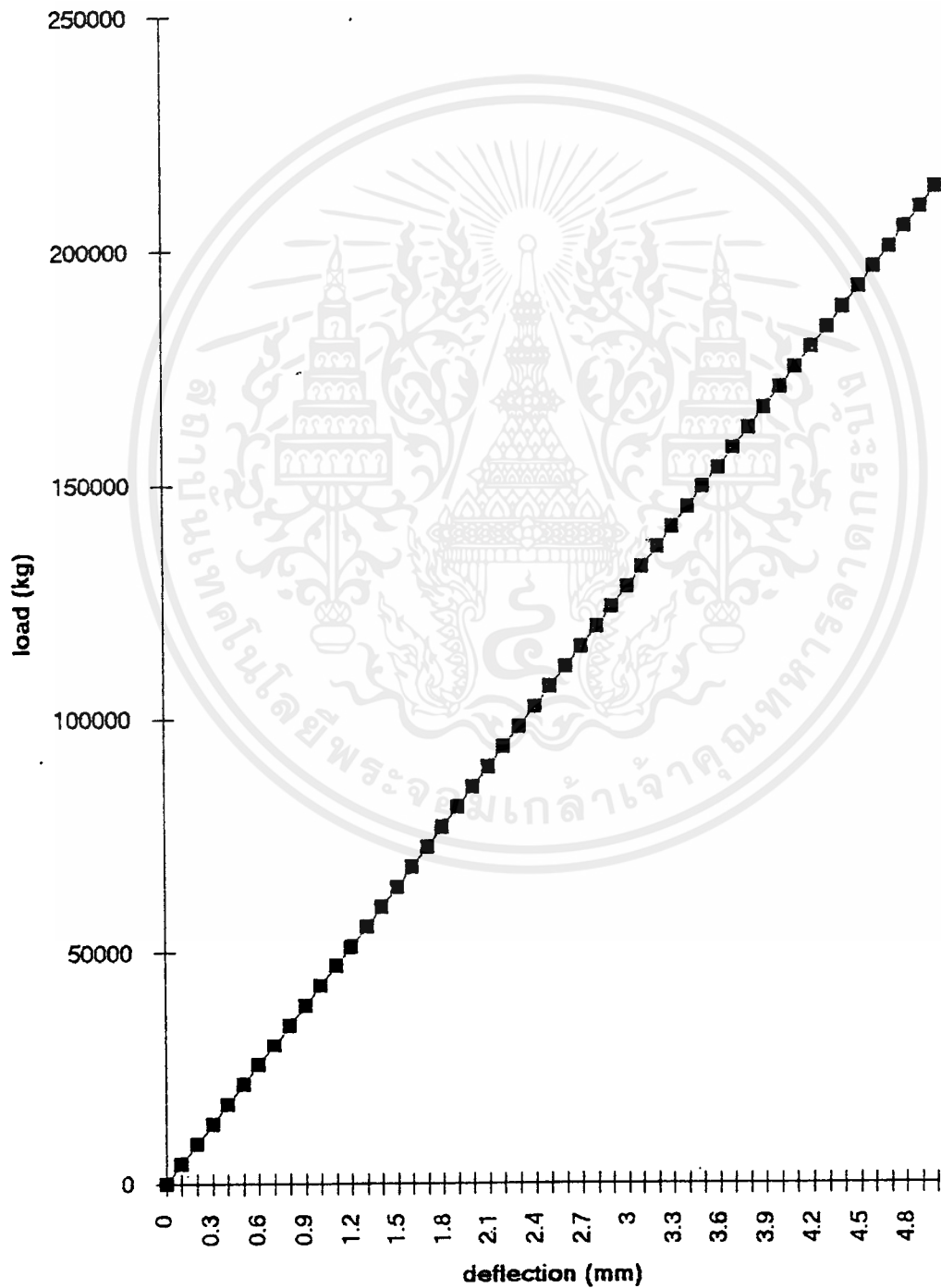
กราฟ LOAD - DEFLECTION  
ที่ค่ากำลังอัด 200 ksc



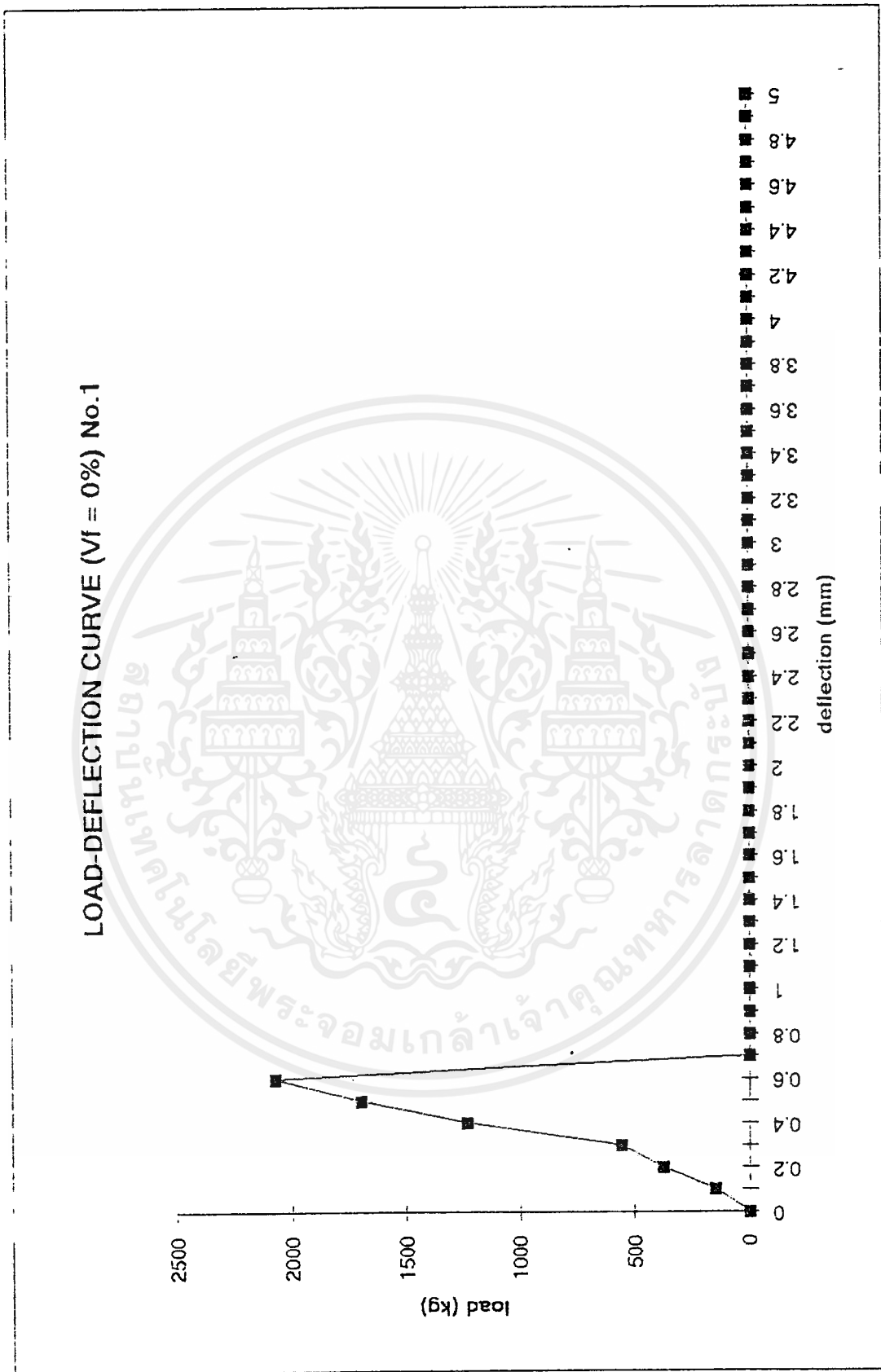
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{deflection (mm)} = (23/1296) \times WL^3 / EI$$

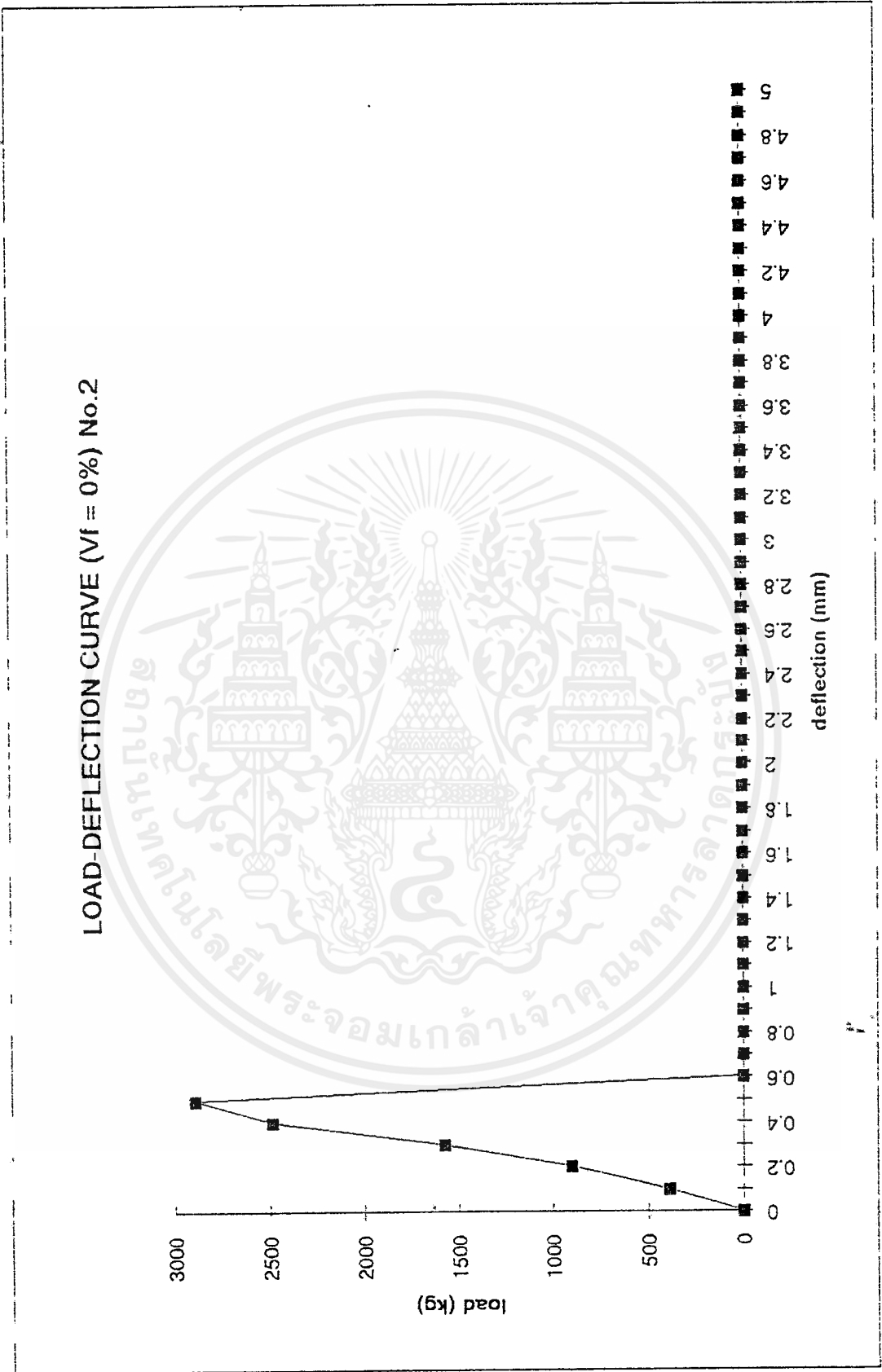
**THEORETICAL LOAD DEFLECTION CURVE ( $v_f = 0\%$ )  
(200 ksc)**



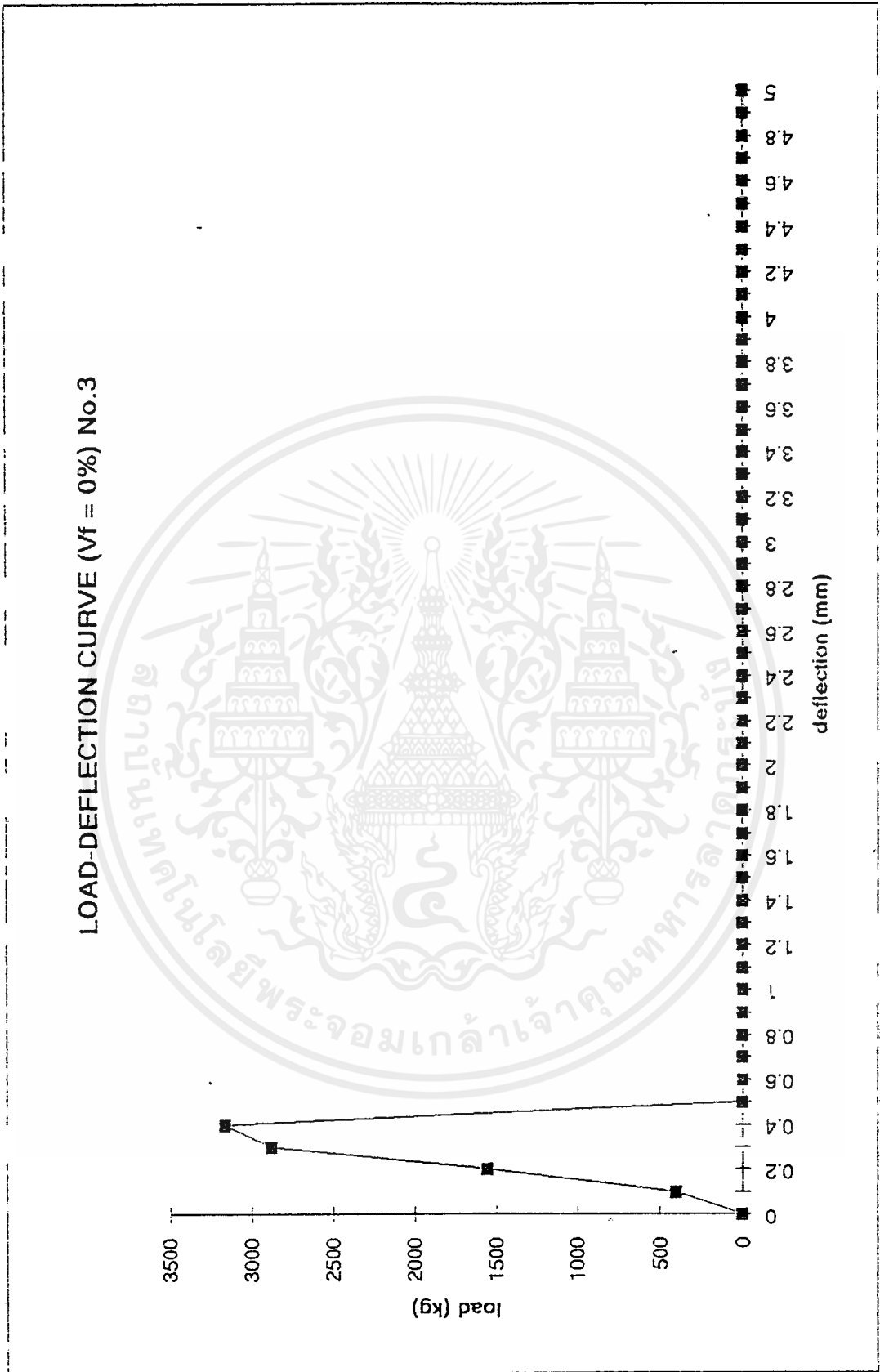
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



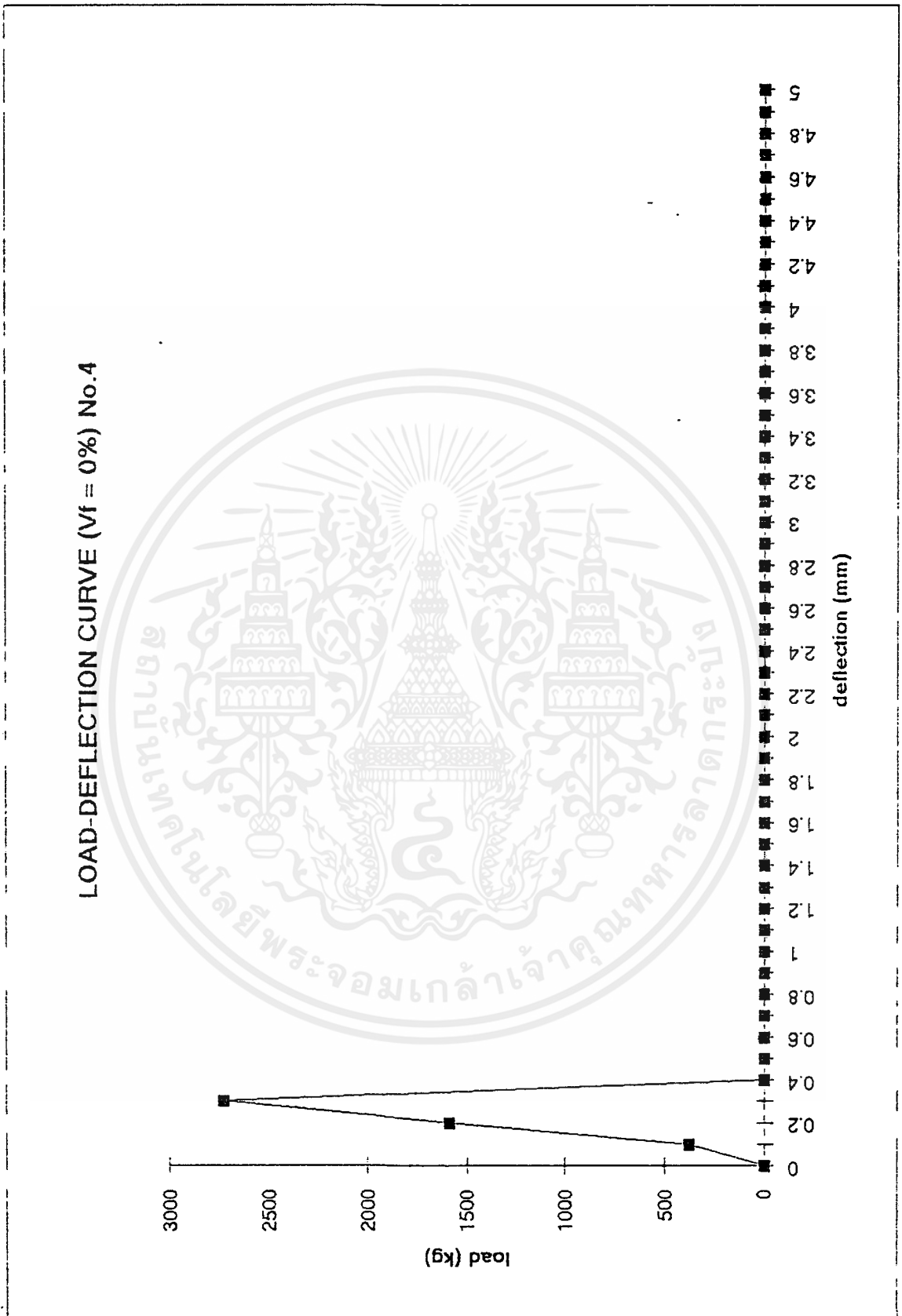
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



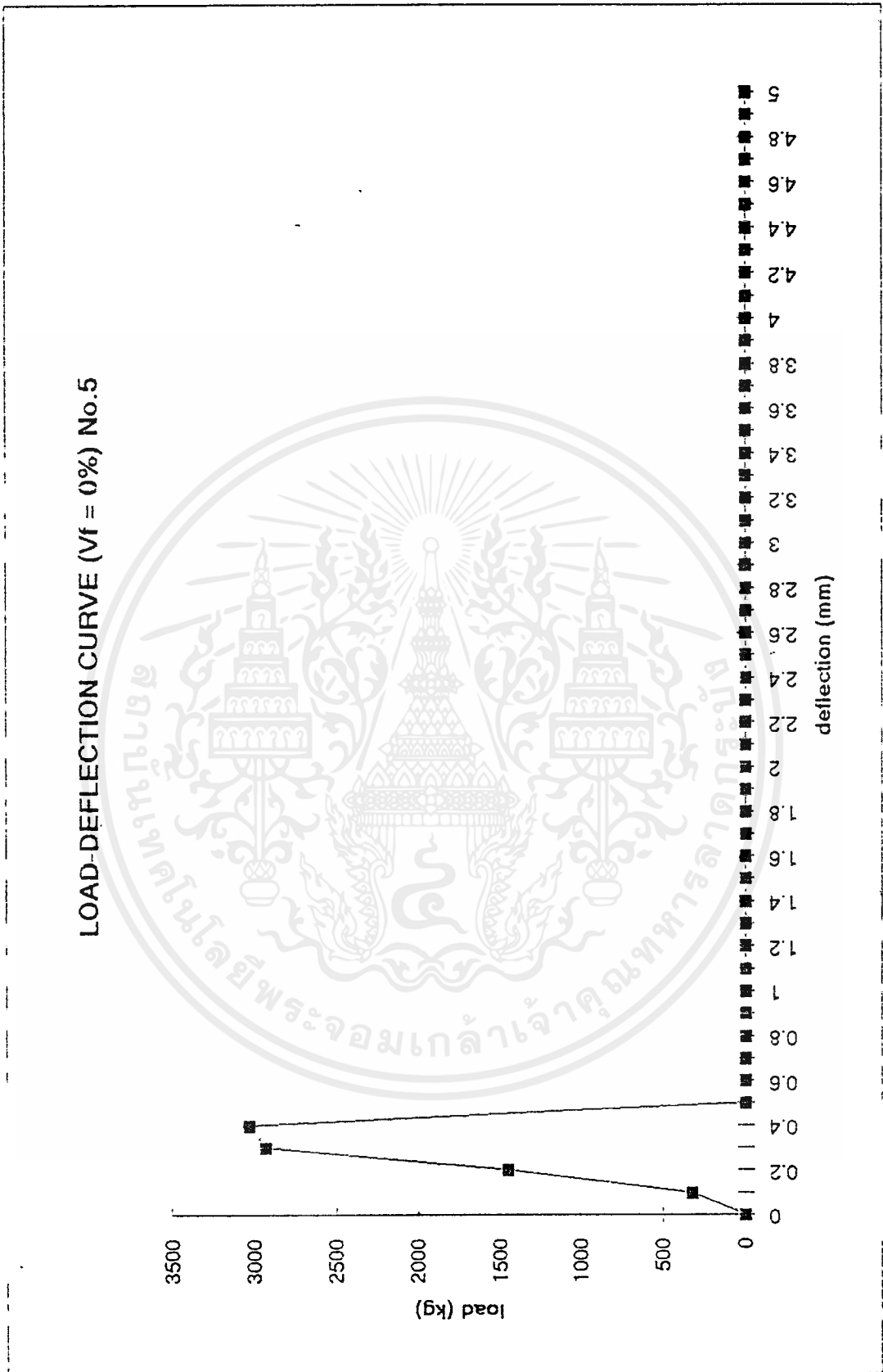
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



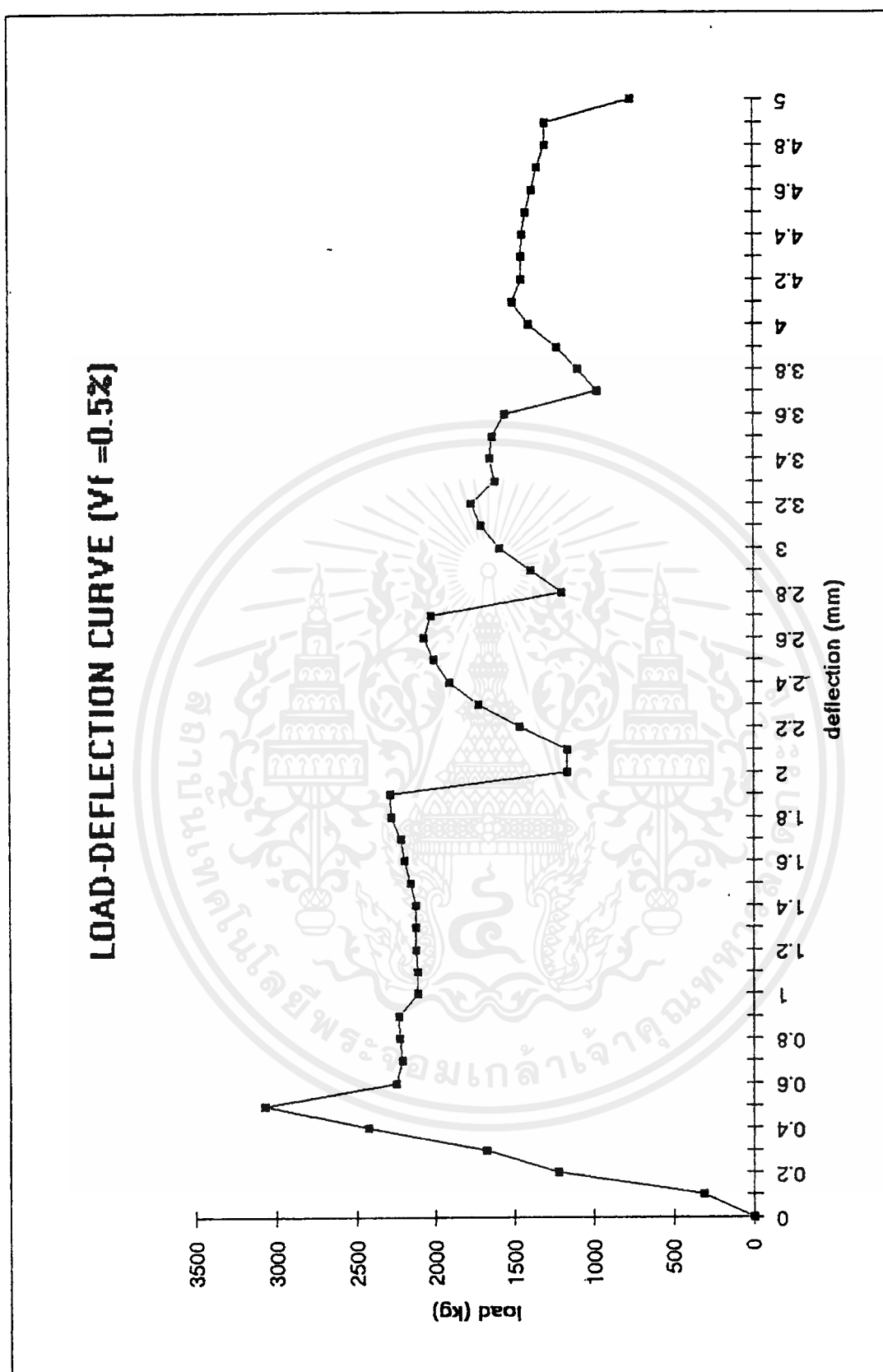
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



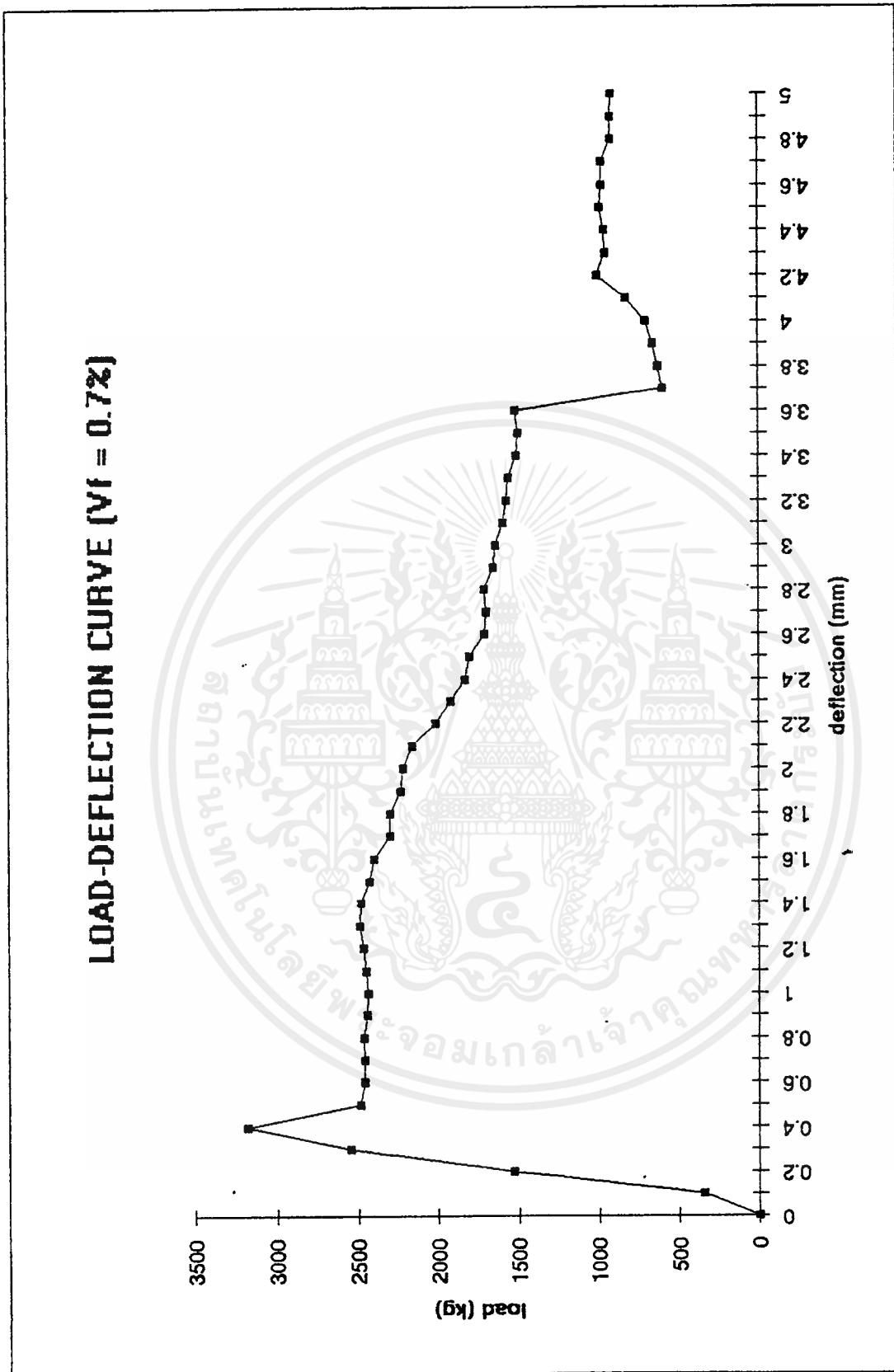
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



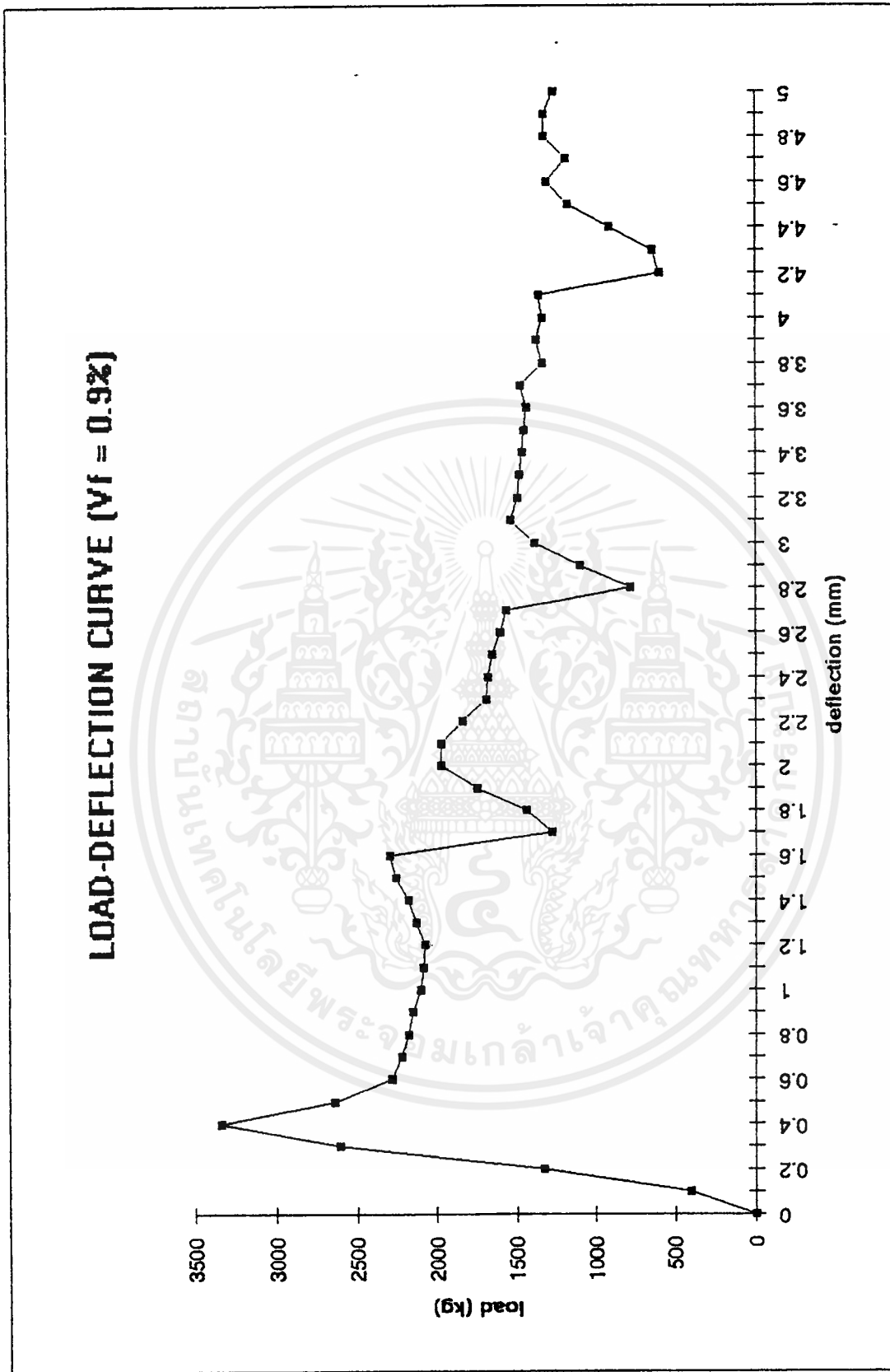
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



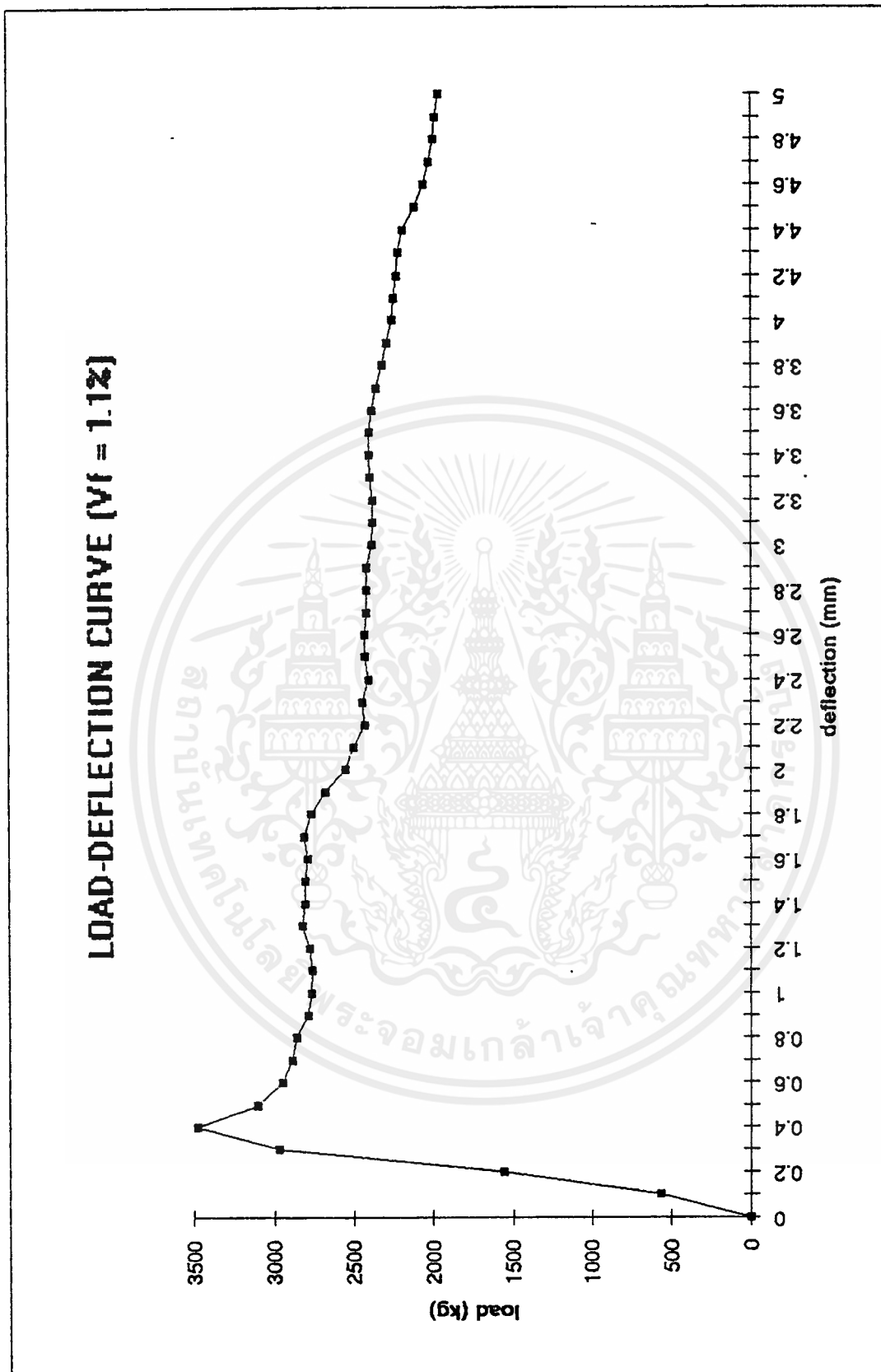
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



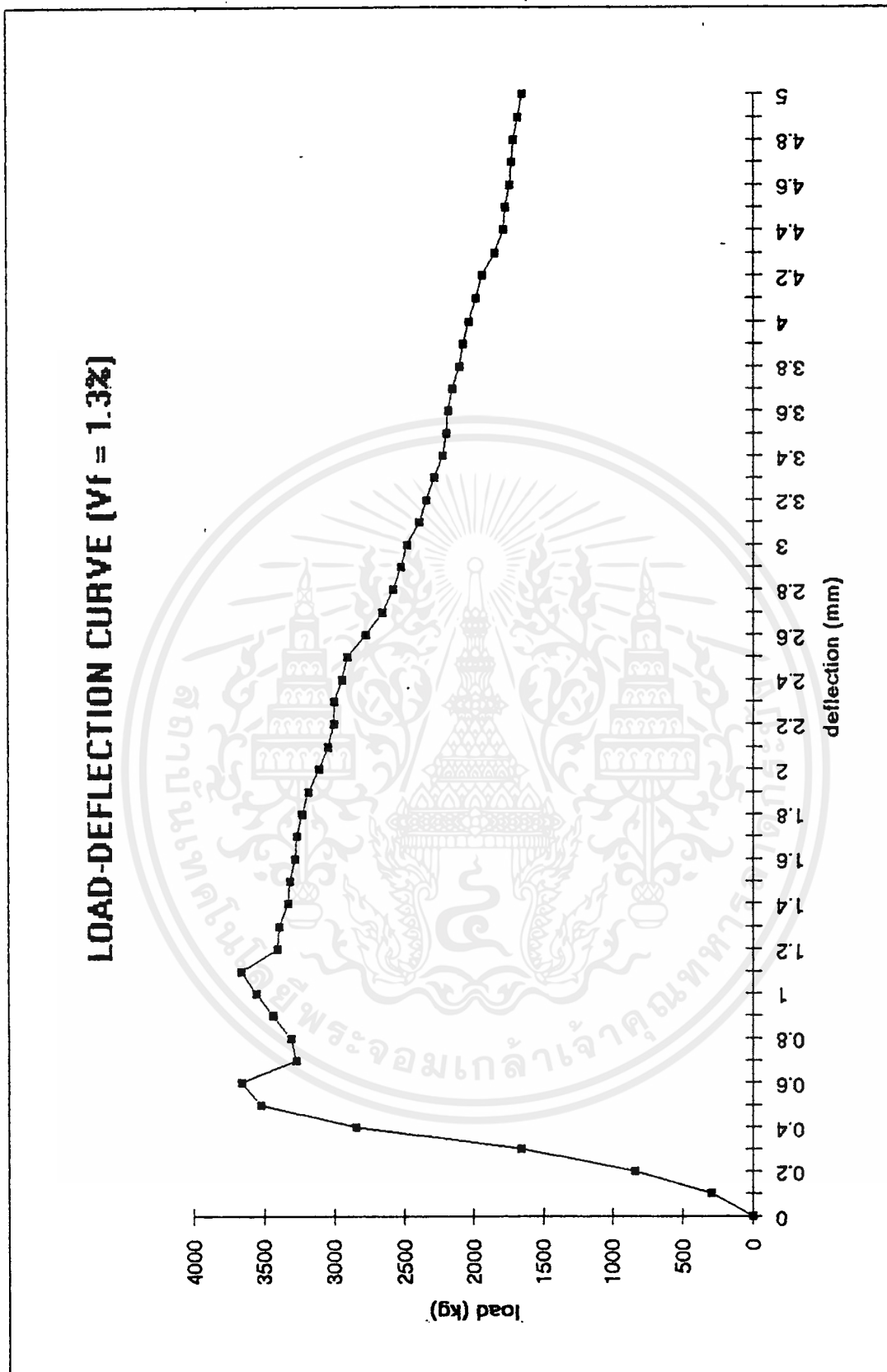
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



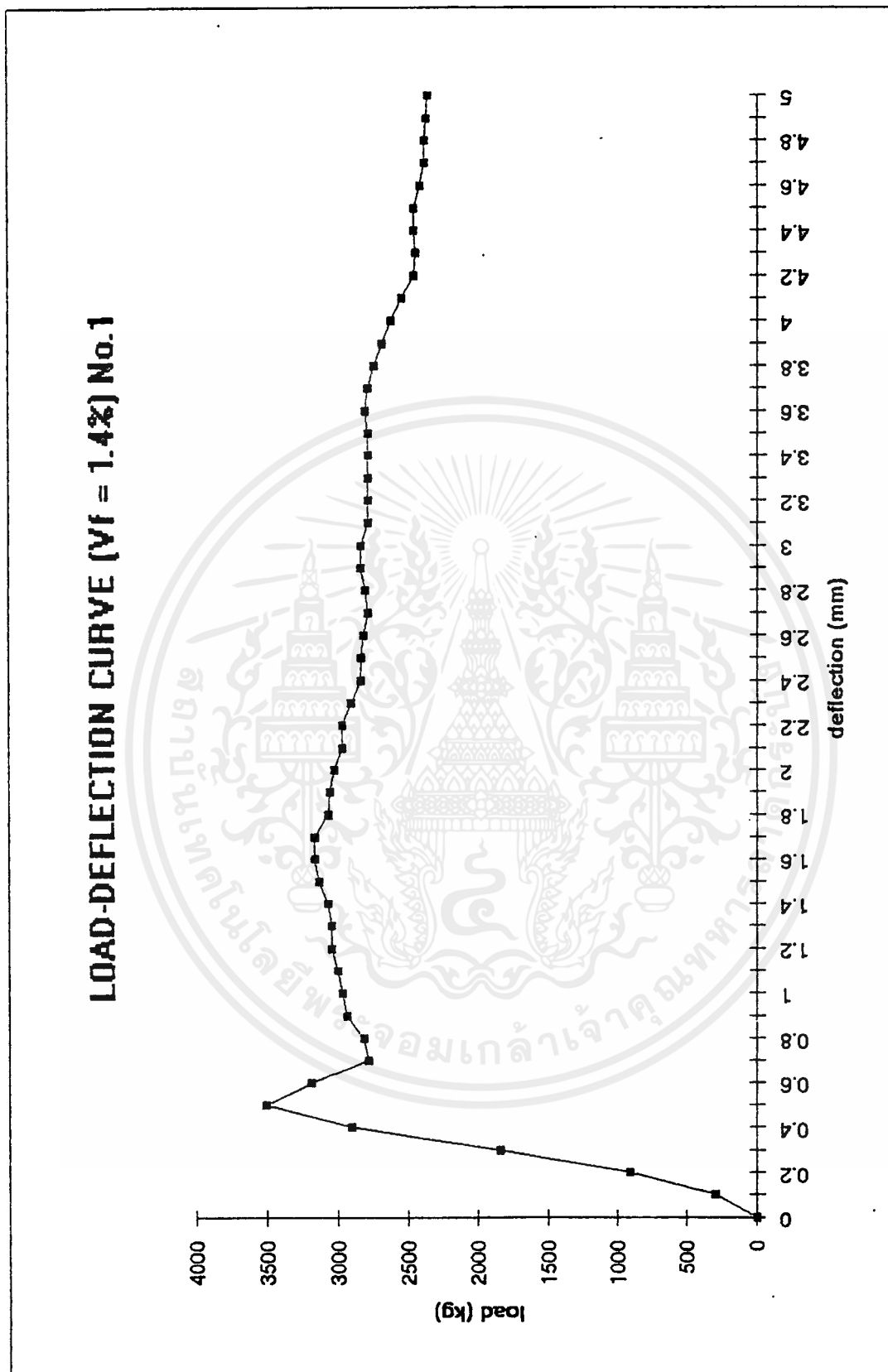
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



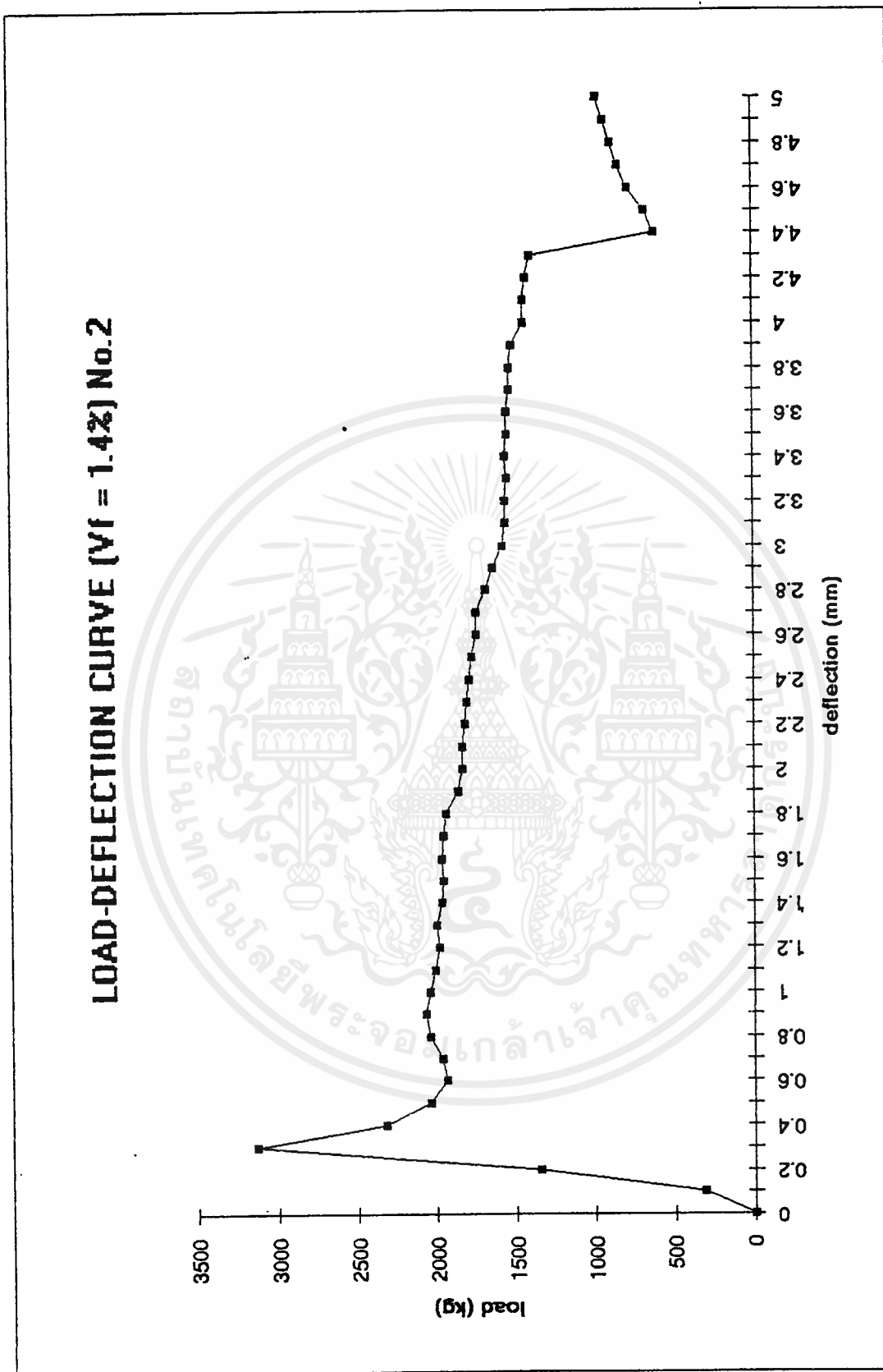
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



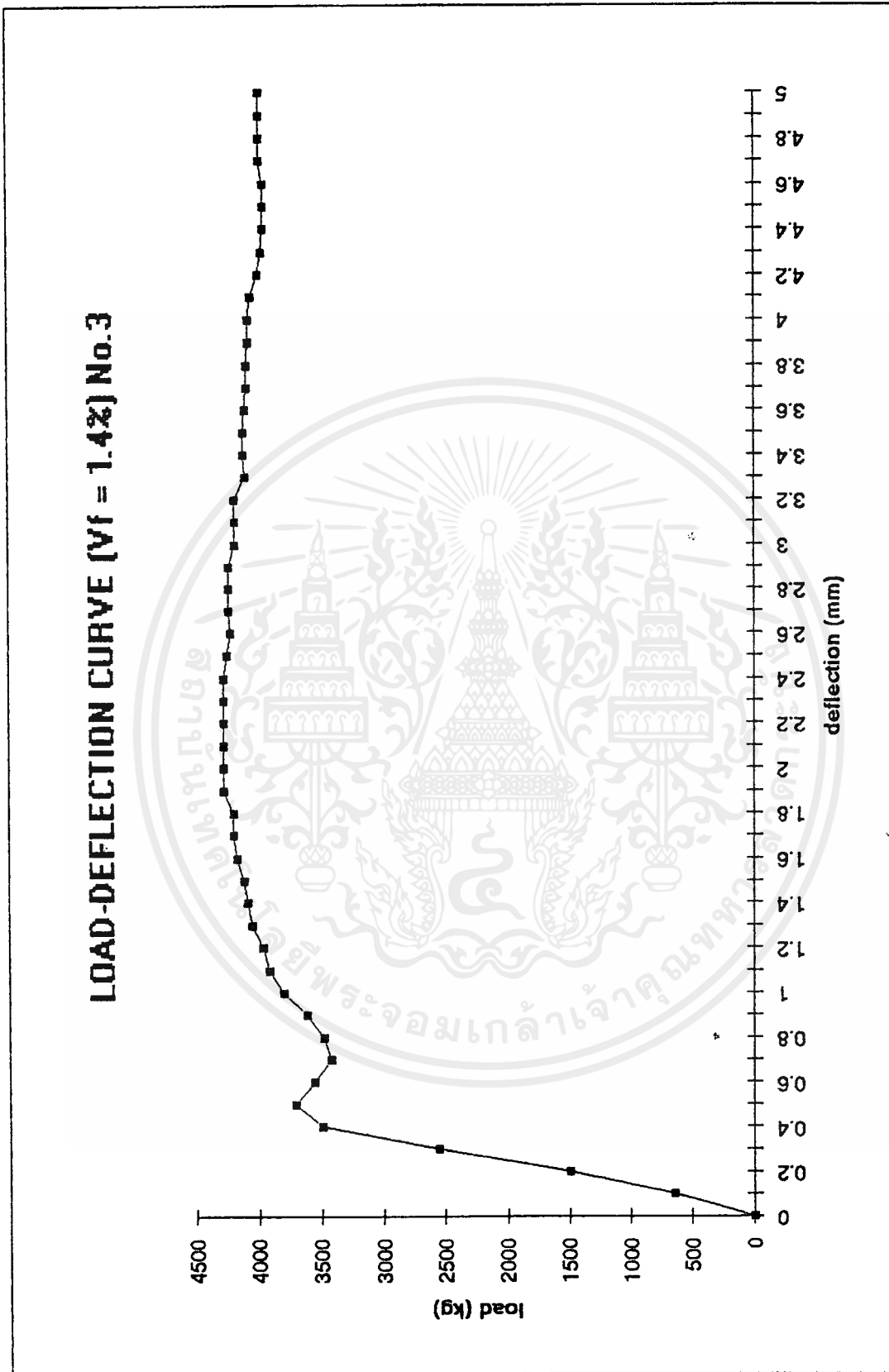
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



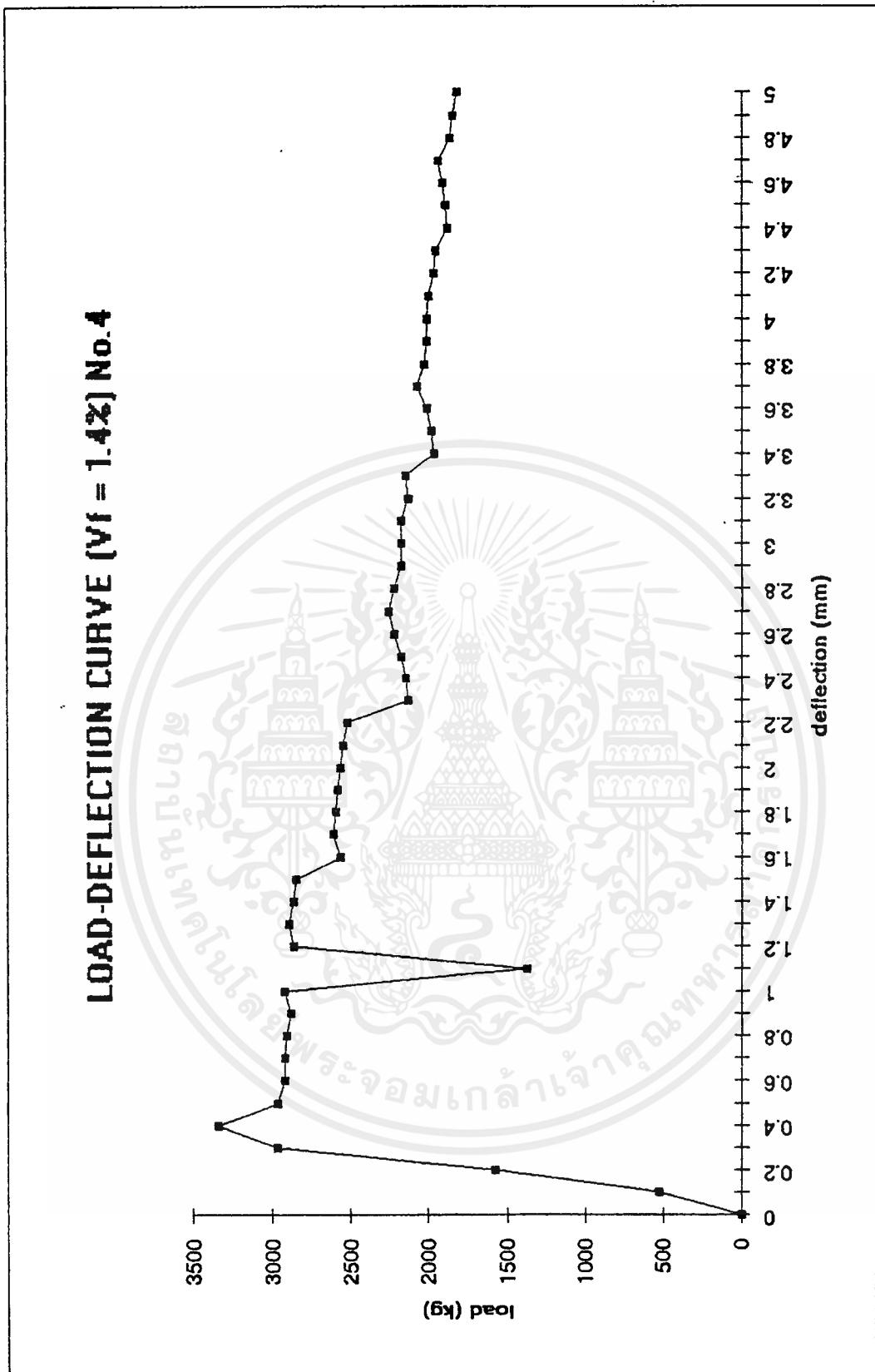
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



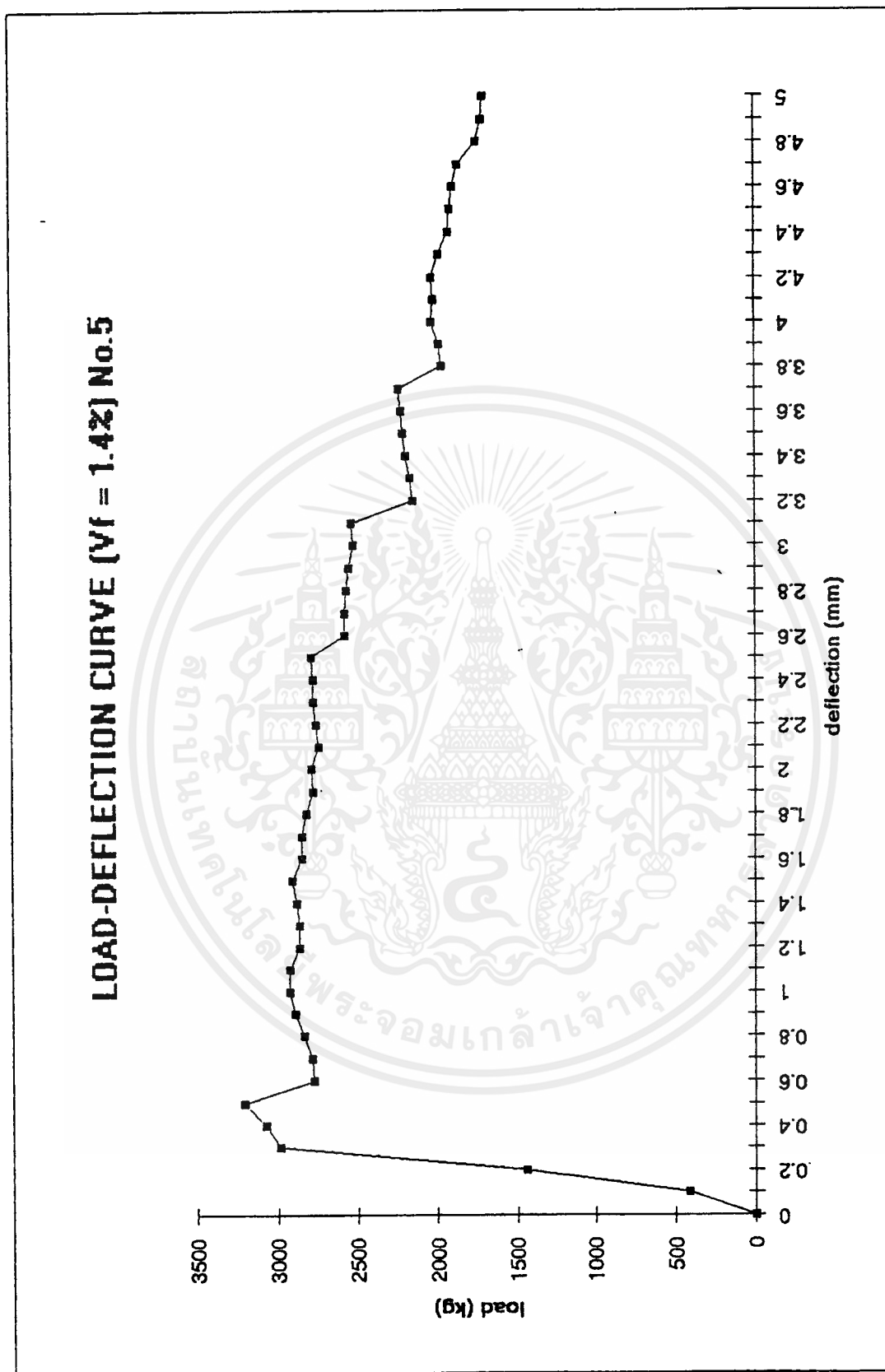
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



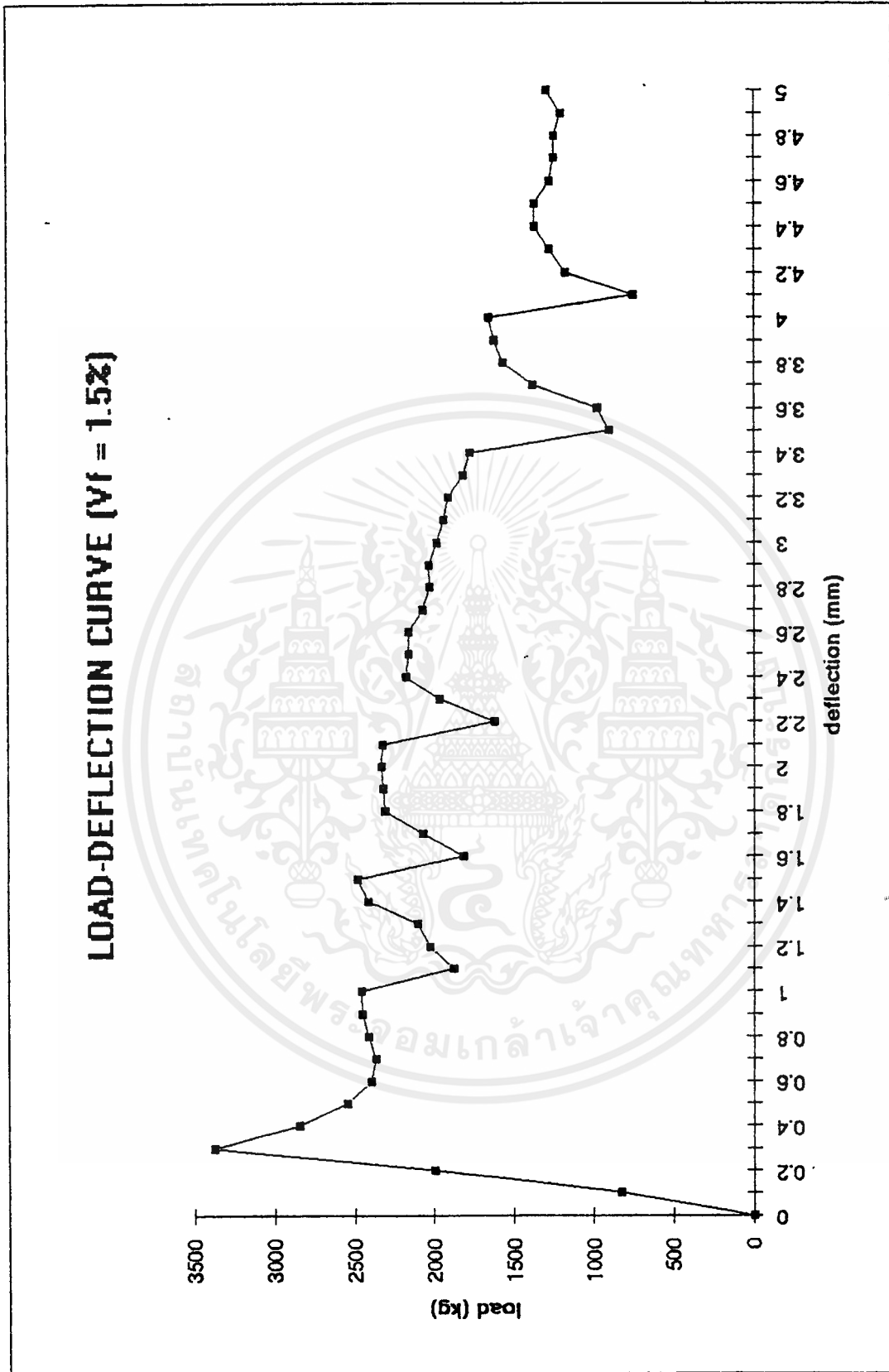
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



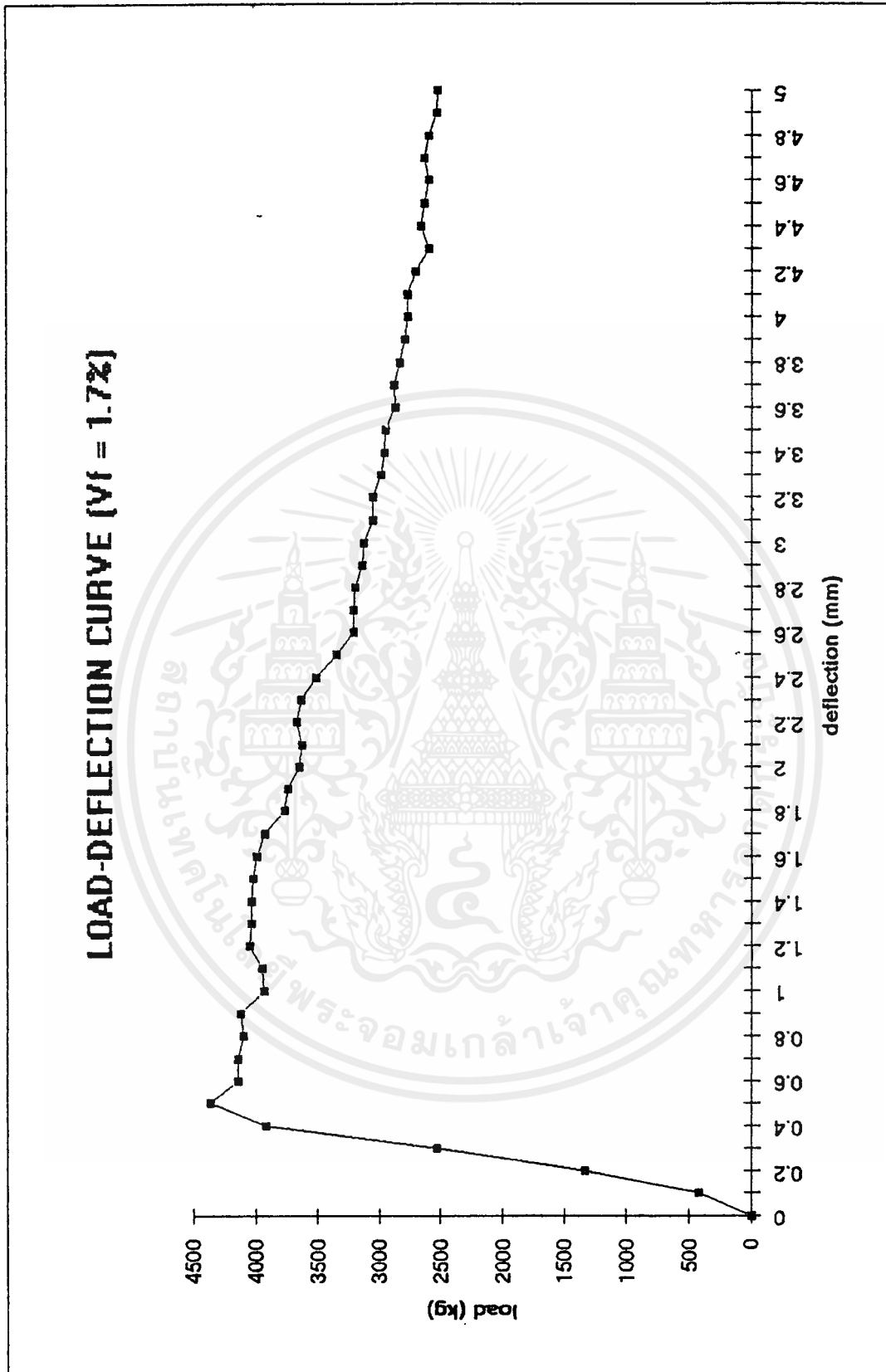
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



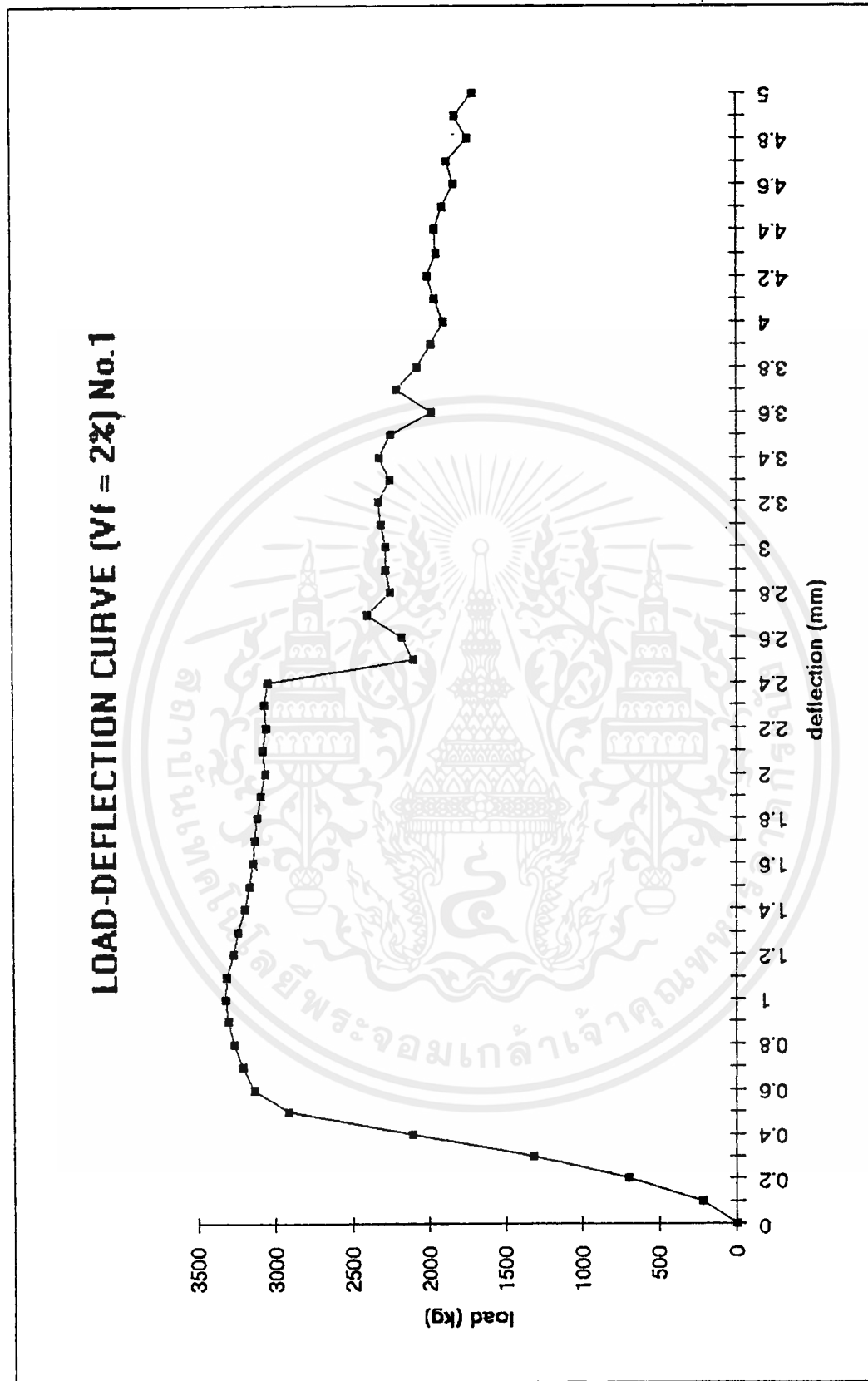
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



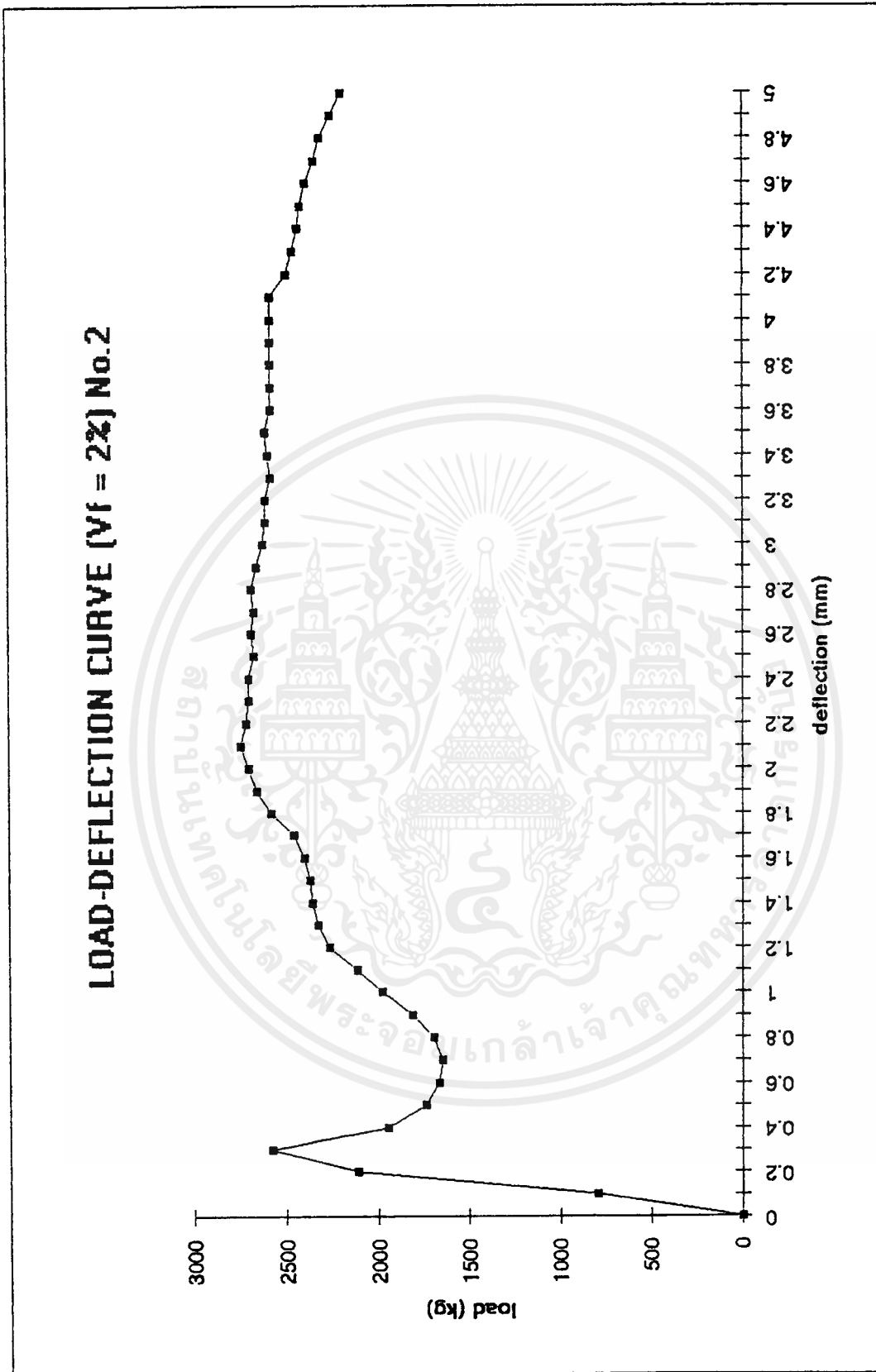
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



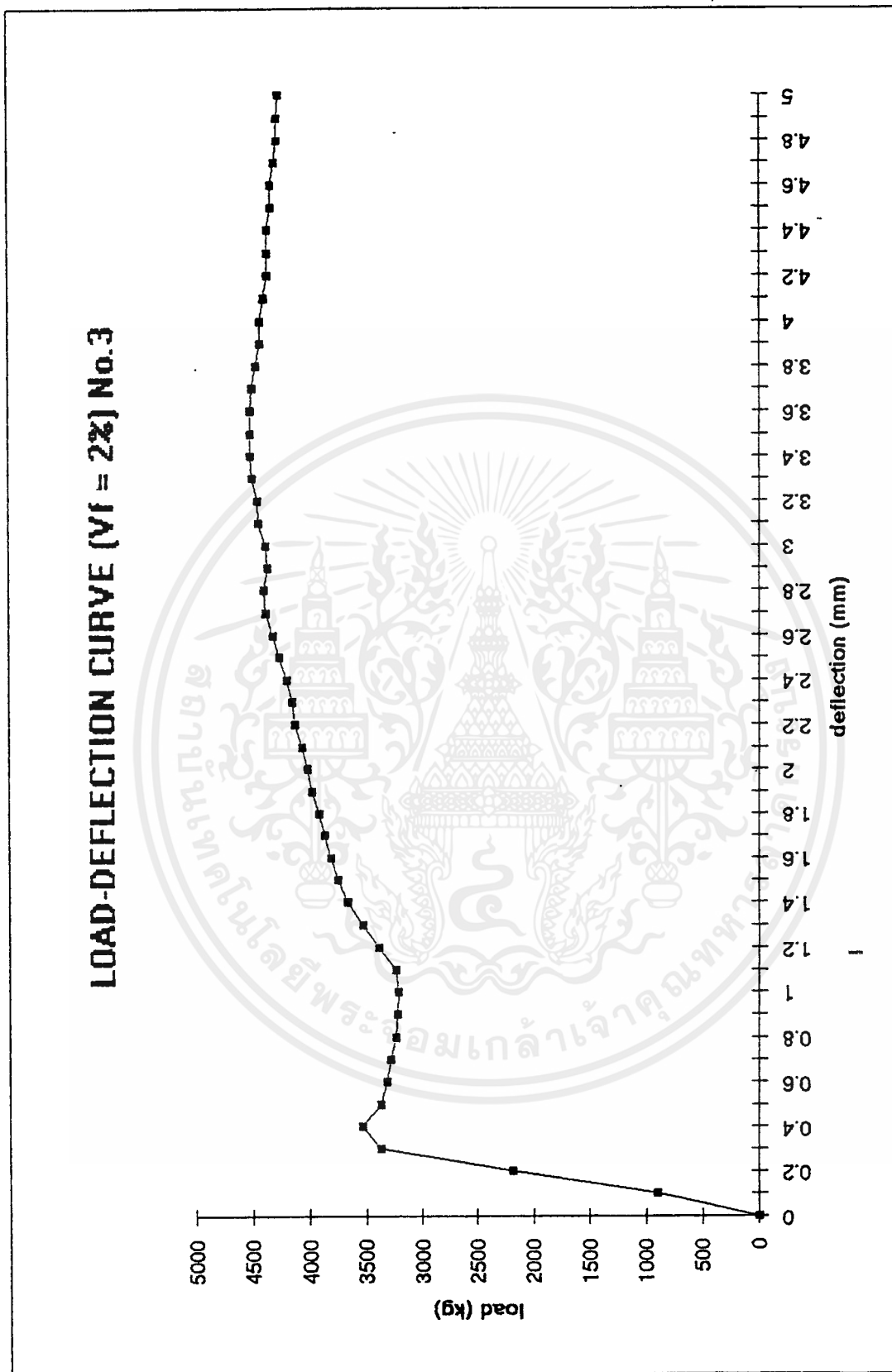
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



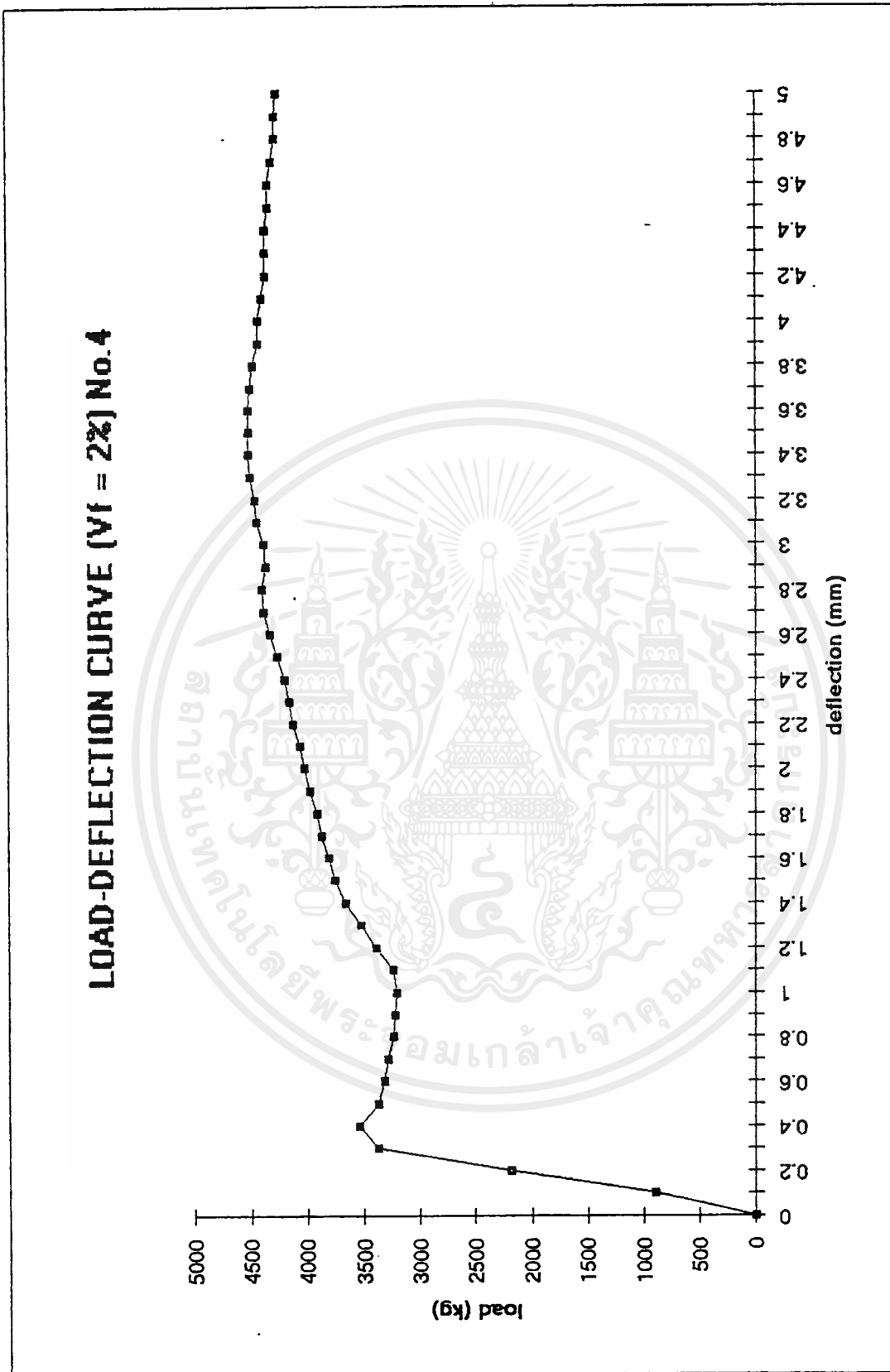
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



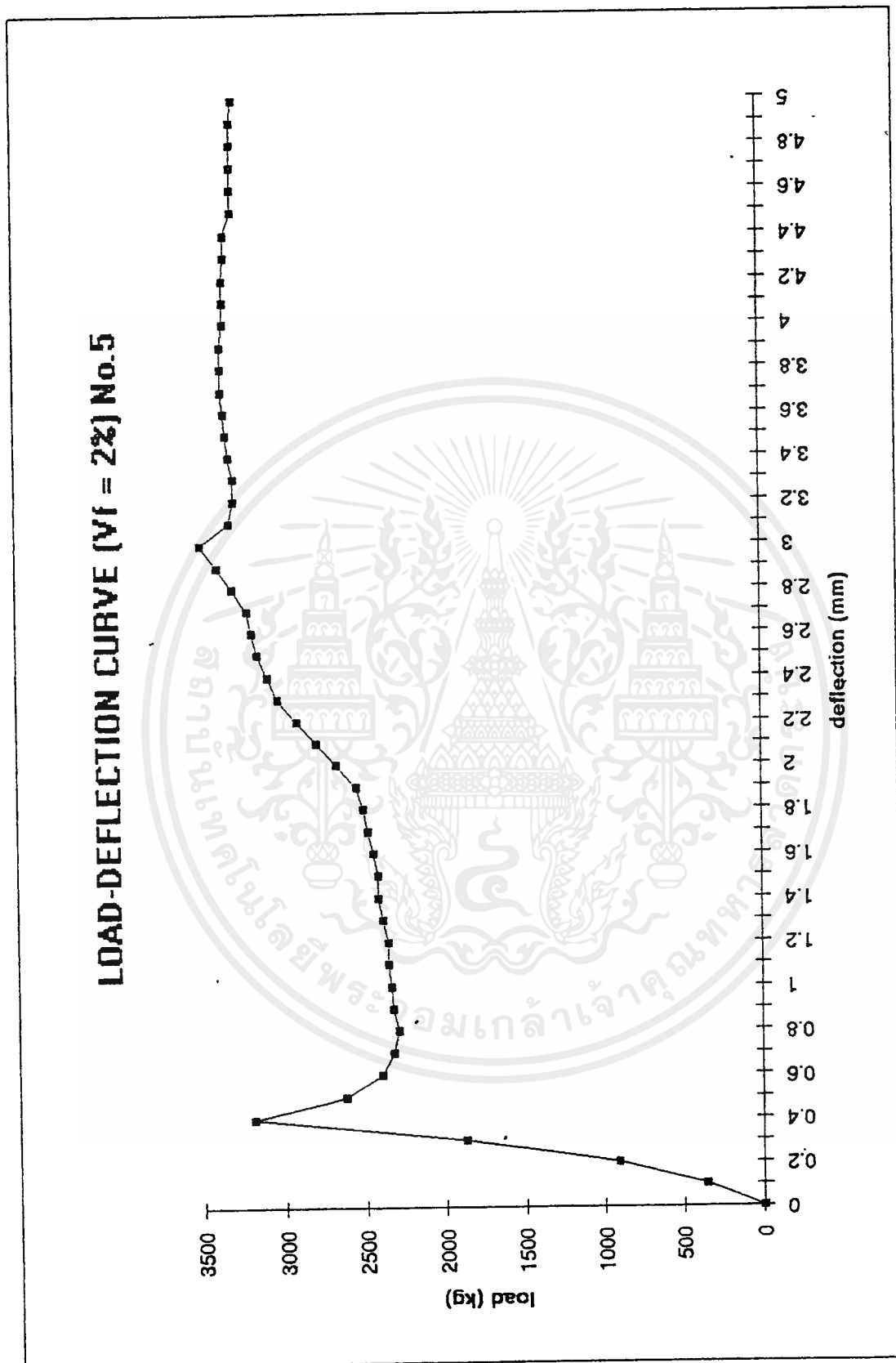
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



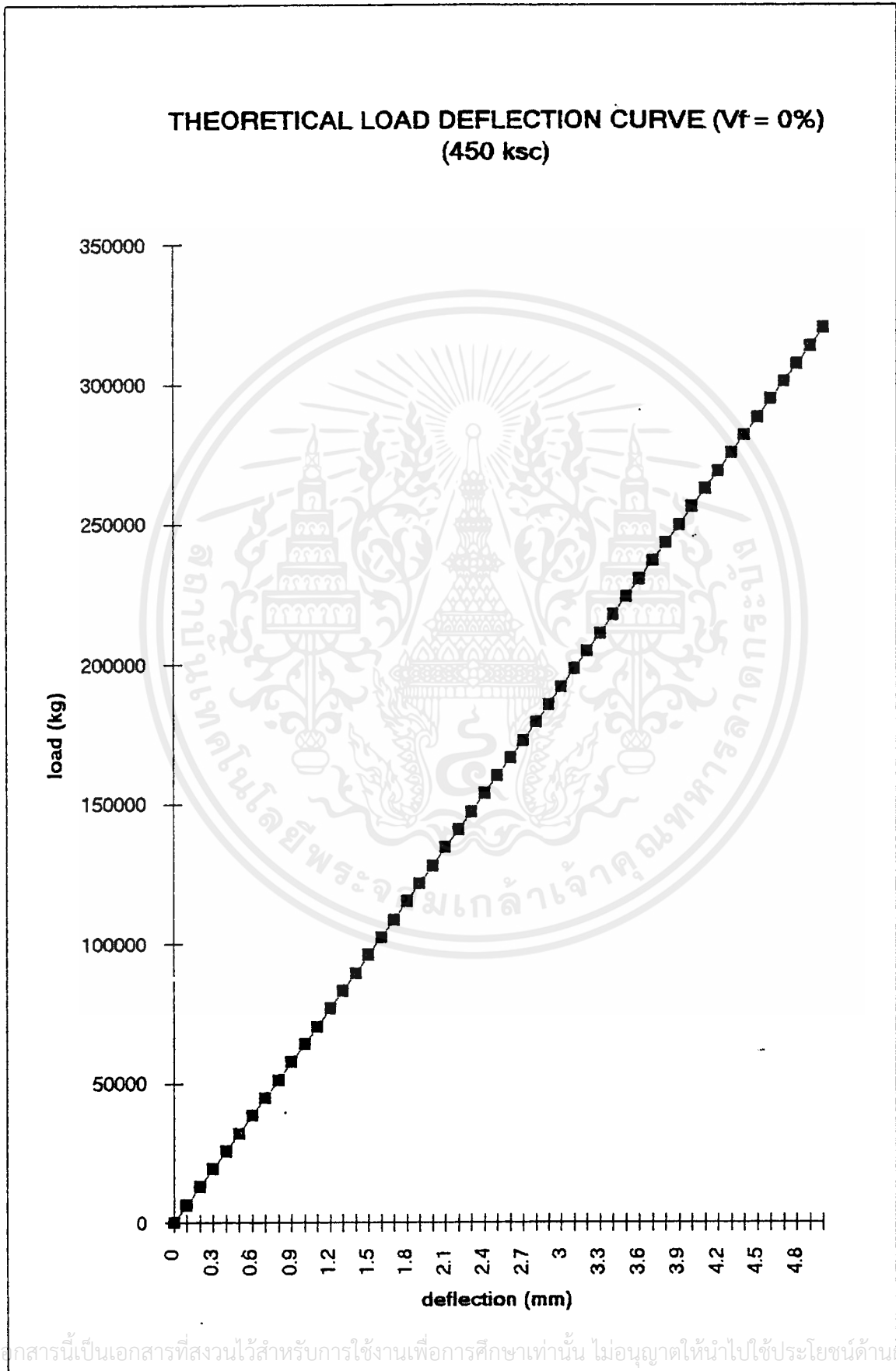
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ LOAD - DEFLECTION  
ที่ค่ากำลังอัด 450 ksc



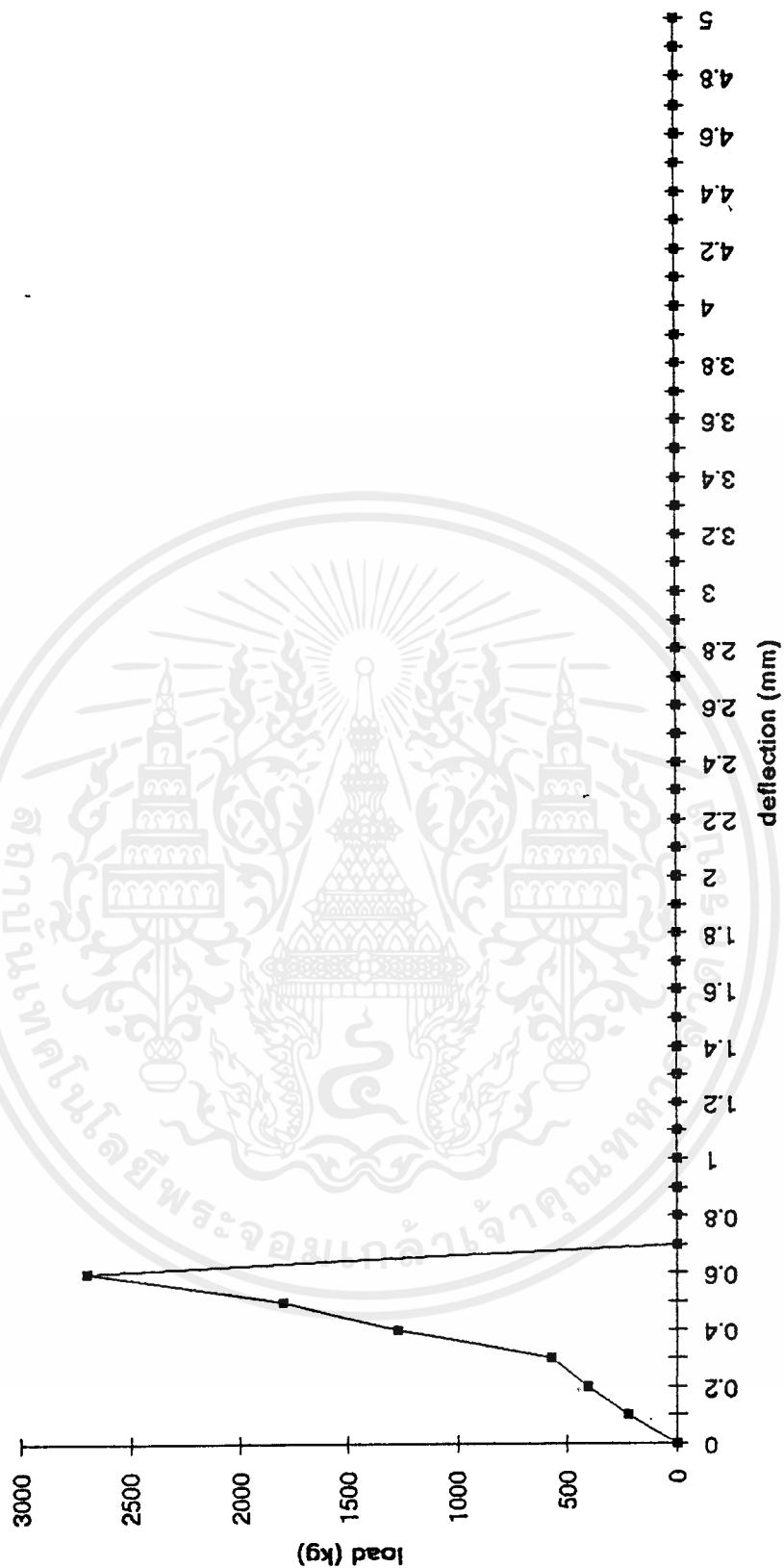
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{deflection (mm)} = (23/1296) \times WL^3 / EI$$



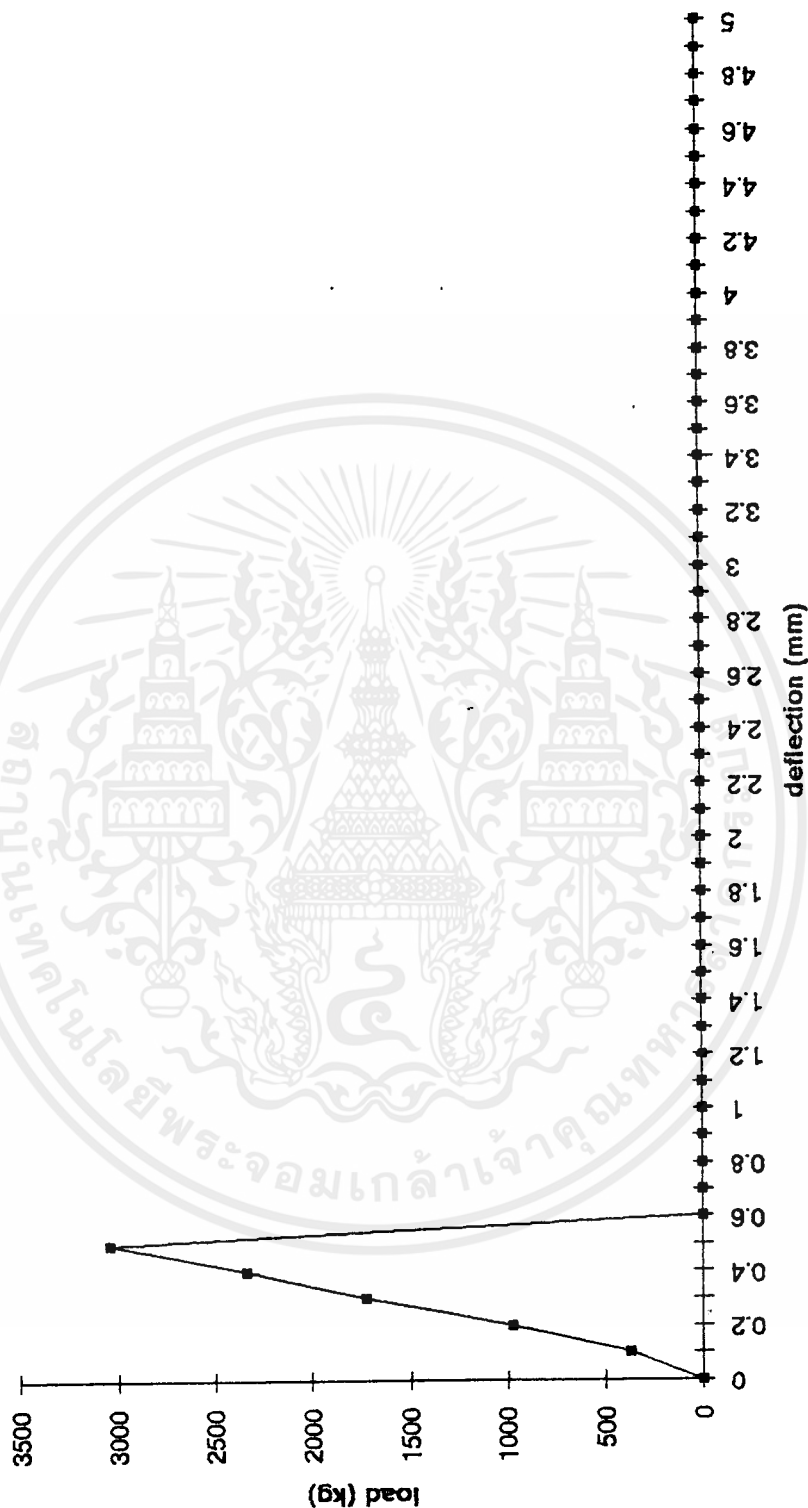
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### LOAD-DEFLECTION CURVE (VI = 0%) No.1



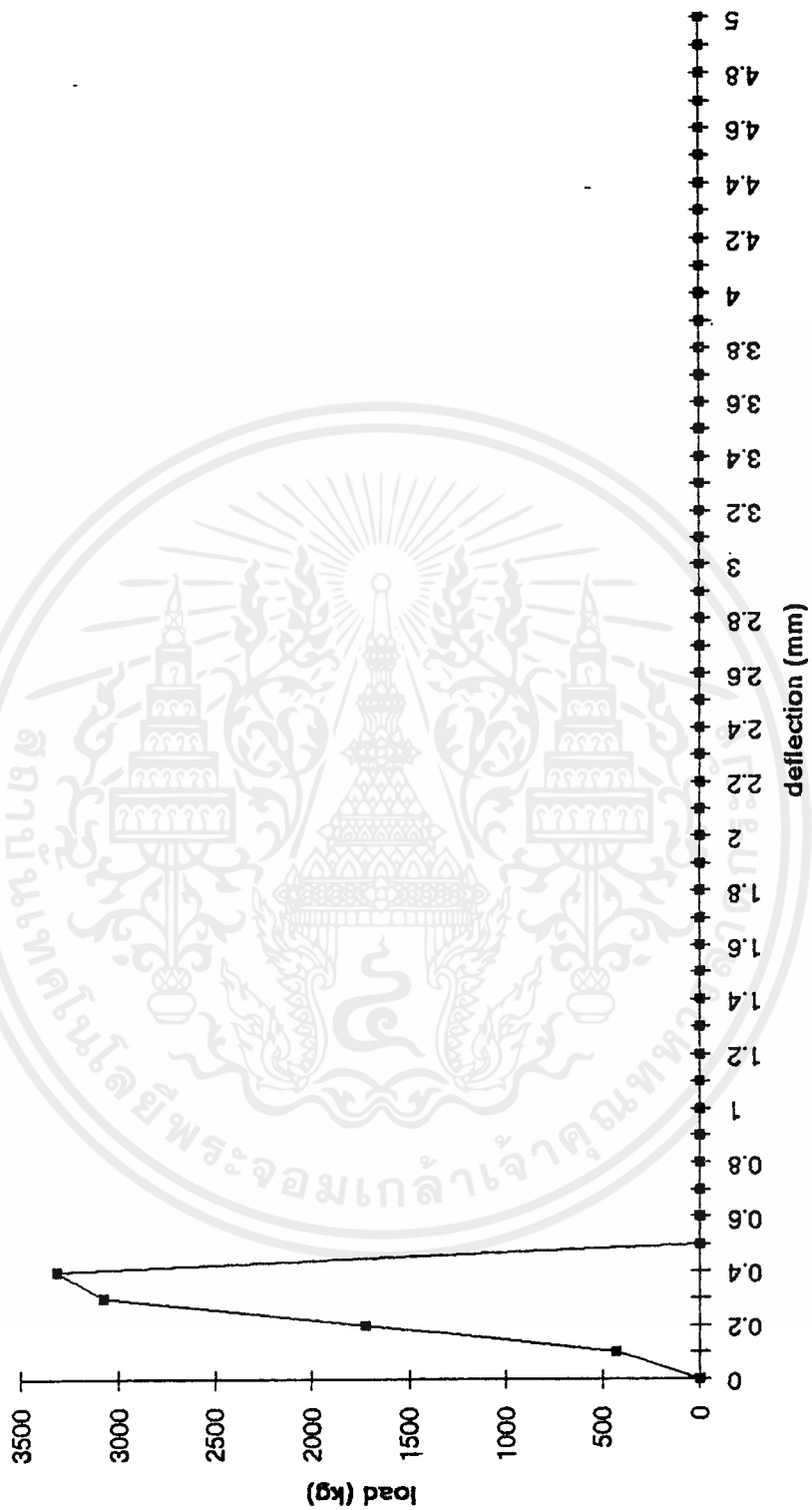
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LOAD-DEFLECTION CURVE (Vf = 0%) No.2**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### LOAD-DEFLECTION CURVE ( $\gamma_f = 0\%$ ) No.3



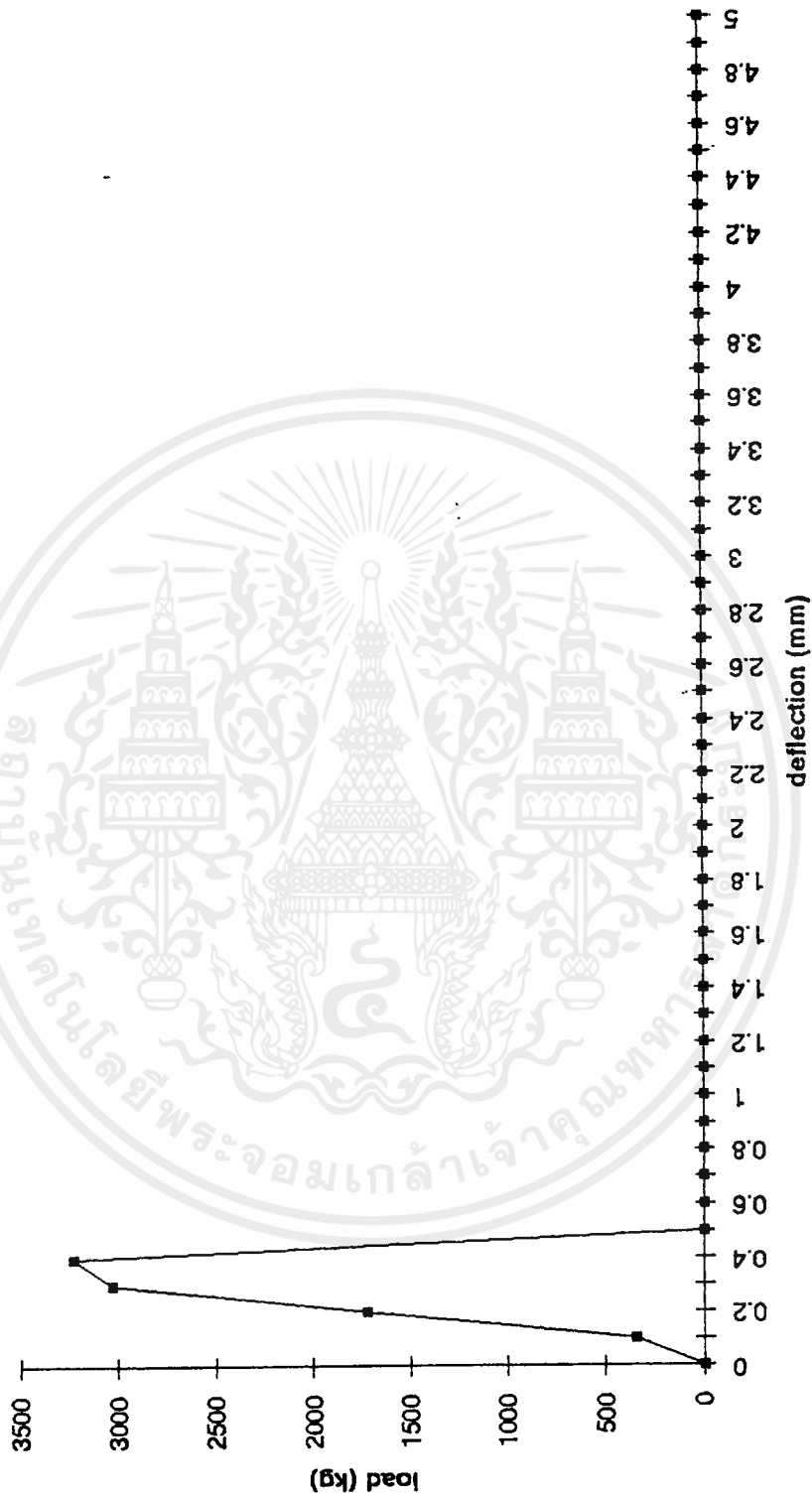
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### LOAD-DEFLECTION CURVE (Vf = 0%) No.4

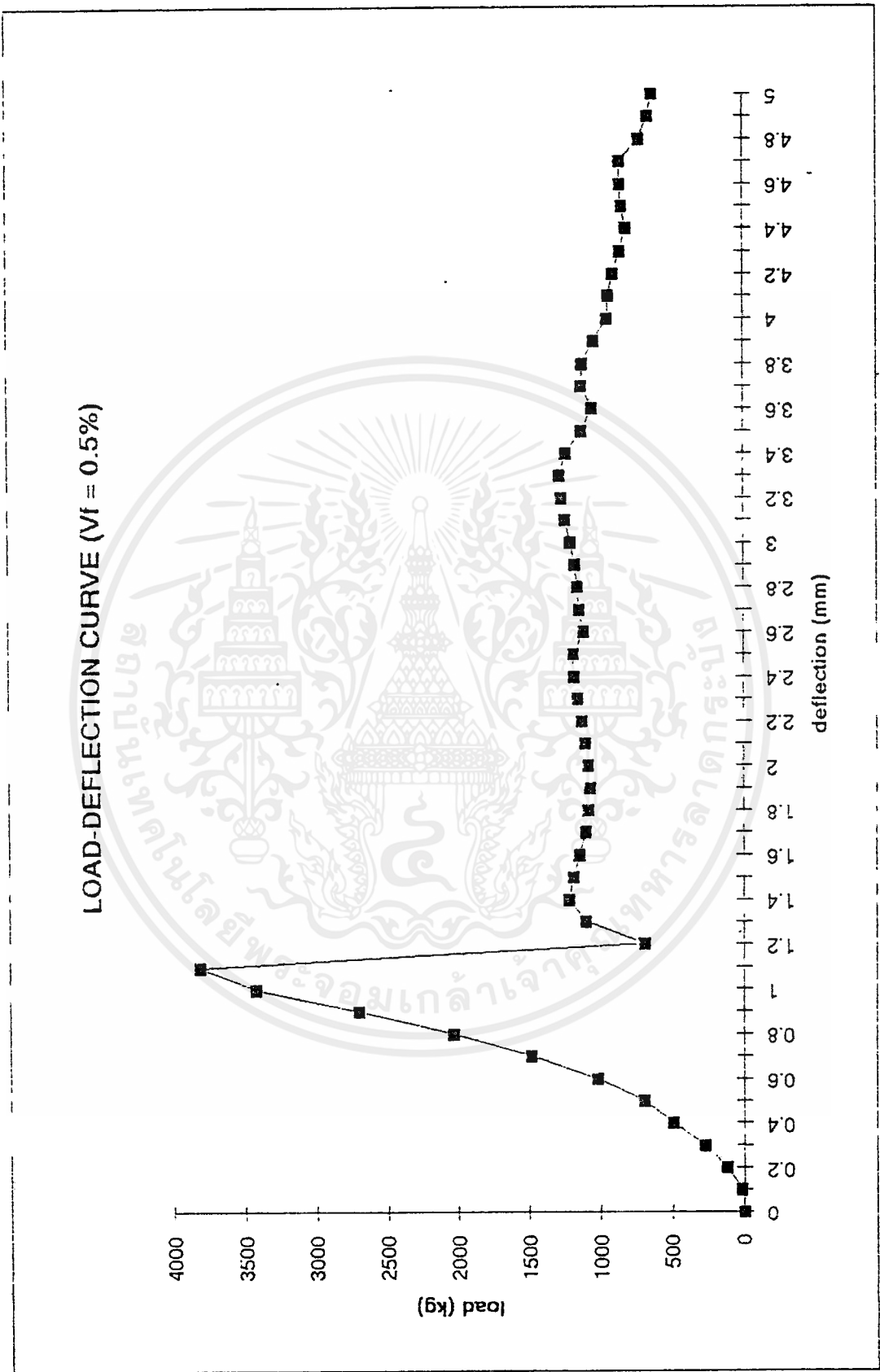


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

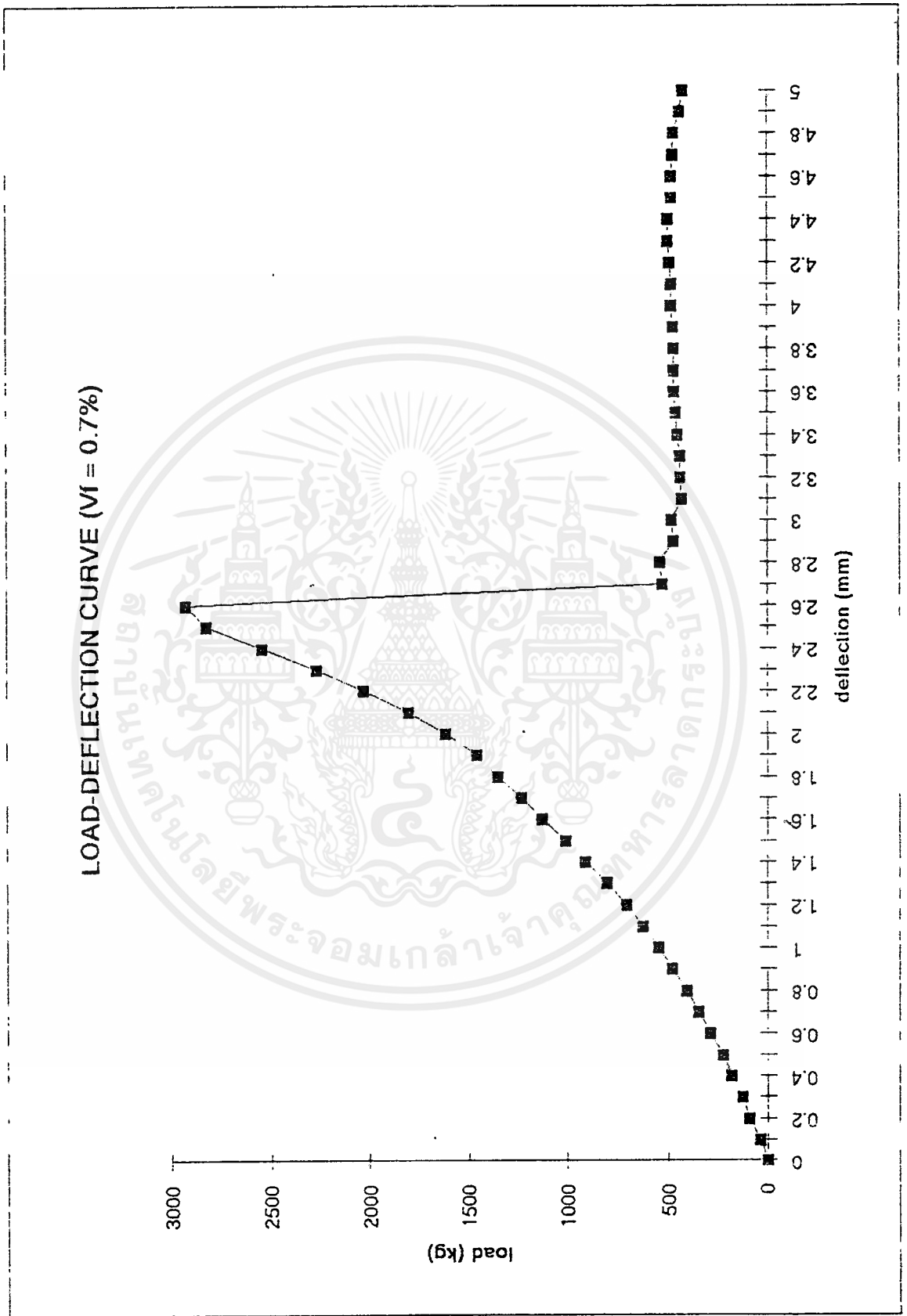
**LOAD-DEFLECTION ( $V_f = 0\%$ ) No. 5**



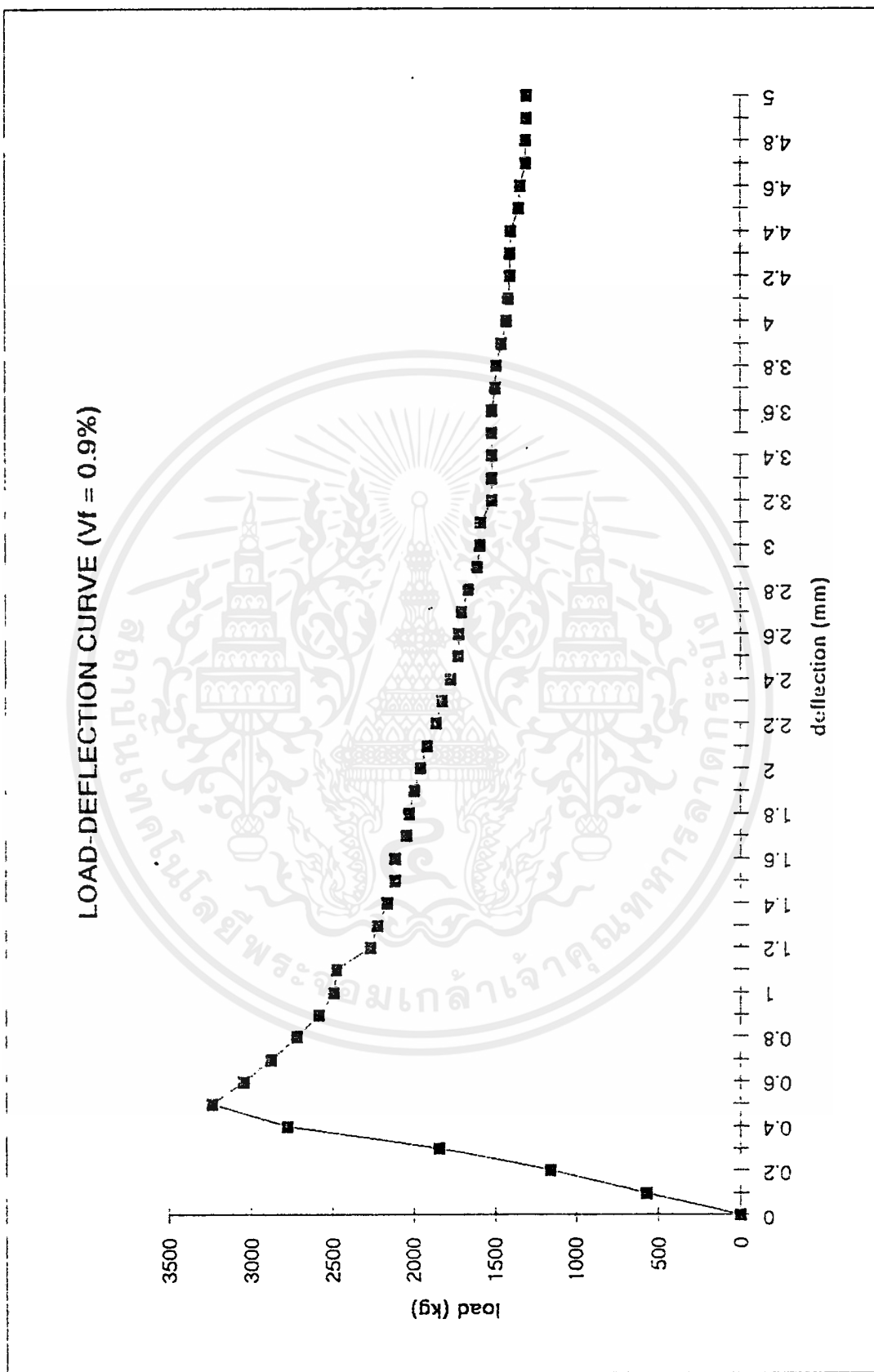
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



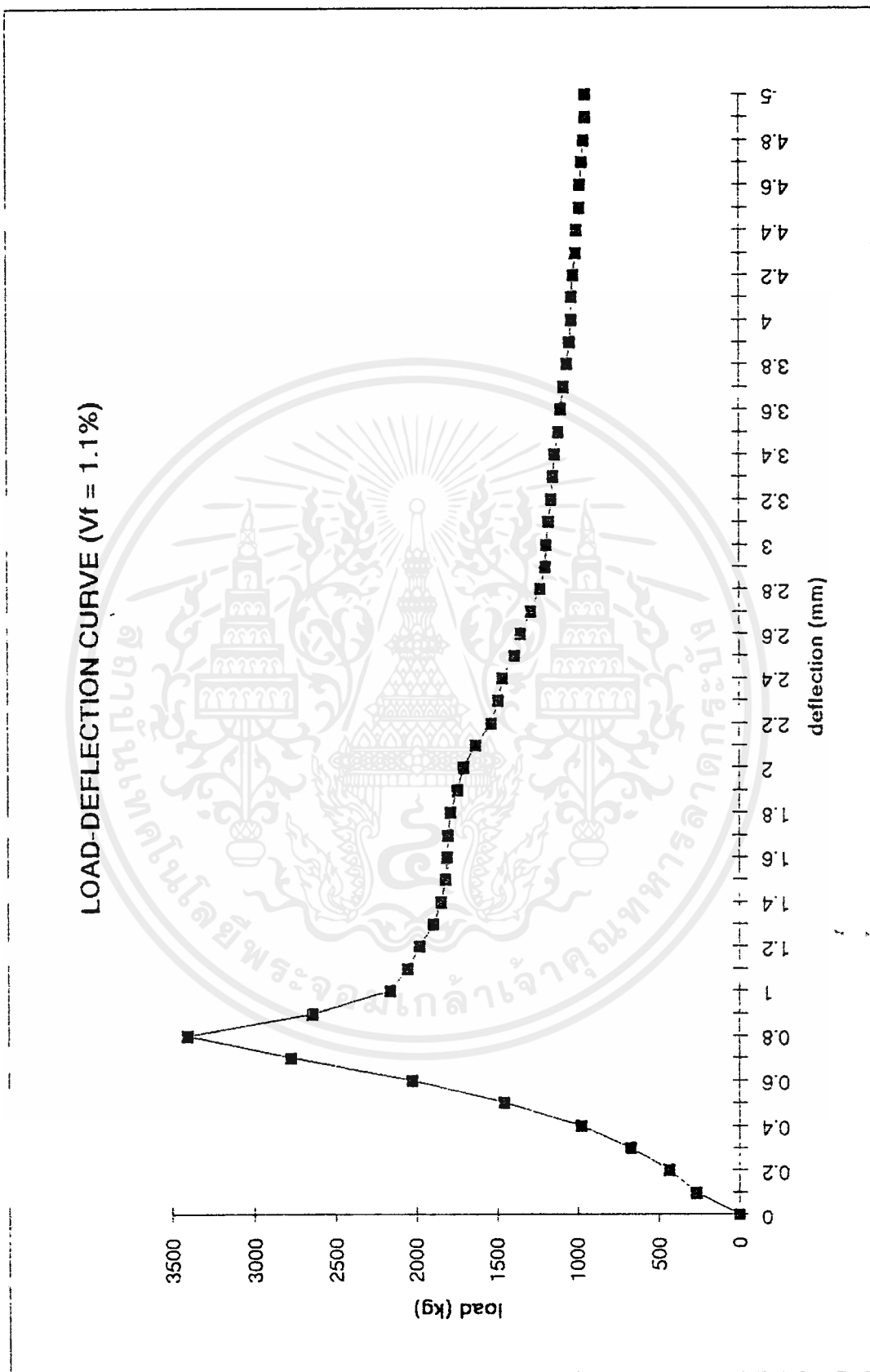
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



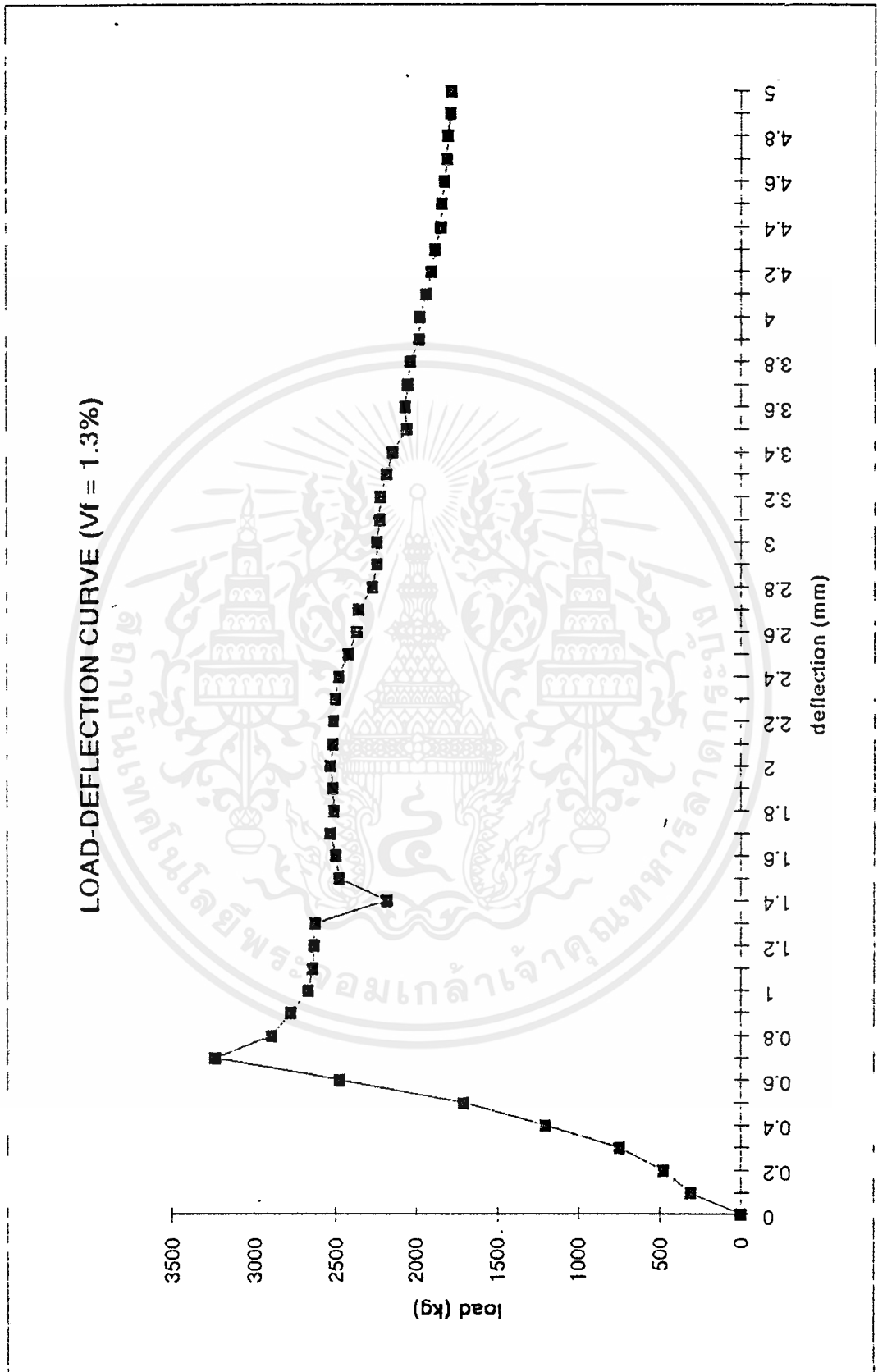
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



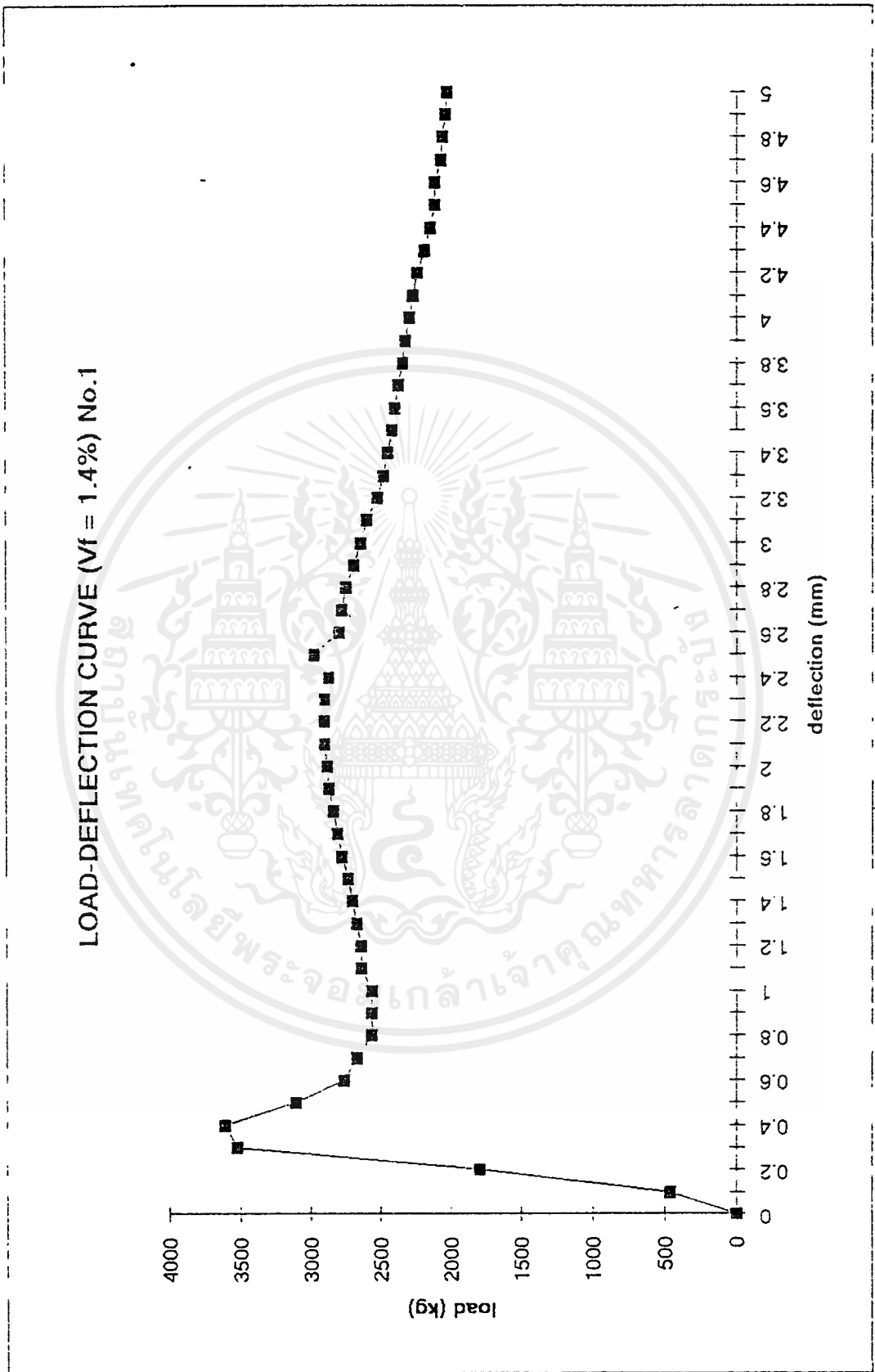
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



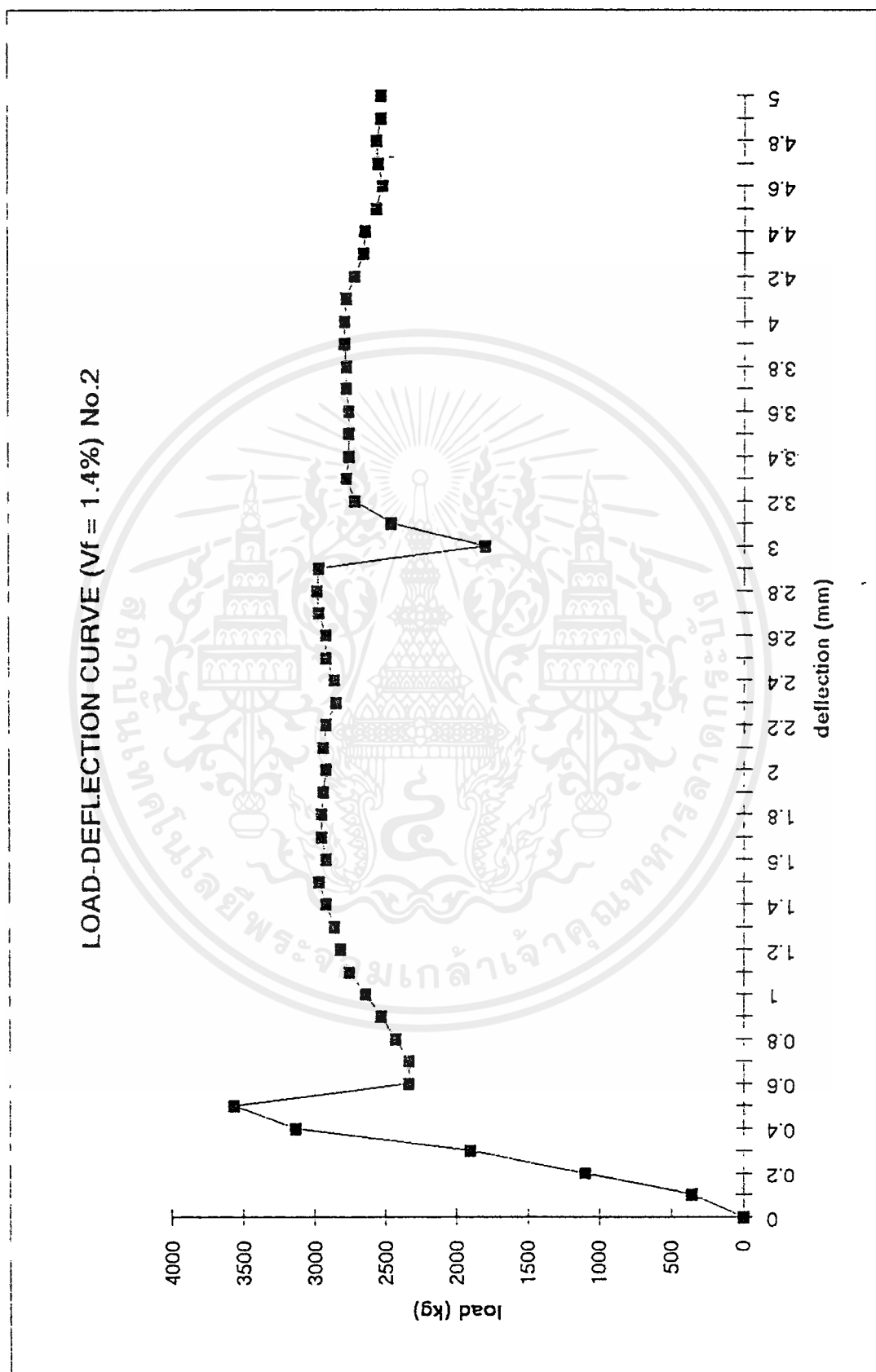
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



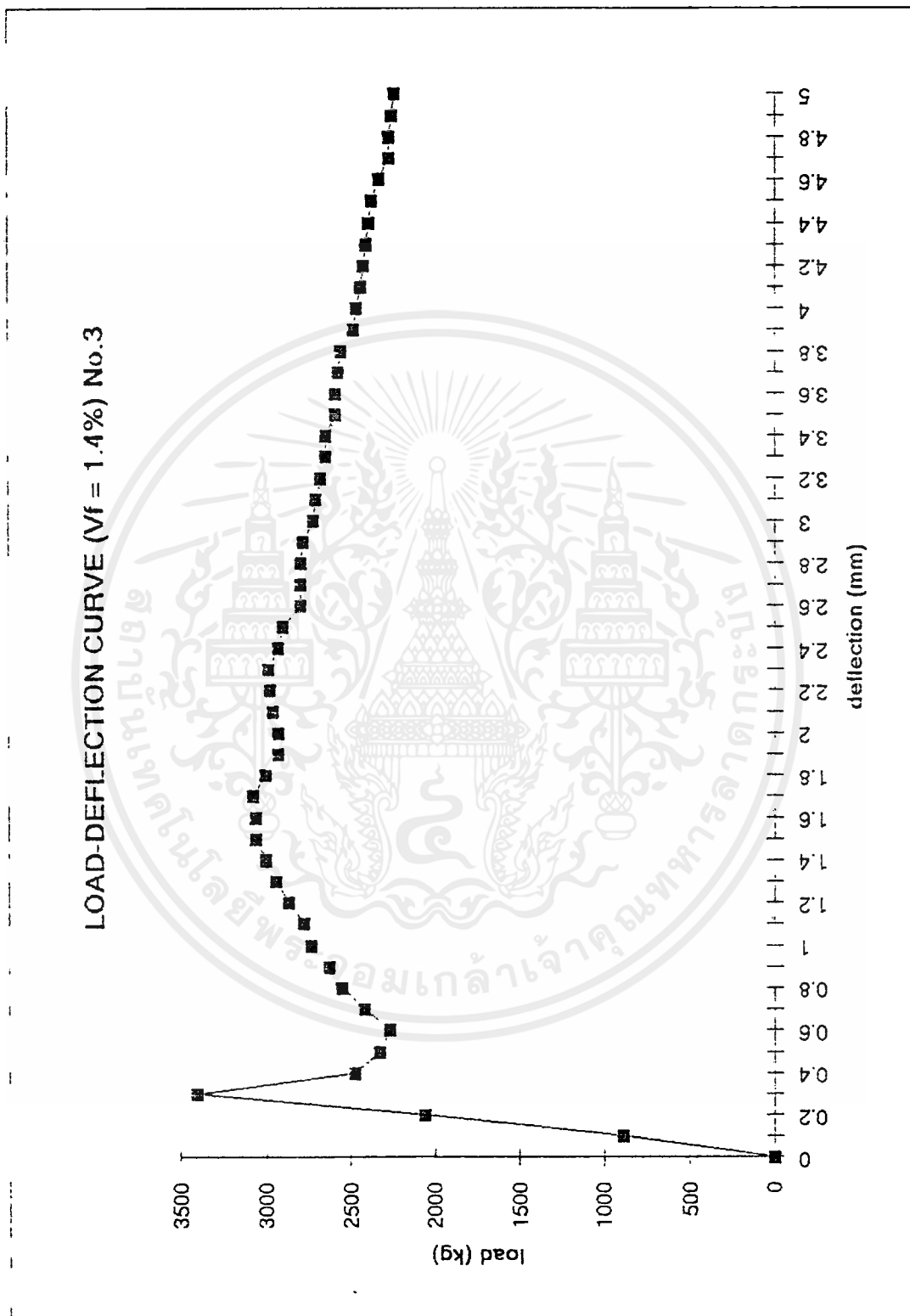
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



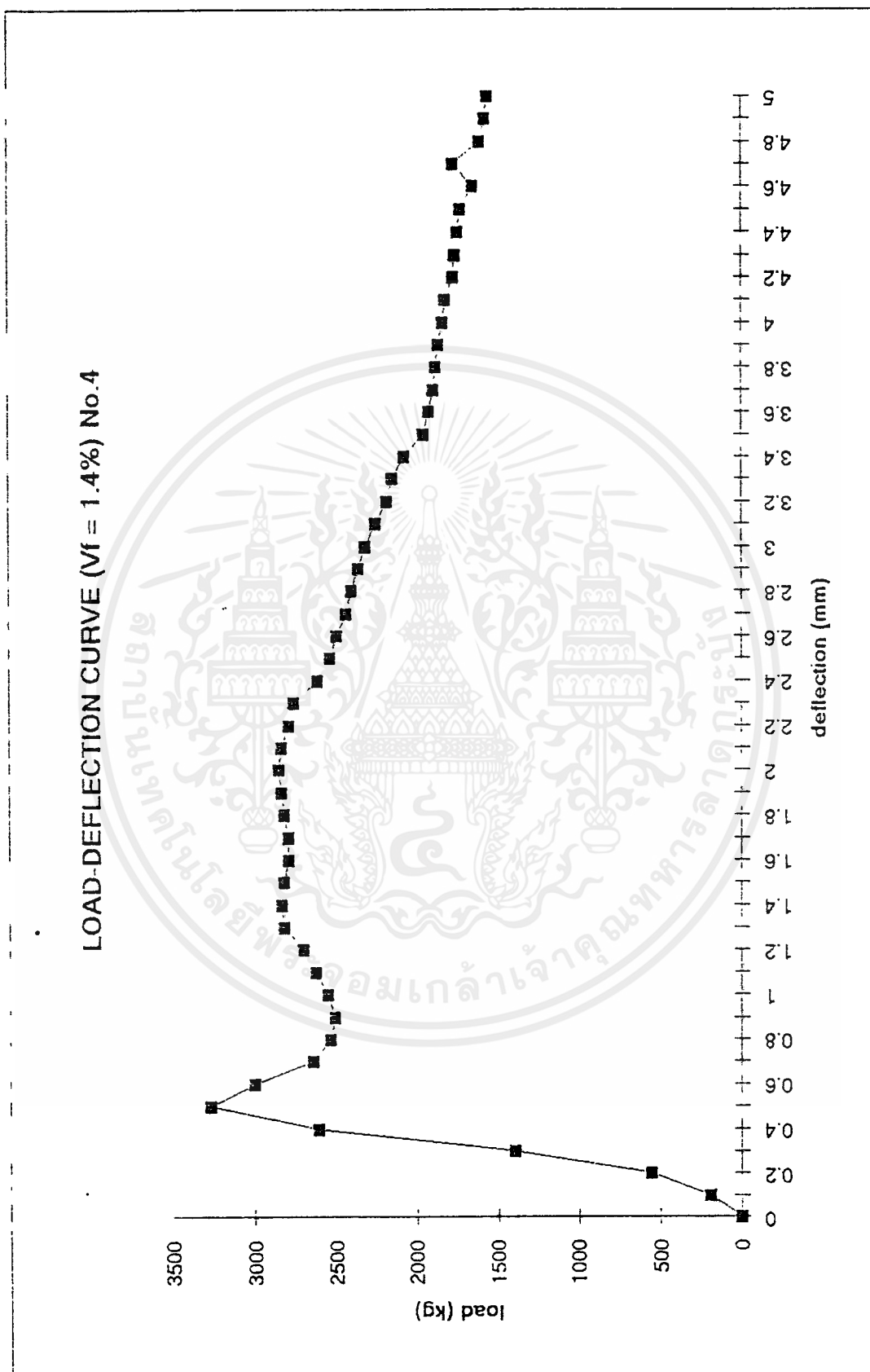
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



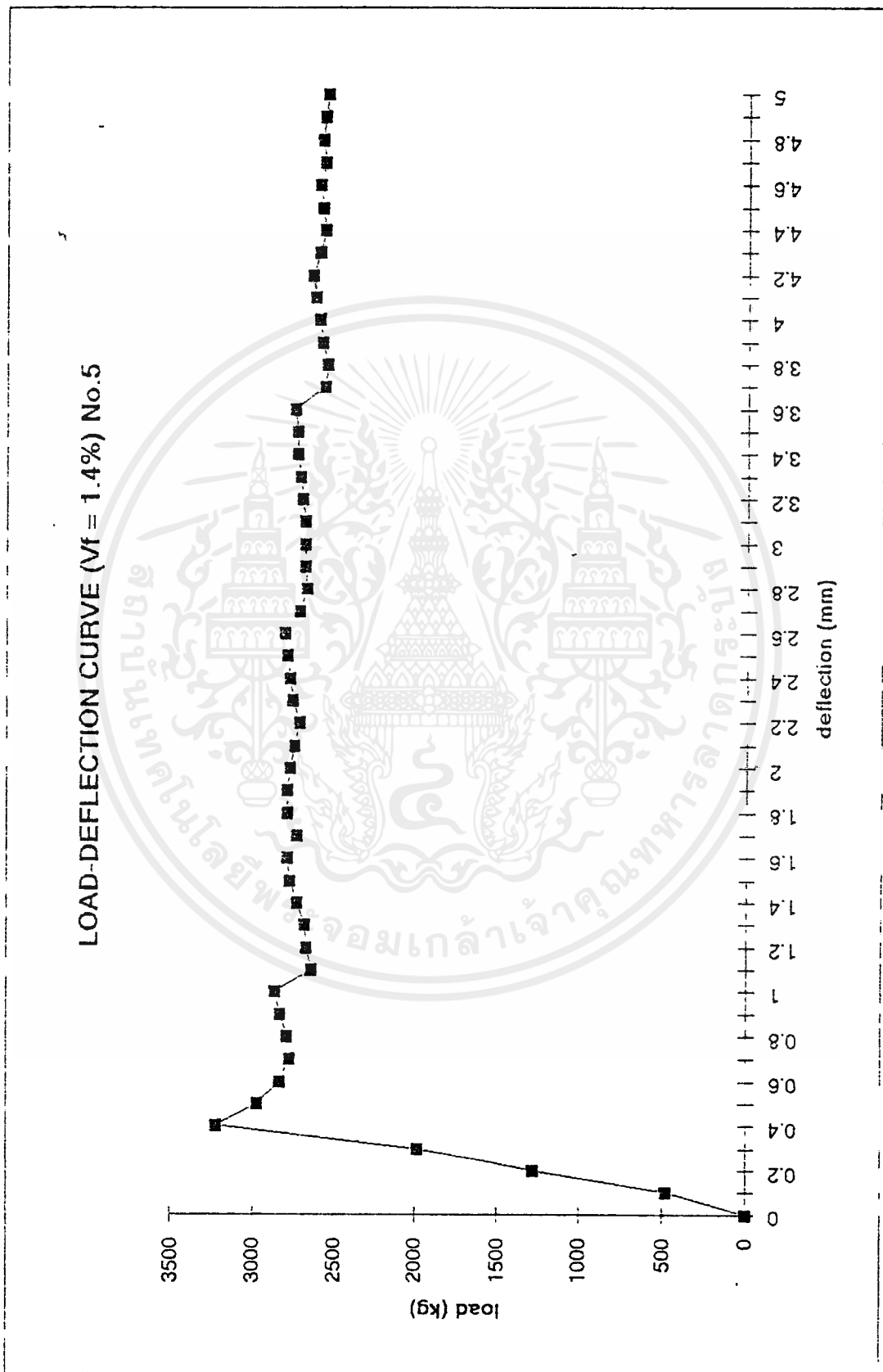
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



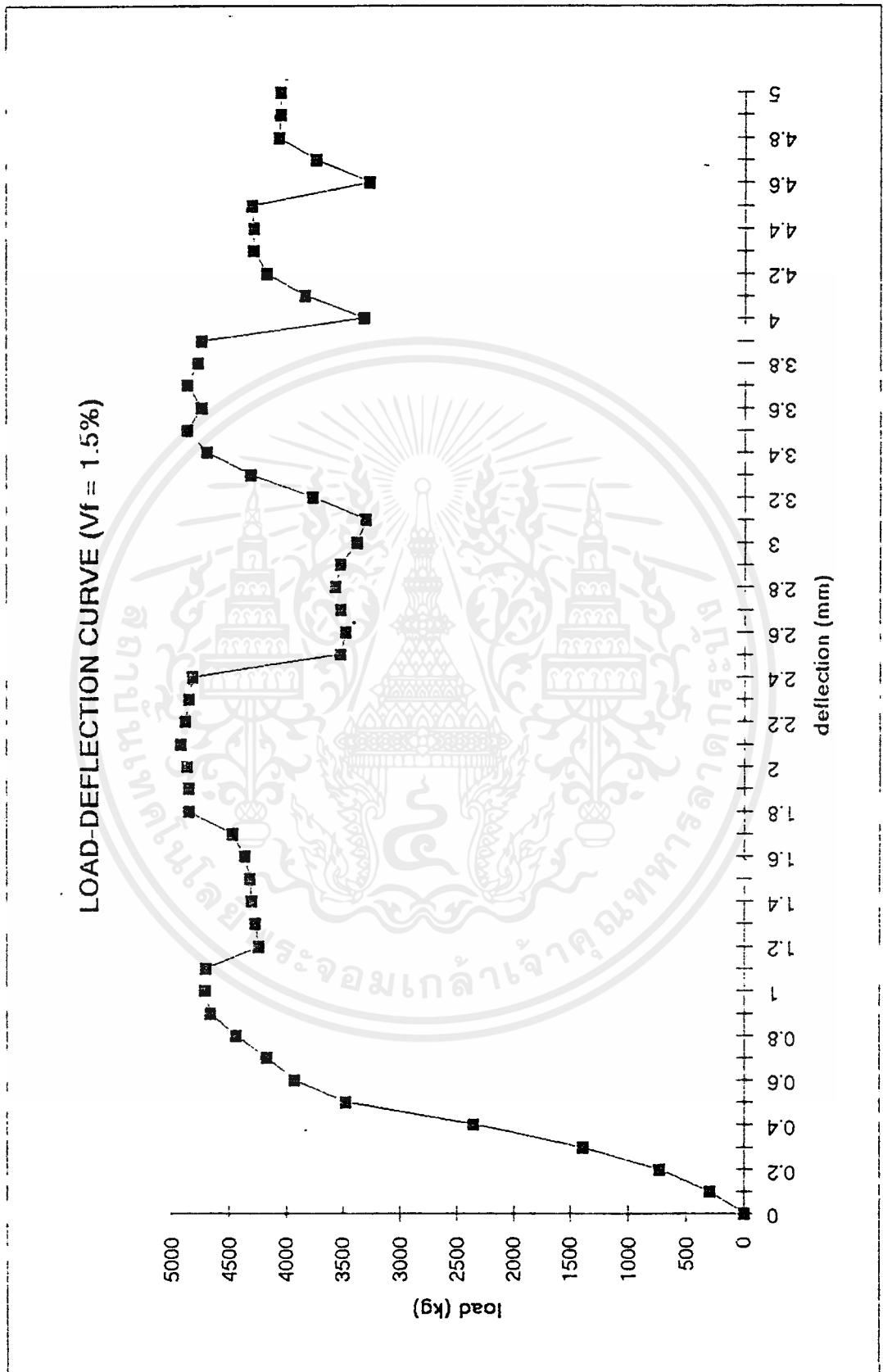
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



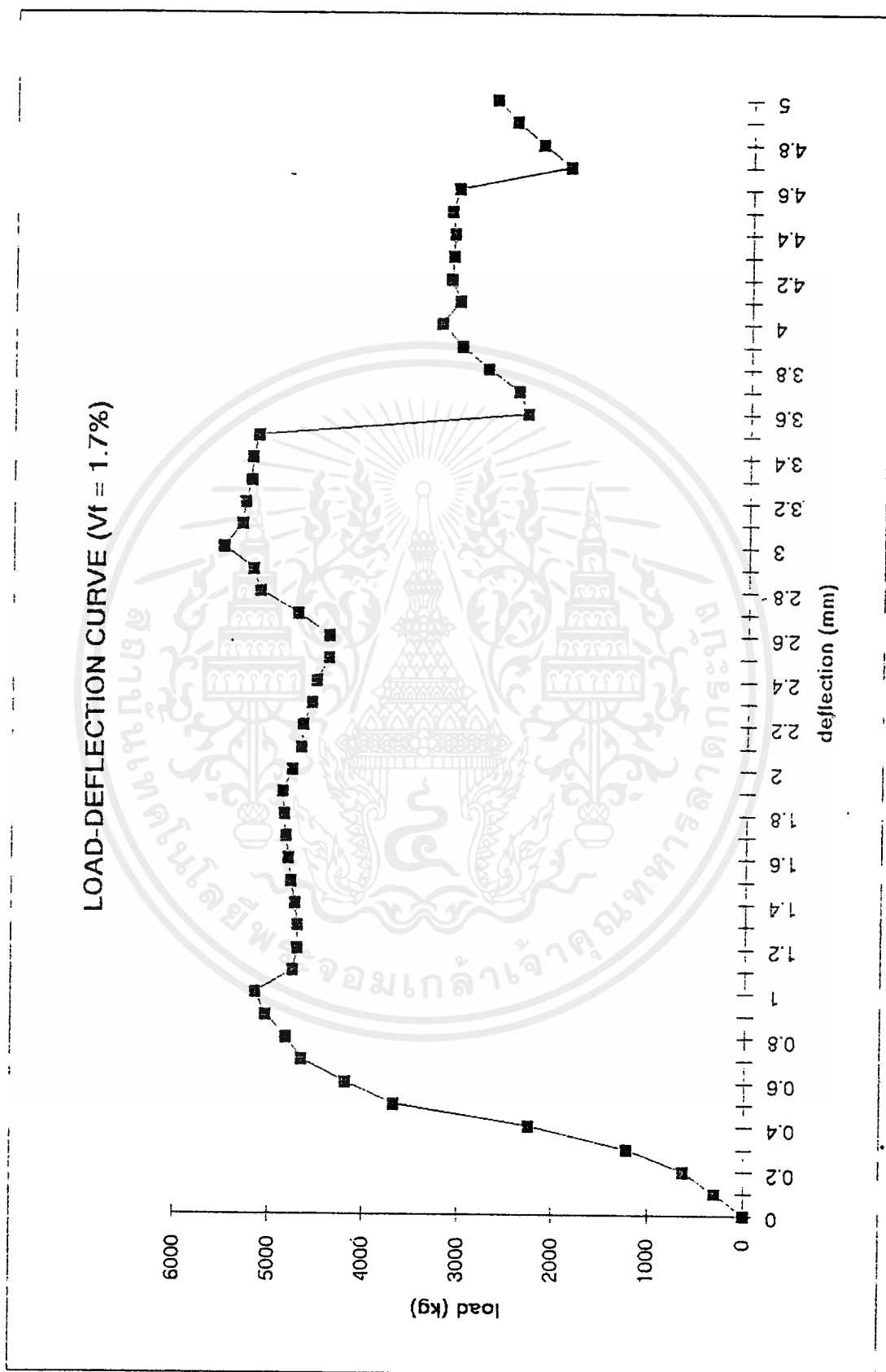
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



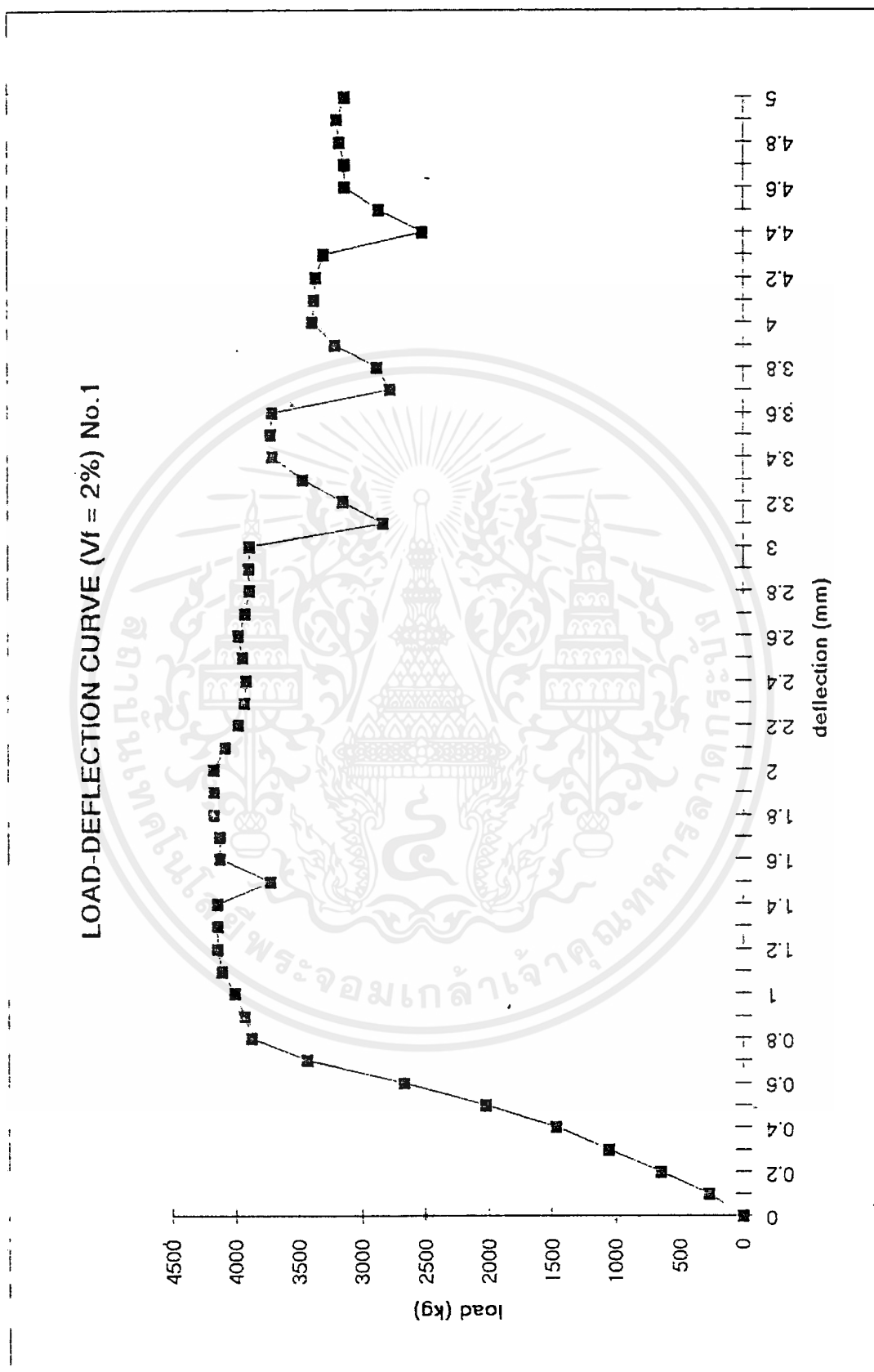
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



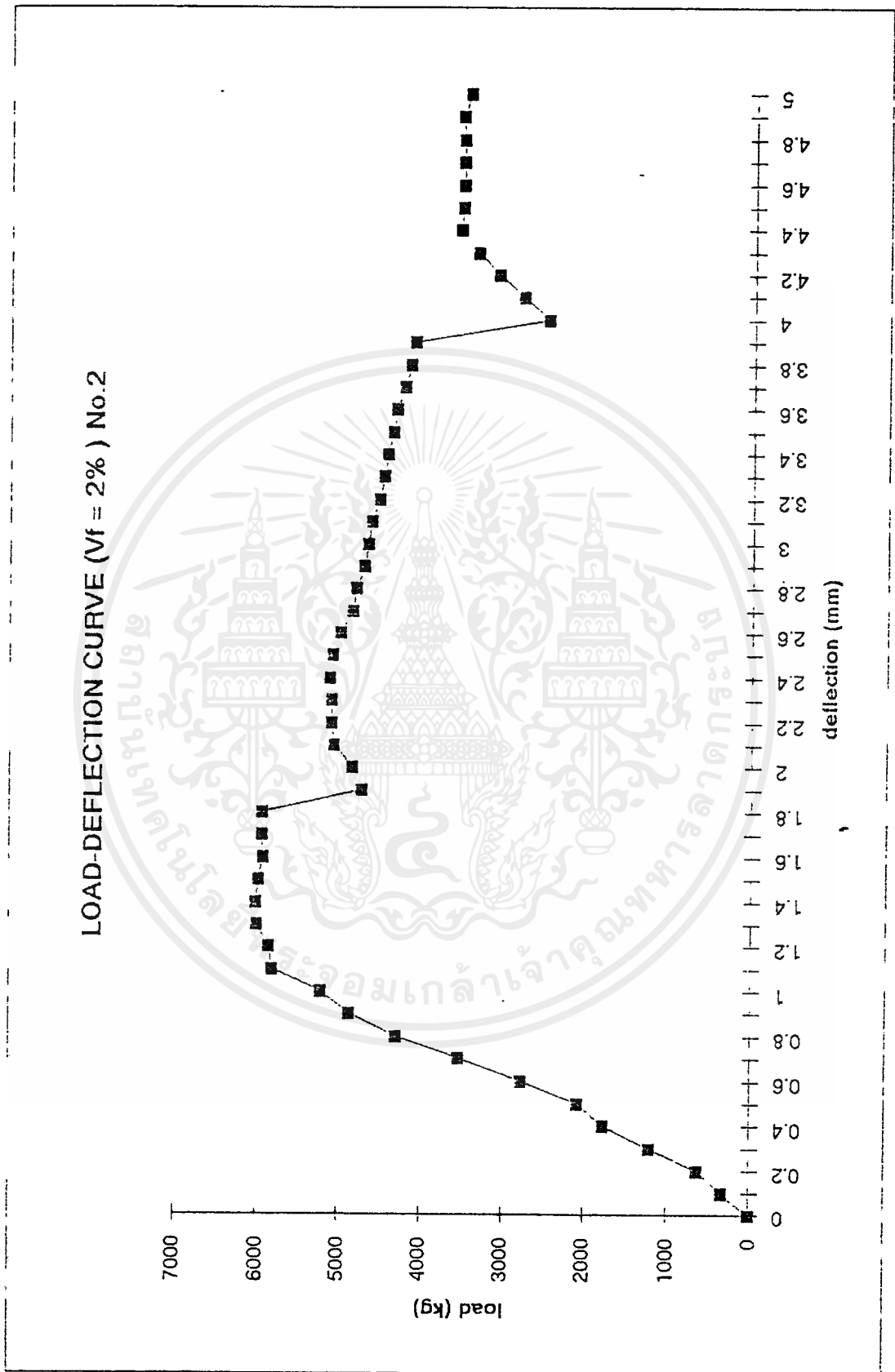
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



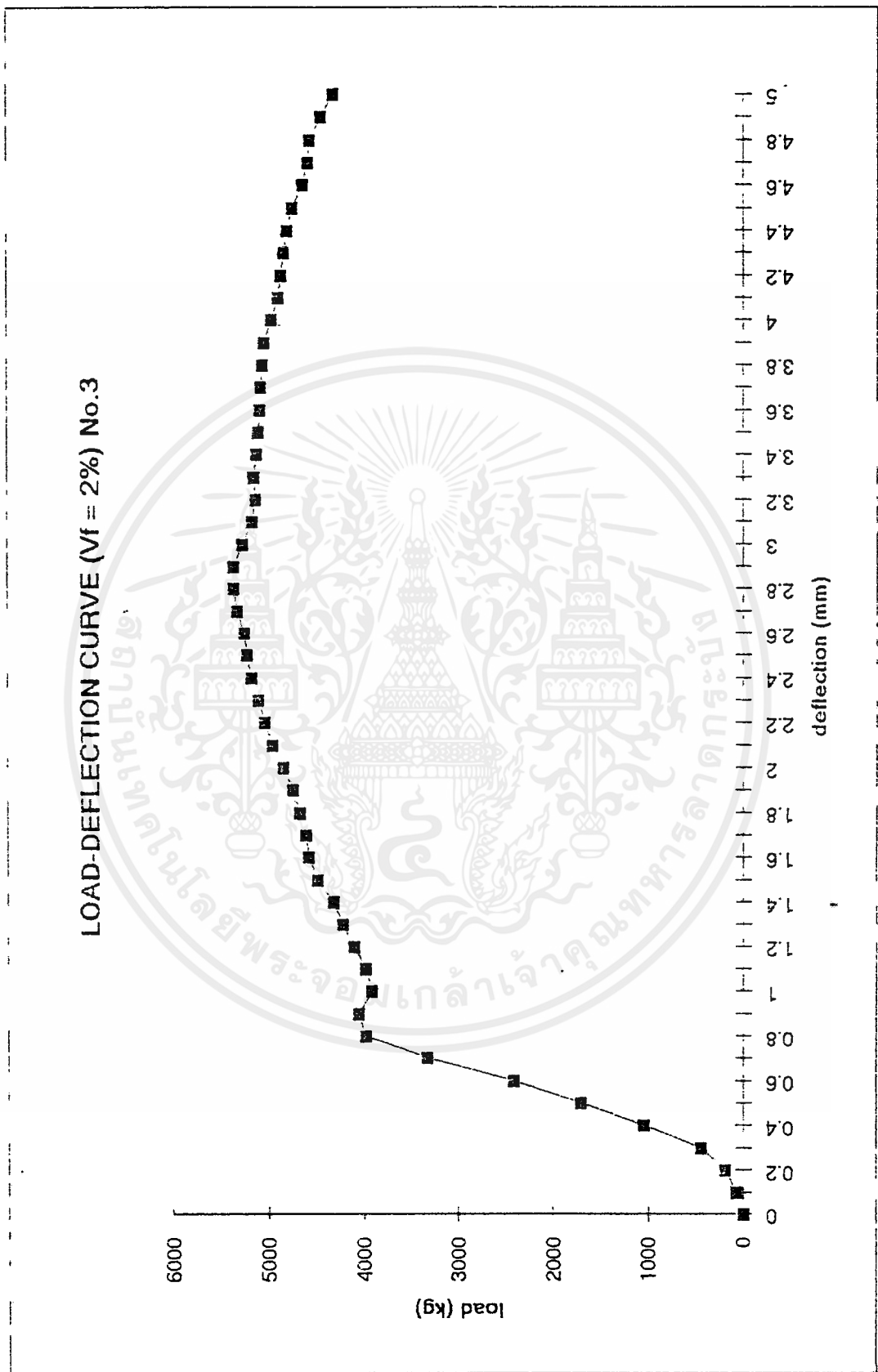
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



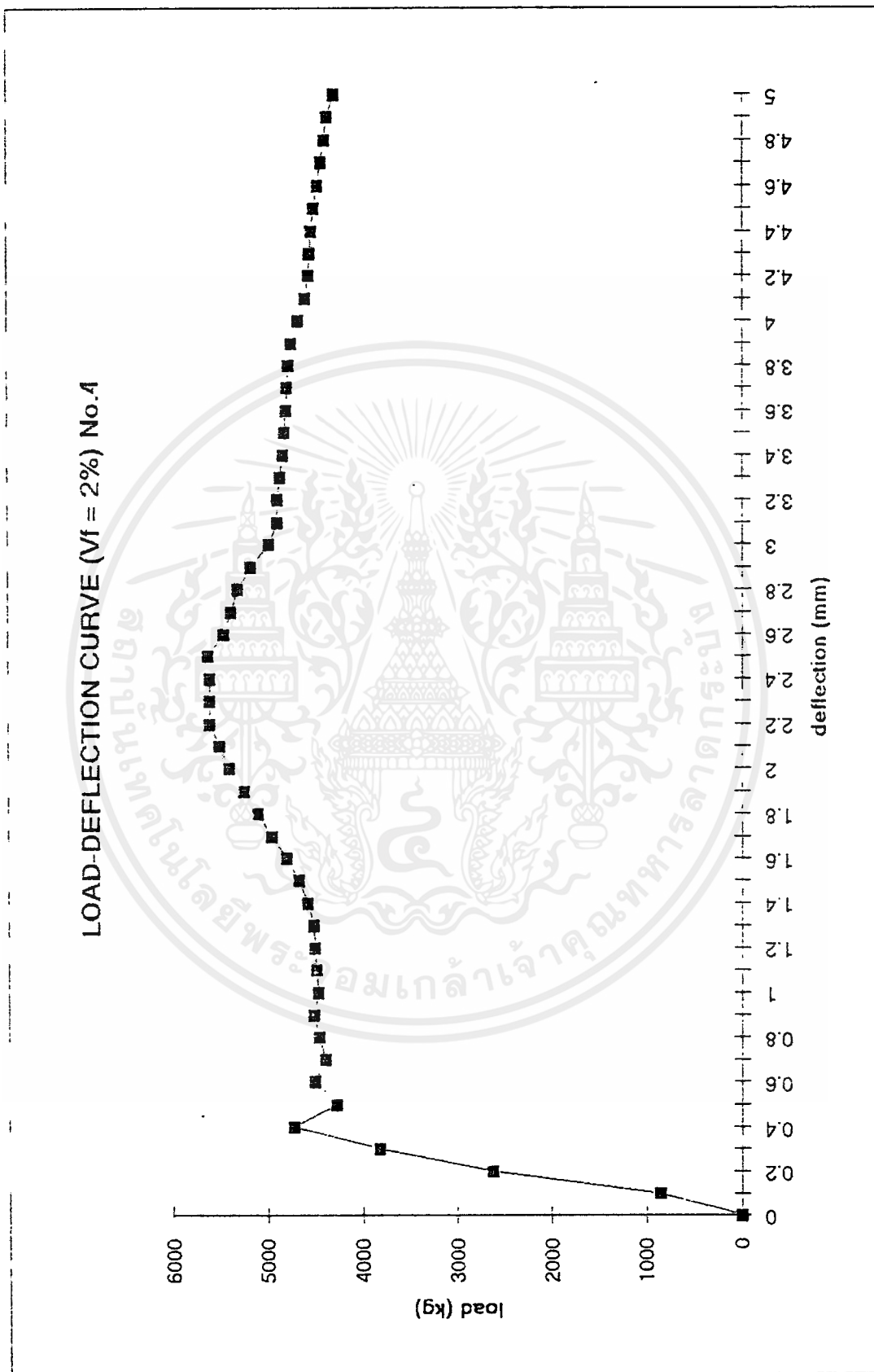
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



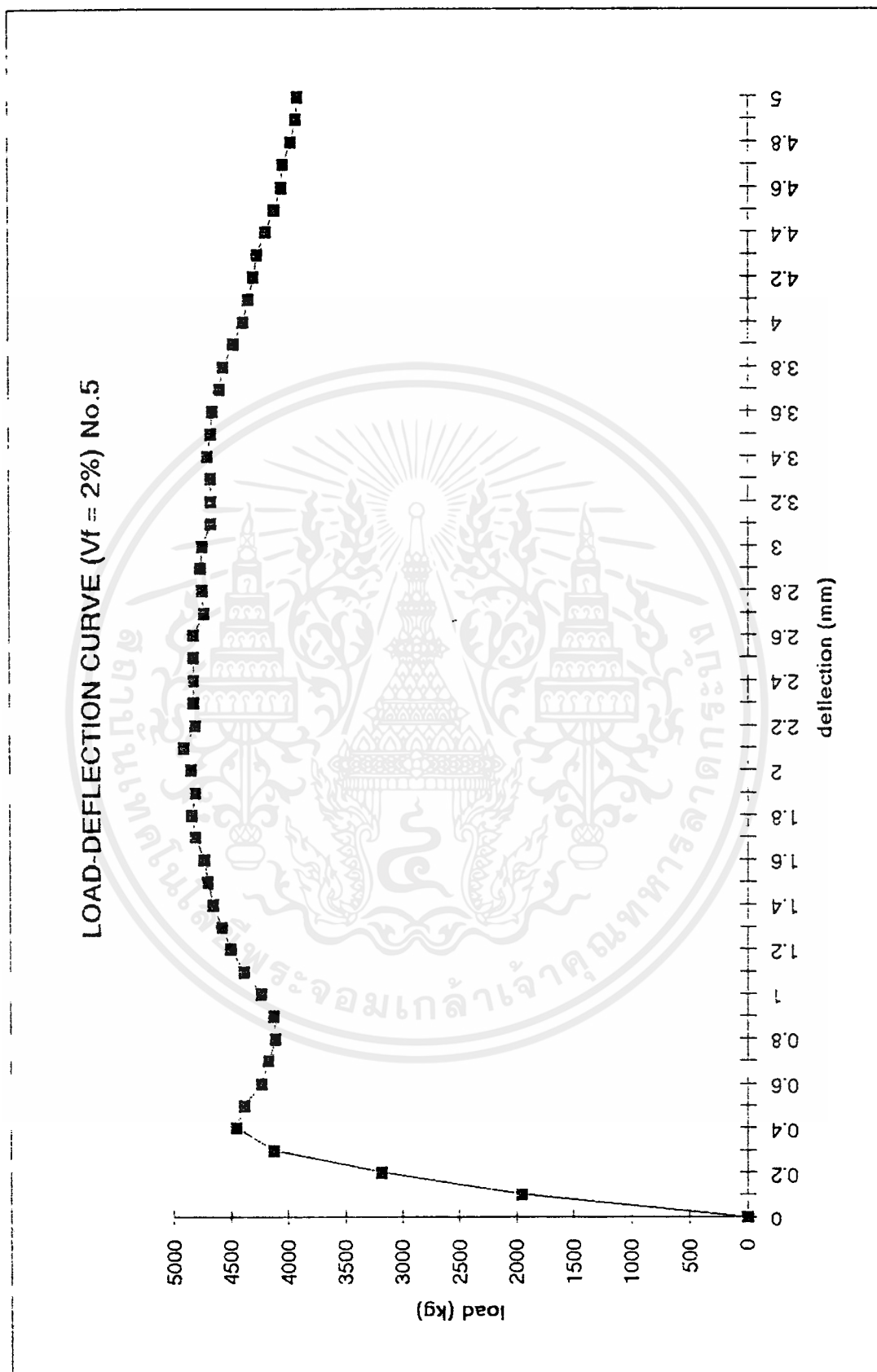
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



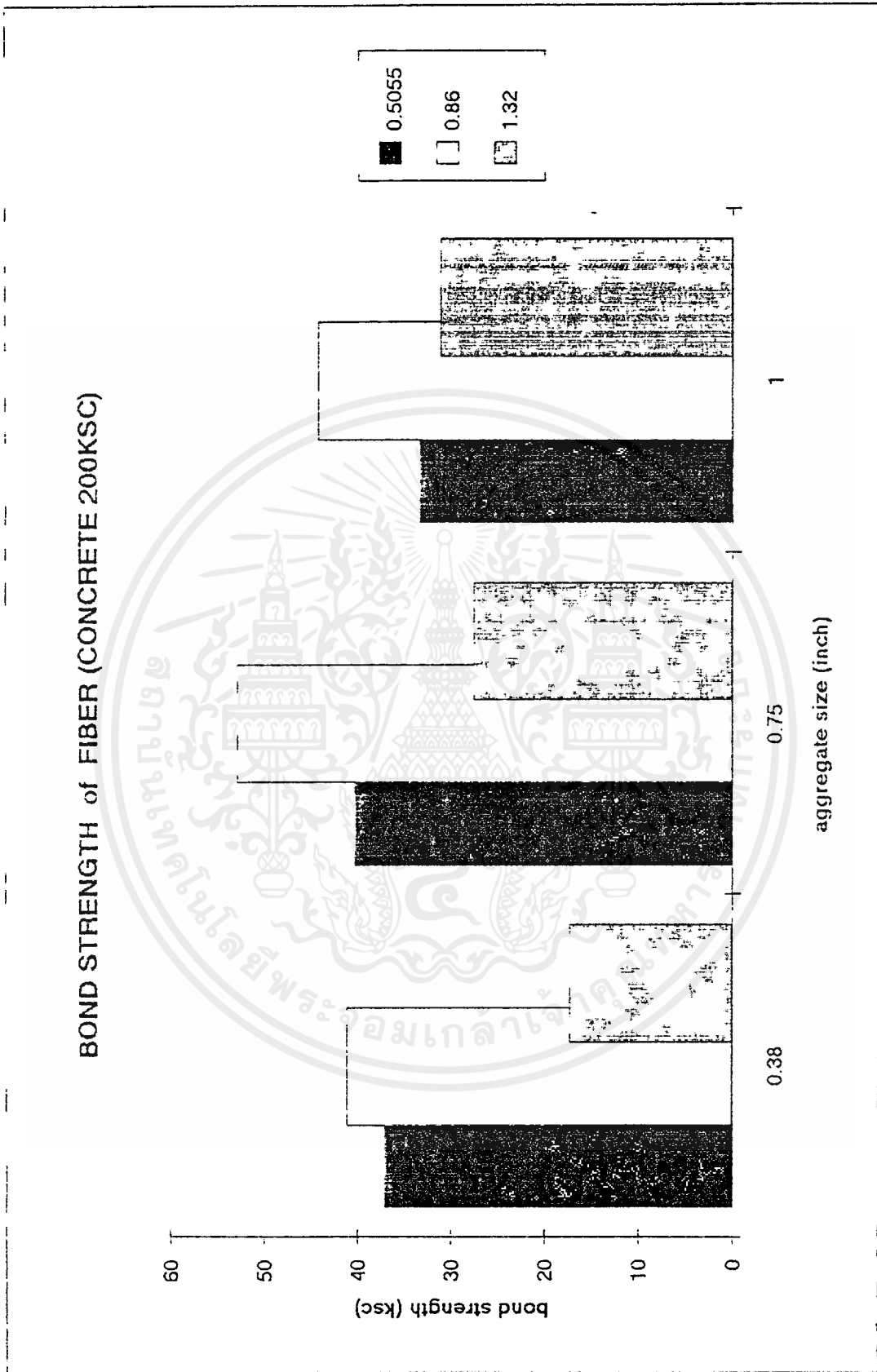
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



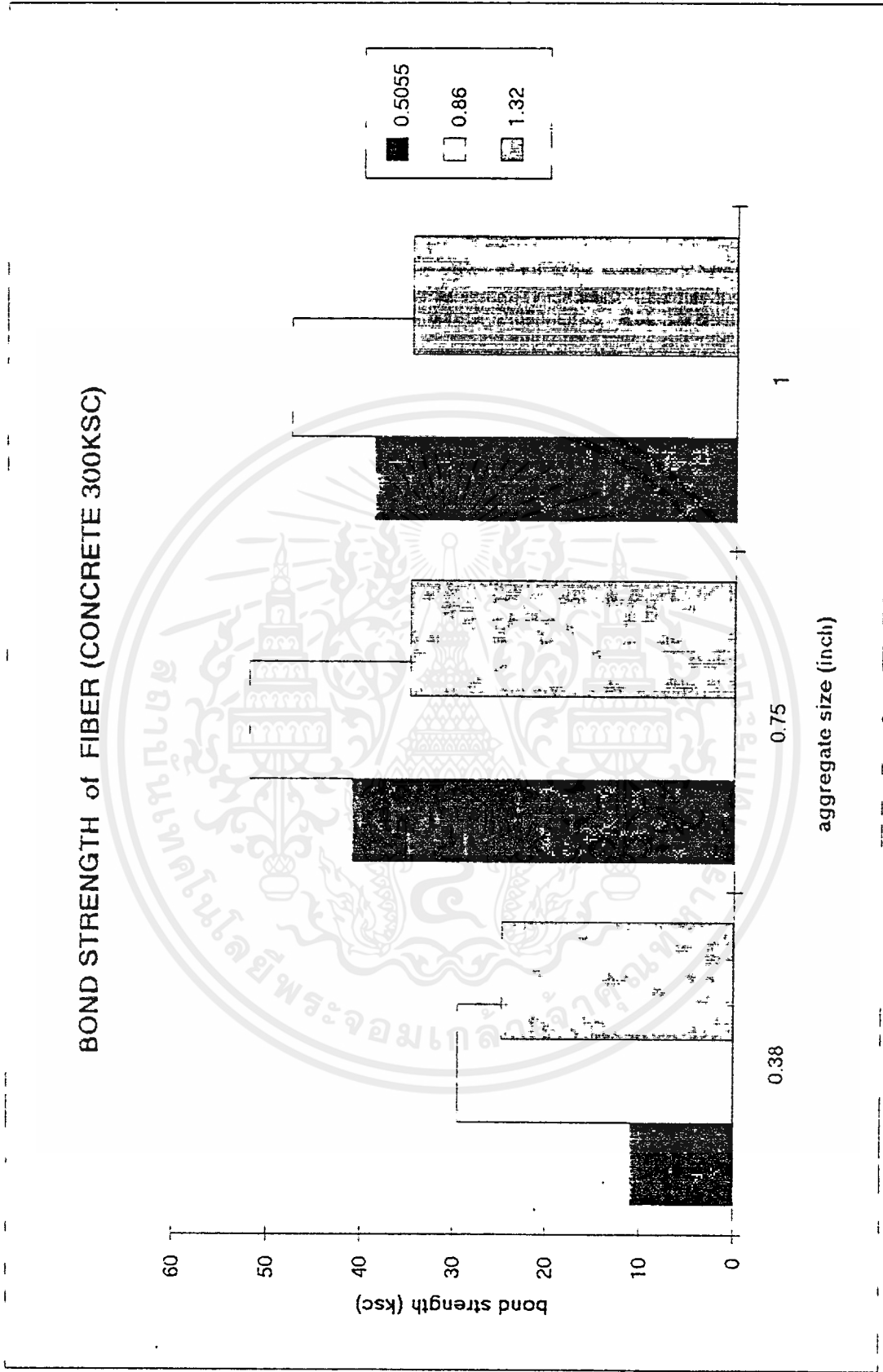
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



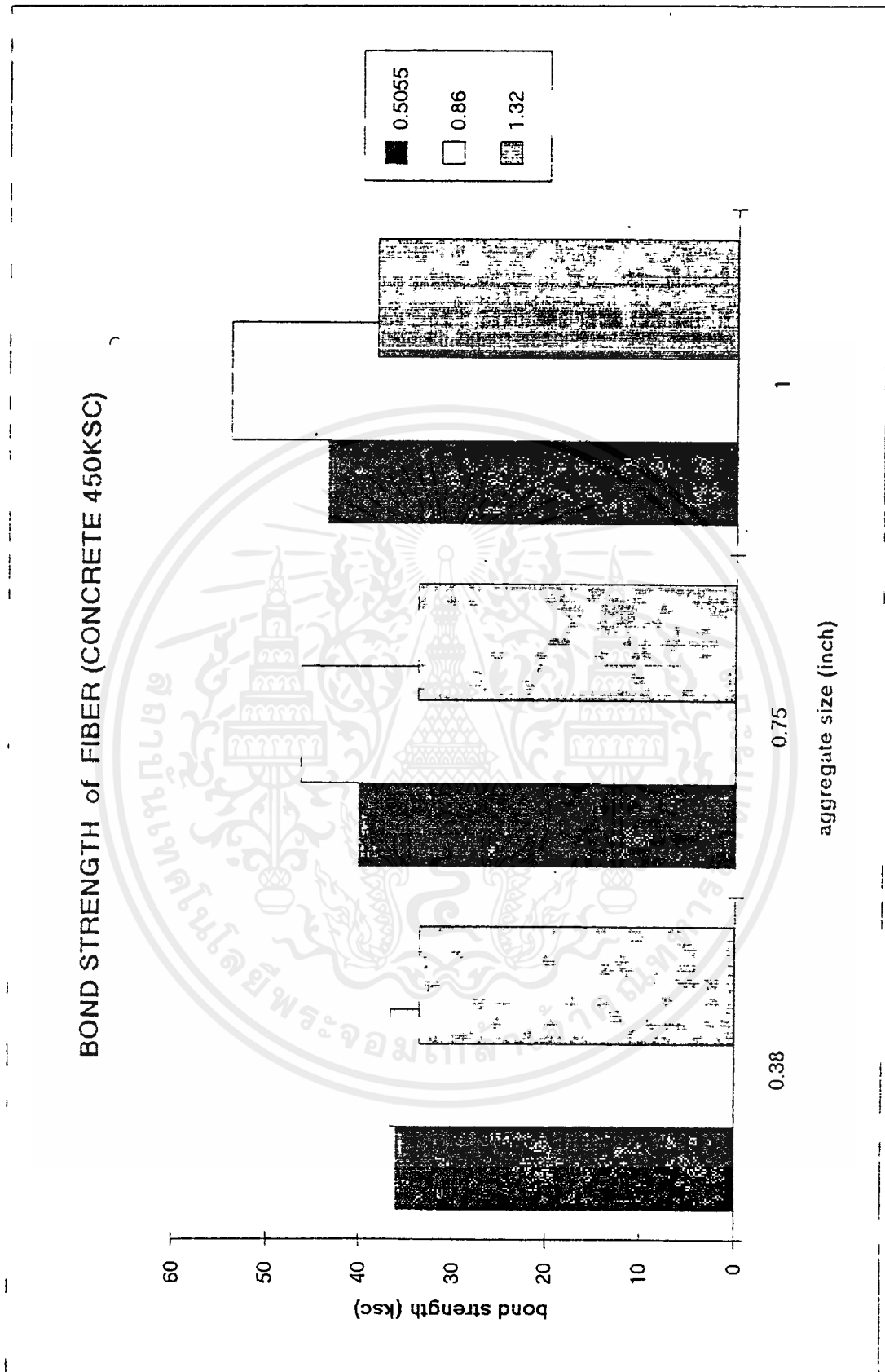
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



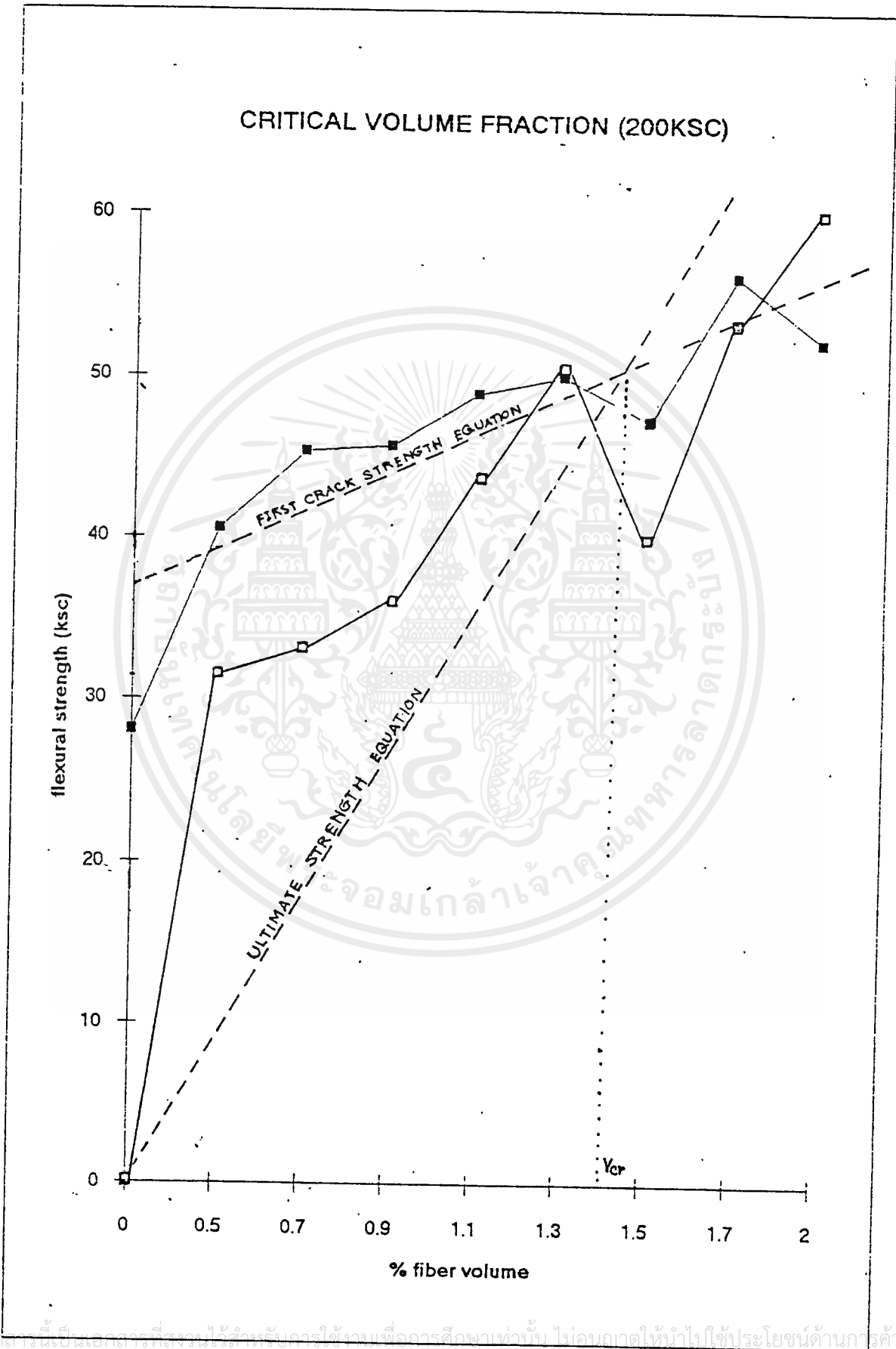
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

First Crack Strength Equation  $Y = 11.437 X + 33.54$

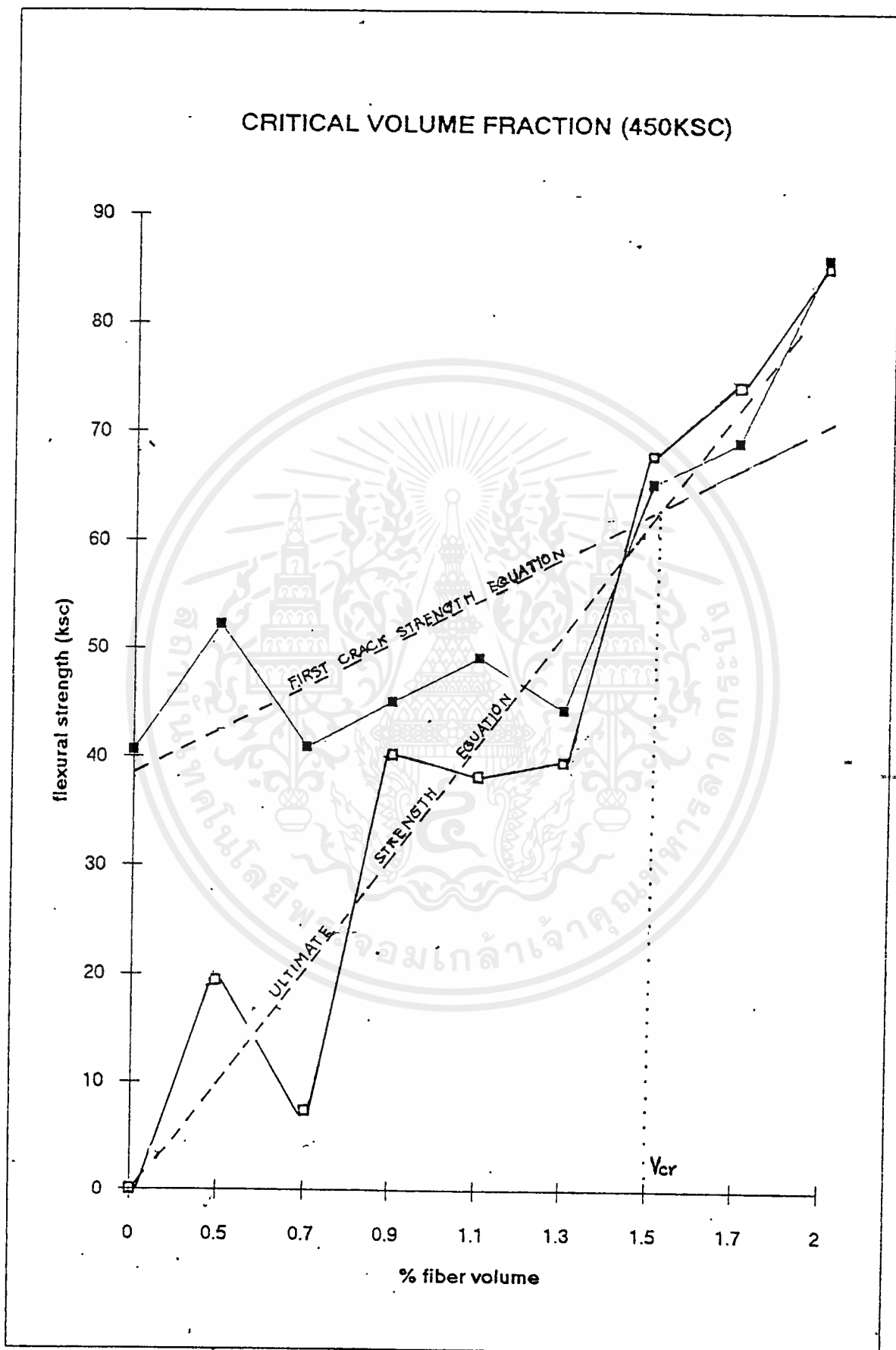
Ultimate Strength Equation  $Y = 33.73 X$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

First Crack Strength Equation  $Y = 19.164 X + 33.06$

Ultimate Strength Equation  $Y = 40.09 X$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงคุณสมบัติที่สำคัญ ๆ ของ FRC อันได้แก่ Compressive Strength , Splitting Tensile Strength , Flexural Strength (Third Point Loading) , และ Toughness นอกจากนี้แล้วการทดลองในโครงการงานพิเศษนี้ ยังให้ผลการทดลองเกี่ยวกับ Bond Strength และ ค่าความยาววิกฤต ของไฟเบอร์ที่สามารถ เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการทดลองในภาคหน้า

### 6.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 6.1.1 ค่ากำลังรับแรงอัดประลัย (Compressive Strength)

ถ้าดูในบทที่ 3 ของโครงการงานพิเศษนี้จะเห็นว่าไม่มีทฤษฎีเกี่ยวกับการรับแรงอัดของ FRC เลข เนื่องจากโดยวัตถุประสงค์หลักของการผลิต FRC ในครั้งแรกนั้นคือต้องการที่จะปรับปรุงพฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นจึงไม่มีใครสนใจในเรื่องทฤษฎีการรับแรงอัดของ FRC เลข อย่างไรก็ตามก็ได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงอัดของ FRC และพอจะสรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัดของ FRC ขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ

1. อัตราส่วนผสมของไฟเบอร์ (fiber volume fraction)
2. รูปร่างลักษณะของไฟเบอร์ (fiber geometry)
3. ส่วนประกอบที่ใช้ทำคอนกรีต (matrix composition)

ในการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของไฟเบอร์ลงใน FRC นั้นจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของ FRC ให้เพิ่มขึ้นจากเดิมตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มลงไป แต่ในช่วง  $V_f = 0-0.7\%$  อัตราการเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับพลังงานจะมีค่าสูงกว่าในช่วงที่ค่า  $V_f$  มีค่าสูงกว่านั้น

ส่วนของปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างไฟเบอร์นั้น สามารถแยกได้ออกเป็น 2 อย่าง คือ รูปร่างลักษณะของตัวไฟเบอร์ และ ค่าอัตราส่วนระหว่าง ความยาวของไฟเบอร์ กับ เส้นผ่าศูนย์กลาง (aspect ratio) ซึ่งค่า aspect ratio จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อ FRC ที่ใช้ไฟเบอร์ตรง (straight fiber) ในการช่วยเพิ่มความเหนียวฉีก (ductility) ให้กับ FRC เมื่อเพิ่มความยาวให้กับไฟเบอร์ แต่ถ้าเพิ่มความยาวของไฟเบอร์มากเกินไปก็จะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการผสม คอนกรีตกับไฟเบอร์ ส่วนลักษณะและรูปร่างของไฟเบอร์ที่จะใช้ (เช่น แบบ crimp, แบบ hook) จะมีผลช่วยเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของ FRC ให้เพิ่มขึ้น ค่า aspect ratio จะมีบทบาทในคุณสมบัติของ FRC ที่ใช้ไฟเบอร์ที่มีรูปร่างอื่น ๆ น้อยกว่าที่ใช้ไฟเบอร์เส้นตรง

ในเรื่องส่วนประกอบของเมตริกซ์นั้น จะมีผลต่อคุณสมบัติของ FRC ด้วยกัน 2 ประการ คือ 1. กำลังรับแรงอัด 2. คุณสมบัติการดูดซับพลังงาน ถ้ามีการผสม silica fume ลงไปใน FRC แล้วจะช่วยเพิ่มกำลังแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง ไฟเบอร์และเมตริกซ์ ทำให้กำลังรับแรงอัดของ FRC เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ คุณสมบัติความเปราะของเมตริกซ์จะมีผลต่อการดูดซับพลังงาน ตามปกติแล้ว คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่ำกว่าจะมีความเปราะสูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูงกว่า ซึ่งมีผลทำให้การเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวของคอนกรีตนั้นไม่เหมือนกันโดย ในคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่ำกว่าจะใช้ปริมาณไฟเบอร์ในการผสมกับเมตริกซ์น้อยกว่า เพื่อสร้างคุณสมบัติความเหนียวที่เท่ากันในคอนกรีตกำลังอัดประลัยสูงกว่า

นอกจากนี้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นของ FRC มีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติอีกด้วย จากผลการทดลอง กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปกติ 200 ksc เมื่อผสมไฟเบอร์แล้วปรากฏว่าสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดประลัย ที่  $V_f = 1.4\%$  และ  $2\%$  ได้ประมาณ 16 % และ 31% ตามลำดับ ส่วนที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 450 ksc ที่  $V_f = 1.4\%$  และ  $2\%$  จะสามารถเพิ่มได้ 2% และ 14% ตามลำดับ

#### 6.1.2 ค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (Splitting Tensile Strength)

การทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติการรับแรงดึงของ FRC อาจทำได้ 2 วิธี คือ แบบ Direct Tension Test กับ แบบ Splitting Tension Test ซึ่งใช้ในการทดลองนี้ โดยแท้จริงแล้วการทดสอบแบบแรกจะให้ค่าที่ถูกต้องกว่าแบบที่สองอยู่แล้ว แต่มักจะไม่เป็นที่นิยมในการทดลองในทางปฏิบัติ เนื่องจากการทำตัวอย่างการทดลองทำได้ยากและไม่เหมาะสมสำหรับการหล่อคอนกรีต

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงของ FRC นั้นก็เหมือนกับของการรับแรงอัด คือ ปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้ผสม, รูปร่างลักษณะและความสั้นยาวของไฟเบอร์, ส่วนประกอบของสารที่ทำเป็นเมตริกซ์หรือคอนกรีตนั่นเอง

จากทฤษฎีในบทที่ 3 เราสามารถคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงก่อนการแตกร้าวแบบ Direct Tension Test ได้จากสมการที่ 3.5 แล้วนำไปคูณกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นก่อนการแตกร้าวก็จะได้ค่าดังกล่าว ตัวอย่างของค่าการคำนวณแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 ท้ายบท

ถ้าสมมุติว่าค่า Splitting Tensile Strength ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่า Direct Tensile Strength จากผลการคำนวณแสดงว่าการผสมไฟเบอร์ไหละลงไปในคอนกรีตจะช่วยเพิ่มค่าของ "ความเครียด" ของคอนกรีตทำให้สามารถรับแรงกระทำ

ได้เพิ่มขึ้นก่อนเกิดการแตกร้าว จากตารางค่าความเครียดของคอนกรีตแต่เดิมมีค่าประมาณ .0001 และสามารถรับกำลังได้ 30 ksc แต่เมื่อผสมไฟเบอร์โพลีโพรพิลีนค่าความเครียดก็ถูกทำให้เพิ่มขึ้นมาที่ประมาณ .0002 และสามารถรับกำลังได้เพิ่มถึง 64 ksc ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงประลัยหลังเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.22

จากผลการทดลองที่ค่ากำลังอัดประลัย 200 ksc ค่า Splitting Tensile Strength ที่  $V_c = 1.4\%$  และ  $2\%$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก plain concrete เท่ากับ 36% และ 64% ตามลำดับ ส่วนที่ค่ากำลังอัดประลัย 450 ksc ที่  $V_c = 1.4\%$  และ  $2\%$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 50% และ 115% ตามลำดับ

### 6.1.3 ค่ากำลังรับแรงดัดประลัย และค่าความเหนียว (Flexural Strength & Toughness)

การทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติของการรับแรงดัดของ FRC ทำได้โดยวิธี Third Point Loading จากผลการทดลองได้ผลดังนี้คือ ค่า Flexural Strength และค่าความเหนียวของ FRC แปรผันตามปริมาณของไฟเบอร์ที่เป็นส่วนผสม ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงดัดนอกจากปริมาณส่วนผสมของไฟเบอร์ก็คือ ค่า aspect ratio , fiber geometry , ขนาดของตัวอย่างทดสอบ และส่วนประกอบของสารเคมี

อิทธิพลของปริมาณส่วนผสมของไฟเบอร์ที่มีต่อ FRC ก็คือเมื่อปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้มีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนผสมวิกฤตแล้วค่า Flexural Strength จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากเกิดการแตกร้าว แต่ถ้ามีค่าเท่ากับค่าวิกฤตแล้ว ค่า Flexural Strength จะสามารถรับแรงกระทำได้เท่ากับที่รับไว้ก่อนหน้าที่จะเกิดการแตกร้าว

ค่า aspect ratio ของไฟเบอร์จะส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยโดยจะมีผลต่อค่า Bond Strength ระหว่างลวดกับคอนกรีต ถ้าไฟเบอร์ยังมีค่า aspect ratio มากขึ้นเท่าใด กำลังรับแรงของคอนกรีตก็ยิ่งดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัด คือ การผสมคอนกรีตกับไฟเบอร์อาจเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

ส่วนปัจจัยในเรื่องของ รูปร่างลักษณะของไฟเบอร์นั้นจะมีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยในแง่เดียวกับค่า aspect ratio คือ ถ้ารูปร่างของไฟเบอร์เอื้ออำนวยต่อการก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง ไฟเบอร์กับคอนกรีตได้ดีแล้ว ก็จะช่วยลดปริมาณไฟเบอร์ที่ต้องใช้ลงได้

และในเรื่องของขนาดของตัวอย่างการทดสอบนั้น ตามปกติแล้วมาตรฐาน ASTM กำหนดไว้ที่ขนาด 10x10x30 cm แต่ในการทดลองนี้ใช้คานทดสอบ ขนาด 15x15x80 cm อย่างไรก็ตาม ได้เคยมีผู้ทดสอบแล้วปรากฏว่าให้ค่าที่แตกต่างกันไม่มากนัก

สุดท้ายคือส่วนประกอบของคอนกรีตที่ใช้ผสมซึ่งถ้าต้องการให้คอนกรีตมีแรงยึดเหนี่ยวกับไฟเบอร์ได้ดี ควรมีการเติมสาร silica fume ลงในคอนกรีตด้วยจะทำให้กำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแบ่งออกได้ 2 อย่างคือ กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวแรก (first crack strength) และ กำลังรับแรงดัดที่จุดประลัยหลังการแตกร้าว (ultimate strength) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า ถ้าปริมาณไฟเบอร์ที่ผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยต่ำกว่าปริมาณส่วนผสมวิกฤต ค่ากำลังที่จุดประลัยหลังการแตกร้าวจะมีค่าต่ำกว่าที่จุดแตกร้าวแรก และค่ากำลังที่จุดประลัยหลังการแตกร้าวจะมีค่ามากกว่าค่ากำลังที่จุดแตกร้าวแรก เมื่อปริมาณไฟเบอร์ที่ผสมมีค่ามากกว่าปริมาณส่วนผสมวิกฤต จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณอัตราส่วนผสมวิกฤตมีค่าอยู่ระหว่าง 1.4% ถึง 1.5% แต่ไม่สามารถระบุค่าปริมาณอัตราส่วนผสมวิกฤตที่แน่นอนในทางปฏิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่รับกำลังดัดได้ ในการทำโครงการงานพิเศษนี้อาศัยหลักการของ linear regression ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมดังกล่าวและใช้ค่าปริมาณอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะ มีค่าเท่ากับ 1.4% (ค่าอัตราส่วนผสมนี้ได้ใช้ในการผสมเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดประลัยด้วย) เมื่อทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดรวมถึงค่าความเหนียวด้วย โดยที่ค่ากำลังอัดประลัย 200ksc  $V_c = 1.4%$  และ 2% นั้นค่า First Crack Flexural Strength จะมีค่ามากกว่า plain concrete เท่ากับ 69% และ 79% ตามลำดับ ส่วนค่า First Crack Toughness จะมีค่าเป็น 3.8 เท่า และ 4.8 เท่าของ plain concrete ตามลำดับ

ที่ค่ากำลังอัดประลัย 450 ksc  $V_c = 1.4%$  และ 2% ค่า First Crack Flexural Strength จะมีค่ามากกว่าของ plain concrete เท่ากับ 34% และ 127% ตามลำดับ ส่วนค่า First Crack Toughness จะมีค่าเป็น 1.1 เท่า และ 6.4 เท่า

จากทฤษฎีในบทที่ 3 เราสามารถคำนวณค่า Flexural Strength ทั้งก่อนเกิดการแตกร้าว และหลังเกิดการแตกร้าว แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 ท้ายบท และรูปที่ 6.1 และ 6.2 จากลักษณะกราฟบอกให้ทราบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าเกินจากค่าที่ปรากฏในการทดลองไปประมาณ 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จากการวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้ของ R.N.Swamy, P.S.Mangat, C.V.S.K. Roa, เรื่อง " The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices " ได้พิสูจน์ว่า ค่า First Crack Composite Strength มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{cr} = 0.843 \sigma_m V_m + 2.93 V_f (l/d) \quad (6.1)$$

ค่า Ultimate Composite Flexural Strength มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{cu} = 0.97 \sigma_m V_m + 3.41 V_m (l/d) \quad (6.2)$$

$\sigma_{cr}$  = กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวแรก

$\sigma_{cu}$  = กำลังรับแรงดัดที่จุดประลัยหลังการแตกร้าว

$V_m$  = อัตราส่วนผสมของเมตริกซ์ในคอนกรีตเสริมเส้นใย

$V_f$  = อัตราส่วนผสมของไฟเบอร์ในคอนกรีตเสริมเส้นใย

ผลการคำนวณตามสมการที่ 6.1 และ 6.2 แสดงอยู่ในรูปที่ 6.3 ถึง 6.6 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ที่มาของสมการที่ 6.1 และ 6.2 สามารถหาได้จากบรรณานุกรม เล่มที่ 6

ความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ ยกตัวอย่างคือ เมื่อวัสดุเปราะถูกกระทำด้วยแรงกระแทก หรือ แรงสั่นสะเทือนที่มีทิศทางไม่แน่นอน ก็มักจะเกิดรอยแตกร้าวเสมอเนื่องจากการเสีรูปร่างมากเกินไป แต่ถ้าเป็นวัสดุที่มีความเหนียวแล้ว ค่าความเครียดที่จุดประลัยของมันจะมีค่ามากกว่าของวัสดุเปราะ ทำให้สามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้น การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้นจึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหนียวของวัสดุ สามารถวัดได้โดยหาพื้นที่ใต้กราฟ load-deflection หรือ stress-strain curve นอกจากนี้ยังมีค่าที่ใช้บ่งชี้ความเหนียว เรียกว่า ค่าดัชนีความเหนียว (toughness indices) ซึ่งเป็นตัวเลขที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟที่กำหนดด้วยพื้นที่ใต้กราฟจากจุดศูนย์ถึงจุดแตกร้าวแรก (first crack) ค่าดัชนีความเหนียวเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำสถิตย์ สามารถใช้วัดระดับ serviceability ของวัสดุได้

#### 6.1.4 ความเค้นเฉือน (Shear Strength)

เนื่องจากด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลา ทำให้ในโครงการพิเศษนี้มิได้ทำการทดสอบค่า กำลังรับแรงเฉือน ของคอนกรีตเสริมเส้นใย แต่ค่าดังกล่าวสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการ Combined Stress โดยอาศัยฐานข้อมูลจากการทดสอบ Compressive Strength เป็นเบื้องต้น แล้วนำไปคำนวณตามสมการ

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (6.3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (6.4)$$

พิจารณารูปที่ 6.8 a จาก element ที่สมมุติตามสมมุติฐานที่ว่า คอนกรีตจะรับแรงในแนวแกน Y และก็จะเกิดค่าความเค้นและความเค้นเฉือนเกิดขึ้นในแนวแกน Y ตามกฎของ HOOK จากความเป็นจริงที่ว่าวัสดุของแข็งจะต้องมีปริมาตรเท่าเดิมเมื่อถูกแรงกระทำ ดังนั้นเมื่อเกิดความเค้นเฉือนในแนวแกน Y ย่อมส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนในแนวแกน X ด้วย ซึ่งหลักการอันนี้เป็นที่มาของ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ( $\nu$ )

จากการศึกษาในอดีตได้มีการหาค่า อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตไว้แล้วมีค่าประมาณ 0.15 - 0.20 ถ้าลองพิจารณารูปที่ 6.8 b เมื่อเกิดความเค้นเฉือนในแนวแกน X แล้วแต่เนื้อมวลของคอนกรีตที่อยู่รอบข้างของ element นั้นจะพยายามอัด element ไว้ไม่ให้ขยายตัวจึงเกิดความเค้นดังรูปดังกล่าว

การคำนวณค่าความเค้นเฉือนในโครงงานพิเศษนี้จะทำได้ดังนี้ คือ นำค่า กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตล้วน และ คอนกรีตเสริมเส้นใย มาหาค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน X เสียก่อน และนำค่าความเค้นเฉือนดังกล่าวมาคูณด้วยค่าอัตราปัวซองเพื่อที่จะได้ค่า ความเค้นเฉือนในแนวแกน X จากนั้นจึงนำค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน X ไปหาค่าความเค้นในแนวแกน X แล้วจึง แทนค่า  $\sigma_x$  และ  $\sigma_y$  ลงในสมการที่ 6.3 และ 6.4 เพื่อหาค่า  $\tau_{max}$  ต่อไป

เมื่อแทนค่า  $\sigma_x = \sigma_y \nu_{Ecu/Ecu} = 0.2 \sigma_y$  ,  $\sigma_y =$  ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ,  $\nu = 45$  องศา เนื่องจากค่า Maximum Shear Stress เกิดที่ระนาบที่ ทำมุม 45 องศากับระนาบหลัก(Principle Planes)

สมการที่ 6.3 และ 6.4 จะลดลงมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = 0.60 \sigma_y \quad (6.5)$$

$$\tau_{max} = -0.40 \sigma_y \quad (6.6)$$

ผลการคำนวณสามารถหาได้จากตารางที่ 6.3 เรื่อง Shear Strength ท้ายบทนี้ เนื่องจากการคำนวณดังกล่าวได้มาจากการตั้งสมมุติฐานดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง ซึ่งจากรายงานการวิจัยล่าสุดปรากฏว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ FRC นั้นมีค่าเท่ากับ  $0.41 \sigma_{cu}$  (ค่า  $\sigma_{cu}$  หาได้จากสมการที่ 6.2)

## 6.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีทำให้ทราบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 1.4% ถึง 1.5% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง ในเรื่องของการนำ FRC ไปใช้งาน เพื่อการตอบสนองความต้องการในด้านของการเพิ่มกำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดนั้นมีโอกาสที่จะเป็นไปได้ ถ้ามีการปรับปรุงเกี่ยวกับคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่จะนำมาใช้ และขบวนการผสมที่มีความสะดวกรวดเร็ว และง่ายต่อการทำงาน

เนื่องจากการทดลองในโครงการพิเศษนี้กระทำโดยใช้ไฟเบอร์เส้นตรง ซึ่งค่อนข้างที่จะมีประสิทธิภาพในการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตน้อยเมื่อเทียบกับไฟเบอร์ที่มีรูปร่างอื่น ๆ ดังนั้นการนำไปใช้งานจริงในภาคสนามจึงนิยมใช้ไฟเบอร์ที่มีรูปร่างอื่น เช่น แบบ hook , แบบ crimp เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ปริมาณไฟเบอร์ที่ใช้ผสมมีค่าน้อยลง และทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำ FRC น้อยลงด้วย

แต่ในเรื่องของความเหนียว (Toughness) นั้น มีความเป็นไปได้สูงมากในการนำไปใช้งานเนื่องจากอัตราการเพิ่มความเหนียวของ FRC นั้นจะมีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มของ Flexural Strength มาก ทำให้ใช้ปริมาณไฟเบอร์ที่ผสมน้อยลง รูปที่ 6.7 แสดงค่าความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณส่วนผสมของไฟเบอร์

## CALCULATE DIRECT TENSILE STRENGTH BEFORE CRACKING (KSC)

%VI	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001
0.10%	30.55307	61.10614	91.65921	122.2123	152.7654	183.3184	213.8715	244.4246	274.9776	305.5307
0.20%	30.5251	61.05021	91.57531	122.1004	152.6255	183.1506	213.6757	244.2008	274.7259	305.251
0.30%	30.49713	60.99427	91.4914	121.9885	152.4857	182.9828	213.4799	243.9771	274.4742	304.9713
0.40%	30.46917	60.93833	91.4075	121.8767	152.3458	182.815	213.2842	243.7533	274.2225	304.6917
0.50%	30.4412	60.8824	91.32359	121.7648	152.206	182.6472	213.0884	243.5296	273.9708	304.412
0.60%	30.41323	60.82646	91.23969	121.6529	152.0661	182.4794	212.8926	243.3058	273.7191	304.1323
0.70%	30.38526	60.77052	91.15578	121.541	151.9263	182.3116	212.6968	243.0821	273.4673	303.8526
0.80%	30.35729	60.71458	91.07188	121.4292	151.7865	182.1438	212.501	242.8583	273.2156	303.5729
0.90%	30.32932	60.65865	90.98797	121.3173	151.6466	181.9759	212.3053	242.6346	272.9639	303.2932
1%	30.30136	60.60271	90.90407	121.2054	151.5068	181.8081	212.1095	242.4108	272.7122	303.0136
1.10%	30.27339	60.54677	90.82016	121.0935	151.3669	181.6403	211.9137	242.1871	272.4605	302.7339
1.20%	30.24542	60.49084	90.73626	120.9817	151.2271	181.4725	211.7179	241.9633	272.2088	302.4542
1.30%	30.21745	60.4349	90.65235	120.8698	151.0873	181.3047	211.5222	241.7396	271.9571	302.1745
1.40%	30.18948	60.37896	90.56845	120.7579	150.9474	181.1369	211.3264	241.5159	271.7053	301.8948
1.50%	30.16151	60.32303	90.48454	120.6461	150.8076	180.9691	211.1306	241.2921	271.4536	301.6151
1.60%	30.13354	60.26709	90.40063	120.5342	150.6677	180.8013	210.9348	241.0684	271.2019	301.3354
1.70%	30.10558	60.21115	90.31673	120.4223	150.5279	180.6335	210.739	240.8446	270.9502	301.0558
1.80%	30.07761	60.15522	90.23282	120.3104	150.388	180.4656	210.5433	240.6209	270.6985	300.7761
1.90%	30.04964	60.09928	90.14892	120.1986	150.2482	180.2978	210.3475	240.3971	270.4468	300.4964
2%	30.02167	60.04334	90.06501	120.0867	150.1084	180.13	210.1517	240.1734	270.195	300.2167

ตารางที่ 6.1 แสดงค่า Direct Tensile Strength ก่อนการแตกหักที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

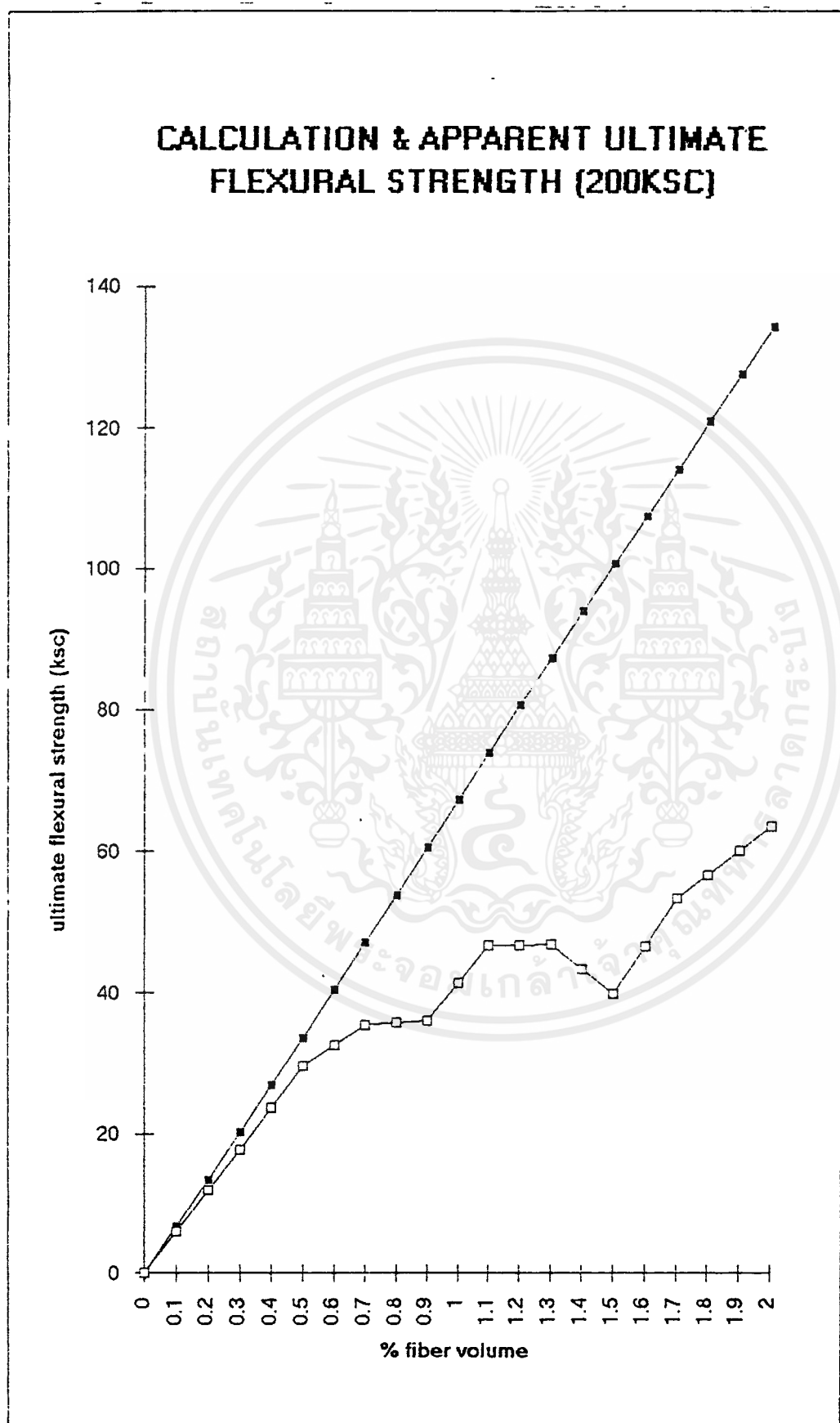
## CALCULATE FLEXURAL STRENGTH BEFORE CRACKING (KSC)

%Vf	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001
0.10%	74.54949	149.099	223.6485	298.198	372.7475	447.297	521.8465	596.396	670.9454	745.4949
0.20%	74.48125	148.9625	223.4438	297.925	372.4063	446.8875	521.3688	595.85	670.3313	744.8125
0.30%	74.41301	148.826	223.239	297.652	372.065	446.478	520.8911	595.3041	669.7171	744.1301
0.40%	74.34477	148.6895	223.0343	297.3791	371.7238	446.0686	520.4134	594.7581	669.1029	743.4477
0.50%	74.27652	148.553	222.8296	297.1061	371.3826	445.6591	519.9357	594.2122	668.4887	742.7652
0.60%	74.20828	148.4166	222.6248	296.8331	371.0414	445.2497	519.458	593.6662	667.8745	742.0828
0.70%	74.14004	148.2801	222.4201	296.5601	370.7002	444.8402	518.9803	593.1203	667.2603	741.4004
0.80%	74.07179	148.1436	222.2154	296.2872	370.359	444.4308	518.5026	592.5743	666.6461	740.7179
0.90%	74.00355	148.0071	222.0107	296.0142	370.0178	444.0213	518.0249	592.0284	666.032	740.0355
1%	73.93531	147.8706	221.8059	295.7412	369.6765	443.6118	517.5472	591.4825	665.4178	739.3531
1.10%	73.86706	147.7341	221.6012	295.4683	369.3353	443.2024	517.0694	590.9365	664.8036	738.6706
1.20%	73.79882	147.5976	221.3965	295.1953	368.9941	442.7929	516.5917	590.3906	664.1894	737.9882
1.30%	73.73058	147.4612	221.1917	294.9223	368.6529	442.3835	516.114	589.8446	663.5752	737.3058
1.40%	73.66234	147.3247	220.987	294.6493	368.3117	441.974	515.6363	589.2987	662.961	736.6234
1.50%	73.59409	147.1882	220.7823	294.3764	367.9705	441.5646	515.1586	588.7527	662.3468	735.9409
1.60%	73.52585	147.0517	220.5775	294.1034	367.6292	441.1551	514.6809	588.2068	661.7326	735.2585
1.70%	73.45761	146.9152	220.3728	293.8304	367.288	440.7456	514.2032	587.6609	661.1185	734.5761
1.80%	73.38936	146.7787	220.1681	293.5575	366.9468	440.3362	513.7255	587.1149	660.5043	733.8936
1.90%	73.32112	146.6422	219.9634	293.2845	366.6056	439.9267	513.2478	586.569	659.8901	733.2112
2%	73.25288	146.5058	219.7586	293.0115	366.2644	439.5173	512.7701	586.023	659.2759	732.5288

ตารางที่ 6.2 แสดงค่า Flexural Strength ก่อนการแตกร้าวที่ได้จากการคำนวณ

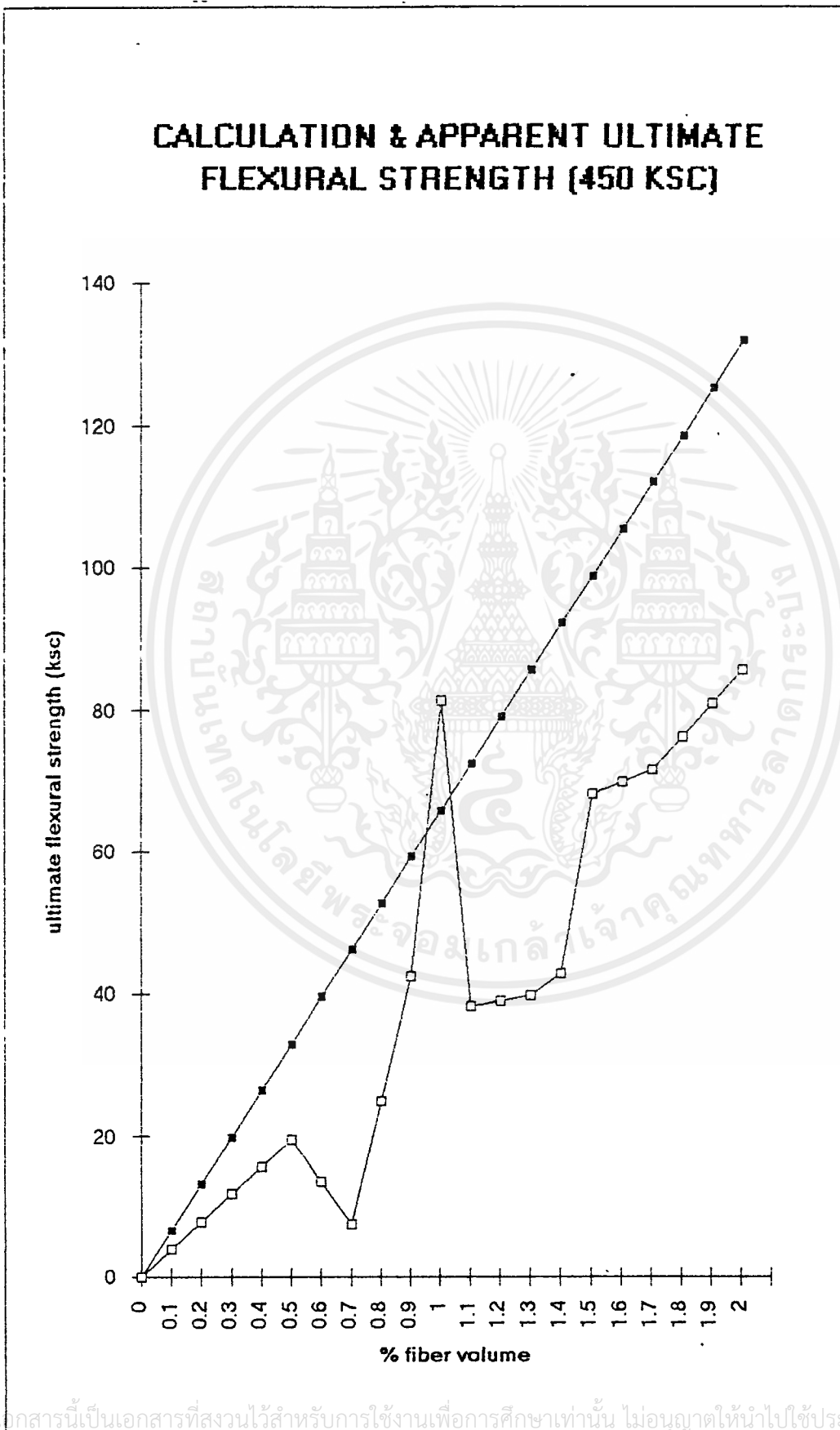
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.1 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.2.8  
เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 200 ksc)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

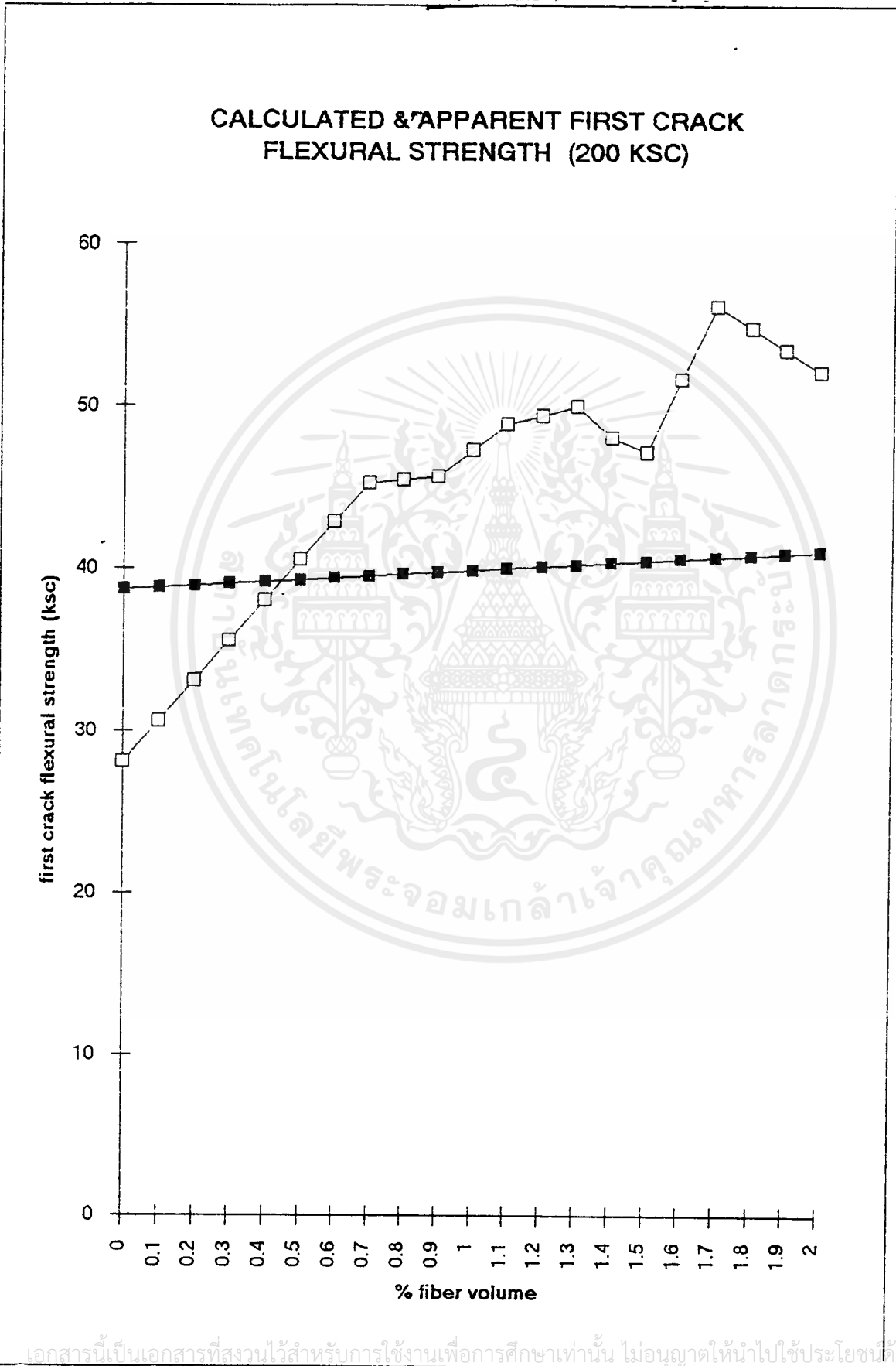
รูปที่ 6.2 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 3.2.8  
เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 450 ksc)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_c = 0.843 \sigma_{mVm} + 2.93 V_f (l/d)$$

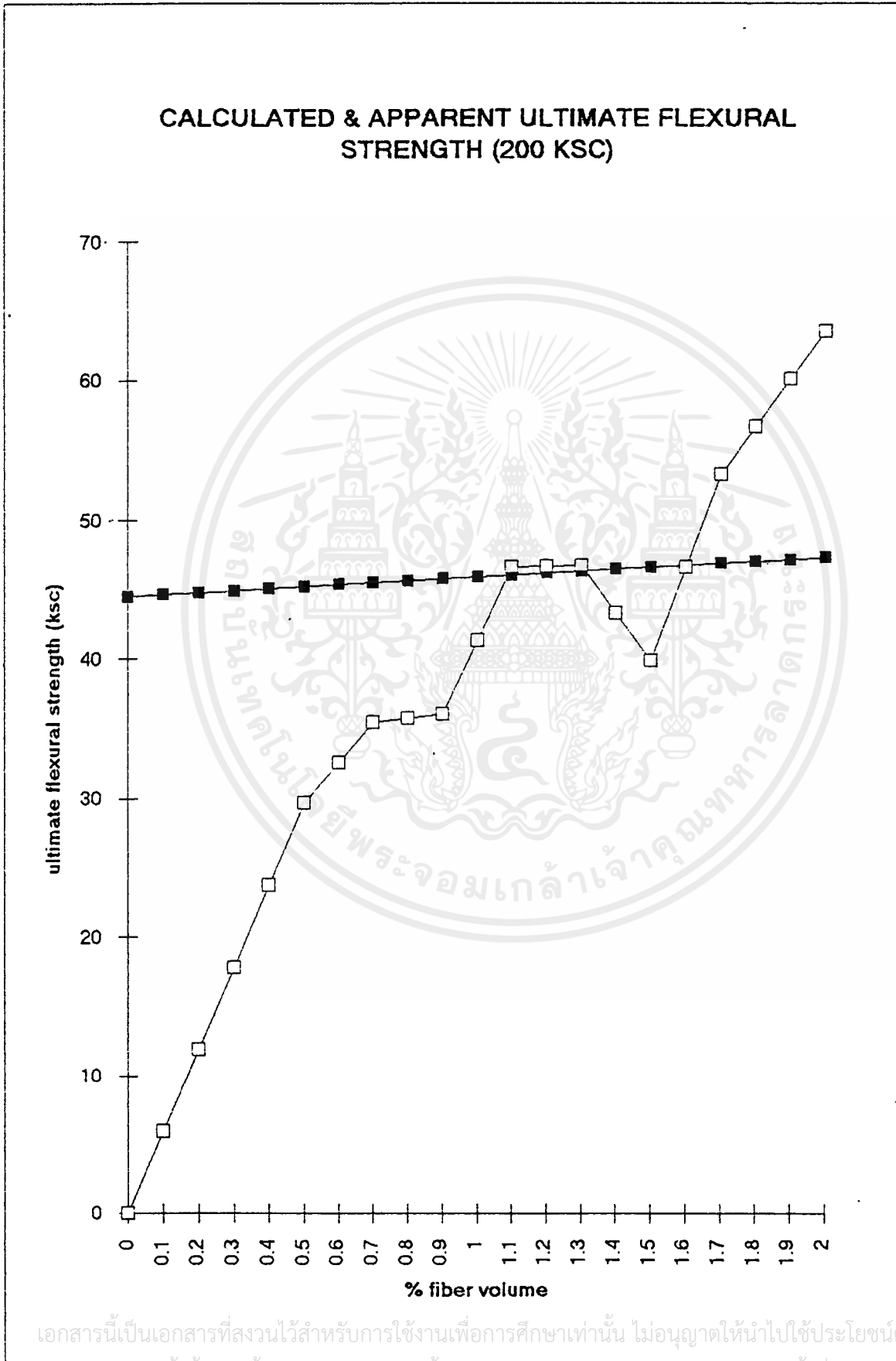
รูปที่ 6.3 แสดงค่า First Crack Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 200 ksc)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta_{cu} = 0.97 \sqrt{mVm} + 3.41 Vf (l/d)$$

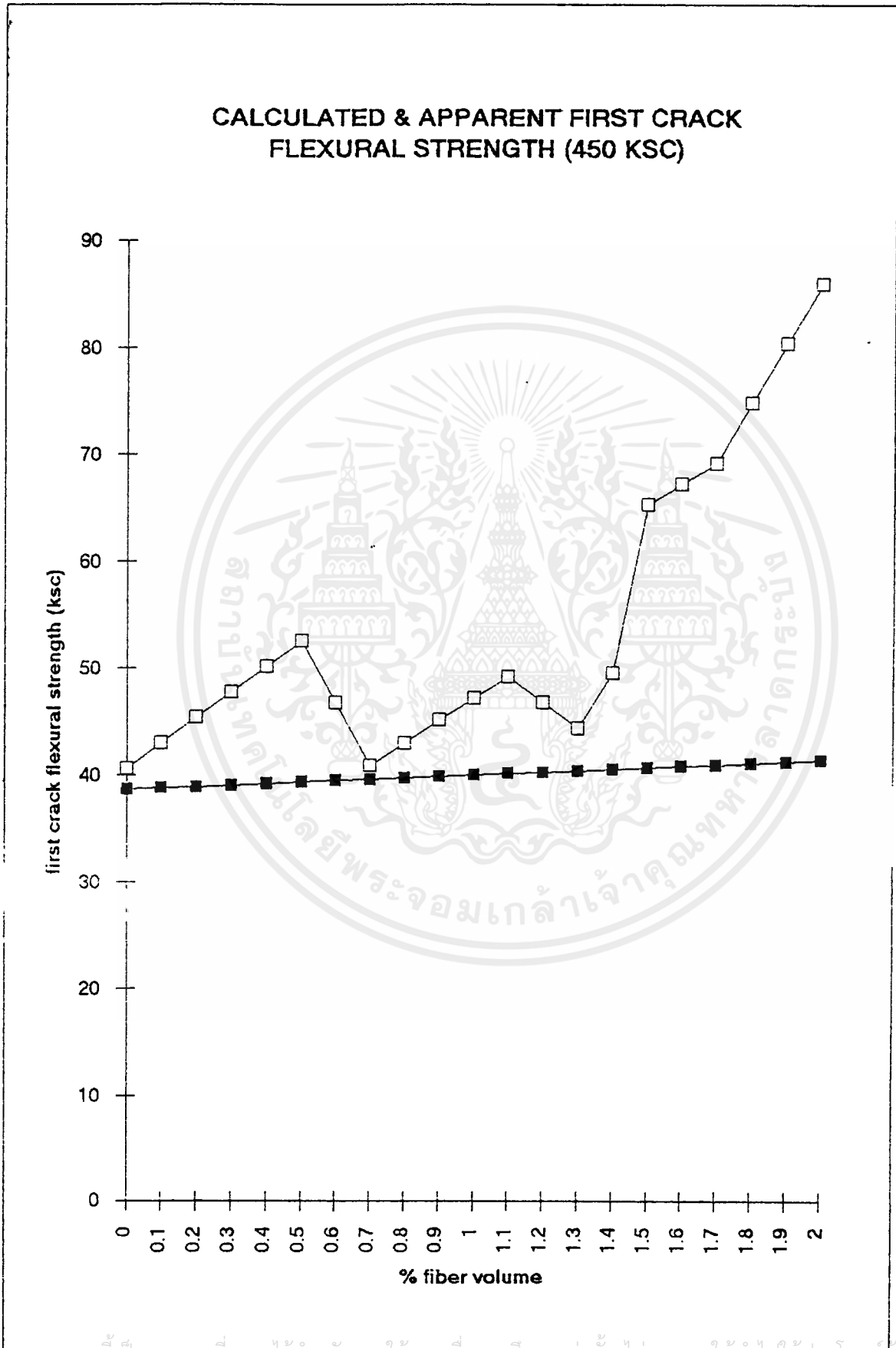
รูปที่ 6.4 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 200 ksc)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม้วากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มากรณาไปใช้

$$\sigma_{cf} = 0.843 \sigma_{mVm} + 2.93 V_f (l/d)$$

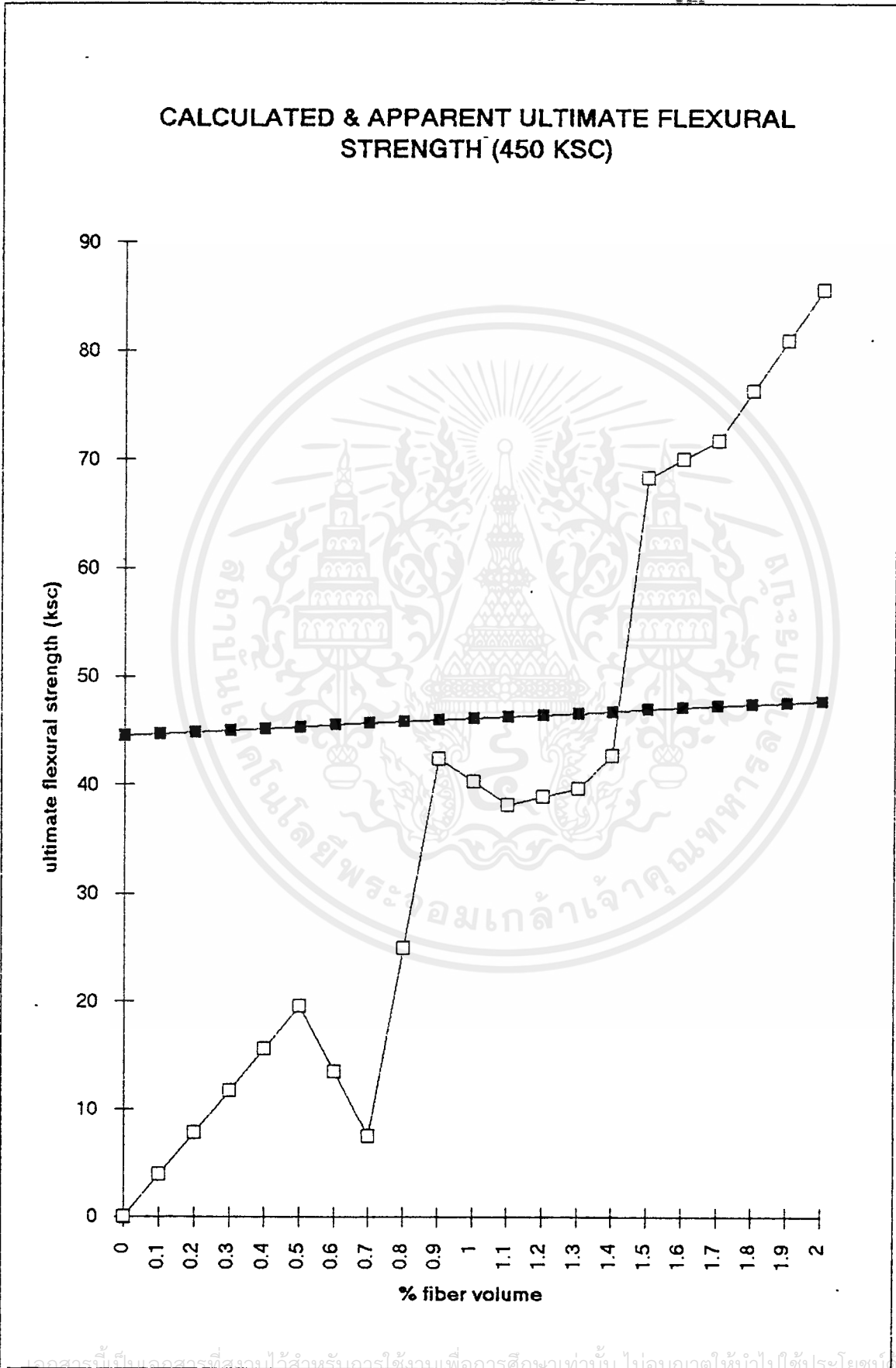
รูปที่ 6.5 แสดงค่า First Crack Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 450 ksc)



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

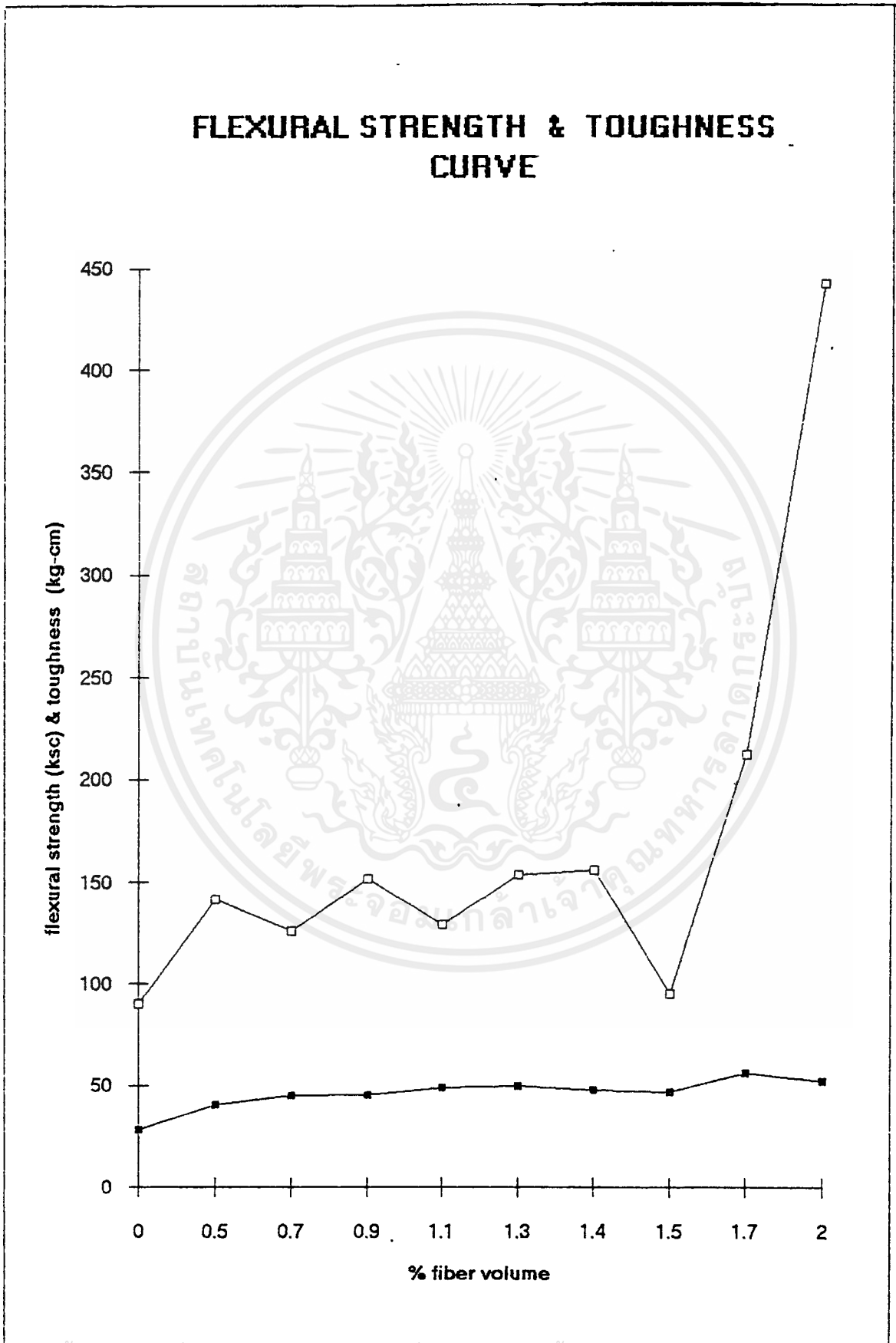
$$\sigma_{cu} = 0.97 \sigma_{mVm} + 3.41 V_f (l/d)$$

รูปที่ 6.6 แสดงค่า Ultimate Flexural Strength ที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการทดลอง (คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 450 ksc)



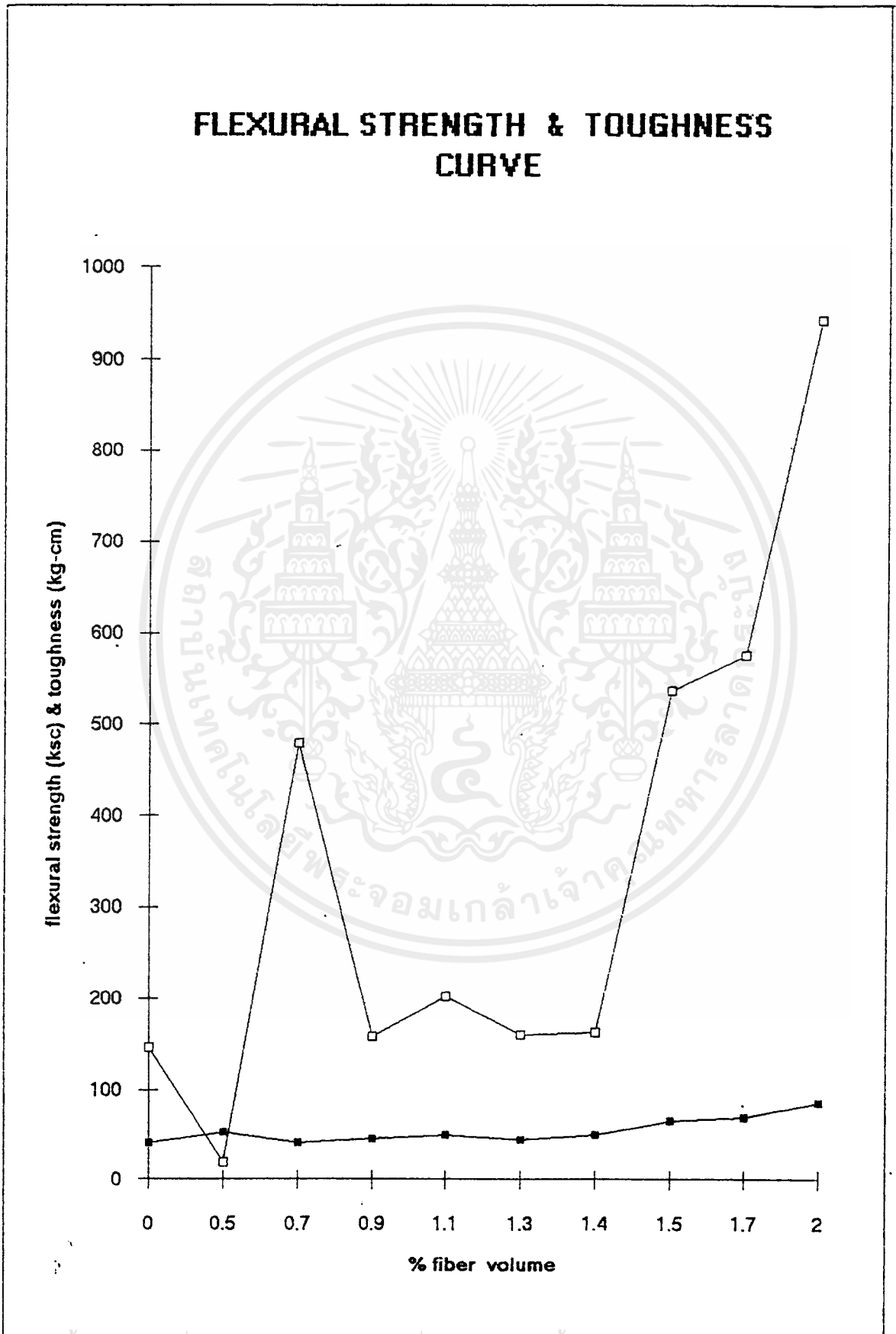
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.7 (a) แสดงการเปรียบเทียบสมบัติการเพิ่มขึ้นของ Flexural Strength และ Toughness ของ FRC ที่เปลี่ยนแปลงตามเปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์(200 ksc)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

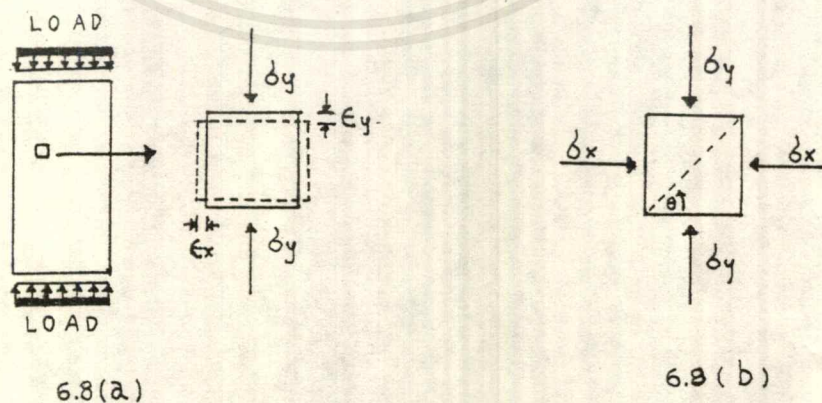
รูปที่ 6.7 (b) แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของ Flexural Strength และ 201 Toughness ของ FRC ที่เปลี่ยนแปลงตามเปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์(450 ksc)



ตารางที่ 6.3 แสดงค่า กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตล้วนและคอนกรีตเสริมเส้นใย  
ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 6.6

MATERIAL TYPE	MIX DESIGN STRENGTH ksc	COMPRESSIVE STRENGTH ksc	CALCULATED SHEAR STRENGTH ksc
PLAIN CONCRETE	200	205.344	82.14
PLAIN CONCRETE	450	335.885	134.35
FRC 1.4 %	200	238.642	95.46
FRC 1.4 %	450	342.224	136.89
FRC 2 %	200	269.913	107.96
FRC 2 %	450	381.650	152.66

รูปที่ 6.8 แสดง ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นใน element



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 7 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการใช้คอนกรีตเสริมไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์ในด้านต่างๆ

7.1 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของ คอนกรีตเสริมไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์ (เส้นลวด) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน ปริมาตรไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์ (fiber volume fraction - %v) ขณะที่ปริมาตรคอนกรีตคงที่เท่ากับ 1 ลบ.ม.

%v	น้ำหนักลวด (กก.)	ราคาลวด (บาท)	ค่าแรงตัดลวด (บาท)	รวมค่าใช้จ่าย (บาท)
0.5	40.77	1,467.70	305.77	1,773.47
0.7	57.08	2,054.88	428.10	2,482.98
0.9	73.39	2,242.04	548.10	2,790.14
1.1	89.70	3,229.20	635.25	3,864.45
1.3	106.00	3,816.00	795.00	4,611.00
1.5	122.32	4,403.52	917.40	5,320.92
1.7	138.63	4,990.68	1,039.72	6,030.40
2.0	163.09	5,871.24	1,223.17	7,094.41

ตาราง 7.1 แสดงค่าใช้จ่ายของ SFRC เมื่อ %v มีค่าสูงขึ้น

หมายเหตุ

7.1.1 ราคาลวด กก.ละ 36 บาท

7.1.2 ค่าแรงตัดลวด คิดจาก

- ค่าแรงคนงาน 2 คน คนละ 90 บาท/วัน
- อัตราการตัดลวด 1 วัน ประมาณ 25 กก.
- สรุปค่าแรงตัดลวดเท่ากับ  $(90 \times 2) / 25 = 7.2$  บาท/กก.

สรุป :

จากตารางและกราฟของค่าใช้จ่าย ในส่วนของไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์หรือเส้นลวดที่ใช้ เมื่อเพิ่ม

ปริมาณเป็นค่าต่างๆดังตาราง จะพบว่าค่าใช้จ่ายเพิ่มเป็นอัตราส่วนแปรผันตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังกราฟ แต่ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ใช้ข้อมูลจากการทดลอง ดังนั้นตัวแปรที่อาจจะเกิดการผกผันได้ในที่นี้คือ ค่าแรง ซึ่งอาจเป็นไปได้ 2 วิธี คือเมื่อใช้ลวดในปริมาณมากขึ้น การจ้างเหมาค่าตัดรวมอาจจะถูกลง หรือการใช้เครื่องจักรเข้าช่วยใช้ในงานแทนคน

## 7.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของคอนกรีตลวดและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์ ที่ค่ากำลังอัด 200 ksc

รายละเอียด	ค่าใช้จ่าย		
	คอนกรีตลวด	SFRC 1.4%	SFRC 2.0%
1. ปูน	529.283	542.830	542.830
2. หิน	112.280	104.440	104.440
3. ทราย	70.242	73.830	73.830
4. เส้นลวด	—	4,965.960	7,094.420
5. น้ำยาลดน้ำ	—	72.762	181.910
รวมค่าใช้จ่าย	711.805	5,759.820	7,997.460

ตาราง 7.2 แสดงค่าใช้จ่ายของคอนกรีตลวดและคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์

หมายเหตุ

7.2.1 ปูนจากการทดลอง ใช้ปูน TPI ประเภท 3 กุงสีดำ ราคาถุงละ

95 บาท

- คอนกรีตลวด ใช้ 278.57 กก.

- SFRC ใช้ 285.70 กก.

7.2.2 หิน

- คอนกรีตลวด ใช้หินขนาด 1"ราคา ลบ.ม.ละ 280 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณที่ใช้ 0.401 ลบ.ม.

- SFRC ใช้หินขนาด 3/4" ราคา ลบ.ม.ละ 280 บาท

ปริมาณที่ใช้ 0.373 ลบ.ม.

7.2.3 ทราส ราคาลบ.ม. ละ 230 บาท

- คอนกรีตล้นใช้ 0.305 ลบ.ม.

- SFRC ใช้ 0.321 ลบ.ม.

7.2.4 เส้นลวด คิคราคาคต่อหน่วยรวมค่าแรง กก.ละ 43.50 บาท

- ที่ 1.4% ใช้ลวด 114.16 กก.

- ที่ 2.0% ใช้ลวด 163.09 กก.

7.2.5 น้ำยาลดน้ำ ราคา กก.ละ 30 บาท

- ที่ 1.4% ใช้ปริมาณ 1,340 ลบ.ซม.

- ที่ 2.0% ใช้ปริมาณ 3,350 ลบ.ซม.

สรุป:

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของคอนกรีตล้นและ SFRC ที่  $\%v=1.4\%$  และ  $2.0\%$  พบว่าค่าใช้จ่ายของ SFRC สูงกว่าคอนกรีตล้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง SFRC ที่  $\%v = 1.4\%$  และ  $2.0\%$  พบว่า เมื่อ  $\%v$  สูงค่าใช้จ่ายจะสูงตามปริมาณลวด ในขณะที่ตัวแปรหลักคือ หิน ปูน และทราสเท่ากัน

ในแง่ของการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายอาจจะเห็นว่า SFRC ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงเสียเปรียบในแง่การลงทุนแต่ในแง่ของการนำไปใช้งานของ SFRC ในงานประเภทรับแรงกระแทกหรือคอนกรีตทับหน้า จะใช้งานได้ดีกว่าคอนกรีตล้น และเนื่องจาก SFRC เป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกต้องคั้นขึ้นใหม่ จึงมีโอกาสนในการศึกษาและนำไปใช้งานในอนาคต ให้ได้งานที่มีคุณภาพดีและราคาเหมาะสมมากขึ้น

7.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเมื่อใช้คอนกรีตเสริมไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์จากการทดลองแทนการเทคอนกรีตทับหน้าทั่วไป สมมติ ใช้พื้นที่ขนาด 4 x 8 ตรม. หน้า 5 ซม.

ค่าใช้จ่ายคอนกรีตทับหน้าเสริมเหล็ก	ค่าใช้จ่ายคอนกรีตทับหน้าเสริมเส้นลวด
<p>1. เหล็กตะแกรงขนาด 6 มม. ระยะห่าง 25 ซม.</p> <p>- ความยาวลวดที่ใช้ 310 ม. x 0.222 = 68.82 กก. ราคา กก. ละ 13.50</p> <p>- ค่าแรงงาน 2 คน (คนละ 90 บาท/วัน) = 180 บาท</p>	<p>1. เส้นลวด</p> <p>คิดค่าแรง+ค่าของ = 43.50 บาท/กก.</p> <p>-ที่ %v = 1.4% ใช้ 182.652 กก. ค่าใช้จ่าย = 7,947.54 บาท</p> <p>-ที่ %v = 2.0% ใช้ 260.944 กก. ค่าใช้จ่าย = 11,351.06 บาท</p> <p>2. น้ำยาลดน้ำ</p> <p>ราคา กก. ละ 30 บาท</p> <p>-ที่ %v = 1.4 % ราคา 116.419 บาท</p> <p>-ที่ %v = 2.0 % ราคา 291.104 บาท</p>
<p>ค่าใช้จ่ายเหล็กตะแกรง = 1,111.50 บาท</p>	<p>ค่าใช้จ่าย SFRC และน้ำยาลดน้ำ</p> <p>= 8,063.960 บาท - %v 1.4%</p> <p>= 11,642.160 บาท - %v 2.0%</p>

ตาราง 7.3 แสดงค่าใช้จ่ายคอนกรีตทับหน้าแบบเสริมเหล็กและแบบเสริมเส้นลวด

สรุป:

จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าใช้จ่ายในการใช้ SFRC สูงกว่า การใช้คอนกรีตเสริมเหล็กตะแกรงเป็นจำนวนเงิน 6,952.46 บาท สำหรับ 1.4% แต่ตัวเลขที่ได้เป็นเพียงแนวโน้มความเป็นไปได้จากการทดลอง ในแง่การทำงานจริง ค่าใช้จ่ายด้านค่าแรงของคณงานหรือมีการนำเครื่องจักรกลมาใช้ อาจทำให้ตัวเลขเปลี่ยนไป แต่เมื่อพิจารณาถึงการใช้งาน SFRC จะสามารถทำงานในหน้าที่เดียวกับเหล็กตะแกรง คือการกันรั่วของคอนกรีตหรืองาน temporary work ได้ดีกว่า เพราะเส้นใยไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์จะประสานเนื้อคอนกรีตได้ทั่วถึง และยังสามารถรับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแทกได้ติดด้วย ขณะปฏิบัติงานการใช้ไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์จะสะดวกในแง่การกองเก็บและดูแลรักษา เคลื่อนย้ายสะดวกโดยใช้กล้อหรือภาชนะใดๆ ในขณะที่เหล็กตะแกรงต้องมีโรงเก็บ ขนย้ายลำบาก ปัจจุบันมีการใช้งาน SFRC ในส่วนคอนกรีตกับหน้าหลายด้าน เช่น งานลานจอดรถ เคื่องบิน งานพื้นโรงงาน ตามที่กล่าวไว้ในส่วนของการใช้งาน

#### 7.4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย เมื่อใช้คอนกรีตเสริมไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์จากการทดลองแทนพื้นทางคอนกรีตทั่วไป

งานถนน : pavement มีความหนา 15 ซม. พื้นที่ขนาด 4 x 8 ตรม.

สมมติ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ทก ระยะ 20 ซม.

ค่าใช้จ่ายคอนกรีตเสริมเหล็ก	ค่าใช้จ่ายคอนกรีตเสริมเส้นลวด
<p>1. เหล็กขนาด 9 มม. ระยะห่าง 20 ซม.</p> <p>- ความยาวลวดที่ใช้ 595 ม. x 0.449 = 267.16 กก. กก. ละ 13.50 บาท</p> <p>- ค่าแรงงาน 2 คน (คนละ 90 บาท/วัน) = 180 บาท</p>	<p>1. เส้นลวด</p> <p>คิดค่าแรง+ค่าของ = 43.50 บาท/กก.</p> <p>- ที่ %v = 1.4% ใช้ 182.652 กก. ค่าใช้จ่าย = 7,947.54 บาท</p> <p>- ที่ %v = 2.0% ใช้ 260.944 กก. ค่าใช้จ่าย = 11,351.06 บาท</p> <p>2. น้ำยาลดน้ำ</p> <p>ราคา กก. ละ 30 บาท</p> <p>- ที่ %v = 1.4 % ราคา 349.260 บาท</p> <p>- ที่ %v = 2.0 % ราคา 873.168 บาท</p>
<p>ค่าใช้จ่ายเหล็ก = 3,786.925 บาท</p>	<p>ค่าใช้จ่าย SFRC และน้ำยาลดน้ำ</p> <p>= 8,202.180 บาท - %v 1.4%</p> <p>= 12,224.230 บาท - %v 2.0%</p>

ตาราง 7.4 แสดงค่าใช้จ่ายคอนกรีตพื้นทางแบบใช้เหล็กเสริมและแบบใช้เส้นลวดเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป:

จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าใช้จ่ายในการใช้ SFRC สูงกว่าการใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นจำนวนเงิน 4,415.255 บาทสำหรับ 1.4% ซึ่งเป็นตัวเลขที่ได้จากการทดลอง

ในแง่พฤติกรรมการทำงานและการปฏิบัติงานสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการใช้ SFRC แทนคอนกรีตทับหน้า

#### 7.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายท่อซีเมนต์ไยหินกับท่อที่ผลิตจากคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ

ค่าใช้จ่ายของท่อซีเมนต์ไยหิน	ค่าใช้จ่ายของคอนกรีตเสริมเส้นลวด
<p>- ท่อซีเมนต์ไยหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ซม. หนา 8 มม. ราคาเมตรละ 170.00 บาท</p>	<p>- ท่อคอนกรีตเสริมเส้นลวด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ซม. หนา 8 มม. -ปูน ( 2.12 กก.x95)/50 =4.02 บาท -ทราย 0.0024 ม<sup>3</sup> x 230 = 0.55 บาท -หิน 0.0027 ม<sup>3</sup> x 280 = 0.77 บาท -เส้นลวด 0.85 กก.x43.5 = 36.97 บาท -ค่าแรงทำงานหล่อท่อ/ม.คิด 100 บาท</p>
ค่าใช้จ่ายท่อซีเมนต์= 170.00 บาท	ค่าใช้จ่ายท่อ SFRC = 142.31 บาท

ตาราง 7.5 แสดงค่าใช้จ่ายของท่อซีเมนต์ไยหินและท่อคอนกรีตเสริมเส้นใย

สรุป:

จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายท่อซีเมนต์ไยหินกับท่อที่ผลิตจากคอนกรีตเสริมไฟเบอร์โกละ (SFRC) พบว่าค่าใช้จ่าย จากท่อSFRC ถูกกว่า ท่อซีเมนต์ไยหิน 27.69 บาท ซึ่งค่าตัวเลขที่ได้ อาจมีข้อผิดพลาดได้จากค่าแรงในการหล่อ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ค่าใช้จ่ายท่อ SFRC และท่อซีเมนต์ไยหิน อาจจะมีค่าใช้จ่ายประมาณใกล้เคียงกัน

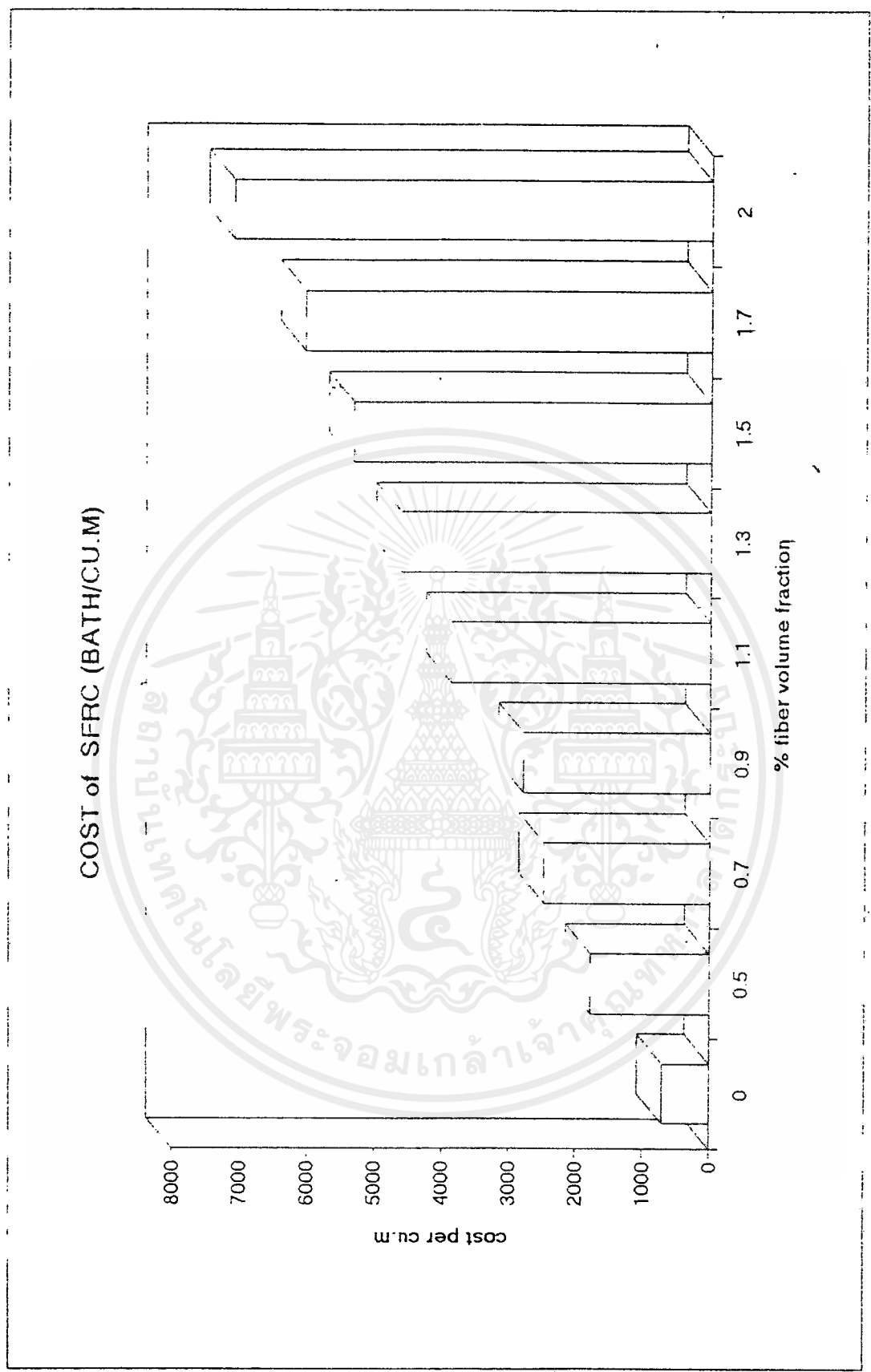
แต่ข้อได้เปรียบของท่อ SFRC คือสามารถรับแรงจากการสั่นกระเทือน(shock)และอุบัติเหตุจากการขีดตัวมากเกินไปได้ดีกว่า ท่อซีเมนต์ไยหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

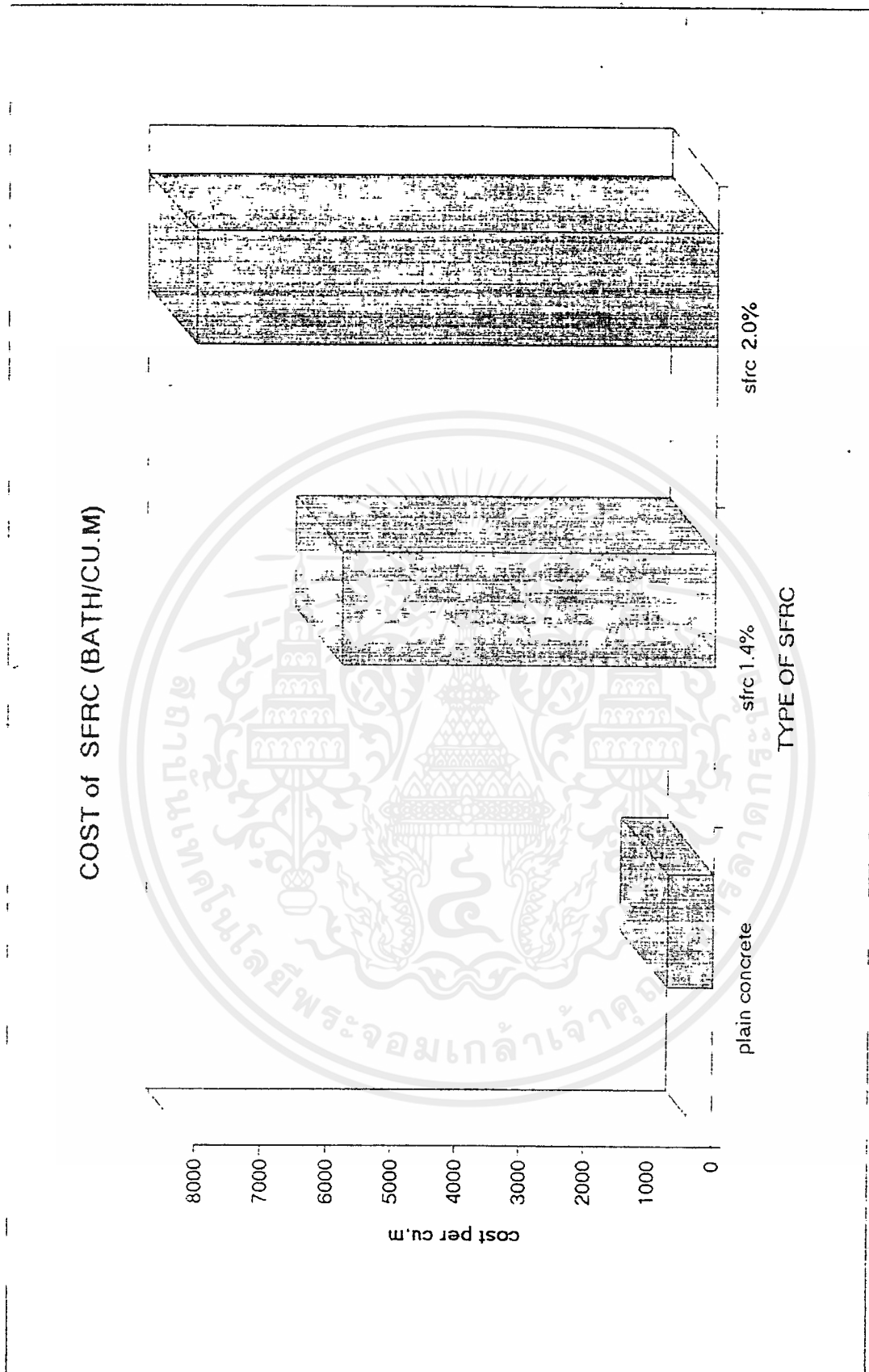
ขณะเดียวกันท่อซีเมนต์ใยหิน มีอันตรายในแง่ของวัสดุที่ใช้คือ Asbestos ซึ่งในต่างประเทศ  
ยังไม่นิยมวัสดุประเภทนี้ เพราะถือว่าเป็นอันตรายต่อสุขภาพผู้บริโภค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8 การใช้งานของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์

การใช้งานของไฟเบอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับการพิจารณาของผู้ออกแบบและเจ้าของงานที่จะใช้ประโยชน์ จากคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมไฟเบอร์ ทั้งด้านกำลังดึงประลัยทางสถิติกและไดนามิก, การดูดซับพลังงาน, อื่นๆ โดยจำแนกการใช้งานออกตามประเภทของไฟเบอร์ที่ใช้ดังนี้

### 8.1 Steel Fiber

#### 8.1.1 Steel Fiber Shotcrete

##### 8.1.1.1 การเสถียรของแนวลาดชัน

8.1.1.1.1 การทำให้เกิดการเสถียรของแนวหินลาดชัน ผังแม่น้ำ Snake, ใกล้กับ Little Gouse Dam Washington, USA. โดยงานนี้เสร็จสมบูรณ์เมื่อปี 1974 โดยการใช้ steel fiber shotcrete เพื่อยึดเกาะหินในส่วนลาดชันใกล้กับเขื่อน Little Gouse Dam ซึ่งวางเป็นแนวยาวตาม Snake River ; ยาว 472 เมตร กว้าง 5-14 เมตร พื้นที่ทั้งหมดประมาณ 5,800 ตรม.

8.1.1.1.2 โครงการ Joint Nordic (Nordforsk); Brofjorden, Sweden โดยมีพื้นที่ผิวของบ้านประมาณ 4,500 ตรม. ถูกทำให้มั่นคงด้วยการใช้ steel fiber shotcrete มาทับหน้าด้วยความหนา 30 มม. บนชั้นของ plain shotcrete ที่หนาประมาณ 5-10 มม.

##### 8.1.1.2 การใช้งานในส่วนใต้ดิน

8.1.1.2.1 งานด้านวิศวกรรมของอุโมงค์(ท่อส่งลง)ในบ่อแร่ Rivie Dam, Idaho, USA. งานนี้แล้วเสร็จเมื่อปี 1972 ด้วยความยาวของอุโมงค์ประมาณ 12 ม. หนา 75 มม. อุโมงค์นี้ประสบความสำเร็จในแง่ของการทนทานต่อการรับน้ำหนักบรรทุกและการสะท้อนจากการปฏิบัติงานด้านระเบิดอุโมงค์

8.1.1.2.2 Peace River Site hydro Tunnels; British Columbia, Canada งานนี้แล้วเสร็จเมื่อปี 1982 ใช้ steel fiber shotcrete หนา 50 มม. ตามแนวยาวของท่อขนาดหลายร้อยฟุต

8.1.1.2.3 Atlanta subway tunnel lining ; Geogia, USA. ความยาวของทางเดินอุโมงค์ 61 ม. ถูกพ่นทับด้วย steel fiber shotcrete หนา 100-150 มม. โดยใช้เวลาการผสมแบบแห้ง จากการสังเกตการทำงานเป็นเวลา 18 เดือนพบว่า พฤติกรรมที่แสดงออกมาเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.1.2.4 Bolidens Grur A8 - เหมืองแร่และปล่องขุดลงในบ่อนแร่หุ้มและสร้างเสถียรภาพภายในปล่องขนส่งแร่ นอกจากนี้ยังป้องกันการเสื่อมสภาพจากการกระแทกของก้อนแร่ โดยความหนาแปรจาก 100-150 มม.

8.1.1.2.5 British Rail arch and tunnel velining ; England. ใช้ steel fiber shotcrete ในการเพิ่มความแข็งแกร่งแก่อุโมงค์และแนวอุโมงค์ใต้สะพาน

8.1.1.2.6 อุโมงค์ทางวิ่งของรถ; ในญี่ปุ่น พบว่าอุโมงค์มากถูกพ่นทับด้วย steel shotcrete

#### 8.1.1.3 งานซ่อม

พบว่า fiber - reinforced shotcrete ถูกใช้ในงานซ่อมเป็นจำนวนมาก

- ใน Sweden ความเสียหายของประภาคาร รวมทั้งบริเวณด้านนอกของปล่องไฟจะถูกซ่อมแซมด้วย steel fiber shotcrete

- ใน Australia นั้น fiber shotcrete จะถูกใช้เพื่อซ่อมแซมหลังคาที่ถูกเจาะในเตาคอนกรีต, หุ้มทับถังเก็บขยะเหล็ก, และอื่นๆ

- ใน Canada ใช้ steel fiber shotcrete ในการซ่อมโครงสร้างท่าเรือและซ่อมแซมพื้นผิวใหม่ให้โครงหินที่เสียหายในถ้ำ Canaveral, Florida ในสหรัฐอเมริกา

#### 8.1.1.4 งานเขื่อน

FRC ถูกใช้ไปในงานซ่อมแซมการก่อสร้างหลักของเขื่อนสมัยใหม่และโครงสร้างทางชลศาสตร์อื่นๆ เพื่อเสริมสร้างความต้านทานต่อการกัดเป็นโพรงและการกัดเซาะต่างๆ ที่มีสาเหตุมาจากการกระแทกของน้ำ โดยใช้ความหนาของกำแพงหรือพื้น 1/2 - 2 นิ้ว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เหล็กเสริมด้วย

มีรายงานจาก International Commission on Large Dams ถึงการใช้ FRC ในโครงสร้างทางชลศาสตร์ ภาชนะในรายงานจะประกอบด้วยแนวทางการออกแบบและตัวอย่างที่ใช้ปฏิบัติงานจริงหลายตัวอย่าง เช่น

- Mayfield และ Alder Dam ใช้ fiber shotcrete เพื่อหยุดการขยายตัวของการกัดเซาะของหินที่ตกลงมากระแทก

- Tarbela, Libby และ Dworshak Dams ใช้ FRC เป็นช่องทางกันการกัดเซาะและใช้เป็นตัวกั้นหน้าของพื้นอ่างเก็บน้ำ

- ในปี 1973 และ 1975 ที่ Lower Monumental Dam และปี 1976 ที่ Little Goose Dam บนแม่น้ำ Snake, Washington เดิมสร้างโดยทับส่วนบนด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อกันการกัดเซาะ จากนั้นได้ทำการทดสอบ โดยใช้ส่วนผสมไฟเบอร์คอนกรีต shotcrete ยาว 30 มม. กว้าง 15 มม. จากการสังเกตหลังการใช้งาน 2 ฤดูกาล ไม่พบความเสียหายหรือการกัดเซาะใดๆ เกิดขึ้น

#### 8.1.2. การใช้ steel fiber reinforced concrete โดยทั่วไป

8.1.2.1 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory ได้แสดงผลการทดสอบพื้นฐานทาง fiber reinforced concrete (FRC) ที่สถานีของกองทัพ U.S., Vicksburg, Miss. ในเดือน มิถุนายน ถึง เดือนตุลาคม ปี 1971 ข้อมูลจากการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า พื้น FRC สามารถลดความหนาจากพื้น PC (Plain Concrete) ได้ถึงครึ่งหนึ่ง

8.1.2.2 งานอีก 2 แห่งที่ใช้ steel fiber concrete ในงานพื้นผิวเป็นบริเวณกว้าง คือ ที่สนามบินนานาชาติ Las Vegas, Nevada ในปี 1976 พื้นผิวยางแอสฟัลต์เดิมที่มีอยู่ของลานจอดมีพื้นที่ 52,700 ตารางเมตร ถูกปูทับด้วย steel fiber concrete ที่หนา 6 นิ้ว เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของพื้นธรรมดาที่หนาถึง 15 นิ้ว จากความสำเร็จในครั้งนั้น ทำให้เกิดงานชิ้นที่ 2 ตามมาคือ สนามจอดที่ใหญ่กว่าเดิม ในปี 1979 โดยมีความหนาถึง 7 นิ้ว เป็นฐานรองรับแอสฟัลต์ที่ปูบนวิศุกรรมชาติ โดยใช้ไฟเบอร์ตัดปลาย ยาว 2 นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 นิ้ว ในอัตรา 50 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน ใช้คานขนาด 150\*150\*525 มม. มีกำลังรับแรงดัดประลัษ 1040 Psi (7.2 MPa) ปูโดยใช้ slip form รับน้ำหนักจากการจอดโบอิ้ง 747 น้ำหนัก 159,000 กก. ถึง 352,000 กก.

8.1.2.3 ใน ค.ศ. 1980, steel fiber reinforced concrete จะถูกใช้ในการก่อสร้างทางรถแท็กซี่ ที่ Reno, Nevada, Canon International Airport ขนาดของถนนยาว 853 ม. กว้าง 22.9 ม. หนา 168 มม. ใช้วัสดุมวลรวมใหญ่สุดขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ไฟเบอร์ตัดปลาย ยาว 2 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 นิ้ว ในอัตรา 52 กก./ลบ.ม.

8.1.2.4 steel fiber reinforced concrete จะถูกใช้ในการปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรงค่า share strength ของหลังคาของอาคารปฏิกรนิวเคลียร์ ใน Dounveay, Scotland โดยใช้เหล็กที่เปลี่ยนรูปร่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.50 มม. ยาว 40 มม.

8.1.2.5 งานซ่อมแซมครั้งใหญ่ของสนามบินของอากาศยานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่าง ค.ศ.1980 ที่ Fallon, Nevada Naval Air Station ในการติดตั้งครั้งนี้พื้นที่คอนกรีตเดิมอยู่ 33,444 ตารางเมตร ถูกซ่อมด้วย SFRC เป็นพื้นที่ 4,205 ตารางเมตร

8.1.2.6 ใน United Kingdom และ Hungary ใช้ไฟเบอร์ผสมร่วมในก่อคอนกรีตเพื่อพัฒนาค่ากำลังอัดและลดความเสียหายจากการควบคุมการใช้งาน

8.1.3 การใช้งาน steel fiber reinforced concrete ในงานอาคาร

8.1.3.1 บันได

ในการนำประโยชน์จากการเพิ่มของ STRENGTH, การลดรอยแตกจากการแห้ง และลดความหนา ถูกนำมาใช้ในการทำบันได บันไดนี้ประกอบไปด้วย ส่วนชั้นบันไดและฐานพัก ที่สร้างขึ้นจากวัสดุ SFRC ส่วนราวทั้ง 2 ข้างใช้เหล็ก เหตุที่ใช้ SFRC ประกอบขึ้นเป็นฐานเพราะเป็นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็กและสามารถผลิตเป็นคอนกรีตสำเร็จรูป (PRECAST CONCRETE) ซึ่งควบคุมคุณภาพต่างๆ ได้ดี

วัตถุดิบผสม SFRC ใช้ 1 : 2.4 : 0.39 โดยน้ำหนัก ของ PORTLAND CONCRETE : ทราย : น้ำ และ VOLUME FRACTION ของ STEEL FIBER = 1% รูปร่าง, ขนาด และคุณสมบัติทางกล แสดงในตาราง 2 (ป้องกันการเกิดสนิม จึงเคลือบผิวหน้าด้วย EPOXY กันสนิม)

รูป 8.1 แสดงภาพโดยรวมของบันไดก่อนประกอบ ซึ่งจะเห็นว่าง่ายต่อการนำส่วนประกอบต่างๆ มาเข้ารูปเพื่อใช้งานโดยใช้น้ำอัด ประโยชน์ใช้งาน ทำได้ทั้งภายนอกและภายในอาคาร เพราะกันสนิม นอกจากนี้ ปัญหาเรื่องเสียงขณะเดินผ่านยังน้อยกว่าบันไดเหล็ก และขนาดความกว้าง, ความสูงต่างๆ ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการ

บทสรุปและวิเคราะห์

รูป 8.7 แสดงกราฟ LOAD-DEFLECTION ของชั้นบันได ทั้งเสริมและไม่เสริมไฟเบอร์โพลี ผลที่ได้เป็นดังนี้

1) น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกหักแรก (FIRST CRACK LOAD) ของชั้นบันได SFRC มีค่า ~ 145% เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นบันไดที่ทำมาจากคอนกรีตล้วน

2) ULTIMATE STRENGTH ของชั้นบันได SFRC ~ 154% เมื่อ

เปรียบเทียบกับ แม้ว่าพื้นที่หน้าตัด และขนาดเหล็กเสริมจะเท่ากัน

3) พฤติกรรมหลังการ CRACKING ของชั้นบันไดทั้ง 2 แบบจะแสดงออกมาต่างกัน

ในกรณีของชั้นบันไดที่สร้างจาก SFRC เพื่อเพิ่ม น.น.กระทำ รอยแยกจะแพร่ ในส่วนรับแรงดิ่งกลางช่วงและสุดท้ายจึงจะหล่นลงมา แต่ในอีกกรณี ชั้นบันไดที่ทำจากคอนกรีตล้วน รอยแยกอื่นๆ จะเกิดขึ้นตามความยาวของเหล็กเสริมหลังจากเกิดรอยแยกแรก และเมื่อเพิ่ม น.น.กระทำ จะเกิดการแพร่ของการแยก จะเกิดการพังทลายอย่างรวดเร็ว

#### การใช้ประโยชน์

ปัจจุบัน บันได SFRC ถูกใช้ในอาคารของญี่ปุ่นกว่า 50 หลังจำนวนของชั้นบันไดถูกผลิตในรูปของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปประมาณ 50,000 ชั้น แสดงในรูป 8.8 และ 8.9 ถึงการใช้งานของชั้นบันได SFRC

#### 8.1.3.2 Nonload-Bearing Walls

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา เมื่อเพิ่มไฟเบอร์โพลีเอสเตอร์ผสมน้ำหนักเบาในคอนกรีต จะปรับปรุงค่ากำลังอัดที่มีอยู่ต่ำ, ลดการแตกรายงาที่เกิดจากการแห้งและลดความกว้างของรอยแตก จากประโยชน์ดังกล่าวจึงมีการผลิต thin-wall panel ขึ้น จะมีการพัฒนากำแพงบางชนิดในเวลาต่อมา โดยมีการทดสอบความสามารถในการทนไฟ, การเก็บเสียง และการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงเฉือนของกำแพง จึงได้กำแพงออกมา 3 ประเภท ดังนี้

##### 8.1.3.2.1 กำแพง SFRC ชนิดไม่มีโครงยึด

รูป 8.2 แสดงภาพโดยรวมของกำแพง SFRC ที่ไม่มีโครงยึดในบ้านพักอาศัย, โรงแรม โรงเรียน และอื่นๆ

กำแพงประเภทนี้ประกอบด้วยเหล็กวางวิ่งอยู่ในส่วนบน และส่วนล่าง, glass wool และผนัง SFRC น้ำหนักเบา ขนาดความหนา 40 มม. กว้าง 600 มม. ผนังนี้สามารถเปลี่ยนความสูงตามการใช้งานได้จากพื้นถึงระดับฝ้าเพดาน ผนังจะถูกยึดติดด้านบนและด้านล่างด้วยสกรูแผ่น จากนั้น glass wool จะถูกนำมาติดตั้งในช่องว่างถัดมา สุดท้ายผนังเช่นเดิมจะถูกยึดติดกับอีกด้านของเหล็กวางทั้งด้านบนและด้านล่างด้วยตะปู

ลักษณะกำแพงแสดงดังรูป 8.3 (จาก A ถึง C)

กำแพงส่วนนี้สามารถจะเกิดการเสียรูปได้ 0.01 เเรเดียน โดยไม่เกิดการพังจากแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.1.3.2.2 กำแพง SFRC ที่มีโครงสร้าง

รูป 8.4 แสดงภาพโดยรวมของกำแพงประเภทนี้ ใช้ในอาคารพักอาศัยทั่วไป

ลักษณะของกำแพงแสดงในตาราง 8.3 (จาก D ถึง E) กำแพงประเภทนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงน้ำหนักและทำให้การติดตั้งกำแพง SFRC ชนิดไม่มีโครง เป็นไปอย่างรวดเร็ว กำแพงประเภทนี้ประกอบด้วย โครงยึด, เหล็กวางวิ่ง, ผนัง SFRC และชิปซีเมนต์บอร์ด

รูป 8.4 ขนาดมาตรฐานของผนัง SFRC คือ ฮาว 900 มม. กว้าง 450 มม. และหนา 25 มม. น้ำหนักผนังประมาณ 12 กก.

### 8.1.3.2.3 SFRC shaft wall

กำแพงชนิดนี้ใช้สำหรับลิฟท์, บันได และ ท่อ มีความสามารถทนไฟได้ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 8.3 (รูป F) โดยมีความสูงตามต้องการจากพื้นถึงระดับฝ้าเพดาน ขนาดมาตรฐานคือ กว้าง 600 มม., หนา 65 มม. ติดตั้งโดยใช้เครน

ประโยชน์ใช้งาน ปัจจุบันกำแพง SFRC ถูกใช้ประมาณ 20 อาคารในญี่ปุ่น พื้นที่ติดตั้งประมาณ 60,000 ม<sup>2</sup> รูป 8.5-8.6 แสดงการใช้ประโยชน์ของกำแพง SFRC ทั้งชนิดมีโครงและชนิดไม่มีโครงยึด

### 8.1.4 Slurry - Infiltrated Fiber Concrete

Slurry - infiltrated fiber concrete (SIFCON) เป็นส่วนผสมไฟเบอร์คอนกรีตชนิดพิเศษที่บรรจุปริมาณไฟเบอร์สูงถึง 20% โดยใช้ steel fiber จากการที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรสูง ทำให้เกิดคุณสมบัติส่วนตัวของ SIFCON ในหน่วยพื้นที่ ทั้งค่ากำลังอัดประลัย และความเหนียวทน การเตรียมเทคนิคการทำงาน, คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ต่างๆ ต้องถูกเตรียมพร้อม

ในแง่ของการใช้งาน เนื่องจาก SIFCON เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ แต่ก็ยังมีการนำไปใช้งานในหลายพื้นที่ ดังนี้

8.1.4.1 หลังคาโค้งที่ถูกสร้างให้ปลอดภัย โดยใช้ป้องกันผลกระทบจากการระเบิด, การขูดเจาะและการเกิดไฟไหม้

SIFCON ไม่ไหม้ไฟเนื่องจากคอนกรีตจะต่อต้านการลุกลามของความร้อน และลดระดับการนำความร้อนลง

SIFCON สามารถกันการระเบิดได้จากความเหนียวทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIFCON สามารถทนต่อการหักกร่อนหรือการขูดเจาะ จากการรวมตัวของไฟเบอร์

8.1.4.2 สร้างถึงด้านทานแรงระเบิด เพื่อบรรจุวัสดุที่อาจจะเกิดอุบัติเหตุให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ที่ New Mexico Research Institute in Albuquerque, New Mexico, U.S.A. ได้สร้างไซโลขนาดสูง 6.1 เมตร เพื่อใช้บรรจุจรวด (missile) เมื่อได้แบบไซโลที่สมบูรณ์แบบจะฝังมันในใต้ดิน และทดสอบถึงความต้านทานต่อแรงกระทำจากการระเบิด

8.1.4.3 การซ่อมแซมส่วนประกอบโครงสร้าง เช่น ความเสียหายจากคอนกรีตอัดแรง

8.1.4.4 การบำรุงรักษาสะพาน

8.1.4.5 การบำรุงรักษาพื้นผิวทาง

8.1.4.6 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จ เช่น พื้นคอนกรีตสำเร็จ, หลังคาขนาดเล็กและอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น แผ่นบอร์ดของบาสเกตบอล

8.1.4.7 การใช้งาน ในส่วนทนไฟ

## 8.2 Glass Fiber - Reinforced Concrete

การใช้งานโดยทั่วไปจะเป็นงานผิวหน้าและผนังตกแต่งทางสถาปัตยกรรมของอาคารต่อไปนี้จะเป็นการใช้งานต่างๆ ของ GFRC ที่ถูกนำไปปฏิบัติแล้ว

8.2.1 ด้านเกษตรกรรม เช่น อ่างเก็บน้ำ, รางน้ำ, รางเก็บของ, คลองส่งน้ำและอื่นๆ

8.2.2 งานผิวหน้าด้านสถาปัตยกรรม เช่น งานผนังภายใน, งานผนังภายนอก ประตูและโครงประตู, การตกแต่งพื้นผิวทางสถาปัตยกรรม, หน้าต่างและโครงสร้างประกอบภายใน, วัสดุห้องน้ำสำเร็จรูป, สุขภัณฑ์

8.2.3 การใช้งานแทน Asbestos เช่น แผ่นเคลือบทั่วไป, ทางเดินและหลังคากระเบื้อง, เบาะกันไฟและท่อ

8.2.4 ท่อส่งและท่อเข้าฟัท เช่น ท่อเดินภายในสำหรับสายเคเบิล, ท่อบริการภายใน

8.2.5 ระบบป้องกันไฟ เช่น ประตูหนีไฟ, กำแพงกันไฟภายใน

8.2.6 องค์ประกอบอาคารทั่วไป เช่น ระบบหลังคา, เสากลางที่ไม่ใช่ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้าง, พื้นกันกระแทกของโรงงานอุตสาหกรรม อื่นๆ

8.2.7 อาคารที่พักอาศัยราคาถูกลง เช่น การใช้โครงไม้ที่ทับด้วย GFRC ทั้ง 2 ด้าน หรือด้านใดด้านหนึ่ง, การใช้พื้นหรือหลังคาสำเร็จรูป

8.2.8 การใช้งานในส่วนเหมืองแร่

8.2.9 พื้นผิวทาง ทางซ่อมแซมเทกกับหน้า เพื่อควบคุมการกระจายตัวการเกิด รอยแยก

8.2.10 อุปกรณ์บรรจุของขนาดเล็ก เช่น กล่องอุปกรณ์การสื่อสาร, แทงค์ หรือไซโลเก็บของ อื่นๆ

8.2.11 การใช้งานด้านการเก็บกักน้ำและท่อส่งน้ำ เช่น ท่อส่งน้ำ, รางระบาย น้ำ, อ่างเก็บน้ำ อื่นๆ

### 8.3 Polymeric Fibers

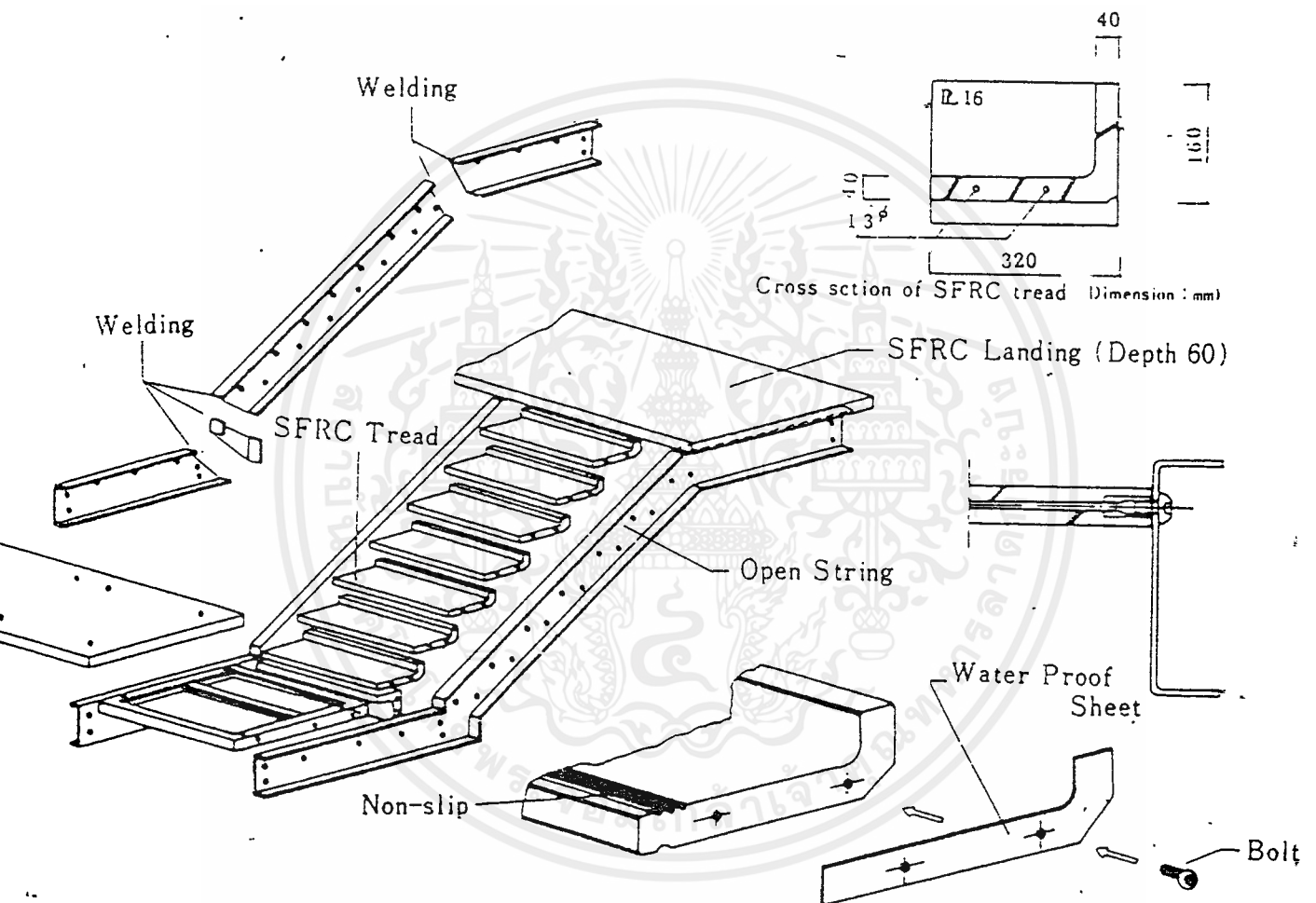
- polyurethane foam

มีการใช้งานก่อสร้างด้านโค้ง โดยการเพิ่มความหนาของชั้น ด้วยวิธี shotcrete โดยชั้นแรกเป็นโฟมอยู่ด้านในสุด จะมีการใช้ปริมาณการเสริมเหล็กเพียงเล็กน้อยที่ฐานของส่วนโค้ง fiber shotcrete จะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับ polyurethane foam ส่วนโค้งนี้สามารถใช้ได้กับบ้าน, สำนักงาน, และการเก็บผลิตภัณฑ์ต่างๆ

- ใน Canada ใช้ polymeric fiber reinforced shotcrete ในการคลุมวัสดุ เพื่อป้องกันความเสียหายจากการเคลื่อนย้ายที่ตั้ง

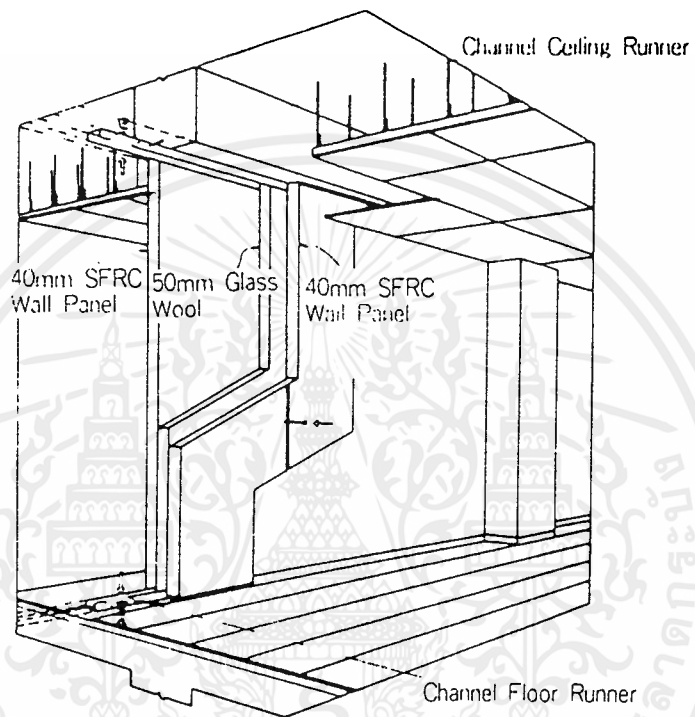
### 8.4. Carbon Steel fiber

ถูกใช้ในงานที่ทนไฟ (อุณหภูมิน้อยกว่า 537 c) เมื่อเกิดไฟไหม้ รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายไปยังด้านที่เย็นกว่า แต่จะถูกต้านทานโดยไฟเบอร์ที่เหลือนิ่ง ซึ่งเกาะกลุ่มประสานกันแน่น และมีกำลังรับแรงที่มีประสิทธิภาพพอป้องกันการแตกร้าวได้



รูปที่ 8.1 แสดงภาพรวมของบันได SFRC ก่อนประกอบ เพื่อใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



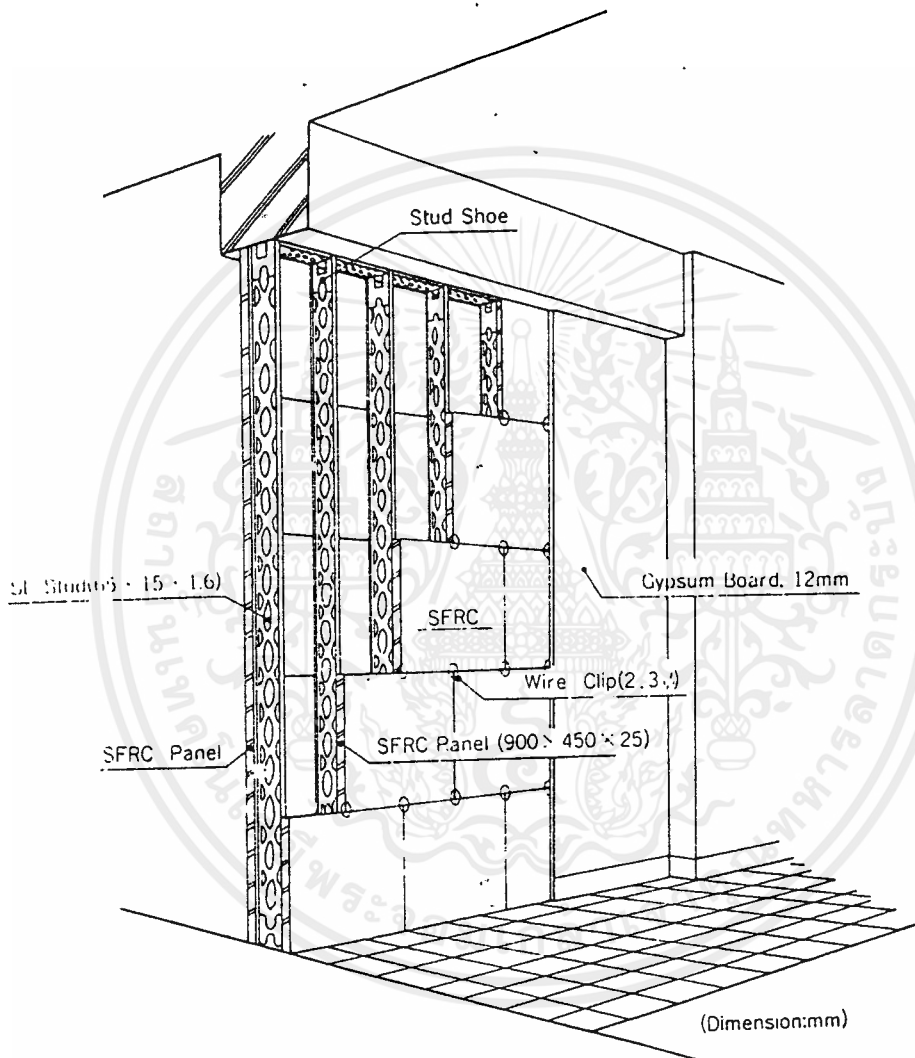
รูปที่ 8.2 แสดงภาพโดยรวมของกำแพง SFRC ชนิดไม่มีโครงยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type of partition	Party walls					Shaft wall
	Studless - type		Stud - type			Studless - type
Vertical section = Symbol						
Partition weight	105 kg/m <sup>2</sup>	GB = 9 mm 120 kg/m <sup>2</sup>	GB = 12 mm 125 kg/m <sup>2</sup>	GB = 12 mm 87 kg/m <sup>2</sup>	GB = 15 mm 93 kg/m <sup>2</sup>	35 kg/m <sup>2</sup>
Fire resistance rating	2 hours	2 hours	2 hours	2 hours	2 hours	2 hours
Sound rating	D - 45	D - 45	D - 50	D - 45	D - 45	D - 35
Sound transmission loss characteristics	(Hz) (dB) 125 36 250 44 500 51 1000 48 2000 56 4000 64	(Hz) (dB) 125 37 250 44 500 51 1000 52 2000 59 4000 65	(Hz) (dB) 125 38 250 45 500 50 1000 54 2000 59 4000 62	(Hz) (dB) 125 33 250 41 500 46 1000 53 2000 57 4000 61	(Hz) (dB) 125 33 250 41 500 45 1000 52 2000 56 4000 61	(Hz) (dB) 125 31 250 28 500 33 1000 40 2000 50 4000 57

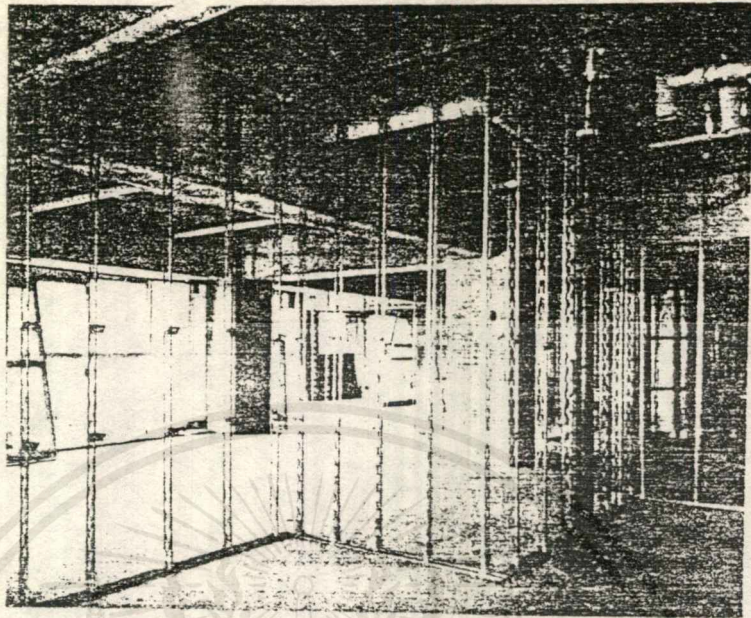
รูปที่ 8.3 ตารางแสดงผนัง SFRC ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

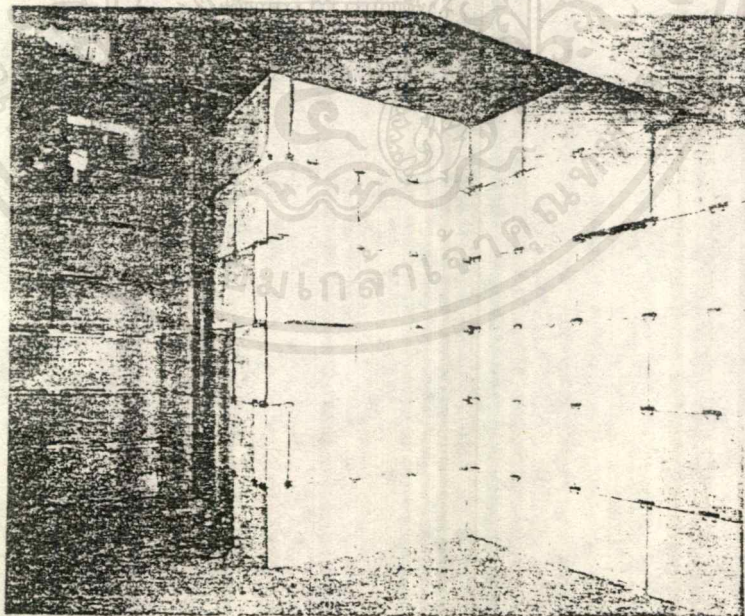


รูปที่ 8.4 แสดงภาพโดยรวมของกำแพง SFRC ชนิดมีโครงยึด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

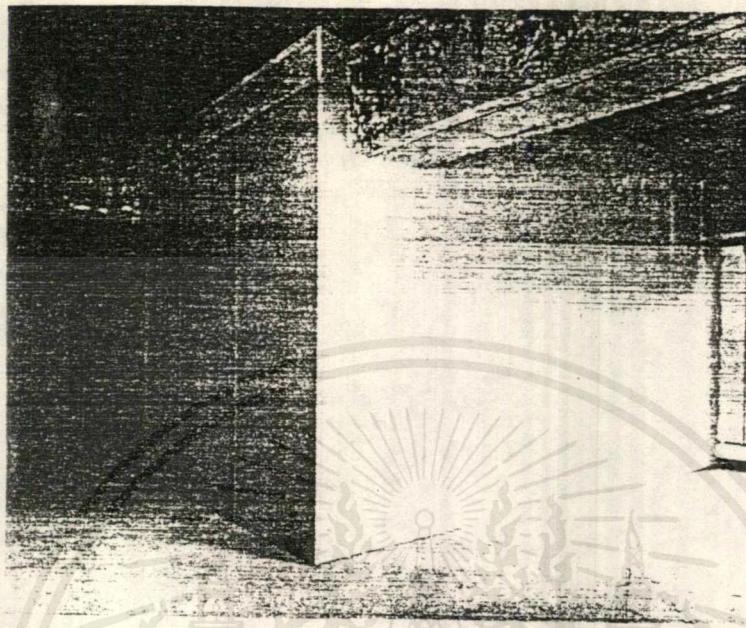


ก. แสดงเหล็กโครงสร้างติดตั้งผนังน้ำหนักเบา SFRC

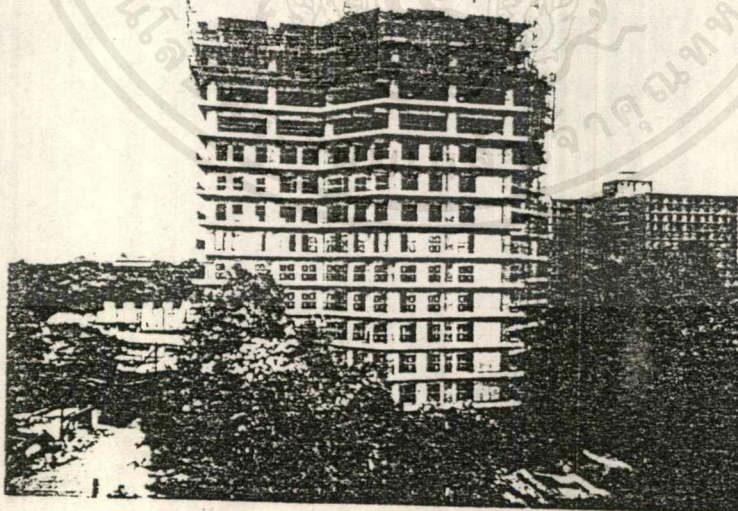


ข. แสดงผนัง SFRC ชนิดมีโครงยึดก่อนเปิดบ่มซีเมนต์ทั้งสองด้าน

รูปที่ 8.5 แสดงตัวอย่างการใช้งานผนัง SFRC ชนิดมีโครงยึดของอาคารที่พักอาศัยในโตเกียว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



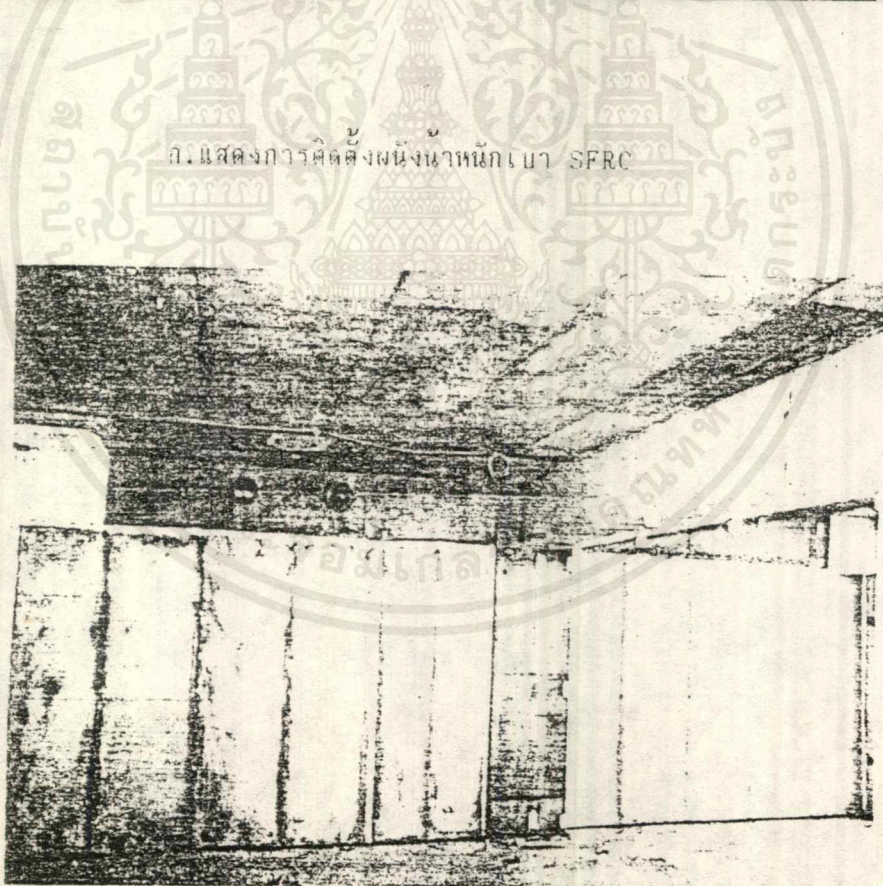
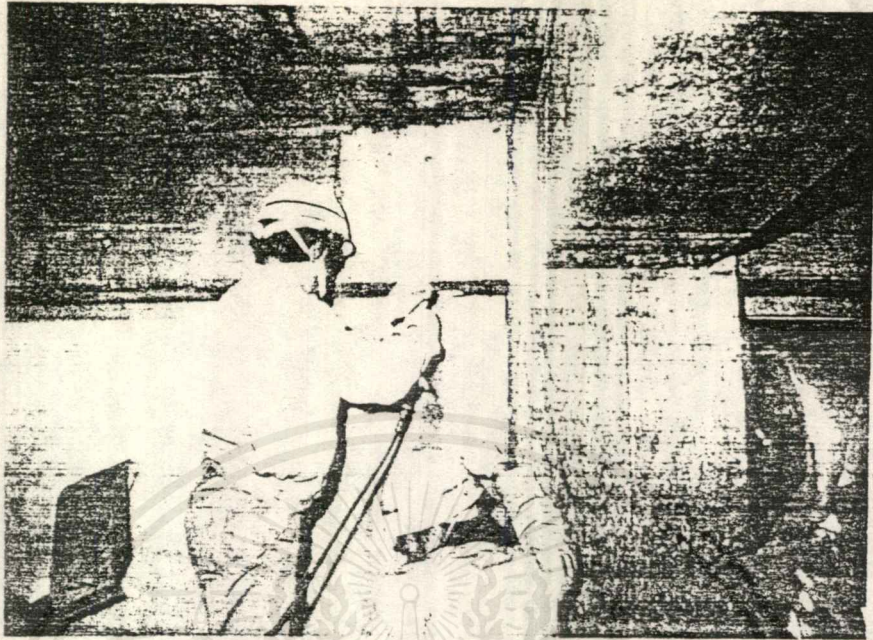
ค. กำแพงชนิด SFRC มีโครงยึดหลังจากติดตั้งยิปซัมบอร์ดทั้ง 2 ด้าน



ง.อาคารพักอาศัยที่ใช้ผนัง SFRC ชนิดมีโครงยึด

รูปที่ 8.5 ตัวอย่างการใช้งานผนัง SFRC ชนิดมีโครงยึดของอาคารพักอาศัยในโตเกียว

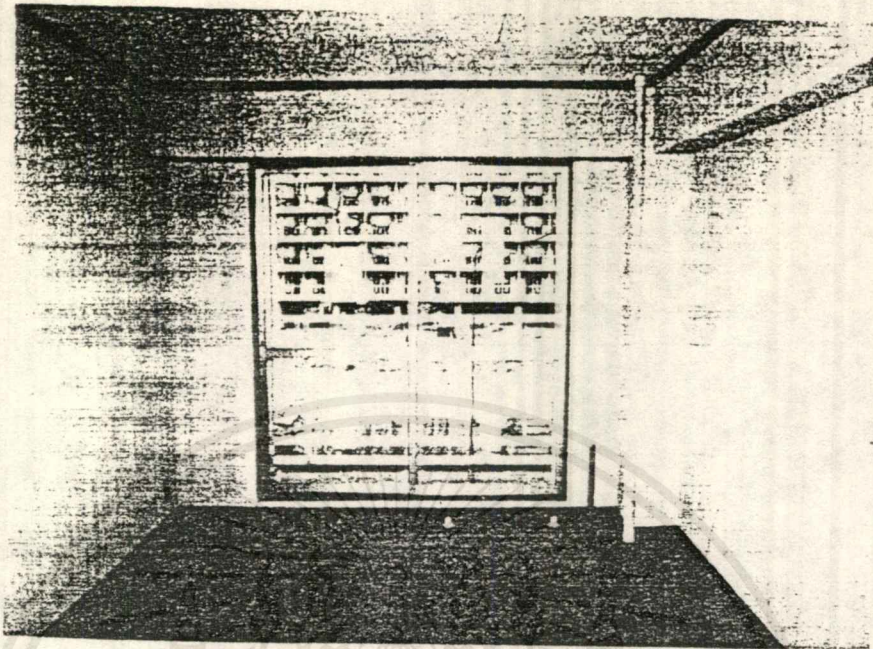
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. แสดงผนัง ก่อนเปิดยิบซั่มบอร์ดทับทั้ง 2 ด้าน

รูปที่ 8.6 แสดงตัวอย่างการใช้งานผนัง SFRC ชนิดไม่มีโครงยึดของอาคารพักอาศัยในชั้นปาร์โกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



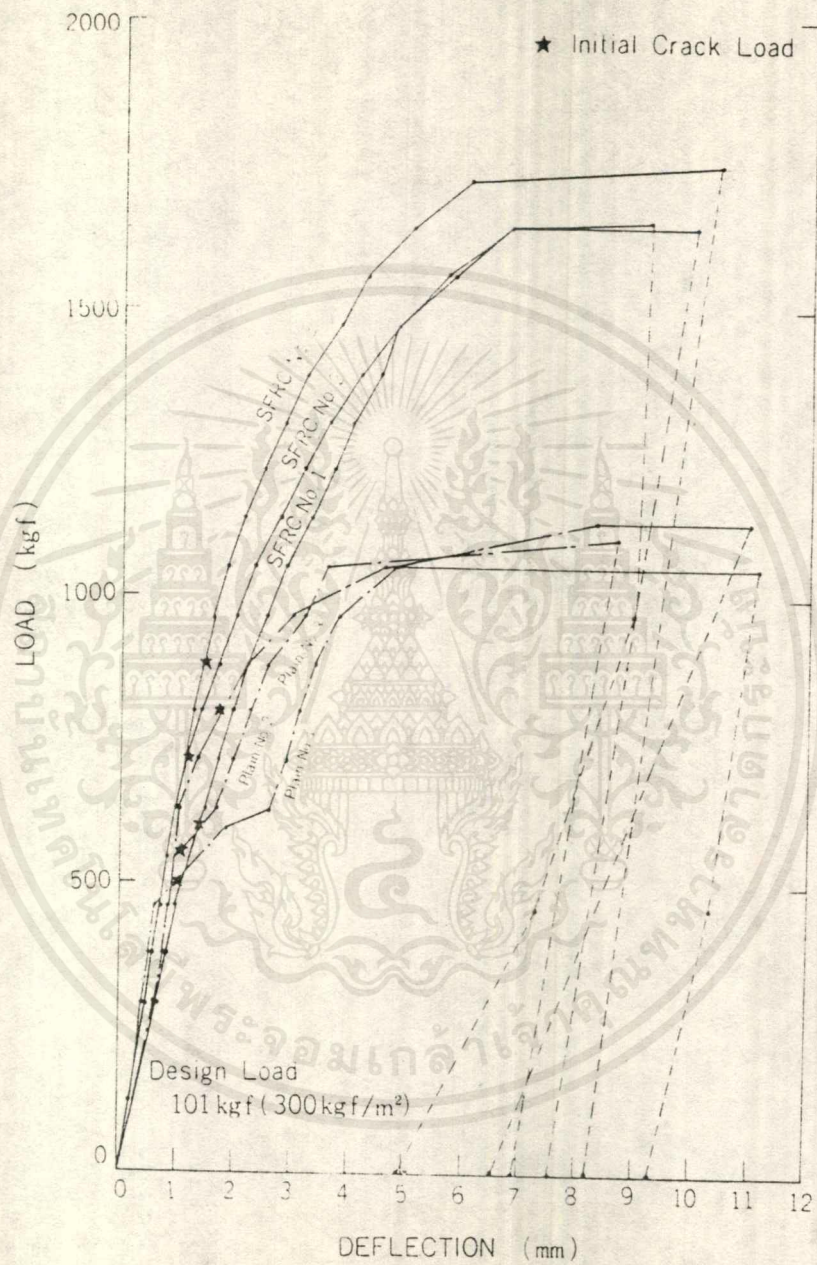
ค. แสดงผนัง SFRC หลังจากปิดยิบซั่มบอร์ดและผ้าทั้ง 2 ด้าน



ง. แสดงอาคารที่พักอาศัยที่ใช้กำแพง SFRC

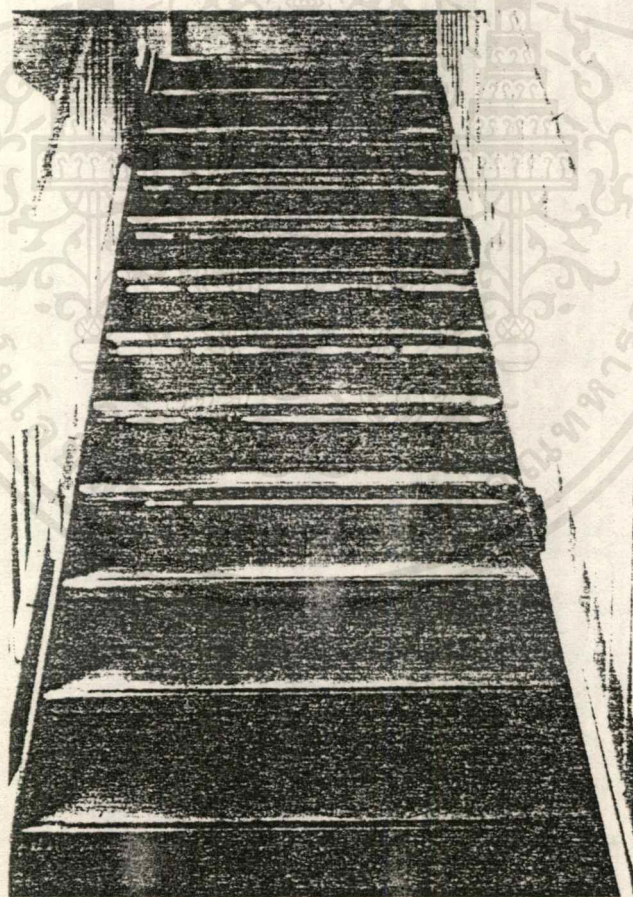
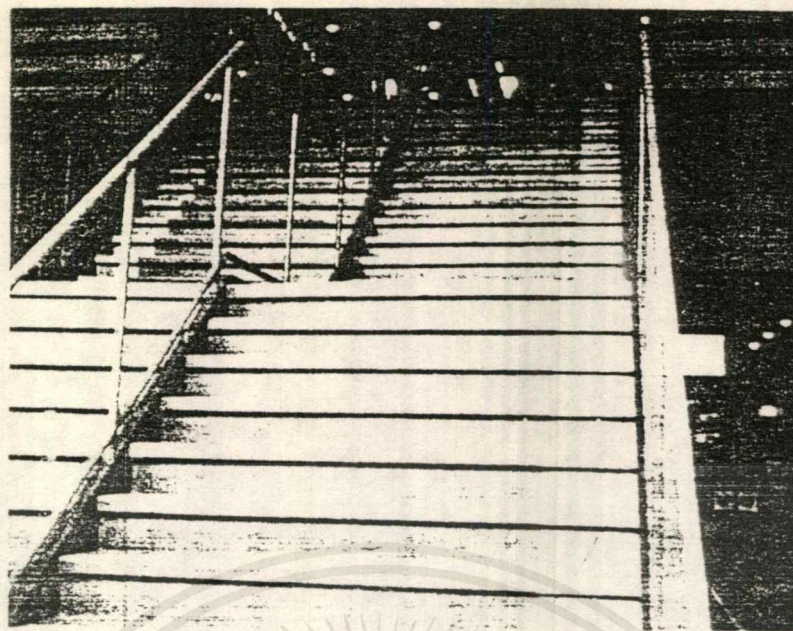
รูปที่ 8.6 แสดงตัวอย่างการใช้งานผนัง SFRC ชนิดไม่มีโครงยึดของอาคารพักอาศัยในชั้นโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



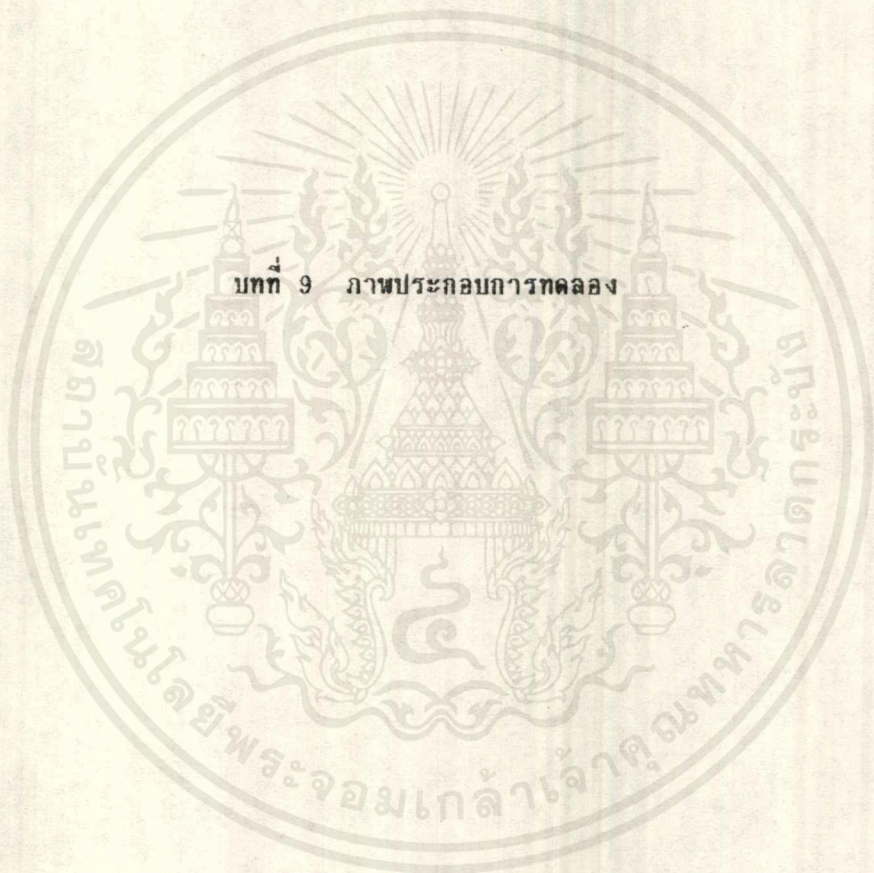
รูปที่ 8.7 กราฟ LOAD - DEFLECTION ของชิ้นบันไดประเภทเสริมไฟเบอร์และ  
ไม่เสริมไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

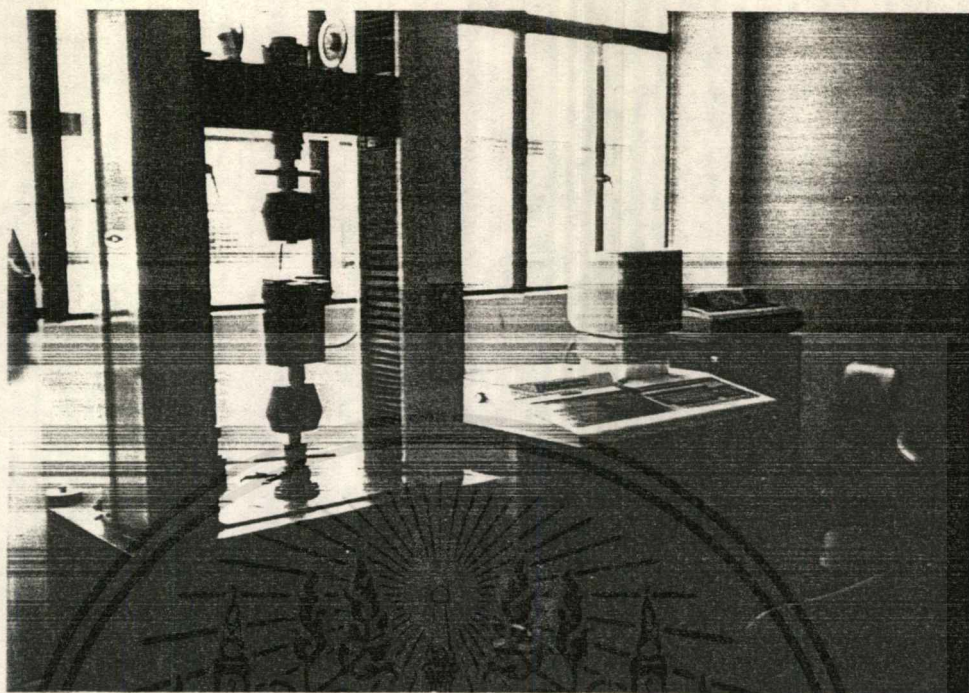


รูปที่ 8.8 และ 8.9 แสดงการใช้งานของชั้นบันได SFRC

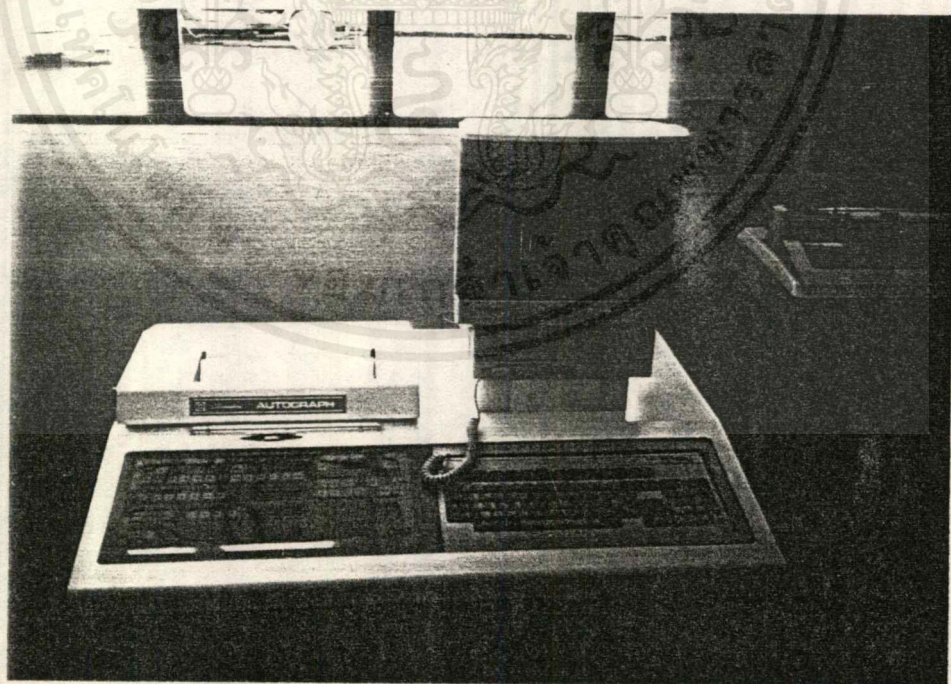
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

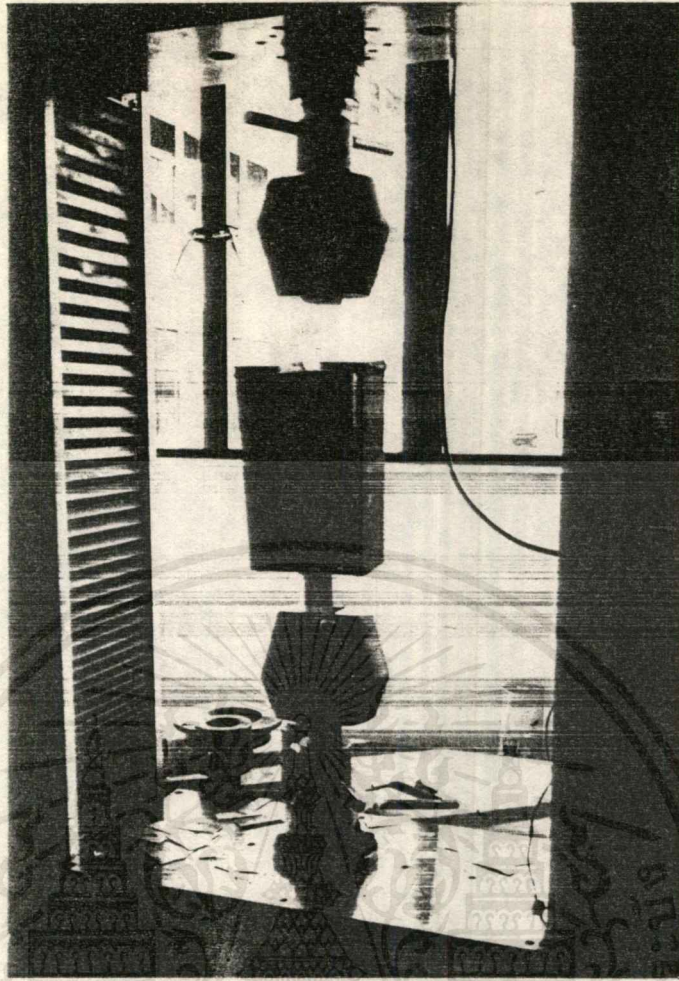


รูปที่ 9.1 รูปเครื่อง UTM สำหรับทดสอบ BOND STRENGTH ของลวด



รูปที่ 9.2 รูปแสดงเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่อง UTM ที่ใช้ BOND STRENGTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

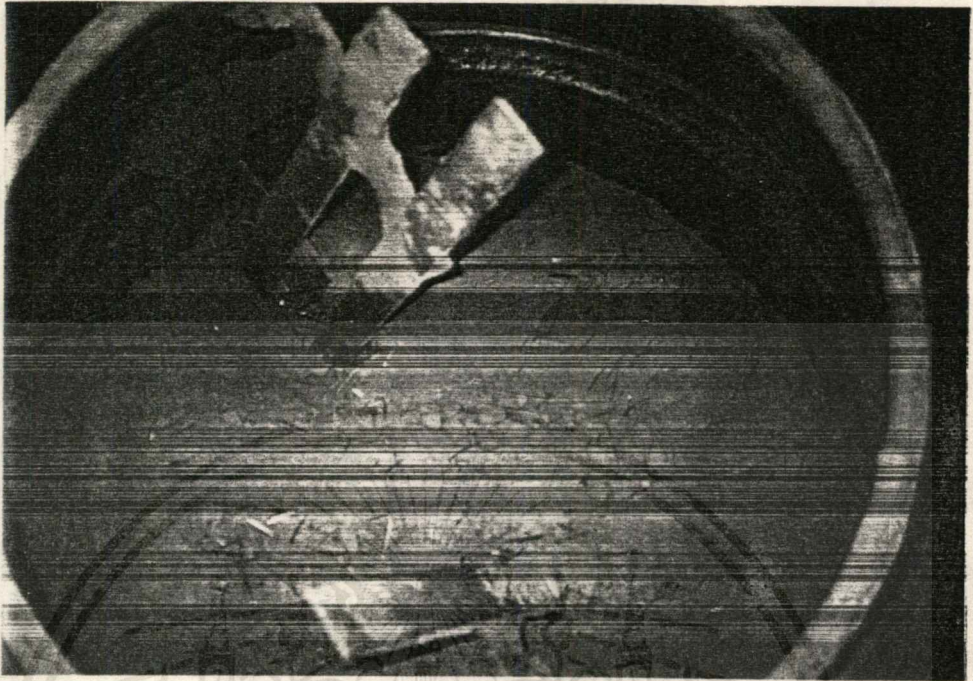


รูปที่ 9.3 รูปการเตรียมเครื่องมือสำหรับทดสอบ BOND STRENGTH

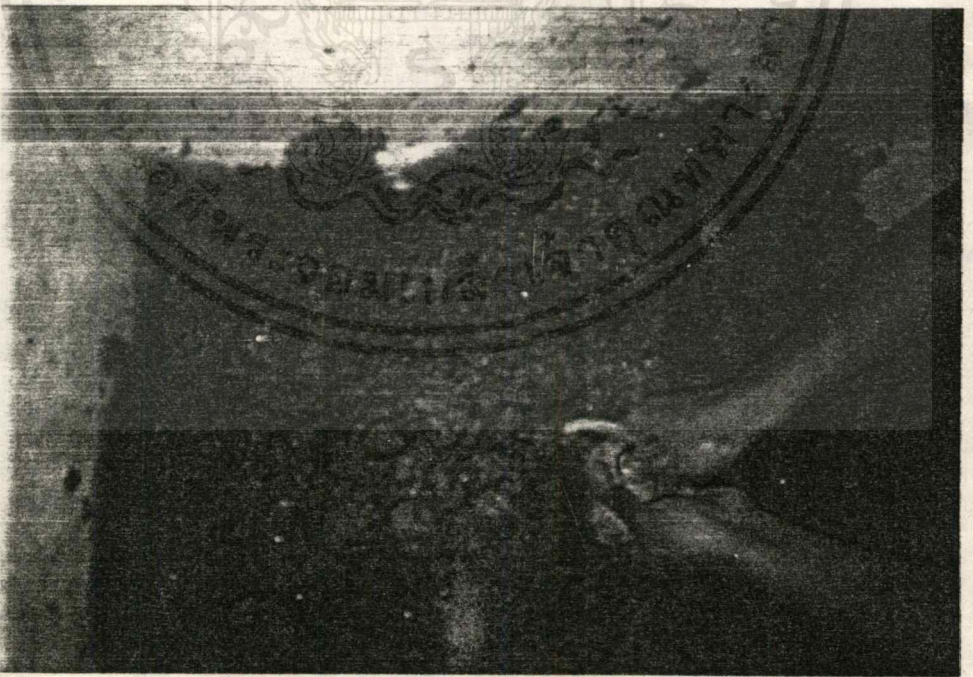


รูปที่ 9.4 รูปไฟเบอร์ที่เตรียมไว้ผสมกับคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

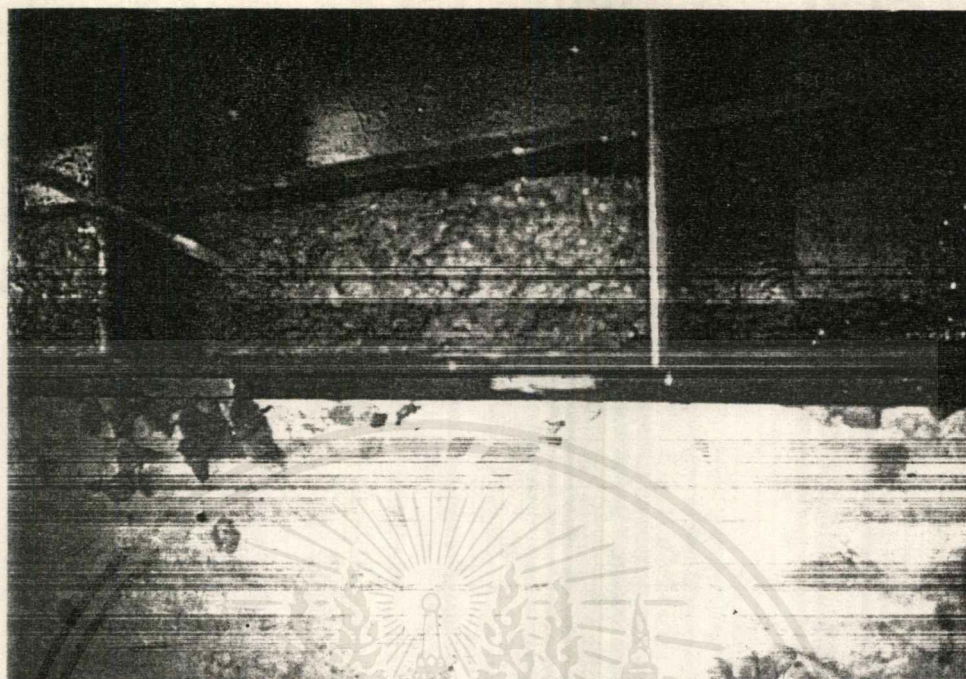


รูปที่ 9.5 รูปการผสมส่วนผสมของคอนกรีตกับไฟเบอร์ในโมผสม

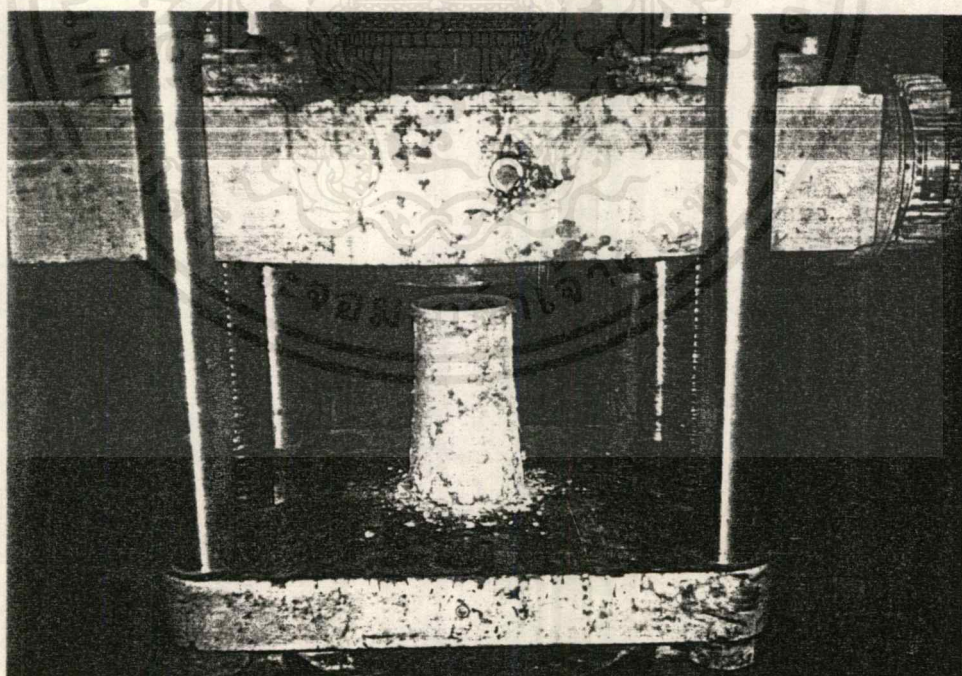


รูปที่ 9.6 รูปคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะ(ลาด)ที่เพิ่งผสมเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

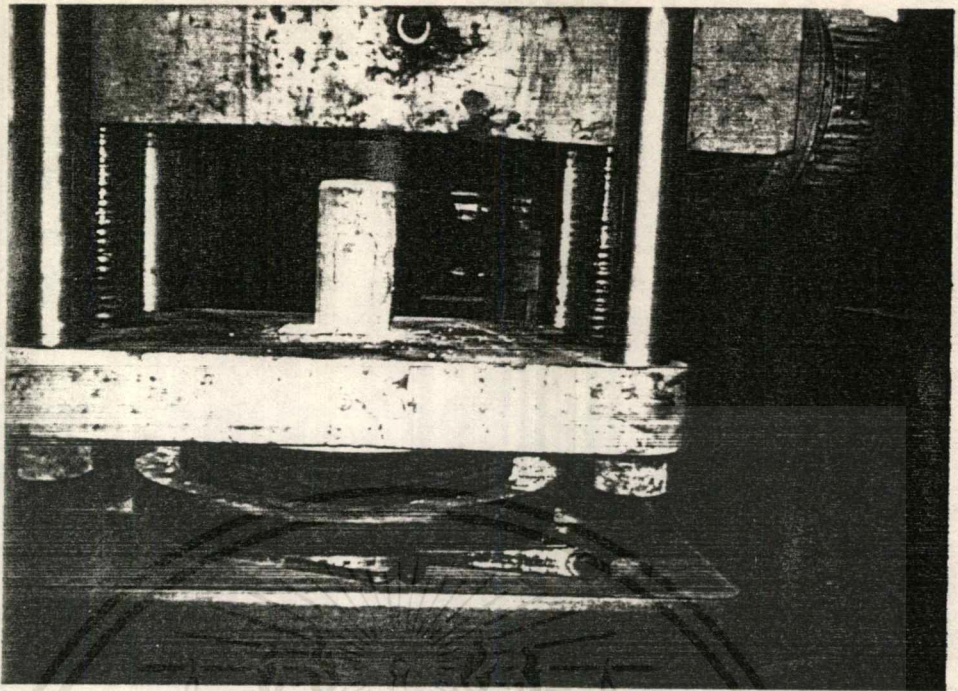


รูปที่ 9.7 รูปการทดสอบการอัดเสริมเส้นใยโลหะลงในแบบคาน



รูปที่ 9.8 รูปการทดสอบ COMPRESSIVE STRENGTH ของคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

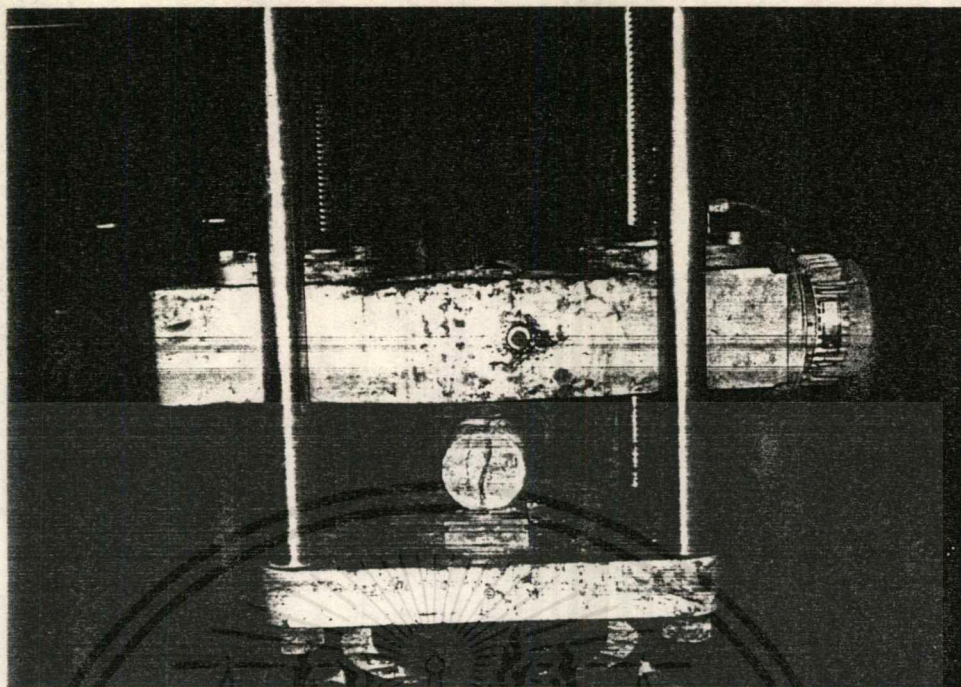


รูปที่ 9.9 รูปการทดสอบ COMPRESSIVE STRENGTH ของลูกปูนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4"

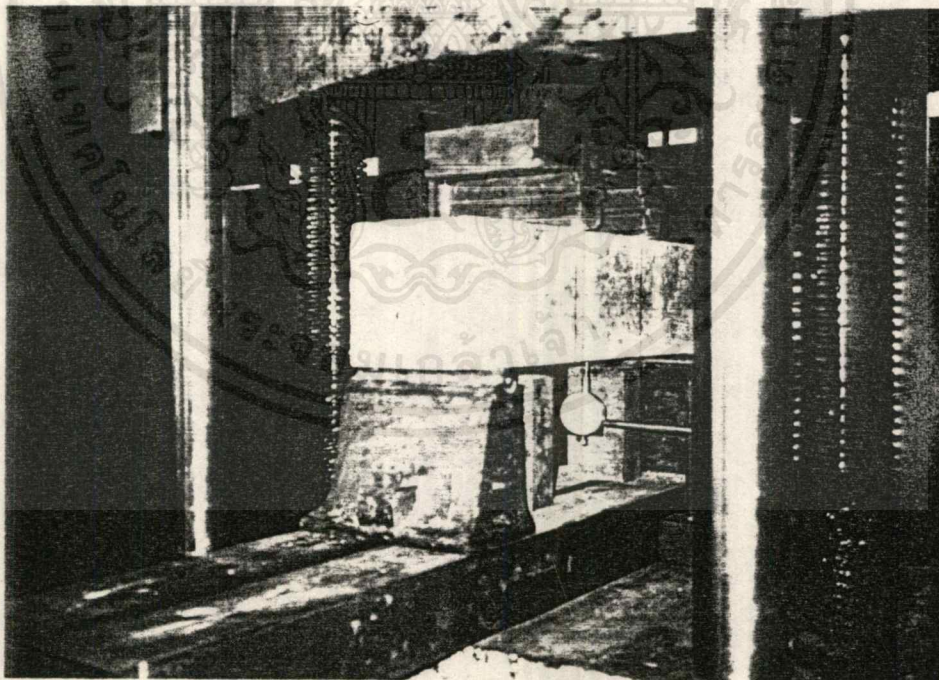


รูปที่ 9.10 รูปแสดงการพังทลายด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ 45 องศาของการทดสอบ  
COMPRESSIVE STRENGTH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

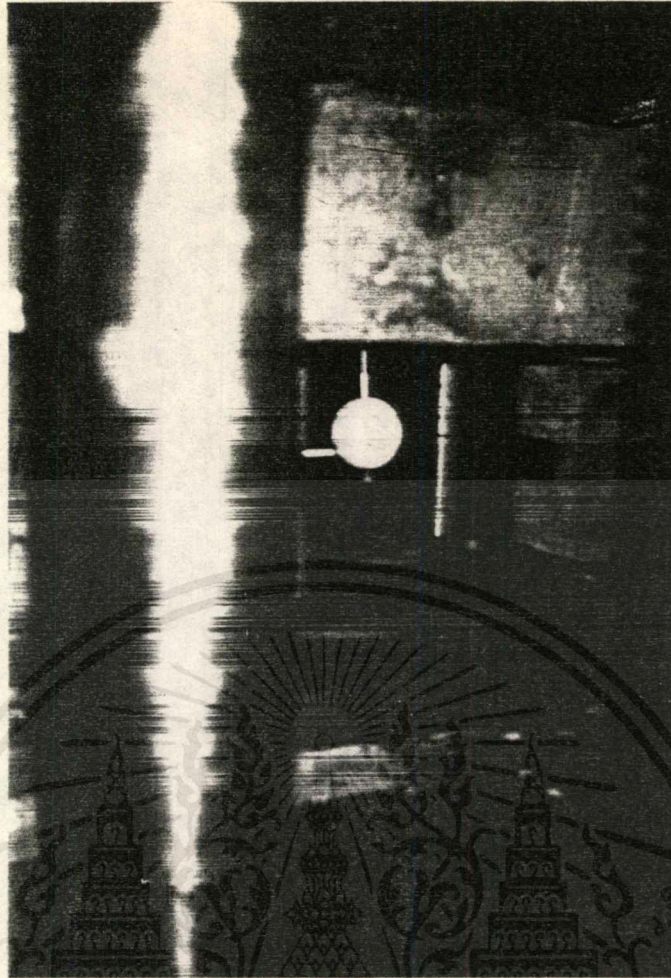


รูปที่ 9.11 รูปการทดสอบ SPLITTING TENSILE STRENGTH ของคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะ

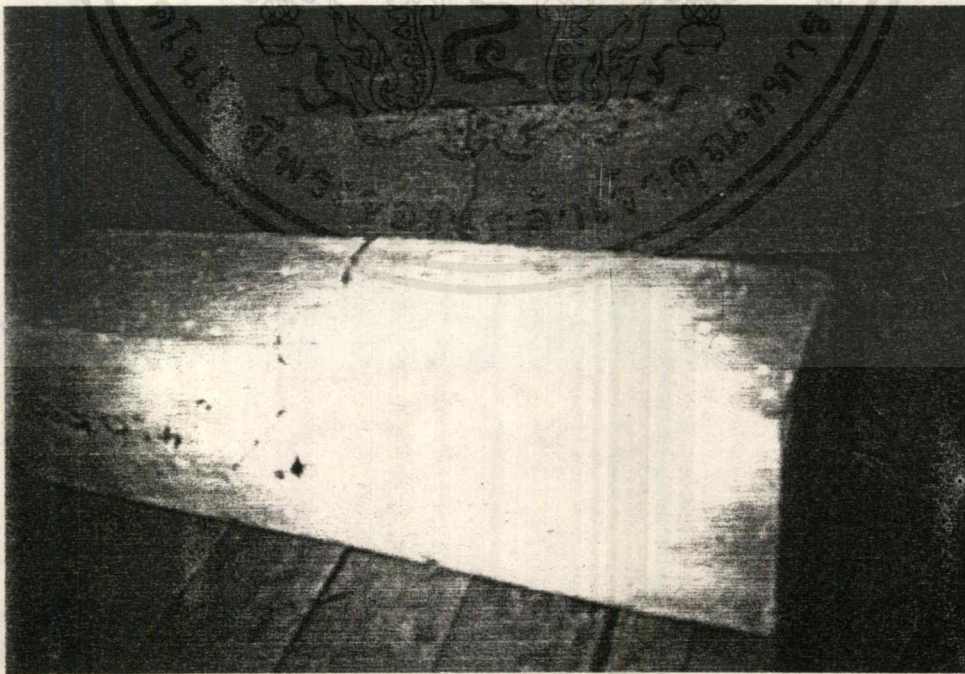


รูปที่ 9.12 รูปการทดสอบ FLEXURAL STRENGTH และ TOUGHNESS ของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

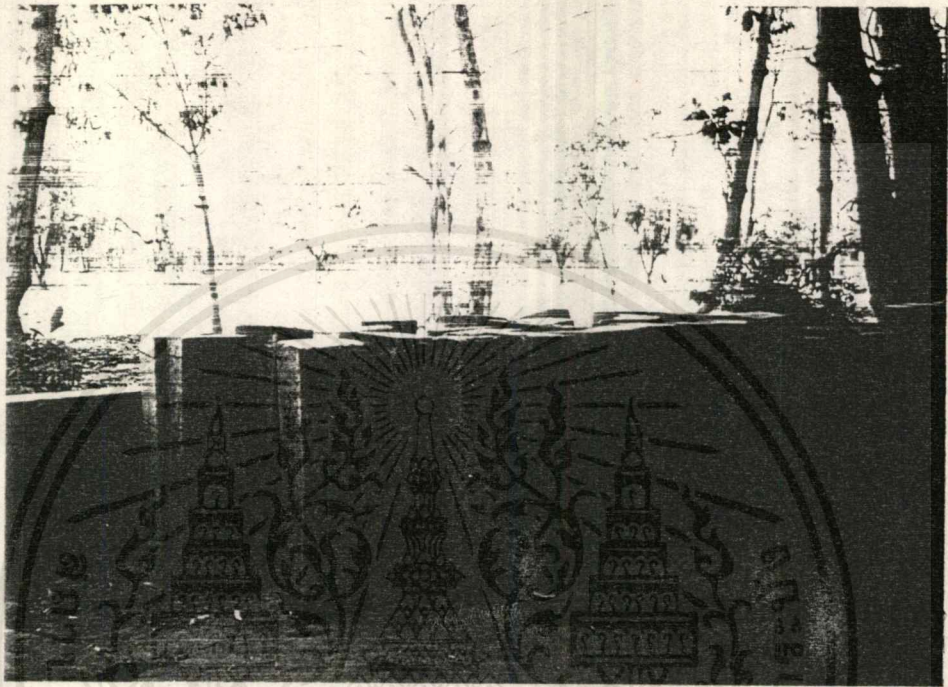


รูปที่ 9.13 รูปแสดงตำแหน่งการวัดค่า DEFLECTION ของคานในการทดสอบ FLEXURAL และ TOUGHNESS



รูปที่ 9.14 รูปแสดงการพังทลายของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่เกิดขึ้นบริเวณกลางคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.15 รูปคานคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ผ่านการทดสอบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 10 ข้อผิดพลาดและอุปสรรคในการทดลอง

1. การทดสอบ Compressive Strength ของลูกปุ่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ใช้แบบจากท่อ PVC สูง 20 cm. ซึ่งไม่ใช่ขนาดมาตรฐานของ ASTM ลูกปุ่นตัวอย่างขนาดนี้ได้ถูกใช้ในการทดสอบค่า Bond Strength ของเส้นลวดที่จะใช้เป็นไฟเบอร์กับคอนกรีต เสร็จแล้วจึงนำลูกปุ่นมาทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อตรวจสอบค่ากำลังอัดที่แท้จริง ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับลูกปุ่นขนาดใหญ่ ดังตารางผลการทดลอง และผลการคำนวณค่ากำลังอัดของลูกปุ่นในการทดลองที่ 2
2. เนื่องจากการทดลองในโครงการพิเศษนี้ เป็นการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน จึงมีตัวแปรในการเลือกหลายตัว ทำให้เกิดอุปสรรคในการทดลอง ทั้งด้านปริมาณการทดลอง และการควบคุมคุณภาพ ทำให้ไม่สามารถควบคุมตัวแปรได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้มีข้อผิดพลาดในการทดลองในบางชิ้นตัวอย่าง
3. เนื่องจาก SFRC เป็นวัสดุใหม่ที่ยังไม่มีการใช้กันมากนักในประเทศไทย จึงทำให้การจัดหาวัสดุไฟเบอร์โกละเป็นไปได้ยาก และมีราคาแพง
4. อุปสรรคในเรื่องของเครื่องมือทดสอบก็เป็นอีกประการหนึ่ง ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานอย่างอื่น ทำให้ต้องมีการไปอืมเครื่องมือของเพื่อนในการทดสอบ ทำให้เกิดความล่าช้าในการติดต่อเพื่อขอใช้เครื่องมือเสมอ

บรรณานุกรม

1. วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : หจก.ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2529.
2. ศิริวิวัฒน์ ไชยชนะ. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : พระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2535.
3. ACI COMMITTEE 544. STATE OF-THE-ART REPORT ON FIBER REINFORCED CONCRETE. UNITED STATE OF AMERICA, 1982
4. ANDREW PYTEL AND FERDINAND L. SINGER. STRENGTH OF MATERIALS. SINGAPORE : HARPERCOLLINS, 1980
5. BALAGURU, PERUMALSAMY N. AND SHAH SUREUDA P. FIBER REINFORCED CEMENT COMPOSITE. SINGAPORE : MCGRAW-HILL, 1990
6. R. N. SWAMY, P. S. MANGAT AND C. V. S. K. RAQ. THE MECHANICS OF FIBER REINFORCED CONCRETE. SINGAPORE : MCGRAW-HILL, 1985
7. YASUHIRA KAMIDA AND HAJIME KAISUMI. STUDIES AND APPLICATIONS OF STEEL FIBER REINFORCE CONCRETE. SINGAPORE : MCGRAW-HILL, 1982

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้