

คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น

นางสาวอมรรัตน์ สุริยวิจิตรเศรษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-484-7

**MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE  
REINFORCED WITH RECYCLED SHORT PLASTIC  
WIRES**

**Amornrat Suriyawichitsaranee**

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the**

**Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

**Suranaree University of Technology**

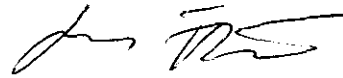
**Academic Year 2005**

**ISBN 974-533-484-7**

## คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น

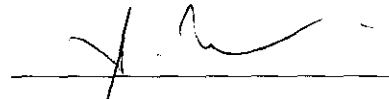
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.มงคล จีระวัชรเดช)

ประธานกรรมการ



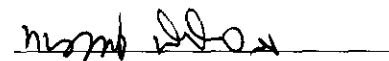
(ผศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

กรรมการ



(อ. ดร.ทองศักดิ์ พิษาลสิน)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี : คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น (MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE REINFORCED WITH RECYCLED SHORT PLASTIC WIRES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 158 หน้า. ISBN 974-533-484-7


งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีนำพลาสติก polyethylene terephthalate (PET) และ high density polyethylene (HDPE) มาเสริมคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และลดการแตกร้าว โดยใช้เส้นพลาสติก PET และ HDPE ที่ใช้แล้วแบบสั้นผสมในคอนกรีต ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4, 0.5, และ 0.6 รูปร่างเส้นพลาสติกตรงและซิกแซก และปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีตที่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 โดยปริมาตร โดยศึกษาพฤติกรรมรับแรงอัด (compression) พฤติกรรมรับแรงดัด (flexural) หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture) ใช้ตัวอย่างที่บ่มเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM

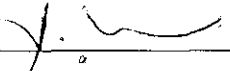
ผลการศึกษาพบว่า การเสริมเส้นพลาสติกให้กำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกมากขึ้น เส้นพลาสติก HDPE ให้กำลังรับแรงอัดลดลงน้อยที่สุดกว่าเส้นพลาสติก PET และเส้นพลาสติกซิกแซกลดกำลังรับแรงอัดมากกว่าเส้นพลาสติกตรง ชนิดและรูปร่างของเส้นพลาสติกมีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยมาก แต่การเสริมเส้นพลาสติกจะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยเส้นพลาสติก PET ซิกแซกปริมาณร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรให้กำลังรับแรงดัดสูงที่สุด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือสามารถประยุกต์ใช้กับองค์อาคารที่ต้องรับภาระกระแทก หรืองานที่ต้องควบคุมการแตกร้าวเช่น หลังคา อิฐบล็อก พื้น ถนน นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกอีกด้วย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

AMORN RAT SURIWICHITSARANEE : MECHANICAL  
PROPERTIES OF CONCRETE REINFORCED WITH  
RECYCLED SHORT PLASTIC WIRES. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. SITTICHAJ SEANGATITH, Ph.D. 158 PP. ISBN  
974-533-484-7

SHORT PLASTIC WIRES/ COMPRESSIVE STRENGTH/ FLEXURAL  
STRENGTH/ RECYCLED PLASTIC/ CONCRETE

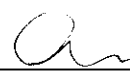
This research experimented with polyethylene terephthalate (PET) and high density polyethylene (HDPE) plastic wires as reinforcing materials for concrete to determine the optimal amount and shape of plastic wires. The studied parameters were water-cement ratio: 0.4, 0.5, and 0.6, fiber shape: straight and zigzag, and percent of plastic fiber: 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 percent by volume of concrete. The properties tested include the compression, the flexural, the modulus of elasticity, and the modulus of rupture, for 28-day specimens, using procedures outlined in ASTM.

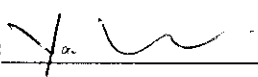
From the tests, it was found that the compressive strength and the modulus of elasticity of the concrete decreased with increasing amount of plastic wires. The zigzag plastic wires reduced the compressive strength more than straight ones. Type and shape of plastic wires have little significance on the modulus of elasticity. But the flexural strength of concrete increased. The zigzag PET plastic wires at 1.0 percent by volume, gave maximum the flexural strength.

Concrete reinforced with short plastic wires may be used in members subject to impact or where cracks need to be minimized. As added benefit is the reduction of plastic wastes

School of Civil Engineering

Academic Year 2005

Student's Signature 

Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ, อาจารย์ ดร.ทนต์ศักดิ์ พิศาลสิน, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวชิรเดช, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา
- คุณจิระ วงศ์พรหม คุณสวัสดิ์ เกตุสระน้อย และคุณวิชาญ วีรชัยสุนทร เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำมาโดยตลอด
- คุณพรรณพิจิตร มานิมนต์ และคุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับการติดต่อประสานงาน และอนุเคราะห์วัสดุที่จำเป็นการดำเนินงานวิจัย
- คุณพรพิไล กิติรัตน์ตระการ, คุณสิทธิชัย เลิศวิชัย และคุณศรัณย์ กำจัดโรค เพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ทำให้กำลังใจ กำลังกาย ให้คำปรึกษาและคำแนะนำมาโดยตลอด
- คุณจักษดา ช่างวุฒิ และคุณกรรณ คำลือ และบุคคลอื่นที่ได้ให้กำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด
- ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งและช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>3</b>
2.1 บทนำ.....	3
2.2 การเสริมกำลังคอนกรีต โดยใช้เส้นใยชนิดต่างๆ.....	3
2.3 ปรีทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.4 คุณสมบัติของ Polyethylene terephthalate .....	12
2.5 คุณสมบัติของ High density polyethylene.....	13
2.6 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต .....	16
2.6.1 กำลังรับแรงอัด .....	16
2.6.2 กำลังรับแรงคด .....	20
2.6.3 โมดูลัสยืดหยุ่น .....	21



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต .....	23
2.8 สรุป .....	24
<b>3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>26</b>
3.1 บทนำ .....	26
3.2 ตัวอย่างการทดสอบ .....	27
3.3 การวัดกำลังรับแรงดึงของเส้นพลาสติก .....	29
3.4 การวัดกำลังรับแรงอัด .....	29
3.5 การวัดกำลังรับแรงค้ำ .....	31
3.6 โมดูลัสยืดหยุ่น .....	32
3.7 การคำนวณ .....	32
<b>4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล .....</b>	<b>35</b>
4.1 บทนำ .....	35
4.2 กำลังรับแรงดึงของพลาสติก HDPE และ PET .....	35
4.3 กำลังรับแรงอัด .....	37
4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด .....	38
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณเส้นพลาสติกต่อกำลังรับแรงอัด .....	44
4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด .....	47
4.3.4 ผลเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยต่างๆ .....	49
4.4 กำลังรับแรงค้ำ .....	50
4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงค้ำ .....	51
4.4.2 อิทธิพลของปริมาณเส้นพลาสติกต่อกำลังรับแรงค้ำ .....	57
4.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงค้ำ .....	60
4.4.4 ผลเปรียบเทียบกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใยต่างๆ .....	62
4.5 โมดูลัสยืดหยุ่น .....	63
4.5.1 อิทธิพลของปริมาณเส้นพลาสติกต่อ โมดูลัสยืดหยุ่น .....	64

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.2 การเปรียบเทียบ โมดูลส์ยึดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกกับเส้นใยชนิด ต่างๆ โมดูลส์ยึดหยุ่น .....	66
4.6 ลักษณะการวิบัติ .....	67
4.7 การเปรียบเทียบการรับแรงอัดและการรับแรงดัด .....	69
<b>5 สรุปผลงานวิจัย .....</b>	<b>71</b>
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	71
5.1.1 กำลังรับแรงอัด .....	71
5.1.2 กำลังรับแรงดัด .....	71
5.1.3 โมดูลส์ยึดหยุ่น .....	72
5.1.4 ลักษณะการวิบัติ .....	72
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการใช้งาน .....	72
5.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย .....	72
5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป .....	73
<b>รายการอ้างอิง .....</b>	<b>74</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก วัสดุที่ใช้ในการศึกษา .....	76
ภาคผนวก ข การเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	83
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบ .....	92
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	144
<b>ประวัติผู้เขียน .....</b>	<b>158</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติเส้นใยชนิดต่างๆ.....	15
3.1 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบกำลังรับแรงดัด .....	28
4.1 คุณสมบัติเส้นพลาสติกที่ใช้ในการศึกษา.....	35
4.2 กำลังรับแรงอัด .....	37
4.3 กำลังรับแรงดัด .....	50
4.4 โมดูลัสยืดหยุ่น .....	64
ก.1 ระยะเวลาป่มคอนกรีต.....	80

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและแรงกระทำของคอนกรีตที่มีการเสริมเส้นใย .....	4
2.2 ลักษณะเส้นใยในคอนกรีตหรือมอร์ต้า .....	6
2.3 ลักษณะเส้นใยโพลีโพรพิลีน .....	12
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดคดอัดของคอนกรีต .....	17
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต .....	18
2.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามชนิดและอายุของคอนกรีต .....	20
2.7 กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆระหว่างการบ่ม .....	20
2.8 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต .....	22
3.1 ขวดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา .....	27
3.2 ลักษณะเส้นพลาสติกที่ใช้ในการศึกษา .....	27
3.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเส้นพลาสติก .....	29
3.4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	30
3.5 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดัด .....	32
4.1 หน่วยแรงดึงสัมพันธ์กับความเครียดของพลาสติก PET .....	36
4.2 หน่วยแรงดึงสัมพันธ์กับความเครียดของพลาสติก HDPE .....	36
4.3 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c = 0.4) .....	39
4.4 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c = 0.4) .....	39
4.5 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c = 0.4) .....	40
4.6 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c = 0.4) .....	40
4.7 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c = 0.5) .....	41
4.8 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c = 0.5) .....	41
4.9 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c = 0.5) .....	42
4.10 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c = 0.5) .....	42
4.11 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c = 0.6) .....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c = 0.6) .....	43
4.13 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c = 0.6) .....	44
4.14 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c = 0.6) .....	44
4.15 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.4).....	45
4.16 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.5).....	46
4.17 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.6).....	46
4.18 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (0.5% plastic) .....	47
4.19 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.0% plastic) .....	47
4.20 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.5% plastic) .....	48
4.21 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (2.0% plastic) .....	48
4.22 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดต่างๆ.....	49
4.23 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c=0.4).....	51
4.24 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c=0.4) .....	52
4.25 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c=0.4) .....	52
4.26 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c=0.4).....	53
4.27 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c=0.5).....	53
4.28 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c=0.5) .....	54
4.29 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c=0.5) .....	54
4.30 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c=0.5) .....	55
4.31 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c=0.6).....	55
4.32 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c=0.6) .....	56
4.33 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c=0.6) .....	56
4.34 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการ โกงตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c=0.6).....	57
4.35 โมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c=0.4) .....	57
4.36 โมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c=0.5) .....	58
4.37 โมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c=0.6) .....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ลักษณะเส้นพลาสติกตรงในเนื้อคอนกรีต.....	59
4.39 ลักษณะเส้นพลาสติกซิกแซกในเนื้อคอนกรีต.....	60
4.40 กำลังรับแรงค้ำยันสัมพัทธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (0.5% plastic) .....	60
4.41 กำลังรับแรงค้ำยันสัมพัทธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.0% plastic) .....	61
4.42 กำลังรับแรงค้ำยันสัมพัทธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.5% plastic) .....	61
4.43 กำลังรับแรงค้ำยันสัมพัทธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (2.0% plastic) .....	62
4.44 กำลังรับแรงค้ำยันของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดต่างๆ.....	63
4.45 โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพัทธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c=0.4).....	65
4.46 โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพัทธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c=0.5).....	65
4.47 โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพัทธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c=0.6).....	66
4.48 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดต่างๆ.....	67
4.49 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอก.....	68
4.50 ลักษณะการวิบัติของกานคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติก.....	68
4.51 การเพิ่มขึ้นของกำลังค้ำยันและการลดลงของกำลังรับแรงอัด (w/c = 0.4).....	69
4.52 การเพิ่มขึ้นของกำลังค้ำยันและการลดลงของกำลังรับแรงอัด (w/c = 0.5).....	70
4.53 การเพิ่มขึ้นของกำลังค้ำยันและการลดลงของกำลังรับแรงอัด (w/c = 0.6).....	70
ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ที่อายุ 28 วัน.....	81
ข.1 ขวดน้ำดื่มที่ทำจากพลาสติกชนิด HDPE และ PET .....	85
ข.2 เครื่องตัดเส้นพลาสติกตรง .....	85
ข.3 เครื่องตัดเส้นพลาสติกซิกแซก .....	86
ข.4 แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก .....	87
ข.5 เครื่องเขย่าคอนกรีต.....	87
ข.6 แบบหล่อตัวอย่างคาน .....	90
ข.7 การบ่มตัวอย่างทดสอบ .....	91
ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hs0.0.....	93











## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	=	ระยะเฉลี่ยจากจุดที่แตกไปยังฐานรองรับที่ใกล้กว่า
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอก
$b$	=	ความกว้างของคาน
$d$	=	ความลึกของคาน
$E_c$	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
$f'_c$	=	กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต
$L$	=	ความยาวของคาน
$P$	=	น้ำหนักกด
$P_{max}$	=	น้ำหนักกดสูงสุด
$R$	=	โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต
$S_1$	=	หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดกดอัดเท่ากับ $50 \times 10^{-6}$ mm/mm
$S_2$	=	หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงกดอัดประลัย
$w_c$	=	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
$\delta$	=	ระยะการแอนตัวที่กึ่งกลางความยาวของคาน
$\varepsilon$	=	ความเครียดของคอนกรีต
$\varepsilon_2$	=	ความเครียดกดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง $S_2$
$\sigma$	=	หน่วยแรงอัด
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
UTM	=	Universal Testing Machine

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ก่อสร้างอาคาร เพราะสามารถสร้างให้มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ และมีอายุการใช้งานได้นาน องค์ประกอบอาคารที่มักทำด้วยคอนกรีตได้แก่ เสา คาน พื้น เป็นต้น คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัด (compressive strength) สูง แต่กำลังรับแรงดึง (tensile strength) ต่ำ เพราะ ดูดซับพลังงานได้น้อย เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (shrinkage) ส่วนของอาคารที่พบรอยแตกร้าวอยู่บ่อยๆ เช่น พื้นถนนคอนกรีตและฐานรองเครื่องจักร เป็นต้น นักวิจัยหลายท่านประสบความสำเร็จในการทำคอนกรีตเสริมเส้นใยประเภทต่างๆ ทั้งเส้นใยบริสุทธิ์และเส้นใยที่ทำจากวัสดุที่ใช้แล้ว เช่น โพลีโพรพิลีน (polypropylene) ไนลอน (nylon) กระดาษที่ใช้แล้ว และเศษเหล็กจากโรงกลึง เป็นต้น ซึ่งเส้นใยต่างๆเหล่านี้มีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดี ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงดีขึ้นและลดการแตกร้าว โพลีโพรพิลีนสามารถนำมาทำเป็นเส้นใยเพื่อเสริมในคอนกรีตแล้วมีผลให้ คอนกรีตมีพฤติกรรมและคุณสมบัติในการรับแรงอัดและการรับแรงดัดที่ดีขึ้น และยังช่วยลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตได้ จนสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์เสริมในงานก่อสร้างได้แก่ไฟเบอร์เมช จากแนวความคิดดังกล่าวและข้อมูลที่ว่ามิของใช้แล้วประเภทพลาสติกเป็นจำนวนมาก ในจำนวนนี้เป็นพลาสติกชนิด PET (polyethylene terephthalate) และ HDPE (high density polyethylene) ในรูปของบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดน้ำเป็นจำนวนมาก PET มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 48.3 ถึง 72.4 MPa ส่วน HDPE มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 17.3 ถึง 44.8 MPa เมื่อพิจารณาคุณสมบัติต่างๆเทียบกับโพลีโพรพิลีนยังพบว่า PET มีกำลังรับแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดที่จุดแตกหักสูงกว่าโพลีโพรพิลีน จึงเป็นไปได้ที่จะใช้เสริมคอนกรีตได้ดีกว่าโพลีโพรพิลีน ส่วน HDPE มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโพลีโพรพิลีน และมีปริมาณมากกว่า (ร้อยละ 60 ของบรรจุภัณฑ์ในสหรัฐอเมริกาที่ทำจาก HDPE (Susan, 1997)) เนื่องจากเป็นวัสดุที่ราคาต่ำ ผู้เขียนจึงมีความคิดว่าจะนำพลาสติกที่ใช้แล้วทั้ง 2 ชนิดมาทำให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมและนำมาเสริมในคอนกรีต เพื่อทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลในด้านกำลังรับแรงดัดดีขึ้นและลดการแตกร้าวของคอนกรีต นอกจากนี้แล้ว ยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะประเภทนี้ และคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วยังมีค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากพลาสติกที่นำมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้แล้ว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาวิธีการนำพลาสติก PET และ HDPE มาเสริมในคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งคุณสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด (compressive strength) กำลังรับแรงดัด (flexural strength) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และพฤติกรรมทางกลในด้านการรับแรงอัดและการรับแรงดัด รวมถึงลักษณะการวิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้ว

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ชนิดของพลาสติก ลักษณะของเส้นพลาสติก และปริมาณเส้นพลาสติก

1.3.1) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) จะแปรผัน 3 ค่าได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6

1.3.2) เส้นพลาสติกที่ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้จากพลาสติกที่ใช้แล้วแบบเส้นประเภทขวดบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกชนิด Polyethylene terephthalate (PET) และ High-density polyethylene (HDPE) ที่มีขนาดกว้าง 1.5 มม. ยาว 25.4 มม

1.3.3) เส้นพลาสติกมี 2 รูปร่าง คือ ตรงและซิกแซก

1.3.4) ปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในเป็นร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต

ศึกษาพฤติกรรมรับแรงอัด (compression) พฤติกรรมรับแรงดัด (flexural) หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture) ใช้ตัวอย่างที่บ่มเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1) คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วจะมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก

1.4.2) คอนกรีตที่มีการเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำอิฐบล็อก กระเบื้องปูหลังคา และพื้นถนน เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้ที่มีการเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วจะสามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้นและจะมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบเหนียวเพิ่มขึ้น

1.4.3) ลดปริมาณขยะและพื้นที่ในการจัดการขยะประเภทนี้

## บทที่ 2

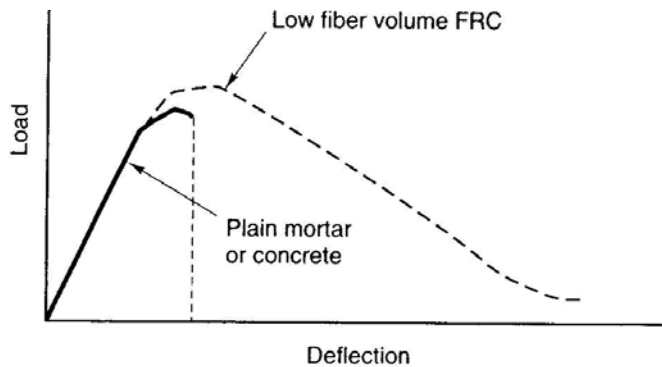
### ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึง การเสริมกำลังคอนกรีตโดยใช้เส้นใยชนิดต่างๆ งานวิจัยที่ผ่านมาที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา คุณสมบัติของพลาสติก PET และ HDPE และคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตซึ่งได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และ ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต ส่วนประกอบของคอนกรีต การแตกร้าวของคอนกรีต และประเภทพลาสติกจะแสดงในภาคผนวกต่อไป

#### 2.2 การเสริมกำลังคอนกรีตโดยใช้เส้นใยชนิดต่างๆ

เทคโนโลยีการใช้เส้นใยเสริมกำลังวัสดุประมะมีมาตั้งแต่โบราณประมาณ 3500 ปีก่อน เช่น ใช้เส้นใยจากฟางข้าวเสริมกำลังของอิฐ ใช้ขนสัตว์ผสมในปูนฉาบ และในช่วงที่ผ่านมา ความสนใจในการศึกษาเรื่องของการใช้เส้นใยในการเสริมกำลังมีมากขึ้น มีการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุโครงสร้าง ร่วมกับคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุประมะในงานโครงสร้างแต่เดิม จะมีการเสริมกำลังโดยการวางวัสดุเสริมกำลังที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวต่อเนื่องไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อด้านทานหน่วยแรงดึง (tensile stress) และเริ่มมีการใช้เส้นใยที่มีลักษณะสั้น ไม่ต่อเนื่อง และกระจายตัวแบบสุ่มในการเสริมกำลัง จากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังจะขึ้นกับชนิด รูปร่าง และปริมาณของเส้นใย การใช้เส้นใยไม่เพียงพิจารณาการเพิ่มกำลังของคอนกรีตเท่านั้น เส้นใยจะเข้ามาเชื่อมช่องว่าง จึงมีประสิทธิภาพดีในการควบคุมการแตกร้าวและความเหนียวเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและแรงกระทำของคอนกรีตที่มีการเสริมเส้นใย เมื่อคอนกรีตได้รับการเสริมเส้นใยจะรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้น สามารถโก่งตัวได้สูงขึ้น เส้นใยที่ใช้การเสริมกำลังมีอยู่หลายชนิด (Derucher, 1994)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและแรงกระทำของคอนกรีตที่มีการเสริมเส้นใย (Derucher, 1994)

Balaguru and shah (1992) ได้แบ่งเส้นใยที่ใช้เสริมในคอนกรีตหรือมอร์ต้าเป็น 4 ชนิด ได้แก่

1.) เส้นใยโลหะ (metallic fibers) ได้แก่ เส้นใยเหล็ก เส้นใยสแตนเลส

เส้นใยเหล็ก ถูกใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังในคอนกรีตเมื่อ 30 ปีที่ผ่านมา เส้นใยเหล็กเป็นเส้นใยที่ได้รับความนิยมมากกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ ประยุกต์ใช้ในงานเช่น สนามบิน วัสดุปูพื้นถนน พื้นโรงงานอุตสาหกรรม มีมาตรฐานในการใช้เส้นใยเหล็กคือ ASTM A820 ซึ่งต้องระบุความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio : l/d) กำลังรับแรงดึงประลัยน้อยสุด และการเสียเหล็กที่ใช้ทำเส้นใยเหล็กคือ carbon steel และ alloy steel รูปร่างที่ใช้มี 3 แบบ

1. กลมยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.254 ถึง 0.990 มม.
2. แบนยาว หนา 0.152 ถึง 0.635 มม. กว้าง 0.254 ถึง 2.032 มม.
3. ม้วน อาจจะม้วนตลอดความยาวหรือม้วนเฉพาะปลาย

เพื่อสะดวกในการใช้งานและการผสม เส้นใยจะเรียงกันอยู่ในกาวที่ละลายน้ำได้ และกาวจะละลายไประหว่างการผสมคอนกรีต ซึ่งจะทำให้เส้นใยกระจายตัว ปริมาณที่ใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 0.25 ถึง 2 โดยปริมาตร เส้นใยเหล็กจะเพิ่มความต้านทานการกระแทก การดูดซึมพลังงาน และกำลังรับแรงดึง

2.) เส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fibers)

เส้นใยสังเคราะห์ถูกนำมาใช้สำหรับเสริมกำลังเมื่อไม่นาน โดยเริ่มจากใช้ผลิตภัณฑ์เบี่ยงปูลังคา สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม

2.1.) เส้นใยสังเคราะห์แบบโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ (low modulus of elasticity) เมื่อผสมในคอนกรีตจะพัฒนาในส่วนของความเครียด ความต้านทานแรงกระแทก และควบคุมการแตกร้าว ซึ่งประสิทธิภาพในการเสริมกำลังขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุ เส้นใยที่ใช้มีความยาว 25 ถึง 75 มม.

ปริมาณสูงถึงร้อยละ 5 โดยปริมาตร เส้นใยกลุ่มนี้ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (polypropylene) ไนลอน (nylon) โพลีเอทิลีน (polyethylene)

2.2.) เส้นใยสังเคราะห์แบบโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (high modulus of elasticity) เมื่อผสมในคอนกรีตจะเพิ่มกำลังรับแรงดัด และควบคุมพฤติกรรมกรรมการแตกร้าว ซึ่งขึ้นกับชนิดของเส้นใย อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) และปริมาณที่ใช้ เส้นใยกลุ่มนี้ได้แก่ carbon fiber และ polyvinyl alcohol fiber

3.) เส้นใยแร่ (mineral fibers) ได้แก่ เส้นใยแก้ว และเส้นใยหิน

เส้นใยแก้ว (glass fiber) มีลักษณะเป็นเส้นยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 20  $\mu\text{m}$ . มีทั้งแบบยาวต่อเนื่องและเป็นชิ้น ส่วนใหญ่ใช้ในส่วนของโครงสร้างที่เป็นแผ่นบางร่วมกับซีเมนต์ เพลสหรือมอร์ตาร์ ปริมาณที่ใช้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอาจมีการใช้สารผสมเพิ่มและพอลิเมอร์ร่วมด้วยในการผสม ปัญหาหลักของเส้นใยแก้ว (E-glass) คือความต้านทานด่างต่ำ จึงมีการพัฒนาเป็น AR-glass ซึ่งมีความต้านทานด่างสูงและมีความคงทนดีกว่า E-glass

เส้นใยหิน (asbestos fiber) ทำจากแร่หินธรรมชาติ ส่วนใหญ่ใช้ในงานท่อ แผ่นปูหลังคา และ flat sheet พบว่า มีอันตรายต่อสุขภาพเมื่อมีการสูดดม ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในกระบวนการผลิตและไม่เป็นอันตรายมากเมื่อใช้ในลักษณะการเสริมกำลังของซีเมนต์

4.) เส้นใยธรรมชาติ (natural fibers)

แนวคิดที่จะใช้เส้นใยธรรมชาติในการเสริมกำลังเกิดขึ้นไม่นานและคาดหวังที่จะช่วยเสริมกำลังของคอนกรีตได้ ถ้าแบ่งกลุ่มตามโครงสร้างจะแบ่งได้ 4 กลุ่ม

1. ลำต้น ก้าน เปลือก
2. ใบ
3. ผิวของก้าน ผิวของผล และผิวของเมล็ด
4. เนื้อไม้

จากการศึกษาพบว่า เส้นใยธรรมชาติจะกระจายตัวอย่างเป็นแบบโดยใช้เส้นใยที่สั้นและไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานในการแตกร้าว การกระแทก และที่สำคัญราคาถูก

เส้นใยที่จะใช้เสริมในคอนกรีตควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (Youjiang, 2000)

- 1.) มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีต
- 2.) มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ
- 3.) มีความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี
- 4.) มีลักษณะที่เหมาะสม
- 5.) มีการกระจายตัวเพื่อผสมในคอนกรีตได้อย่างทั่วถึง

ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์เสริมเส้นใย



Swamy (1988) เสนอว่า การเสริมเส้นใยในคอนกรีตหรือมอร์ต้าไม่ได้เสริมการแตกร้าวขนาดเล็ก (micro crack) แต่เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวแล้ว เส้นใยจะเข้าไปช่วยยึดคอนกรีตหรือมอร์ต้าไว้ไม่ให้รื้อยแตกร้าวขยายตัวเพิ่มขึ้น และช่วยลดซึมพลังงาน ซึ่งลักษณะของเส้นใยที่อยู่ในส่วนของการแตกร้าวแสดงในรูปที่ 2.2 เส้นใยบางชนิดไม่ยึดเกาะกับคอนกรีตเนื่องจากพันธะเคมี (chemical bonds) ระหว่างผิวของเส้นใยกับซีเมนต์เฟส (เส้นใยที่ ①) คอนกรีตจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้แก่เส้นใยที่ยึดเกาะกับคอนกรีตได้ ดังเส้นใยที่ ② เมื่อเส้นใยรับพลังงานถึงจุดแตกหักของเส้นใยก็จะฉีกขาด ดังเส้นใยที่ ④ และถ้ารอยแตกร้าวของคอนกรีตหรือมอร์ต้าเกิดขึ้นที่ส่วนปลายของเส้นใย เส้นใยจะไม่สามารถการยึดเกาะกับคอนกรีตหรือมอร์ต้าได้ ดังเส้นใยที่ ③



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเส้นใยในคอนกรีตหรือมอร์ต้า (Swamy, 1988)

### 2.3 ปริมาณงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Groom, Holmquist, and Yarbrough (1993) ศึกษาการลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก (plastic shrinkage cracking) ของคอนกรีตที่มีเส้นใยในลอนเป็นส่วนผสมที่อายุ 24 ชั่วโมง โดยเส้นใยในลอนได้จากกระบวนการผลิตพรม เส้นใยที่นำมาใช้มีความยาว 6.4 มม. และ 19.1 มม. ผสมในปริมาณ 0.6 กก./ม<sup>3</sup> (ร้อยละ 0.13 โดยปริมาตร) และ 0.9 กก./ม<sup>3</sup> ขนาดของตัวอย่างทดสอบ 0.91×2.4 ม. หน้า 44.5 มม. เมื่อวัดพื้นที่ของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น (กว้าง×ยาว) เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยในลอนให้ผลดังนี้

- 1.) เส้นใยในลอน ความยาว 6.4 มม. ปริมาณ 0.6 กก./ม<sup>3</sup> ไม่ลดการแตกร้าว
- 2.) เส้นใยในลอน ความยาว 6.4 มม. ปริมาณ 0.9 กก./ม<sup>3</sup> ลดการแตกร้าวลงร้อยละ 89
- 3.) เส้นใยในลอน ความยาว 19.1 มม. ปริมาณ 0.6 กก./ม<sup>3</sup> ลดการแตกร้าวลงร้อยละ 94
- 4.) เส้นใยในลอน ความยาว 19.1 มม. ปริมาณ 0.9 กก./ม<sup>3</sup> ไม่พบการแตกร้าว
- 5.) เส้นใยในลอน ความยาว 6.4 มม. และ 19.1 มม. ปริมาณ 0.6 กก./ม<sup>3</sup> ไม่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด รวมทั้งกำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงแยกตัวของคอนกรีต

Naaman, Garcia, Korkmaz, and Li (1996) ศึกษาพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดและการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน (polypropylene) จากพรมที่ใช้แล้ว โดยใช้เส้นใยที่มีความยาว 0 (เป็นผง) ถึง 25 มม. และมีร้อยละ 40 ที่มีความยาวน้อยกว่า 5 มม. ปริมาณเส้นใยในส่วนผสมเป็นร้อยละ 0.15, 1.0, 1.3, 2.6, และ 3.9 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.60 ถึง 0.63 พฤติกรรมการรับแรงดัดดีขึ้นที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 2.6 ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.3 ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ในปริมาณเส้นใยร้อยละ 2.6 ถึง 3.9 ทำให้กำลังรับแรงดัดลดลงเล็กน้อย แต่การเสริมเส้นใยไม่มีผลต่อพฤติกรรมของหน่วยแรงอัดกับความเครียด และเสนอว่าการยึดเกาะของเส้นใยในคอนกรีตที่ไม่ดี อาจส่งผลต่อการรับแรงอัดและการรับแรงดัดของคอนกรีต

Auchey, and Dutta (1996) ศึกษาการใช้เส้นใย HDPE ที่ได้จากขวดบรรจุนมที่ใช้แล้ว โดยกำลังรับแรงดึงของเส้นใยมีค่าประมาณ 34 MPa มีความยาว 19 ถึง 38 มม. กว้าง 1.6 มม. หนา 1 มม. ปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2, และ 0.4 โดยปริมาตร เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ที่มีกำลังรับแรงอัด 28 MPa ใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นแท่งทรงกระบอกภายใต้สถานะ ที่เย็นจนเป็นน้ำแข็งแล้วอุ่นจนน้ำแข็งละลาย (freeze-thaw) พบว่า คอนกรีตที่ 28 วันผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ - 20 °C นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ความร้อนที่ 20 °C อีก 1 ชั่วโมง มีความต้านทานต่อสถานะดังกล่าว (freeze - thaw) เท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย HDPE และคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีนบริสุทธิ์ที่ปริมาณเท่ากัน ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เส้นใย HDPE ที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับอุณหภูมิและการขยายตัวของคอนกรีต ในสถานะที่เย็นจนเป็นน้ำแข็งแล้วอุ่นจนน้ำแข็งละลาย (freeze-thaw)

ตระกูล อร่ามรักษ์ (2000) ได้ศึกษาการใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีน (polypropylene) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อลดการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต เนื่องจากการหดตัวจากการระเหยของน้ำในคอนกรีตสด โดยการกำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ 7.5 ซม. มีอัตราส่วนของทรายต่อมวลรวมที่ 0.4 ปริมาณซีเมนต์ 450 กก./ม<sup>3</sup> และเส้นใยมีความยาว 19 มม. ใส่ในปริมาณร้อยละ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, และ 0.5 โดยปริมาตร พบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้น และได้ผลสรุปว่า ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัด 59.8 MPa โดยค่าใช้จ่ายเพิ่มร้อยละ 37 เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนร้อยละ 0.2 โดยปริมาตร จะให้ค่ากำลังรับแรงอัด 61.5 MPa และมีค่าใช้จ่ายเพิ่มร้อยละ 75 ส่วนกำลังรับแรงดึงโดยตรง (direct tensile strength) จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้น หลังจากศึกษา คุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีนปริมาณร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร ในด้านกำลังรับแรงดึงโดยตรง กำลังรับแรงดึงแยกตัวโมดูลัสยืดหยุ่น และการหดแห้ง (dry shrinkage) ที่ 90 วัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย

โพลีโพรพิลีนให้ผลดังนี้ กำลังรับแรงดึงโดยตรงและกำลังรับแรงดึงแยกตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 และ 10 ตามลำดับ โมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 และการหดแห้งที่ 90 วันลดลงร้อยละ 8

Gupta, Banthia, and Yan (2000) ศึกษาการใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนเสริมในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ที่มีขนาด  $0.38 \times 25$  มม. ปริมาตรร้อยละ 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร เส้นใยตรงขนาด  $0.63 \times 38$  มม. ปริมาตรร้อยละ 1.5 โดยปริมาตร และเส้นใยแบบลอนขนาด  $0.76 \times 30$  มม. ปริมาตรร้อยละ 1.5 โดยปริมาตร พบว่า

- 1.) คอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 7.8 คอนกรีตเสริมเส้นใยตรงให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าการเสริมเส้นใยแบบลอน
- 2.) คอนกรีตเสริมเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงดัดลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มจากร้อยละ 1.0 เป็น 1.5 กำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกันเมื่อแปรผันความยาวเส้นใย ส่วนคอนกรีตที่เสริมเส้นใยปริมาณเท่ากัน ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อเปลี่ยนจากเส้นใยตรงความยาว 38 มม. เป็นเส้นใยลอนความยาว 30 มม.

Sobhan and Mashnad (2002) ได้ศึกษาการใช้แผ่นพลาสติก HDPE จากขวดบรรจุนมและน้ำ เป็นส่วนผสมในดินซีเมนต์ แผ่นพลาสติกกว้าง 6.35 มม. ยาว 19 และ 38.1 มม.หนา 0.5 มม. ปริมาตรร้อยละ 0.25, 0.5, และ 0.8 โดยน้ำหนักของดินซีเมนต์ พบว่า

- 1.) กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเสริมแผ่นพลาสติกร้อยละ 0.25 แต่ลดลงเมื่อมีแผ่นพลาสติก ร้อยละ 0.5 และกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อความยาวแผ่นพลาสติกเพิ่มขึ้น
- 2.) ดัชนีความเหนียวของดินซีเมนต์ที่เสริมแผ่นพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ถึง 40
- 3.) กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 และ 62 เมื่อเสริมแผ่นพลาสติกร้อยละ 0.25 และ 0.8 ตามลำดับ และกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น
- 4.) การเสริมแผ่นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.25 และ 0.5 เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรจุจนวิบัติ ตัวอย่างทดสอบมีการวิบัติแบบทันทีทันใด ส่วนการเสริมแผ่นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.8 ตัวอย่างทดสอบวิบัติแบบทันทีทันใดแต่แผ่นพลาสติกจะเชื่อมรอยแตก ทำให้ตัวอย่างทดสอบไม่แยกเป็นสองส่วน

Khajuria and Balaguru (1992) ศึกษาพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (shrinkage crack area) ของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเหล็กคาร์บอนต่ำ (low carbon) ที่มีการอุปถัมภ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\times$  ความยาวเท่ากับ  $0.5 \times 30$  มม.,  $0.5 \times 50$  มม., และ  $0.8 \times 60$  มม. อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 60, 100, และ 75 ตามลำดับ ในปริมาณ 45 กก./ $m^3$  และ 60 กก./ $m^3$  และเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิดได้แก่ ไนลอน โพลีโพรพิลีน และโพลีเอสเตอร์ ความยาว 19 มม. ปริมาตร

ร้อยละ 0.02 ถึง 0.1 โดยปริมาตร จำนวน 2 ค่าคือ 0.6 กก./ม<sup>3</sup> และ 0.9กก./ม<sup>3</sup> และในกรณีที่ใช้เส้นใยที่ละความยาว 19 มม. 25 มม. และ 38 มม. รวมกันในสัดส่วนที่เท่ากันปริมาณรวม 0.6 กก./ม<sup>3</sup> โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบขนาด 600×900×19 มม. หลังจากถอดแบบแล้วจะใช้พัดลมเป่าด้วยความเร็วลม 19 ถึง 23 กม./ชม. แล้ววัดความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น พบว่าการใช้เส้นใยเหล็กทุกความยาวเป็นส่วนผสมในมอร์ต้า ลดพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวและลดขนาดรอยแตกร้าวใหญ่ที่สุด โดยที่เส้นใยเหล็กขนาด 50 มม. จะลดพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ดีกว่าความยาว 30 มม. และ 60 มม. ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งให้อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดคือ 100 และการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กจะช่วยลดพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว มอร์ต้าที่เสริมเส้นใยในลอนลดพื้นที่การแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวได้ดีกว่ามอร์ต้าที่เสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ปริมาณเส้นใยในลอนที่เพิ่มขึ้นยังช่วยลดพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้เพิ่มขึ้น การใช้เส้นใยในลอนเสริมในมอร์ต้านอกจากจะลดพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแล้ว ยังลดความกว้างของรอยแตกร้าวด้วยการใช้เส้นใยหลายขนาดเป็นส่วนผสมในมอร์ต้า จะลดพื้นที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ดีกว่าการผสมเส้นใยขนาดเดียว

Wei-Ling Lin (1992) ได้ศึกษาพฤติกรรมความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยของเส้นลวดเหล็ก (iron wire) เส้นใยเหล็ก (steel fiber) เส้นใยปอไซซัล (sisal fiber) และเส้นใยแก้ว (glass fiber) โดยขนาดของเส้นลวดเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 ถึง 0.80 มม. ความยาว 40 มม. เส้นใยเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.11 มม. ความยาว 50 มม. เส้นใยปอไซซัลเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 ถึง 0.30 มม. ความยาว 30 มม. และเส้นใยแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.007 ถึง 0.02 มม. ความยาว 25 มม. ปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 4 ค่าคือ 0.48, 0.55, 0.62, และ 0.68 ตัวอย่างทดสอบขนาด 100×100×350 มม. พบว่า ปริมาณเส้นใยและอายุของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จะมีผลให้พฤติกรรมความเหนียวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสำหรับเส้นใยทุกประเภท แต่พฤติกรรมความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใย จะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เส้นใยเหล็กมีผลให้พฤติกรรมความเหนียวผลดีที่สุด รองลงมาคือเส้นลวดเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยปอไซซัล ตามลำดับ การใช้เส้นใยที่มีความอ่อนตัวได้แก่เส้นใยแก้วและเส้นใยปอไซซัลจะช่วยต้านทานการขยายตัวของรอยแตกร้าวได้ และมีความสามารถเท่าได้ของคอนกรีตที่ดี

Keyvani and Saeki (1997) ศึกษาคอนกรีตเสริมเศษเหล็ก (steel shaving) จากโรงกลึงเป็นเศษเหล็กดังกล่าวจะมีลักษณะขอบคมและหยาบ เป็นเส้นม้วน และเส้นใยจะมีความแข็งมากกว่าเหล็กเดิม เส้นใยมีกำลังรับแรงดึง (tensile strength) ประมาณ 1300 MPa ส่วนเหล็กเดิมมีกำลังรับแรงดึงประมาณ 700 MPa เส้นใยยาว 40 ถึง 50 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 ถึง 1.0 มม. ปริมาณ

ร้อยละ 0.3 ถึง 1.9 โดยปริมาตร (25 ถึง 150 กก./ม<sup>3</sup>) พบว่า ทำให้กำลังและความเหนียว (toughness) ของคอนกรีตสูงขึ้นทุกปริมาณเส้นใยที่ใช้ และที่ปริมาณร้อยละ 1.9 โดยปริมาตร ผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 94 กำลังรับแรงดิ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 113 กำลังรับแรงดิ่งแยกตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 62 กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นร้อยละ 80

Raghavan and Huynh (1998) ศึกษาคุณสมบัติทางกลของมอร์ต้าเสริมยางรถที่ใช้แล้ว โดยใยยางที่มีลักษณะเป็นเม็ดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มม. และเป็นชิ้น 2 ขนาดคือ 5.5×1.2 มม. และ 10.8×1.8 มม. และมอร์ต้าที่เสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนร้อยละ 1 โดยมวลของซีเมนต์ (เส้นใยโพลีโพรพิลีนมีขนาด 15×25.4 μm.) ปริมาณร้อยละ 0, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0, และ 15.0 โดยมวลของซีเมนต์ การศึกษาผลของกำลังรับแรงดัดที่มีคานตัวอย่างทดสอบขนาด 25×25×279 มม. พบว่า ลักษณะของยางมีผลในการลดกำลังรับแรงดัด เมื่อปริมาณของเส้นใยยางที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ กำลังรับแรงดัดยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นใยที่ใช้คือ ยางที่มีลักษณะเป็นชิ้นจะลดกำลังรับแรงดัดน้อยกว่ายางที่มีลักษณะเป็นเม็ด เนื่องจาก เม็ดตัวอย่างทดสอบผสมยางลักษณะเป็นเส้นเมื่อเกิดการแตกร้าวแล้วยังสามารถรับแรงกระทำคงที่ต่อได้อีก และลักษณะการวิบัติจะไม่แยกเป็นสองชิ้น เพราะมีเส้นยางเป็นตัวเชื่อมอยู่ แต่ตัวอย่างทดสอบผสมยางลักษณะเป็นเม็ดยังนั้น เมื่อเกิดการแตกจะแยกเป็นสองชิ้น ในส่วนของการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก (plastic shrinkage cracking) มีค่าลดลงเมื่อใยยางขนาด 10.8×1.8 มม. ซึ่งรอยแตกร้าวจะลดลงเมื่อปริมาณของยางเพิ่มขึ้น แต่จะพบรอยแตกร้าวน้อยมากจนถึงไม่พบรอยแตกร้าวในตัวอย่างทดสอบผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน และการศึกษาความคงทนของยางต่อสภาพความเป็นด่างในมอร์ต้า โดยการจุ่มยางในสารละลาย NaOH และ Ca(OH)<sub>2</sub> เป็นเวลา 4 เดือนพบว่า ค่าหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ของยางมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 20

Fukushima, Shirayama, Hitotsuya, and Maruyama (1992) ศึกษาออร์ต้าเสริมเส้นใยคาร์บอนชนิด PAN-based high tension (PAN-HT) และ pitch-based general purpose (pitch-GP) และเส้นใยแก้วชนิดต้านทานด่าง (alkali-resistant glass fiber) กำลังรับแรงดิ่งของเส้นใยเท่ากับ 35.3, 7.8, และ 14.7 ถึง 19.6 MPa ตามลำดับ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7, 14, และ 12 μm. ตามลำดับ และเส้นใยทุกชนิดมีความยาว 3, 6, และ 12 มม. ใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณร้อยละ 1, 2, และ 3 โดยปริมาตร พบว่า การใช้เส้นใยคาร์บอนชนิด pitch-CFRC มีกำลังรับแรงดิ่งลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ส่วนเส้นใยชนิดอื่นๆจะให้กำลังรับแรงดิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยให้ผลเช่นเดียวกับกำลังรับแรงดิ่ง

Ramirez-coretti (1992) ศึกษาออร์ตาเสริมเส้นใยธรรมชาติ 4 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว (rice straw) ชานอ้อย (sugar-cane bagasse) หยวกกล้วย (banana raquis) และกาบมะพร้าว (coconut husk) เส้นใยมีความยาวโดยเฉลี่ย 10 ถึง 20 มม. ในปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, 4, และ 5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 242×76×8 มม. พบว่า เส้นใยธรรมชาติเหล่านี้มีผลในการเพิ่มกำลังของมอร์ต้าเพียงเล็กน้อย แต่มีลักษณะการวิบัติเป็นแบบเหนียว

พยุงศักดิ์ ศรีอำไพ (2542) ได้ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าเสริมเส้นใยผักตบชวาผสมเถ้าแกลบ ความยาวเส้นใยเท่ากับ 10, 20, และ 20 มม. และค่าอัตราส่วนของเส้นใยต่อมอร์ต้าโดยน้ำหนัก 3 ค่าคือ 0.05, 0.10, และ 0.15 พบว่า กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมอร์ต้าเสริมเส้นใยผักตบชวา มอร์ต้าเสริมเส้นใยในอัตราส่วนเส้นใยต่อมอร์ต้าเท่ากับ 0.10 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงที่สุด ที่อัตราส่วนเส้นใยต่อมอร์ต้าเท่ากันกำลังรับแรงดัดของมอร์ต้าเสริมเส้นใยความยาว 20 มม. มีค่าสูงที่สุด ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าโมดูลัสการคืนตัว และค่าโมดูลัสความเหนียวของมอร์ต้าเสริมเส้นใยผักตบชวา มีลักษณะคล้ายกับค่ากำลังรับแรงดัด

อนพัช พรหมมาณพ, บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วินัย อวยพรประเสริฐ (2542) ศึกษาการใช้เส้นใยสับปะรดเสริมมอร์ต้า ความยาวเส้นใยเป็น 10 และ 20 มม. อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.08, 0.09, และ 0.10 พบว่า ค่าโมดูลัสการคืนตัวของมอร์ต้าเสริมเส้นใยสับปะรดมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าที่ไม่เสริมเส้นใย โดยมีค่าสูงสุดที่การใช้เส้นใยยาว 10 มม. อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์เป็น 0.09 ส่วนค่าโมดูลัสความเหนียวของมอร์ต้าเสริมเส้นใยสับปะรดมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าที่ไม่เสริมเส้นใย โดยมีค่าสูงสุดที่การใช้เส้นใยยาว 20 มม. อัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์เป็น 0.10

ในปัจจุบัน ได้มีบริษัทที่นำเส้นใยสังเคราะห์มาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยที่ทำจากโพลีโพรพิลีนบริสุทธิ์เรียกว่า ไฟเบอร์เมช (fiber mesh) ซึ่งมีการออกแบบเพื่อผสมในคอนกรีต ลักษณะเป็นท่อนๆอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก่อนผสม ดังแสดงในที่ 2.3 เมื่อผสมในคอนกรีต จะถูกหिनและทรายดี มีการแยกตัวเป็นเส้น สามารถนำไปใช้เสริมหรือทดแทนการเสริมเหล็กตามกรณี เพื่อควบคุมการแตกร้าวได้ แม้ว่าไฟเบอร์เมชจะไม่สามารถรักษาความแข็งของคอนกรีต เพื่อไม่ให้แตกร้าวเมื่อมีน้ำหนักมากกดทับ แต่สามารถที่จะยึดเหนี่ยวพลาสติกและคอนกรีตที่ยังอ่อนตัวอยู่ไว้ได้ ซึ่งจะกำจัดรอยแตกร้าวได้ และช่วยลดสภาพรอยแตกเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกได้ การผสมไฟเบอร์เมชจำนวนมากๆเพื่อเกลี่ยบนแผ่นพื้นผิวคอนกรีตให้สม่ำเสมอ จะช่วยลดความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าว การใช้ไฟเบอร์เมชเสริมในคอนกรีตยังมีผลให้น้ำซึมเข้าไปได้น้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมไฟเบอร์เมช และไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับโครงสร้างภาชนะบรรจุน้ำและเรือเดินทะเล มีคุณสมบัติสามารถป้องกันการเป็นสนิม ไฟเบอร์เมชยังสามารถทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการสึกหรอ แรงกระแทก แรงเสียดสี และการแตกละเอียดบนแผ่นพื้นคอนกรีต ในระยะเริ่มแรกไฟเบอร์เมชถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมของ

คอนกรีตสำหรับผลิตภัณฑ์สำเร็จ แต่ในปัจจุบันนิยมนำไปใช้เป็นส่วนผสมเพื่อใช้ทำพื้น เพดาน ในอุตสาหกรรมเสาคอนกรีตนั้น ไฟเบอร์เมซมีคุณสมบัติป้องกันเสาคอนกรีตเสียหายจากแรง กระแทก ในขณะที่ยกหรือเคลื่อนย้ายและป้องกันการซึมน้ำ ในประเทศไทยได้มีการใช้ไฟเบอร์ เมซบ้างแล้ว เช่นในงานซ่อมผิวการจราจรบริเวณใต้สะพานลอยสุทธิตสาร ซึ่งมีความจำเป็นต้องเปิด ใช้หลังเทคอนกรีต 24 ชั่วโมง จึงใช้คอนกรีตผสมเสร็จที่มีค่ายุบตัว 5 ถึง 10 ซม. กำลังอัดของ ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ไม่น้อยกว่า 240 กก./ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.36 พร้อมทั้งใช้น้ำยาผสมคอนกรีตเป็นน้ำยาประเภทลดน้ำ (SUPER 20) 4500 ซีซี/ม<sup>3</sup> น้ำยาเพื่อยึดการ แข็งตัว (POZZOLITH 180 XRA) 450 ซีซี/ม<sup>3</sup> และไฟเบอร์เมซ 900 กรัม/ม<sup>3</sup>



รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นใยโพลีโพรพิลีน

## 2.4 คุณสมบัติของ Polyethylene terephthalate (PET)

PET เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีสามารถขึ้นได้ด้วยความร้อนและเป็น ที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยมีสัดส่วนถึงร้อยละ 9.3 ของปริมาณพลาสติก ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ประเภทต่างๆ (Selke, 1997) ความต้องการบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก PET ทั่วโลกจากปี 1985 ปริมาณ 0.5 เมกะตันเป็น 1.5 เมกะตันในปี 1990 และ 7 เมกะตันในปี 2000 และ คาดว่าจะมีความต้องการเพิ่มร้อยละ 10 ต่อปี (Brooks and Giles, 2002) จุดเด่นของ PET ที่ทำให้ เป็นที่นิยมในการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆคือ สามารถผลิตได้หลายรูปร่างและมีการเปลี่ยน รูปร่างน้อยเมื่อขึ้นแล้ว PET ยังเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ดีและมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้มากขึ้นใน งานของวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมเครื่องกลในการทำเป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักร และ วิศวกรรมไฟฟ้า

คุณสมบัติของ PET

- 1.) กำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 48.3 ถึง 72.4 MPa

- 2.) โมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2.76 ถึง 4.14 GPa
- 3.) จุดหลอมเหลวสูงประมาณ 245 ถึง 265 °C
- 4.) ความหนาแน่น 0.95 g/cm<sup>3</sup>
- 5.) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดที่จุดแตกหักเท่ากับ 30
- 6.) การดูดซึมน้ำต่ำ
- 7.) มีความแข็ง (hardness) และ ความแกร่ง (stiffness) ที่ดี
- 8.) การเปลี่ยนรูปร่างต่ำ
- 9.) ผิวเรียบ โปร่งใส เหนียวและฉีกขาดได้ยาก
- 10.) มีความต้านทานต่อสภาพอากาศ ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

## 2.5 คุณสมบัติของ High density polyethylene (HDPE)

HDPE เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกเช่นเดียวกับ PET และเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆเช่น ขวด หีบห่อสำหรับอาหาร เป็นต้น โดยมีสัดส่วนถึงร้อยละ 29.1 ของปริมาณพลาสติกที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ประเภทต่างๆ (Selke, 1997) ในปี 1998 ยุโรปตะวันตกความต้องการบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก HDPE เป็น 2826 กิโลตันซึ่งมากเป็นอันดับที่ 2 รองจากพลาสติก LDPE (Brooks and Giles, 2002) นอกจากนี้ ยังนำมาทำส่วนประกอบของปั๊มเครื่องใช้ไฟฟ้า เนื่องจาก HDPE มีลักษณะเด่นหลายประการเช่น สามารถกันน้ำ มีความต้านทานต่อสารเคมี น้ำหนักเบา และราคาไม่แพง เป็นต้น

### คุณสมบัติของ HDPE

- 1.) กำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 17.3 ถึง 44.8 MPa
- 2.) โมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 1.08 GPa
- 3.) จุดหลอมเหลวสูงประมาณ 128 ถึง 138 °C
- 4.) ความหนาแน่น 1.29 ถึง 1.40 g/cm<sup>3</sup>
- 5.) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดที่จุดแตกหักเท่ากับ 10
- 6.) มีความต้านทานต่อสารเคมี ทนกรด ต่างอ่อน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์
- 7.) การดูดซึมน้ำต่ำ ผิวเรียบมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ไม่เกาะติดน้ำ
- 8.) น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นตัวที่ดี
- 9.) ในแผ่นบางสามารถพับงอได้ดี ฉีกขาดยาก



คุณสมบัติของเส้นใยโพลีพรพิลีน เส้นใยไนลอน เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใย  
ไฟ ในด้านกำลังรับแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดที่จุดแตกหัก แสดงใน  
ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ

คุณสมบัติ	PET	HDPE	PP	nylon	steel	E-glass	ไฟ
$T_g$ , °C	73 – 80	-120	-10	60	-	-	-
$T_m$ , °C	245 – 265	128 – 138	160 – 175	210 – 220	-	-	-
Density, g/cm <sup>3</sup>	1.29 – 1.40	0.95 – 0.96	0.89 – 0.91	1.13 – 1.16	7.84	2.58	1.53
Tensile strength, MPa	48.3 – 72.4	17.8 – 44.8	31.0 – 41.3	41.3 – 165	445	512	70-170
Modulus of elasticity, MPa	2756 – 4135	620 – 1089	1140 – 1550	689 – 1700	207000	72500	28800
Elongation at break, %	30.0	10.0	8.0	13.0 – 15.0	0.5 – 3.5	2.0 – 3.5	3.2

หมายเหตุ  $T_g$  (glass transition temperature) : พอลิเมอร์ที่แสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันเป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่ เป็นระเบียบ หรือ พอลิเมอร์อสัณฐาน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  พอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นของแข็งคล้ายแก้ว (glaslike) แข็ง และเปราะ เมื่อถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  มาก ๆ สมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น

$T_m$  (melting temperature) : พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งผลึกเป็นของเหลวที่อุณหภูมิลอมเหลว ณ อุณหภูมินี้ พันธะระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์จะอ่อนลง เมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงโมเลกุลจะเลื่อนผ่านกันและไหลได้ ความแข็งแรงและโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียง พอลิเมอร์ทั่วไปที่มีลักษณะกึ่งผลึก (semicrystalline) หรือมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐานปนกันอยู่ จะแสดงการเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิลอมเหลว และอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน

## 2.6 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่สนใจในการศึกษา ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น

### 2.6.1 กำลังรับแรงอัด

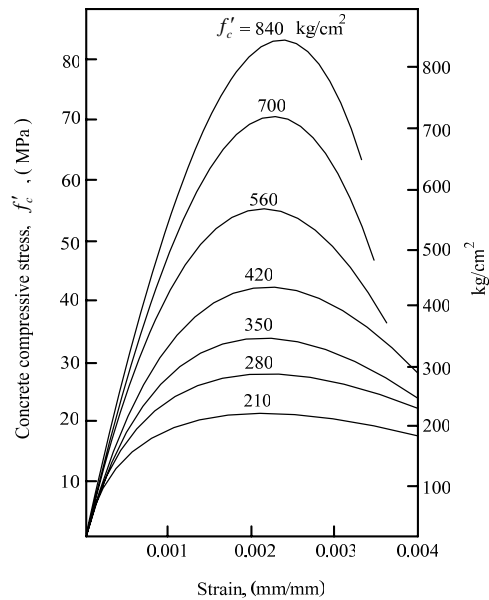
คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องการของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วคือ กำลังต้านทานแรงอัด (compressive strength) เนื่องจากพบว่า กำลังต้านทานหรือกำลังรับแรงแบบอื่นของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงเฉือน และกำลังยึดเหนี่ยว รวมทั้งความทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบได้กับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้งสิ้น ซึ่งหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูง กำลังรับแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็จะสูงตามไปด้วย

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการกดหรืออัดแรงตามแนวแกนของแท่งทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆ ด้วยเครื่องทดสอบ จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก และเมื่อหารน้ำหนักกดอัดสูงสุดที่ได้ด้วยเนื้อที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรงกระทำ จะเป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ( $f'_c$ ) ของแท่งคอนกรีตนั้น กำลังของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกันให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่กำหนด โดยที่กำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง อาจให้ค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดได้ไม่เกิน 3.5 MPa (35 kg/cm<sup>2</sup>)

จากรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับค่าความเครียดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังรับแรงอัดต่างๆ กัน เมื่อรับแรงกดอัดตามแนวแกนอย่างเดียว (uniaxial stress) จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก จะเห็นได้ว่าจากจุดเริ่มต้นที่รับน้ำหนักจนถึงระดับของหน่วยแรงอัดประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อยซึ่งดูเหมือนเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (short-time loading) มักจะสมมติว่าคอนกรีตมีค่าความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ

เมื่อหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งคล้ายพาราโบลา ซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงอัดสูงสุดคอนกรีตจะมีความเครียดประมาณ 0.002 mm/mm และแท่งคอนกรีตยังสามารถต้านแรงอัดต่อไปได้ ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่หน่วยแรงอัดจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งวิบัติที่ค่าความเครียดสูงสุดประมาณ 0.003-0.004 mm/mm (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 กำหนดให้ใช้ค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 mm/mm) และจากรูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นว่า คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูง หน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลยจากหน่วยแรงอัดสูงสุดไปแล้ว แต่คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำกว่าหน่วยแรงอัดจะลดลง

อย่างช้าๆและมีค่าความเครียดสูงสุดมากกว่า ซึ่งแสดงว่า คอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่าจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่า

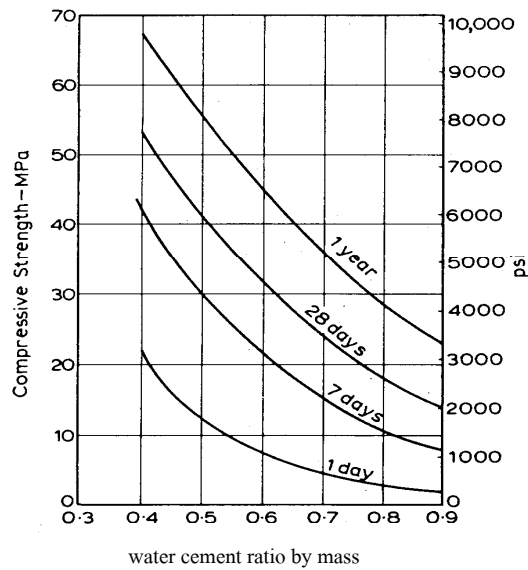


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต (Wang, 1992)

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

#### 1.) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตส่วนใหญ่ จะถูกควบคุมโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดรูปพรุนของคอนกรีตแข็ง และช่วยเพิ่มความสามารถในการประสานกันของของแข็งในคอนกรีต ซึ่งโพรงอากาศที่เกิดในคอนกรีตจะลดกำลังของคอนกรีต เช่น  $w/c = 0.45$  ที่อายุ 28 วัน จะมีกำลัง 27.59 ถึง 34.48 MPa (4000 ถึง 5000 psi) สำหรับคอนกรีตฟองอากาศ แต่จะมีกำลัง 34.48 ถึง 44.82 MPa (5000 ถึง 6500 psi) เมื่อไม่มีฟองอากาศ และที่  $w/c = 0.65$  ที่อายุ 28 วัน จะมีกำลัง 17.24 ถึง 22.76 MPa (2500 ถึง 3300 psi) และ 22.76 ถึง 31.03 MPa (3300 ถึง 4500 psi) ตามลำดับ (MacGregor, 1991) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Neville, 1981)

2.) ประเภทและลักษณะของซีเมนต์

ความละเอียดของปูนซีเมนต์และองค์ประกอบของสารเคมีของปูนซีเมนต์ มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคอนกรีตมีอายุน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าแตกต่างกันตามประเภทของปูนซีเมนต์ที่อายุเท่ากัน และเมื่ออายุมากขึ้นเกิน 1 ปีกำลังรับแรงอัดจะมีค่าแตกต่างกันน้อย

3.) อายุของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในช่วงอายุ 28 วันแรก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว และเพิ่มขึ้นน้อยลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ยังพบว่าที่อายุ 7 วันจะมีกำลังเป็นร้อยละ 65 ถึง 70 ของกำลังที่อายุ 28 วัน (MacGregor)

4.) วัสดุผสม (aggregate)

วัสดุผสมหรือมวลรวมได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากวัสดุผสมมีปริมาตรร้อยละ 70 ถึง 80 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด คุณสมบัติของวัสดุผสมจะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (durability) และปริมาณที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก (volume stability) ทั้งยังทำ

หน้าที่ด้านทานน้ำหนักที่ตกลงบนคอนกรีต กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพ ยังมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว วัสดุผสมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูงควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และวัสดุผสมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เฟส การยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุผสมกับซีเมนต์เฟสจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ซึ่งการยึดเหนี่ยวที่ดีจะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะขอบมุมของวัสดุผสม วัสดุผสมที่ดีต้องมีรูพรุนน้อย

5.) ปริมาณความชื้นและอุณหภูมิระหว่างการบ่ม

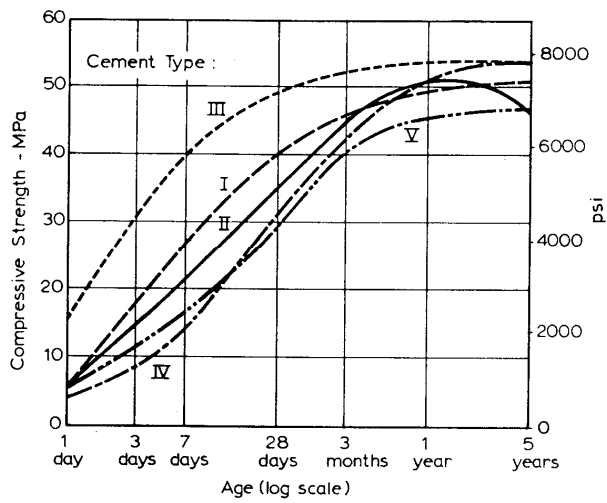
กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆเพิ่มขึ้นระหว่างการบ่ม การเพิ่มความชื้นและการให้ความชื้นอย่างต่อเนื่องในการบ่มจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อบ่มด้วยความชื้นอย่างต่อเนื่องจะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และถ้าอุณหภูมิที่บ่มมีค่าสูงขึ้นแล้ว คอนกรีตจะมีกำลังสูงขึ้น

6.) ปริมาณความชื้นในแท่งทดสอบขณะทำการทดสอบ

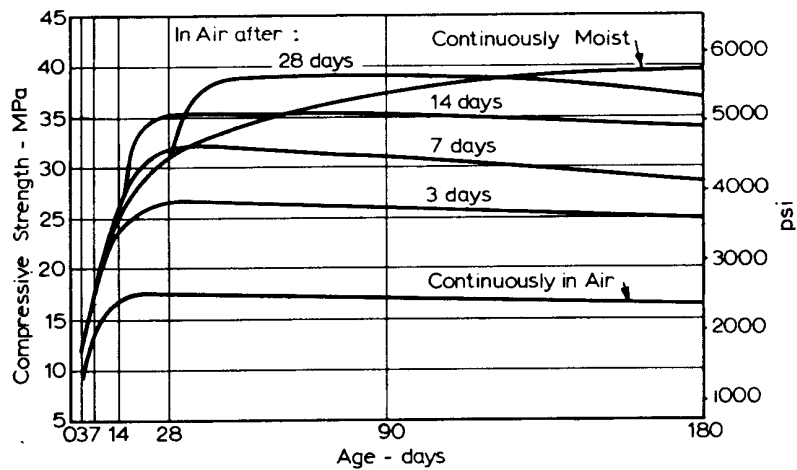
ถ้ามีปริมาณความชื้นในแท่งทดสอบขณะทำการทดสอบมีค่าสูงแล้ว กำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำลง

7.) อัตราของแรงกระทำ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราของแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น ในการทดสอบที่ใช้แท่งตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกใช้แรงกระทำประมาณ 0.24 MPa/sec ในเวลา 1.5 ถึง 2 นาทีจะทำให้แรงกระทำสูงสุดในการทดสอบ ถ้าให้อัตราแรงกระทำอย่างช้าๆกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะลดลงประมาณร้อยละ 75 ของการทดสอบ ด้วยแรงกระทำ 0.24 MPa/sec และถ้าให้อัตราแรงกระทำอย่างรวดเร็วกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 115 ของการทดสอบเดิม (MacGregor)



รูปที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามชนิดและอายุของคอนกรีต (Neville, 1981)



รูปที่ 2.7 กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆระหว่างการบ่ม (Neville, 1981)

### 2.6.2 กำลังรับแรงตัด

กำลังรับแรงตัดของคอนกรีต (flexural strength) สามารถวัดจากโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture),  $R$  ซึ่งได้แก่หน่วยแรงดึงสูงสุดในเนื้อคอนกรีต ณ จุดที่เกิดการแตกหักโดยแรงตัด การหาค่าโมดูลัสแตกร้าวให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยตัวอย่างทดสอบเป็นคาน ใช้น้ำหนักกดลงบนจุดที่แบ่งคานเป็นสามช่วง เพิ่มน้ำหนักกดลงให้สม่ำเสมอ โดยให้เกิดหน่วยแรงที่ผิวนอกประมาณ  $8 - 10 \text{ kg/cm}^2$  ต่อนาที จากค่าน้ำหนักสูงสุดที่คานสามารถรับได้นำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสแตกร้าว ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $P$  คือ น้ำหนักกดสูงสุด

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ

$b, d$  คือ ความกว้างและความลึกของคานตัวอย่างทดสอบ

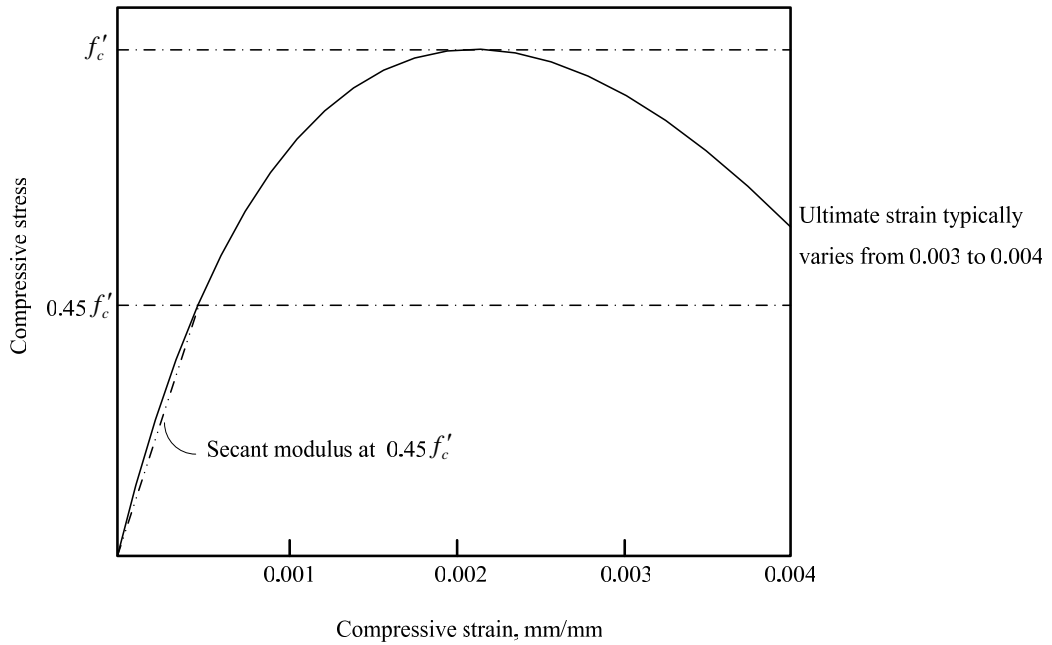
พบว่า กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตสูงกว่ากำลังรับแรงดึงประมาณร้อยละ 60 ถึง 100 ค่าโมดูลัสของการแตกหักอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 23 ของกำลังรับแรงอัด การใช้วัสดุผสมที่มีผิวหยาบขรุขระและมีเหลี่ยมมุม จะทำให้กำลังรับแรงค้ำสูงขึ้น

### 2.6.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (modulus of elasticity),  $E_c$  เป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสีย (deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีแรงกดอัดมากกระทำ จากการทดสอบจะพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วงใช้งาน และกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งอาจจะสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic materials) ได้ โดยมีความเครียด (elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างเป็นเวลานานๆ (long-term loading) ต้องพิจารณารวมความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ด้วยเพราะ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการเสียมากขึ้น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อความเครียดเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ หากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นโค้งพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้น มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ใช้วิธี Secant Modulus ซึ่งคำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการหา ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงอัดสูงสุด ( $0.45f'_c$ ) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดโดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เนื่องจากได้พิจารณาถึงความเครียดแบบพลาสติกเข้าไปด้วย





รูปที่ 2.8 วิธีการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Wang, 1992)

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการที่ 2.2

$$E_c = 4,270w_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad , \text{kg/cm}^2 \quad (2.2)$$

หรือ 
$$E_c = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad , \text{MPa}$$

เมื่อ  $E_c$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $\text{kg/cm}^2$ )

$w_c$  คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ( $\text{ton/m}^3$ )

$f'_c$  คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตทรงกระบอกเมื่ออายุ 28 วัน ( $\text{kg/cm}^2$ )

ดังนั้น สำหรับคอนกรีตธรรมดา ที่มีหน่วยน้ำหนัก  $w_c = 2,323 \text{ kg/m}^3$  จะได้ตามสมการที่ 2.3

$$E_c = 15,100\sqrt{f'_c} \quad , \text{kg/cm}^2 \quad (2.3)$$

หรือ 
$$E_c = 4,700\sqrt{f'_c} \quad , \text{MPa}$$

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้จากอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของคอนกรีต ในช่วงที่คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ซึ่งมาตรฐาน ASTM C469-94 ได้กำหนดสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไว้ดังสมการที่ 2.4

$$E_c = (S_2 - S_1) / (\varepsilon_2 - 0.000050) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $S_1$  คือ หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดกดอัดเท่ากับ  $50 \times 10^{-6}$  mm/mm  
 $S_2$  คือ หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด  
 $\varepsilon_2$  คือ ความเครียดกดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง  $S_2$

## 2.7 ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

ความสามารถทำงานได้ (Workability) เป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างหนึ่งของคอนกรีต หมายถึง การที่คอนกรีตสามารถ ขน เท ไหลเข้าแบบได้ดี ทำให้แน่นได้ง่าย และคอนกรีตที่หล่อได้ปราศจากรูพรุน ไม่เกิดการแยกตัวของคอนกรีต ความสามารถทำงานได้ จึงขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีตคือ

1) ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คือ ถ้าใช้น้ำมากเกินไป คอนกรีตจะเหลวและเทลงแบบได้ง่าย แต่กำลังของคอนกรีตจะลดลง ในทางกลับกันการมีน้ำอยู่น้อยไปจะทำให้คอนกรีตแห้ง การผสมจะเข้ากันไม่หมด และการอัดแน่นทำได้ยากขึ้น คอนกรีตอาจมีโพรงอยู่ภายใน ทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นควรใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

2) รูปร่างและลักษณะผิวของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีกว่าวัสดุผสมที่มีเหลี่ยมมุม วัสดุผสมที่มีความลดหลั่นของขนาดทำให้คอนกรีตเนื้อแน่นสม่ำเสมอต้องการน้ำผสมน้อย มีคุณภาพดีและทำงานง่าย

3) ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ มีปูนซีเมนต์ปริมาณมาก จะทำให้คอนกรีตขึ้นชั้น การใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่าเพราะมีพื้นที่ผิวมาก แต่จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็ว จึงทำให้คอนกรีตขึ้นแข็งเร็ว

4) ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศ ถ้าใช้ปริมาณที่เหมาะสม คอนกรีตจะทำงานได้ง่าย แต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง

5) สารเคมีผสมเพิ่มบางชนิด เช่น fly ash จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้น และช่วยแก้การแตกร้าวที่ผิวหน้าของคอนกรีต

6) เวลาและอุณหภูมิ ถ้าทิ้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จไว้นานเกิน 15 นาที คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ต่ำลง หรืออาจแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยเกินไป

## 2.8 สรุป

จากการศึกษา การใช้เส้นใยต่างๆเสริมคอนกรีตหรือมอร์ต้า เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านการรับแรงค้ำ และควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตนั้น โดยส่วนใหญ่คอนกรีตเสริมเส้นใย จะมีคุณสมบัติในด้านการรับแรงค้ำและควบคุมการแตกร้าวได้เท่าเดิมหรือดีขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย คอนกรีตหรือมอร์ต้าเสริมเส้นใยสังเคราะห์ประเภทโพลีโพรพิลีนและไนลอน ทำให้พฤติกรรมการรับแรงค้ำของค้ำขึ้น และลดการแตกร้าว ความยาวของเส้นใย 19-35 มม. ให้กำลังรับแรงค้ำเพิ่มร้อยละ 10 – 60 และลดการแตกร้าวได้ถึงร้อยละ 70 – 90 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่าง ขนาด และปริมาณของเส้นใยที่ใช้เป็นส่วนผสม ปัจจุบันสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เสริมในคอนกรีตเพื่อใช้งานในการควบคุมการแตกร้าว เมื่อนำคุณสมบัติของพอลิเมอร์ PET HDPE ไนลอน และโพลีโพรพิลีน มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่า PET มีจุดหลอมเหลว สูงที่สุด รองลงมาคือไนลอน โพลีโพรพิลีน และ HDPE ตามลำดับ ซึ่งไนลอนจะมีกำลังรับแรงค้ำ สูงที่สุด รองลงมาคือ PET โพลีโพรพิลีน และ HDPE ตามลำดับ ในด้านโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ ทั้งสี่ชนิดมีค่าเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PET ไนลอน โพลีโพรพิลีน และ HDPE ส่วนเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูงสุดที่จุดแตกหักของ PET มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นไนลอน โดย HDPE และโพลีโพรพิลีนมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนคุณสมบัติของพอลิเมอร์แสดงในภาคผนวก

นอกจากนั้นแล้ว การใช้พลาสติกที่ใช้แล้วประเภท PET และ HDPE ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ เนื่องจาก PET และ HDPE เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ที่เพิ่มความสะดวกในการพกพาเช่น ขวดน้ำ และเป็นวัสดุที่มีราคาไม่แพง โดย PET มีกำลังรับแรงค้ำ (tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูงสุดที่จุดแตกหัก สูงกว่าโพลีโพรพิลีน จึงเป็นไปได้ที่จะเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตได้ดีกว่าโพลีโพรพิลีน ซึ่งโพลีโพรพิลีนเป็นวัสดุที่นำมาศึกษาแล้วว่าสามารถนำมาทำเป็นเส้นใยเพื่อเสริมในคอนกรีตแล้วมีผลให้คอนกรีตมีพฤติกรรมและคุณสมบัติในการรับแรงค้ำและการรับแรงค้ำที่ดีขึ้น และยังช่วยลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตได้ จนสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์เสริมในงานก่อสร้างได้แก่ไฟเบอร์เมช ส่วน HDPE มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโพลีโพรพิลีน แต่ปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่ทำจาก HDPE สูงกว่า (ร้อยละ 60 ของบรรจุภัณฑ์ในสหรัฐอเมริกาที่ทำจาก HDPE (Susan, 1997)) เนื่องจากเป็นวัสดุที่ราคาต่ำ ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณพลาสติกที่ใช้แล้วประเภท HDPE มี

ปริมาณสูงเช่นกัน จึงคาดหวังว่าการใช้เส้นพลาสติกที่ใช้แล้วประเภท HDPE จะเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้แก่คอนกรีตได้เช่นเดียวกับ PET

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 บทนำ

คอนกรีตเสริมเส้นใยมีผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ลดการแตกร้าว และมีพฤติกรรมการรับแรงอัดที่ดีขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด รูปร่าง ขนาด และปริมาณของเส้นใย งานวิจัยนี้ใช้เส้นพลาสติก PET และ HDPE จากขวดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้ว ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เป็นผลิตภัณฑ์ในการเสริมคอนกรีตที่ใช้ปัจจุบัน และขยะประเภทพลาสติกดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มขึ้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 พบว่าปริมาณเส้นใยที่เสริมในคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 2 โดยปริมาตร ขนาดความยาว 19.1 ถึง 38 มม. และรูปร่างที่มีปลายโค้ง หรือเป็นลอนให้ผลดีกว่าแบบตรง และข้อจำกัดในการผลิตเส้นพลาสติกที่ต้องตัดจากขวดที่ใช้แล้ว รวมถึงความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกจึงเลือกใช้เส้นพลาสติกความยาว 25.4 มม. กว้าง 1 มม. ปริมาตรร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก 2 ลักษณะคือ ตรงและซิกแซก สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6 เนื่องจากคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการควบคุมการแตกร้าวเป็นหลัก ได้แก่ พื้นถนน กระเบื้องปูหลังคา ซึ่งไม่เน้นในส่วนที่กำลังรับแรงอัด รวมถึงเส้นพลาสติกจะลดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ เพราะคอนกรีตจะมีปริมาณซีเมนต์สูงแต่ปริมาณน้ำน้อย เมื่อผสมเส้นพลาสติกเข้าไป คอนกรีตจะมีความชื้นขึ้น แม้ว่าการเสริมเส้นพลาสติกจะเพิ่มกำลังรับแรงดัด แต่โครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่ยังคงต้องรักษากำลังรับแรงอัดอยู่ จึงทำการวัดกำลังรับแรงอัดและการรับแรงดัด เพื่อเสนอผลที่ได้ให้เหมาะกับการใช้งาน

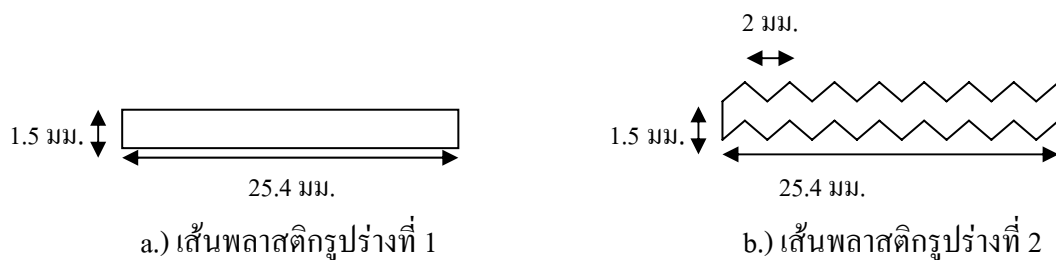
บทนี้จะกล่าวถึง ตัวอย่างการทดสอบ วิธีการวัดกำลังรับแรงอัด วิธีการวัดกำลังรับแรงดัด และการคำนวณหา ค่าหน่วยแรง (stress) ความเครียด (strain) หน่วยแรงอัดประลัย การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการหาโมดูลัสแตกร้าว ซึ่งการวัดกำลังรับแรงอัด (compression test) ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C39-96 การวัดกำลังรับแรงดัด (flexural test) ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78-94 และการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C469-94 ส่วนการเตรียมเส้นพลาสติก เครื่องมือในการทดสอบ และการหล่อตัวอย่างทดสอบแสดงในภาคผนวก ข

### 3.2 ตัวอย่างการทดสอบ

จากตัวแปรที่สนใจศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 3 ค่าได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6 เส้นพลาสติกแบบสันชนิด PET และ HDPE ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เส้นพลาสติกมี 2 ลักษณะคือ ตรงและซิกแซก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เส้นพลาสติกกว้าง 1.5 มม. ยาว 25.4 มม. ความหนาของเส้นพลาสติก PET และ HDPE เท่ากับ 0.5 และ 0.6 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ขวดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.2 ลักษณะเส้นพลาสติกที่ใช้ในการศึกษา

ในการวัดการรับแรงอัด ตัวอย่างทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกขนาด  $\phi 15 \times 30$  ซม. และในการวัดการรับแรงดัด ตัวอย่างทดสอบเป็นคานขนาด  $10 \times 10 \times 50$  ซม. มีตัวอย่างทดสอบอย่างละ 60 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย AB.BC.dE.E ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ A หมายถึง การทดสอบ ได้แก่ C และ F เป็นสัญลักษณ์แทน การทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามลำดับ B.B หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c) 3 ค่า ได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6 C หมายถึง ชนิดของเส้น

พลาสติก ได้แก่ H และ P เป็นสัญลักษณ์แทน HDPE และ PET ตามลำดับ d หมายถึง ลักษณะของ ขอบเส้นพลาสติก ได้แก่ s และ z เป็นสัญลักษณ์แทน ขอบตรงและขอบซิกแซก ตามลำดับ ส่วน E.E หมายถึง ปริมาณเส้นพลาสติก (ร้อยละโดยปริมาตร) ได้แก่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบกำลังรับแรงค้ำ

การทดสอบ กำลังรับแรงอัด	การทดสอบ กำลังรับแรงค้ำ	w/c	ชนิดของ เส้นพลาสติก	ขอบของ เส้นพลาสติก	ปริมาณเส้นพลาสติก (ร้อยละโดยปริมาตร)
C0.4Ps0.0	F0.4Ps0.0	0.4	PET	ขอบตรง (s)	0.0
C0.4Ps0.5	F0.4Ps0.5				0.5
C0.4Ps1.0	F0.4Ps1.0				1.0
C0.4Ps1.5	F0.4Ps1.5				1.5
C0.4Ps2.0	F0.4Ps2.0				2.0
C0.4Pz0.0	F0.4Pz0.0			ขอบซิกแซก(z)	0.0
C0.4Pz0.5	F0.4Pz0.5				0.5
C0.4Pz1.0	F0.4Pz1.0				1.0
C0.4Pz1.5	F0.4Pz1.5				1.5
C0.4Pz2.0	F0.4Pz2.0				2.0
C0.4Hs0.0	F0.4Hs0.0	0.4	HDPE	ขอบตรง (s)	0.0
C0.4Hs0.5	F0.4Hs0.5				0.5
C0.4Hs1.0	F0.4Hs1.0				1.0
C0.4Hs1.5	F0.4Hs1.5				1.5
C0.4Hs2.0	F0.4Hs2.0				2.0
C0.4Hz0.0	F0.4Hz0.0			ขอบซิกแซก(z)	0.0
C0.4Hz0.5	F0.4Hz0.5				0.5
C0.4Hz1.0	F0.4Hz1.0				1.0
C0.4Hz1.5	F0.4Hz1.5				1.5
C0.4Hz2.0	F0.4Hz2.0				2.0

ในตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 เท่านั้น แต่จะมีตัวอย่างการทดสอบแบบเดียวกันที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6

### 3.3 การวัดกำลังรับแรงดึงของเส้นพลาสติก

#### มาตรฐานการทดสอบ

ASTM D 638-97 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

#### วิธีการทดสอบ

- 1.) วัดความกว้าง และความหนาของตัวอย่างทดสอบ
- 2.) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบในเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยมีระยะจับที่ 65 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- 3.) เพิ่มแรงดึงให้อัตราเร็ว 50 มม./นาที
- 4.) บันทึกหน่วยแรงดึงและความเครียด
- 5.) วาดกราฟหน่วยแรงดึงสัมพันธ์กับความเครียด



รูปที่ 3.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเส้นพลาสติก

### 3.4 การวัดกำลังรับแรงอัด

#### มาตรฐานการทดสอบ

ASTM C39-96 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

#### วิธีการทดสอบ

- 1.) ชั่งแท่งตัวอย่างทดสอบและวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กึ่งกลางแท่ง 2 ครั้งพร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ย



- 2.) ติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดหดตัวเพื่อวัดการเสียรูปทรงของตัวอย่างทดสอบระหว่างการทดสอบ
- 3.) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบในเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ใส่ น้ำหนักเล็กน้อยและตั้งเข็มวัดเป็นศูนย์
- 4.) เพิ่มน้ำหนักกดอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็วประมาณ 14 ถึง 35 MPa/min และให้อัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดมีค่า 11 mm/min โดยไม่มีการกระแทก ในช่วงครึ่งแรกของการทดสอบอาจใช้อัตราของแรงสูงกว่าที่กำหนดได้ แต่ควรคงที่ในช่วงครึ่งหลัง ให้น้ำหนักกดจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ และสังเกตลักษณะการวิบัติ
- 5.) ถอดเครื่องมือวัดการยืดหดตัวออกเมื่อคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าว
- 6.) บันทึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างทดสอบ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักกดสูงสุด คำนวณน้ำหนักกดทุกช่วง 0.1 มม. คำนวณหากำลังรับแรงอัด และวาดภาพลักษณะการวิบัติของแท่งทดสอบพร้อมทั้งบอกประเภทการแตกร้าว (mode of failure)
- 7.) วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดในสเกลที่เหมาะสม



รูปที่ 3.4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด

### 3.5 การวัดกำลังรับแรงดัด

#### มาตรฐานการทดสอบ

ASTM C 78-94 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete

#### วิธีการทดสอบ

- 1.) วัดความกว้างและความลึกของคานตัวอย่างทดสอบ 2 ครั้ง พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ย
- 2.) นำแท่งตัวอย่างคานทดสอบไปวางบนฐานรองรับคานทดสอบ ซึ่งฐานรองรับจะมีท่อนโลหะผิวโค้ง (steel rod และ steel ball) 2 ท่อนไว้รับคานทดสอบ เพื่อจัดให้เป็นระยะห่างของจุดรองรับ (support) ควรมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับมากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าของความลึก แล้วจัดให้ฐานรองรับคานทดสอบอยู่ในแนวศูนย์กลางและสมดุลบนแท่งกวดตัวของเครื่อง ทดสอบให้เรียบร้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.5
- 3.) วัดระยะห่างระหว่างฐานรองรับทั้งสอง (span)
- 4.) นำหัวกดมาวางสัมผัสบนคานทดสอบ จัดให้อยู่ในแนวกึ่งกลาง (แบ่งคานเป็น 2 ช่วงเท่าๆกัน) แล้วจัดให้หัวกดอยู่ในแนวศูนย์กลางและสมดุลใต้แท่งกวดตัวของเครื่องทดสอบ
- 5.) เดินเครื่องทดสอบให้น้ำหนักกดสม่ำเสมอ ด้วยน้ำหนักกดประมาณ 0.86 ถึง 1.21 MPa/min แล้วให้สังเกตว่าผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับคานทดสอบ และระหว่างฐานรองคานกับคานทดสอบ มีช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสกว้างกว่า 0.15 มม. ในช่วง 25 มม. หรือไม่ ถ้ามีก็ให้แต่งผิวคานทดสอบเฉพาะช่วงนั้นๆด้วยการฝนให้เรียบ และถ้าช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสกว้างน้อยกว่า 0.15 มม. ในช่วง 25 มม. ก็อาจจุดได้โดยใช้แผ่นหนังวางไว้ระหว่างผิวสัมผัสนั้น แผ่นหนังควรมีขนาดความกว้าง 25 ถึง 50 มม. ความยาวตลอดแนวกว้างของคานและความหนา 6.4 มม.
- 6.) เพิ่มน้ำหนักกดอย่างต่อเนื่อง สม่ำเสมอและไม่มีการกระแทก เพิ่มน้ำหนักกดให้มี การโก่งตัว (deflection) ที่กึ่งกลางคานคงที่ประมาณ 0.05 ถึง 0.1 mm/min จนกระทั่งคานทดสอบวิบัติ
- 7.) สังเกต first-crack จะเกิดขึ้น 30 ถึง 60 วินาทีหลังจากการให้น้ำหนักกด ซึ่งประมาณพฤติกรรมแบบอิลาสติก
- 8.) บันทึกค่าความกว้างและความลึกของคานทดสอบ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ น้ำหนักกดที่เกิด first-crack ค่าระหว่างการโก่งตัว (deflection) กับน้ำหนักกด และน้ำหนักกดสูงสุด
- 9.) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งตัวกับน้ำหนักกด



รูปที่ 3.5 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด

### 3.6 โมดูลัสยืดหยุ่น

#### มาตรฐานการทดสอบ

ASTM C469-94 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression

#### วิธีการทดสอบ

การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น สามารถหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียด ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด

- 1.) หาค่าหน่วยแรงที่ความเครียด  $50 \times 10^{-6}$  mm/mm
- 2.) หาค่าความเครียดที่หน่วยแรงกดอัดประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด

### 3.7 การคำนวณ

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง การคำนวณหา ค่าหน่วยแรง (stress) ความเครียด (strain) หน่วยแรงอัดประลัย การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งได้จากผลการทดสอบการรับแรงอัด และการหาโมดูลัสแตกร้าว ได้จากผลการทดสอบการรับแรงอัด โดยมีคำนวณดังต่อไปนี้

- 1.) คำนวณหาค่าหน่วยแรงอัด ( $\sigma$ ) ดังสมการที่ 3.1

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

โดยที่  $\sigma$  คือ หน่วยแรงอัด (Pa)

$P$  คือ น้ำหนักกด (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ( $m^2$ )

2.) กำหนดหาค่าความเครียด ( $\varepsilon$ ) ดังสมการที่ 3.2

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ ความเครียด (mm./mm.)

$\delta$  คือ ค่าการยืดหดตัวของตัวอย่างทดสอบ (mm.)

$L$  คือ ความสูงของตัวอย่างทดสอบ (mm.)

3.) กำหนดหาค่าหน่วยแรงอัดประลัย ( $f'_c$ )

$$f'_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.3)$$

โดยที่  $f'_c$  คือ หน่วยแรงอัดประลัย (Pa)

$P_{max}$  คือ น้ำหนักกดสูงสุด (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ( $m^2$ )

4.) กำหนดหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ ) ดังสมการที่ 3.4

$$E_c = (S_2 - S_1) / (\varepsilon_2 - 0.000050) \quad (3.4)$$

โดยที่  $E_c$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Pa)

$S_1$  คือ หน่วยแรงที่เกิดความเครียดคดอัดเท่ากับ  $50 \times 10^{-6}$  mm/mm

$S_2$  คือ หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงคดอัดประลัย

$\varepsilon_2$  คือ ความเครียดคดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง  $S_2$

5.) กำหนดหาค่าโมดูลัสแตกร้าว ( $R$ ) ดังสมการที่ 3.5-3.6

กรณีที่คานตัวอย่างทดสอบแตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.5)$$

โดยที่  $R$  คือ โมดูลัสแตกร้าว (Pa)

$P$  คือ น้ำหนักกดสูงสุด(N)

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ (m.)

$b, d$  คือ ความกว้างและความลึกของคานตัวอย่างทดสอบ (m.)

กรณีที่คานตัวอย่างทดสอบไม่แตกอยู่ในช่วงกลาง

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3.6)$$

โดยที่  $P$  คือ น้ำหนักกดสูงสุด (N)

$a$  คือ ระยะเฉลี่ยจากจุดที่แตกไปยังฐานรองรับที่ใกล้กว่าวัดด้าน รับแรงดึง (tension) (m.)

$b, d$  คือ ความกว้างและความลึกของคานตัวอย่างทดสอบ (m.)

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

#### 4.1 บทนำ

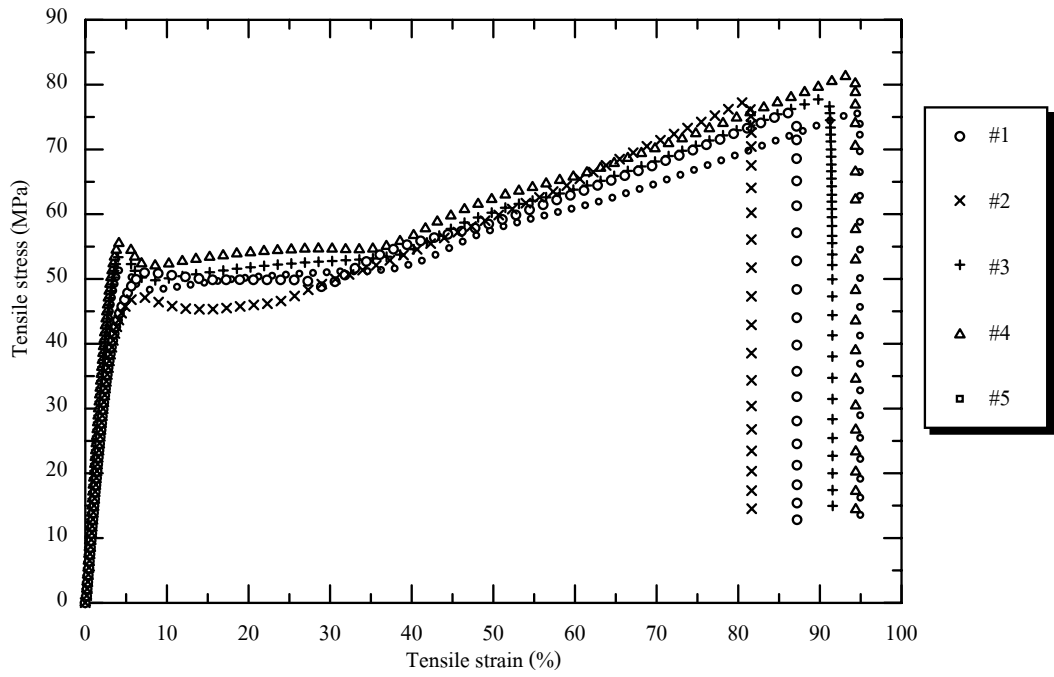
บทนี้จะกล่าวถึง ผลการวัดกำลังรับแรงดึงของพลาสติก PET และ HDPE คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น และนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณเส้นพลาสติก คุณสมบัติทางกลดังกล่าวได้แก่ กำลังรับแรงอัด (compressive strength) กำลังรับแรงดัด (flexural strength) และลักษณะการวิบัติ (mode of failure) การวัดการรับแรงอัด (compression test) ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C39 และการวัดการรับแรงดัด (flexural test) ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78

#### 4.2 กำลังรับแรงดึงของพลาสติก PET และ HDPE

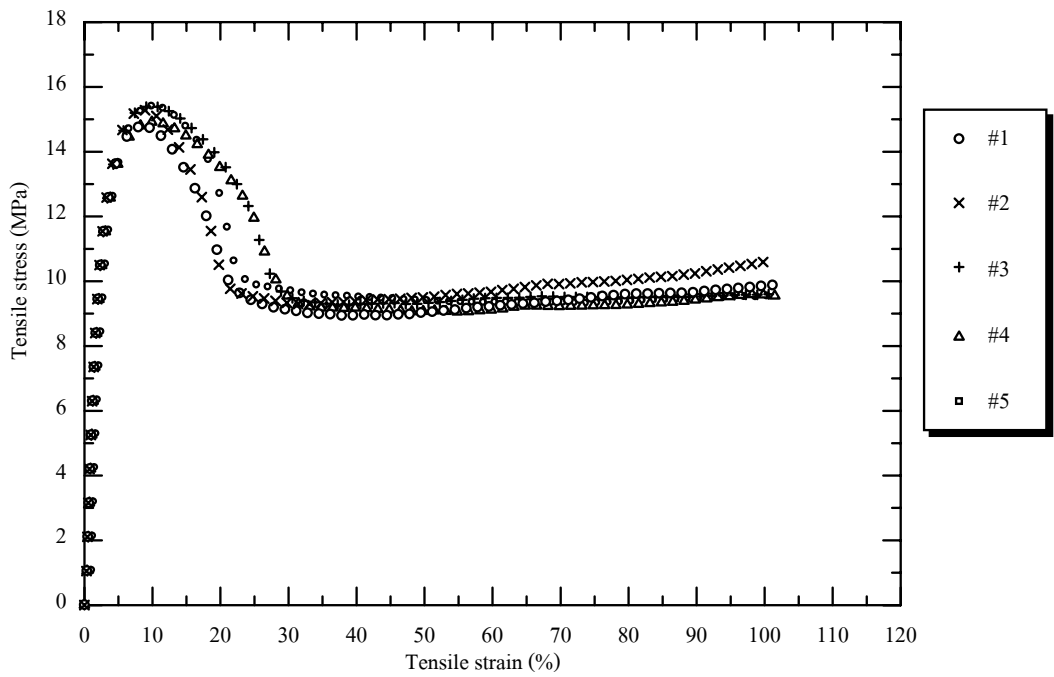
การวัดกำลังรับแรงดึงและการยืดตัวสูงสุดที่จุดแตกหักของพลาสติก PET และ HDPE ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D638-97 ให้ผลดังตารางที่ 4.1 และเมื่อพล็อตหน่วยแรงดึงสัมพันธ์กับความเครียด แสดงดังรูปที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเส้นพลาสติกที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติ	PET	HDPE
Tensile stress, MPa	77.48	15.18
Modulus of elasticity, MPa	1304.76	449.28
Elongation at break, %	88.87	9.13



รูปที่ 4.1 หน่วยแรงดึงสัมพันธ์กับความเครียดของพลาสติก PET



รูปที่ 4.2 หน่วยแรงดึงสัมพันธ์กับความเครียดของพลาสติก HDPE

### 4.3 กำลังรับแรงอัด

การวัดการรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกใช้แล้วและคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก ตัวอย่างทดสอบเป็นทรงกระบอกขนาด  $\phi 15 \times 30$  ซม. อายุบ่ม 28 วัน ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกกับคอนกรีตธรรมดาพบว่า กำลังรับแรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 1 ถึง 30 และกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพลาสติกเพิ่มขึ้นในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ขึ้นกับปริมาณเส้นพลาสติก ชนิดของพลาสติก และลักษณะของขอบเส้นพลาสติกที่ได้แก่ Hs, Hz, Ps, และ Pz กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE สูงกว่าที่เสริมเส้นพลาสติกชนิด PET และเมื่อพิจารณาจากลักษณะของขอบเส้นพลาสติกพบว่า ที่อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณพลาสติกที่เท่ากัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกตรงจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่เสริมเส้นพลาสติกซีกแซก

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัด

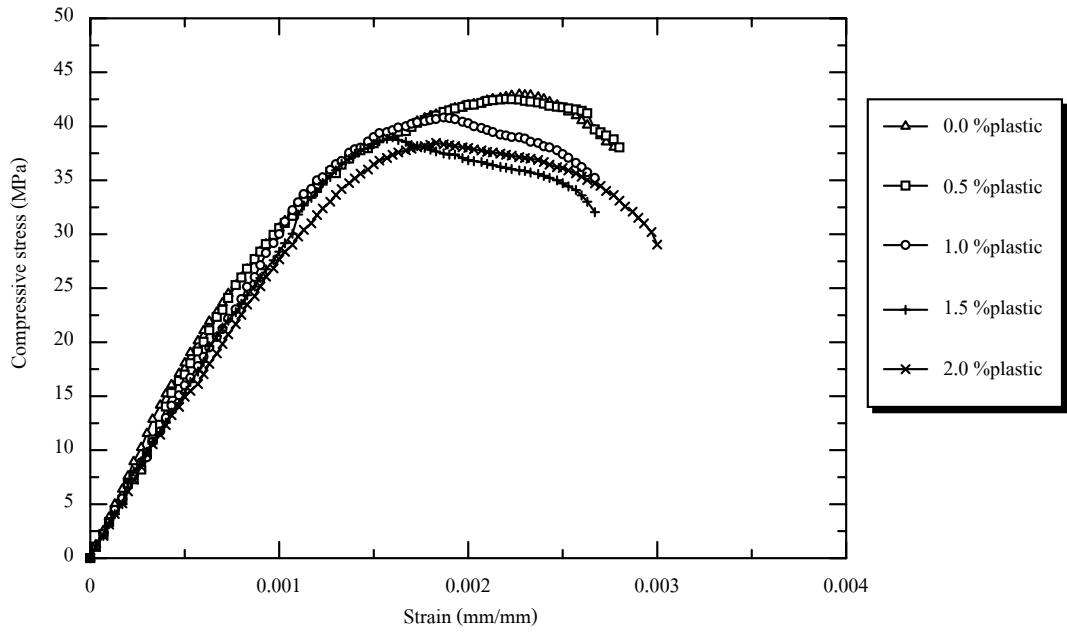
ชื่อ ตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (MPa)				
	ปริมาณเส้นพลาสติก ( ร้อยละ โดยปริมาตร)				
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
C0.4Hs	42.94	42.48	41.56	39.27	38.00
C0.4Hz	42.94	42.31	41.85	38.86	35.84
C0.4Ps	42.94	42.63	39.04	37.09	31.82
C0.4Pz	42.94	41.04	39.27	34.70	30.22
C0.5Hs	32.07	32.04	31.97	29.49	28.40
C0.5Hz	32.07	31.59	30.27	28.95	26.00
C0.5Ps	32.07	31.50	29.90	28.80	24.24
C0.5Pz	32.07	29.40	26.50	25.50	22.03
C0.6Hs	22.89	22.55	22.37	22.07	20.37
C0.6Hz	22.89	22.41	21.25	19.90	18.28
C0.6Ps	22.89	21.69	19.35	18.29	16.70
C0.6Pz	22.89	21.99	18.10	17.30	15.46



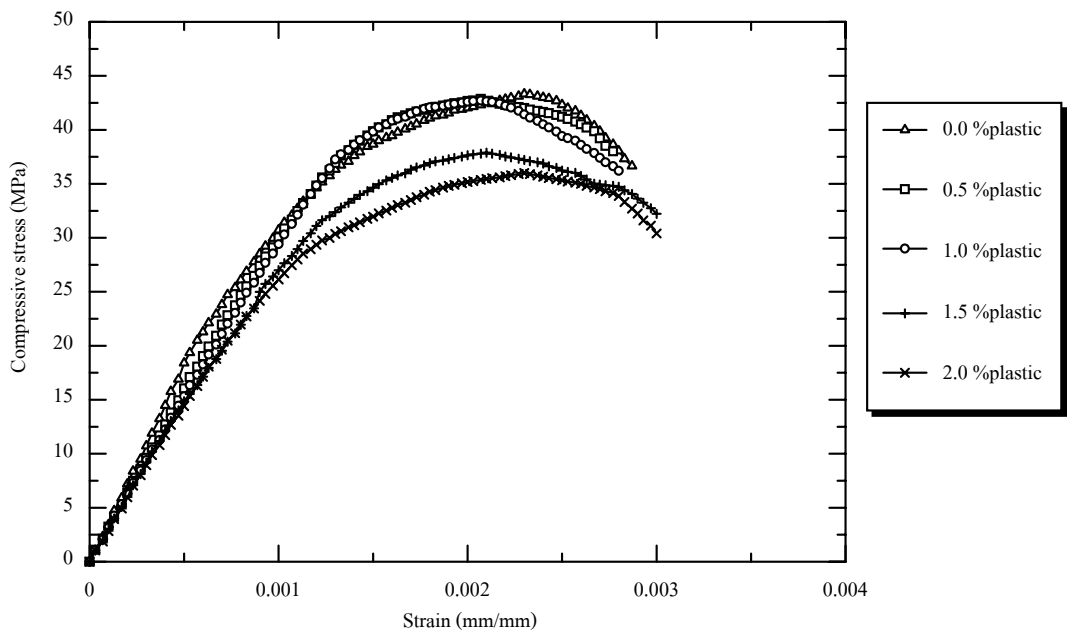
#### 4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด

เมื่อพล็อตหน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก จะได้กราฟดังรูปที่ 4.3–4.8 จะเห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1.0 ให้หน่วยแรงอัดกับความเครียดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก ส่วนการเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.5 และ 2.0 หน่วยแรงอัดจะลดลงแต่มีความเครียดเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากปลายกราฟที่ยาวกว่า แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดการขีดหดตัว (dial gage) สามารถวัดการเสียรูปได้เพียงความเครียดประมาณ 0.004 มม./มม. จึงไม่สามารถหาความเครียดถึงจุดวิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก HDPE ให้พฤติกรรมการรับแรงอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกมากกว่าการเสริมเส้นพลาสติก PET ดังรูปที่ 4.3 กราฟหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs มีเส้นกราฟใกล้เคียงกันมากกว่ากราฟหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps ในรูปที่ 4.5 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 เส้นกราฟใกล้เคียงกันมากกว่ารูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟหน่วยแรงอัดกับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs และ Hz ตามลำดับ จะเห็นว่าเส้นพลาสติกตรงมีผลต่อหน่วยแรงอัดกับความเครียดน้อยกว่าเส้นพลาสติกตรง

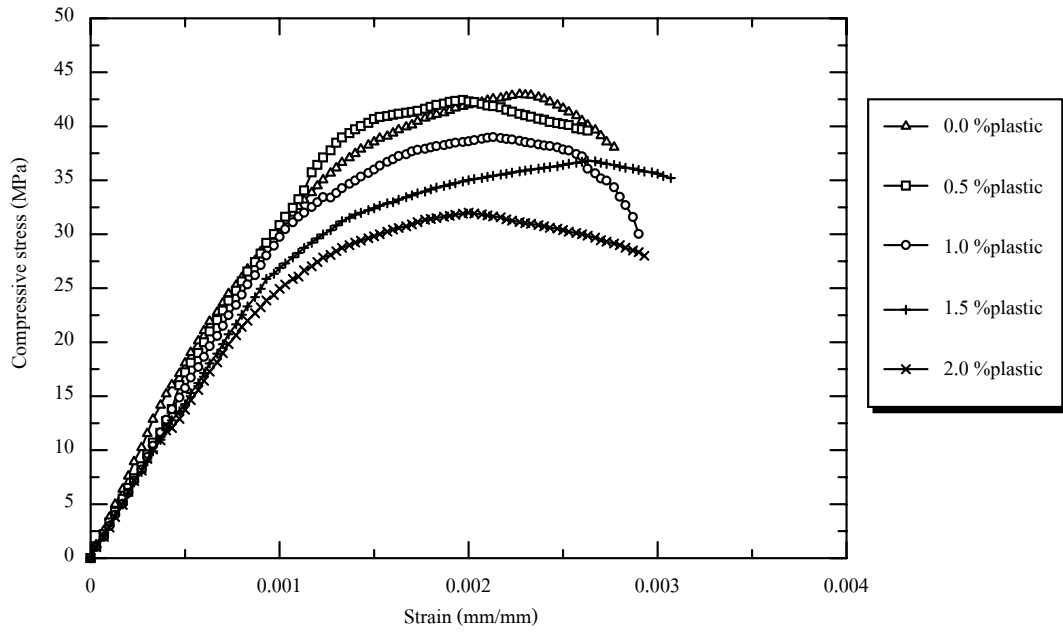
การเสริมเส้นพลาสติกในคอนกรีตมีผลต่อหน่วยแรงอัดและความเครียดของคอนกรีตมากขึ้นในช่วงร้อยละ 75 ของหน่วยแรงอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติของคอนกรีต โดยสังเกตได้จากกราฟหน่วยแรงอัดกับความเครียดที่แตกต่างกันมากขึ้นในช่วงดังกล่าว แสดงว่าเส้นพลาสติกไม่ได้ทำให้ micro crack และ bond crack ของคอนกรีตเปลี่ยนไป (การแตกร้าวของคอนกรีตกล่าวในภาคผนวก ก) แต่เมื่อคอนกรีตแตกร้าวมากขึ้นเส้นพลาสติกช่วยให้คอนกรีตเสียรูปได้มากขึ้นก่อนการวิบัติ



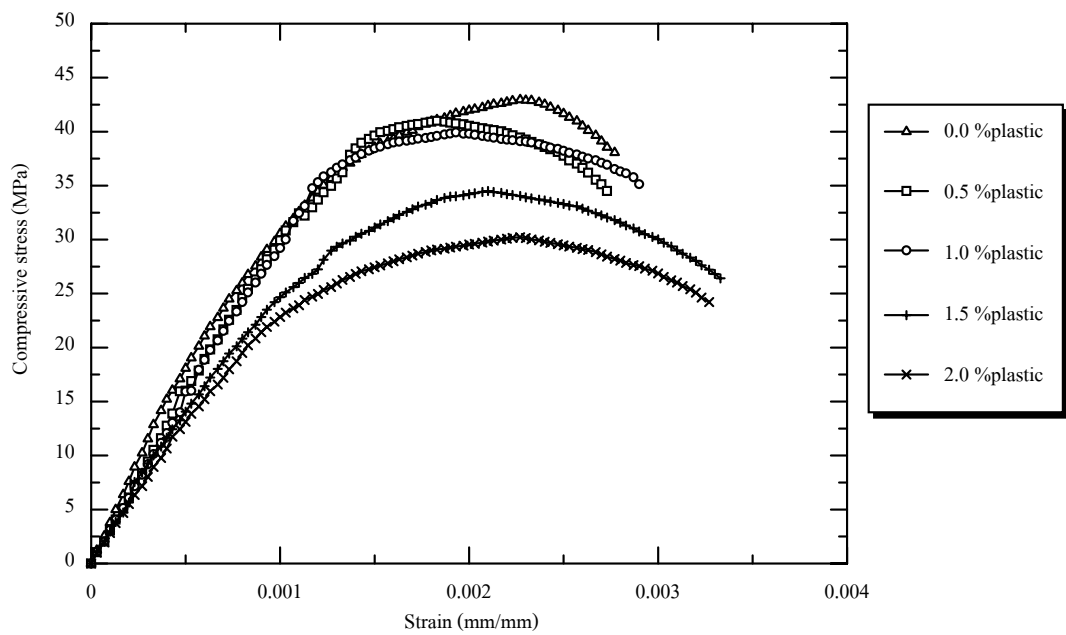
รูปที่ 4.3 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c = 0.4)



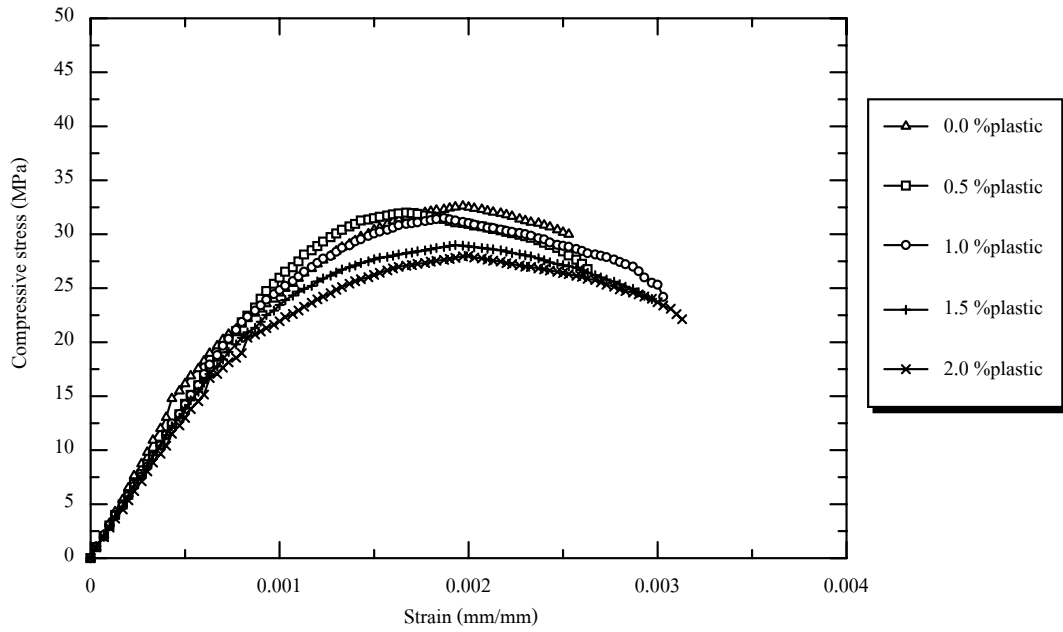
รูปที่ 4.4 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c = 0.4)



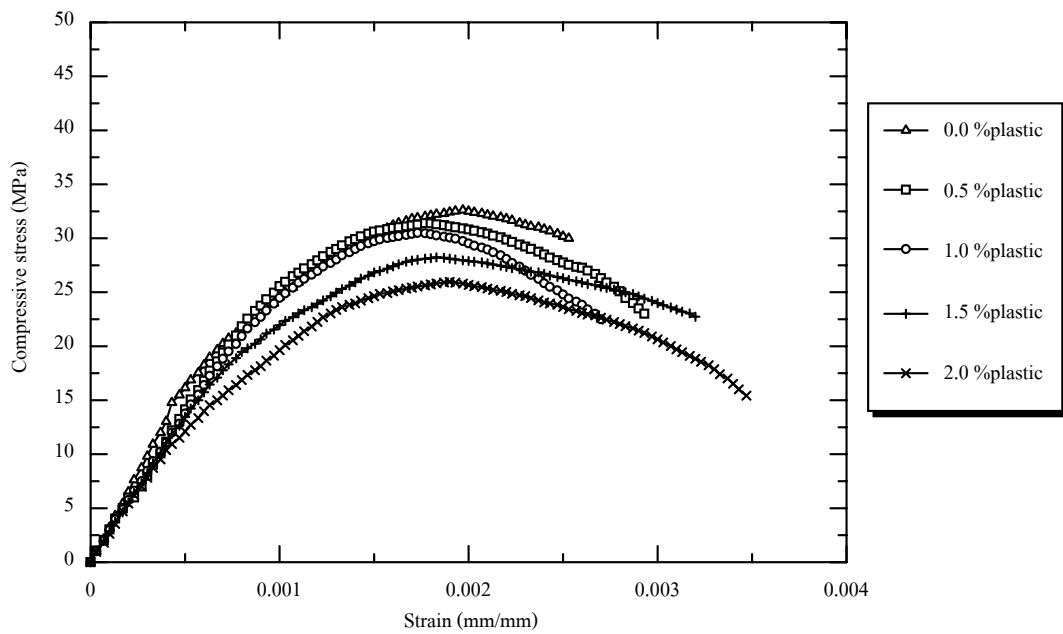
รูปที่ 4.5 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c = 0.4)



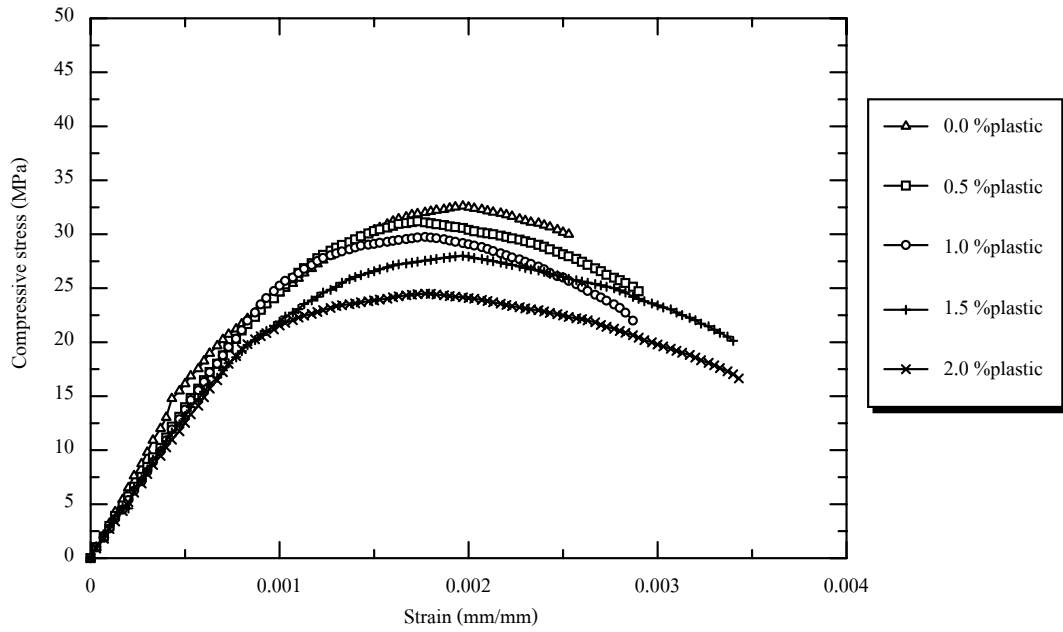
รูปที่ 4.6 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c = 0.4)



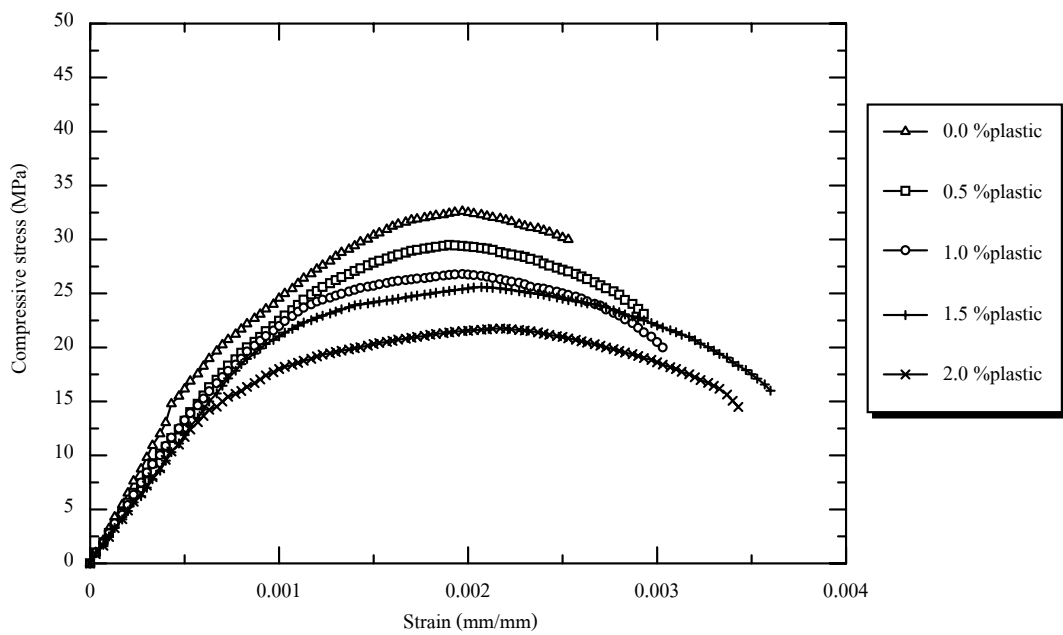
รูปที่ 4.7 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c = 0.5)



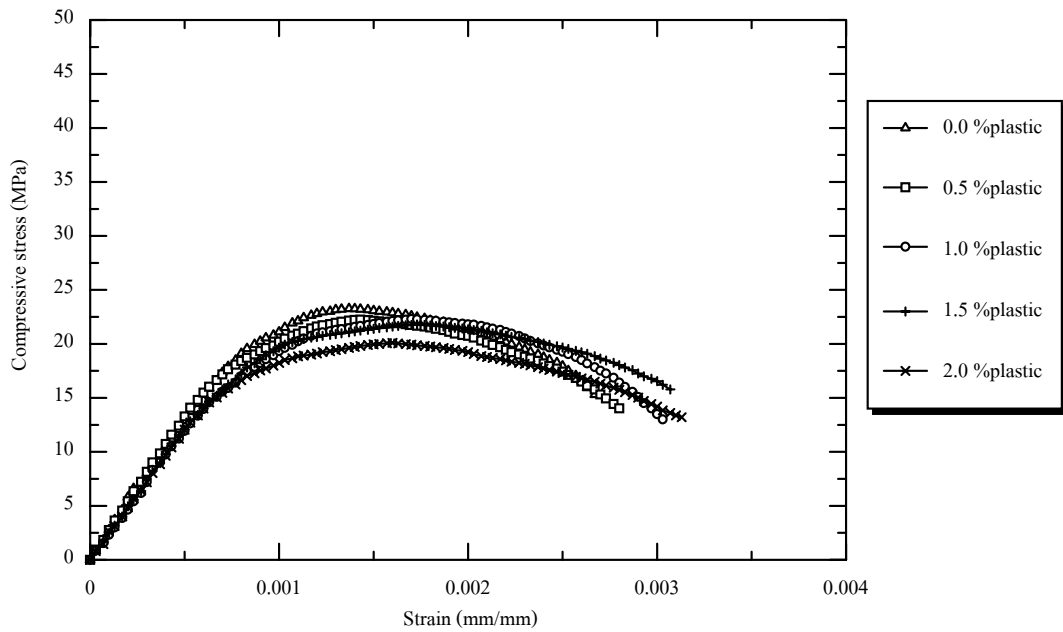
รูปที่ 4.8 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c = 0.5)



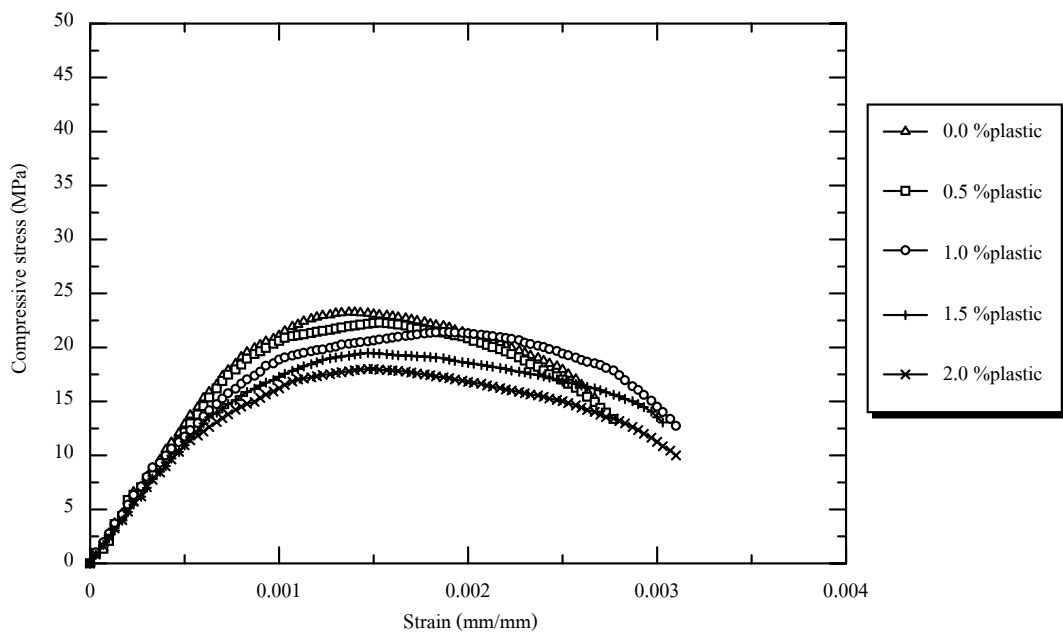
รูปที่ 4.9 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c = 0.5)



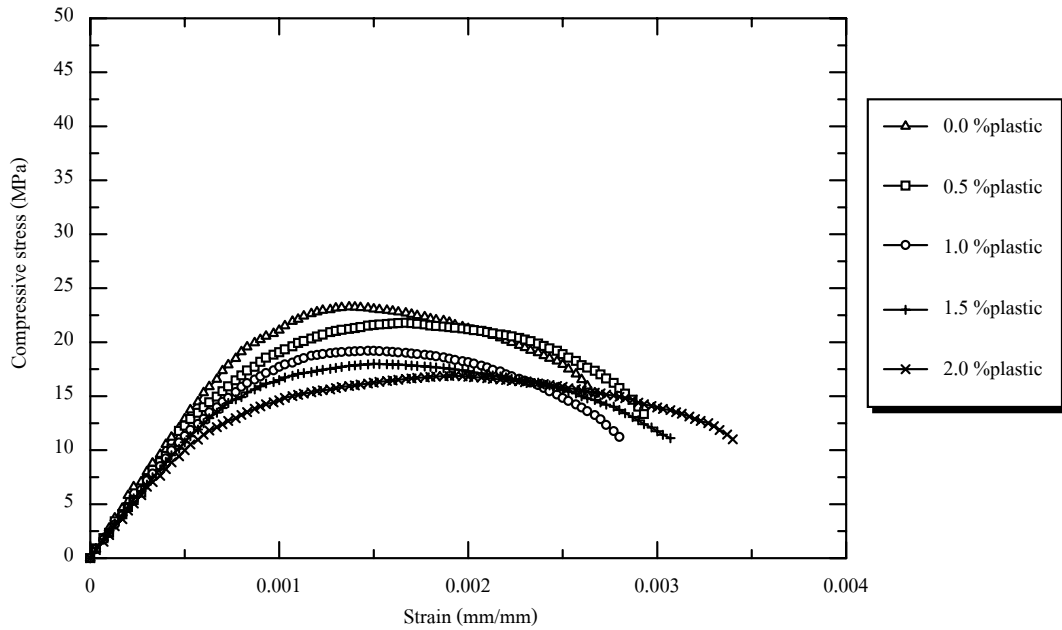
รูปที่ 4.10 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c = 0.5)



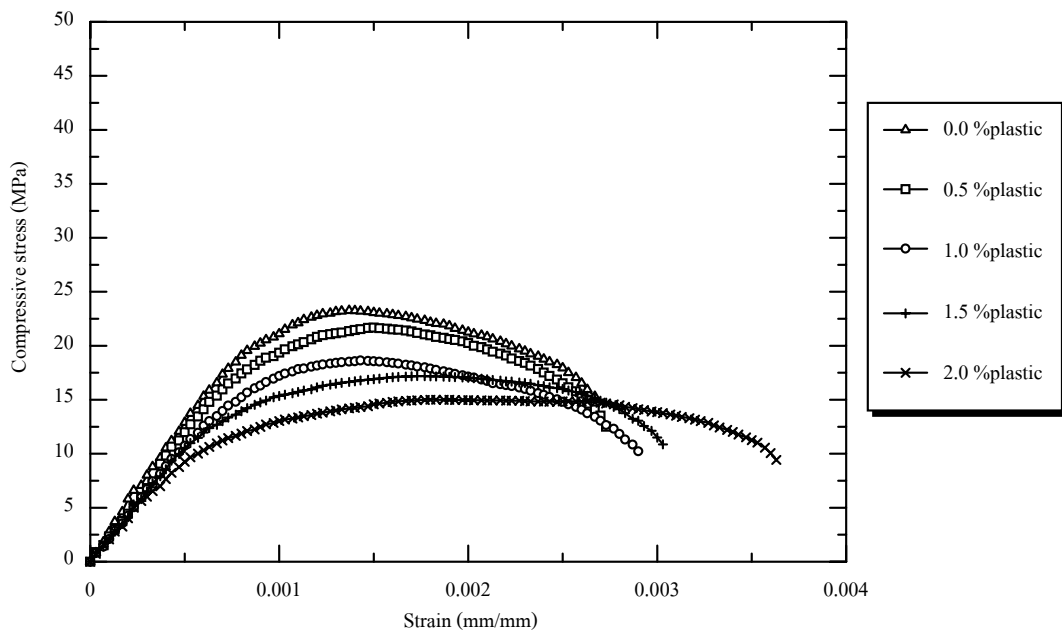
รูปที่ 4.11 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs ( $w/c = 0.6$ )



รูปที่ 4.12 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz ( $w/c = 0.6$ )



รูปที่ 4.13 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps ( $w/c = 0.6$ )

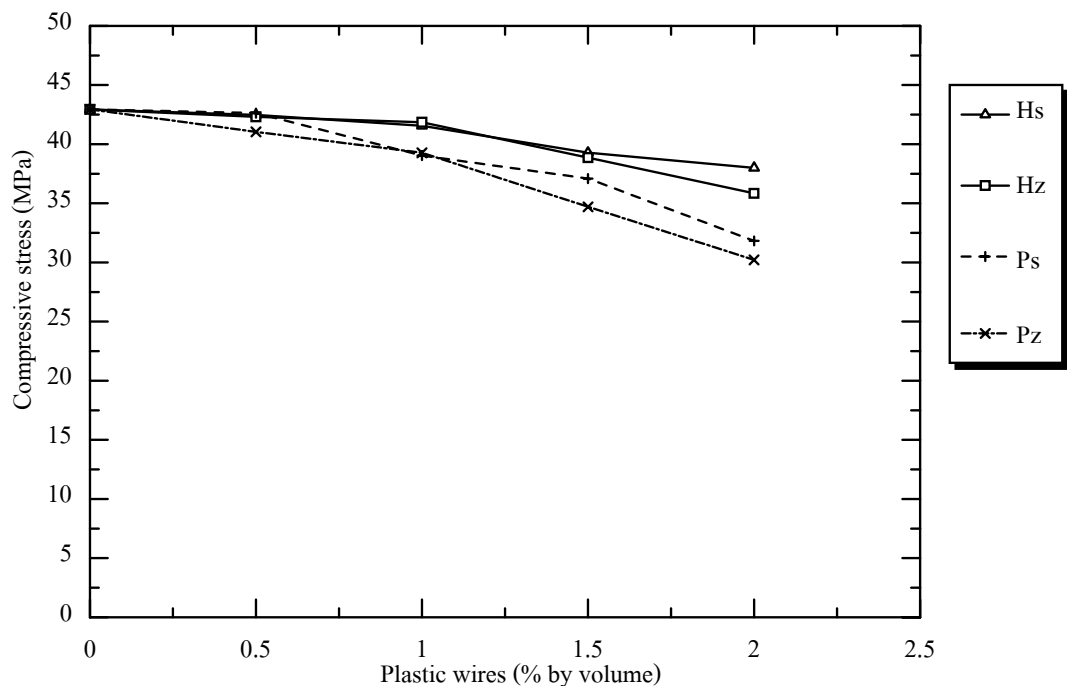


รูปที่ 4.14 หน่วยแรงอัดสัมพันธ์กับความเครียดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz ( $w/c = 0.6$ )

#### 4.3.2 อิทธิพลของปริมาณเส้นพลาสติกต่อกำลังรับแรงอัด

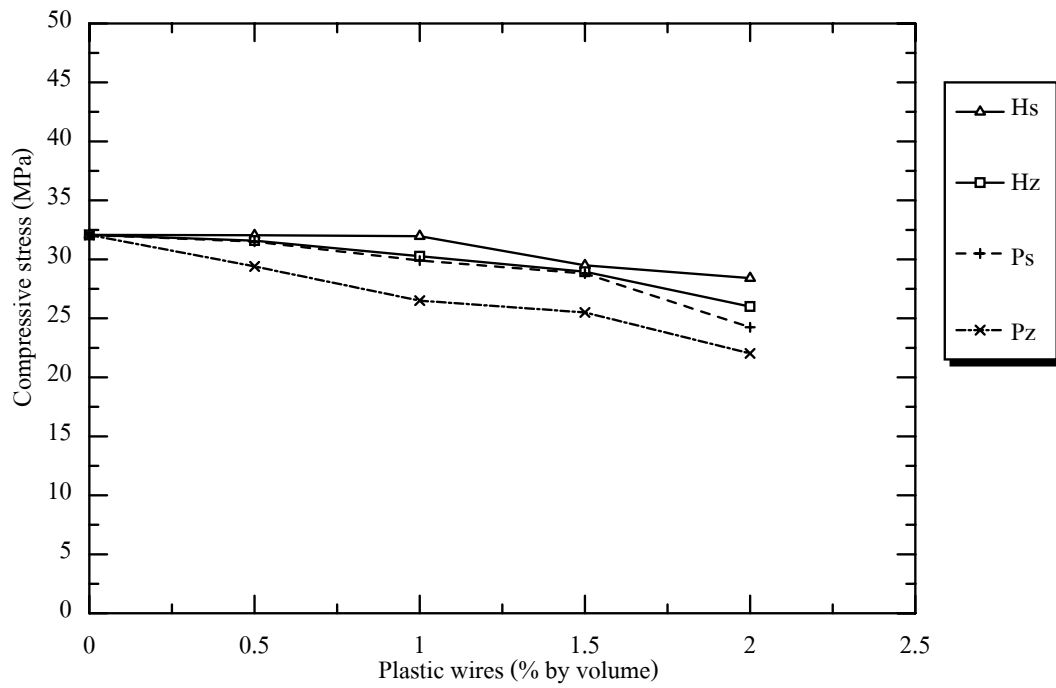
เมื่อพล็อตกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติกเสริมในคอนกรีต จะได้กราฟดังในรูปที่ 4.15–4.17 จะเห็นว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเสริม

เส้นพลาสติก และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้น ซึ่งคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกลักษณะเดียวกันมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดเมื่อคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณสูงสุดที่ใช้ในการศึกษาคือ ร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร ในส่วนของชนิดพลาสติก ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก HDPE ให้กำลังอัดสูงกว่าที่เสริมเส้นพลาสติก PET ทั้งขอบตรงและขอบซิกแซก ที่ปริมาณเส้นพลาสติกเท่ากัน ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากพลาสติก HDPE มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ง่ายกว่าพลาสติก PET ทำให้เส้นพลาสติกชนิด HDPE แทรกอยู่ในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาลักษณะของเส้นพลาสติกพบว่า เส้นพลาสติกตรงจะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่เสริมเส้นพลาสติกซิกแซก ทั้งนี้เพราะแบบซิกแซกทำให้ปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมากกว่าแบบตรง คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่มีลักษณะต่างกัน ปริมาณที่เท่ากัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดลดลงน้อยที่สุดเมื่อคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร และลดลงมากที่สุดเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร โดยคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติก Hs มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด รองลงมาคือ Hz, Ps, และ Pz ตามลำดับ

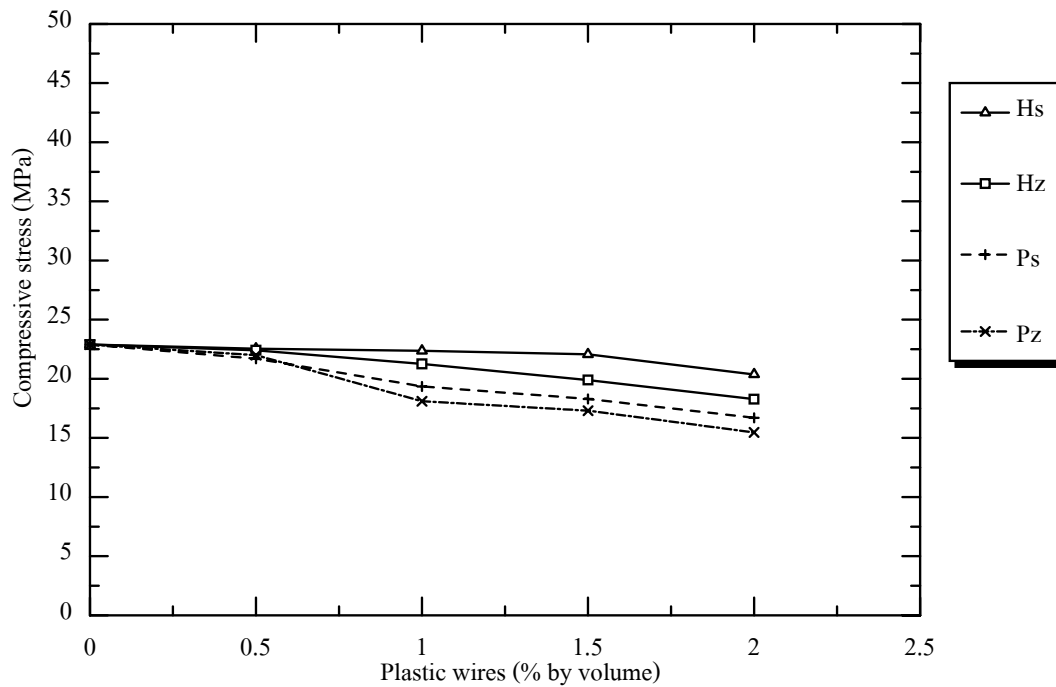


รูปที่ 4.15 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.4)





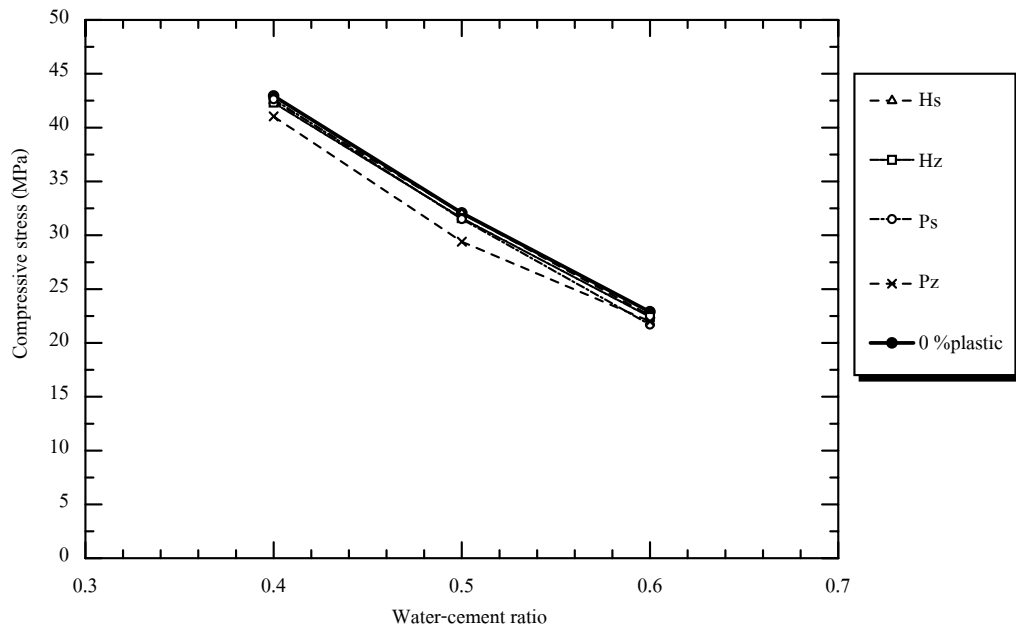
รูปที่ 4.16 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.5)



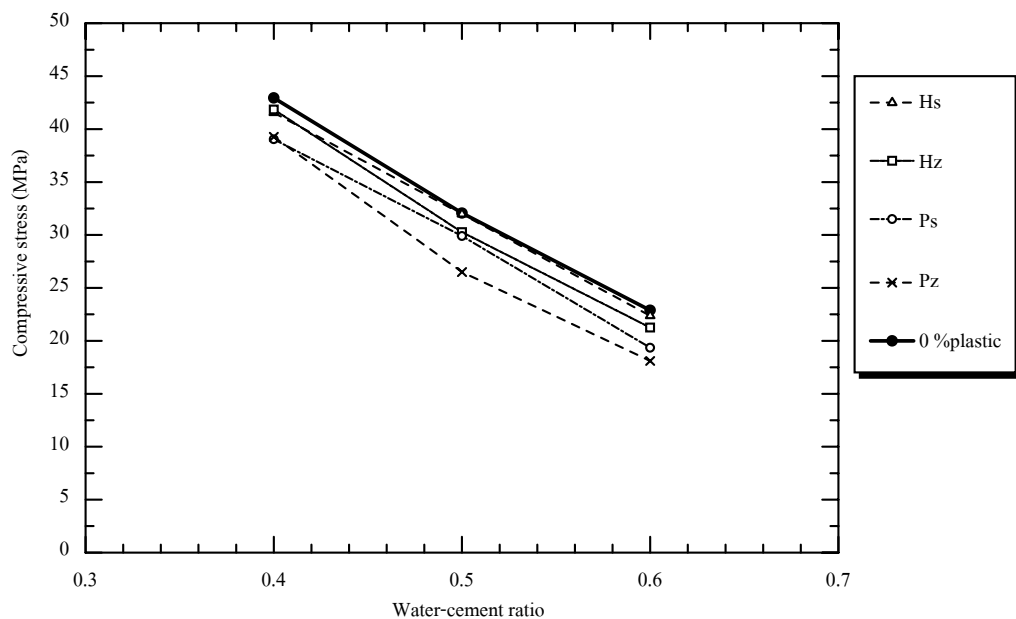
รูปที่ 4.17 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.6)

### 4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด

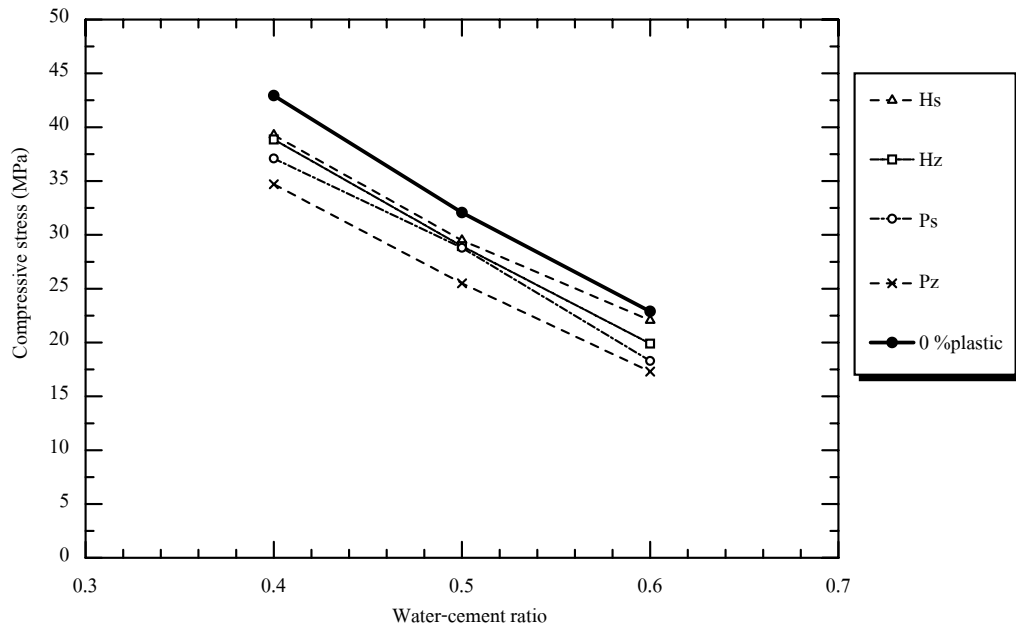
เมื่อพล็อตกำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก ได้กราฟแสดงในรูปดังรูป 4.18 – 4.21



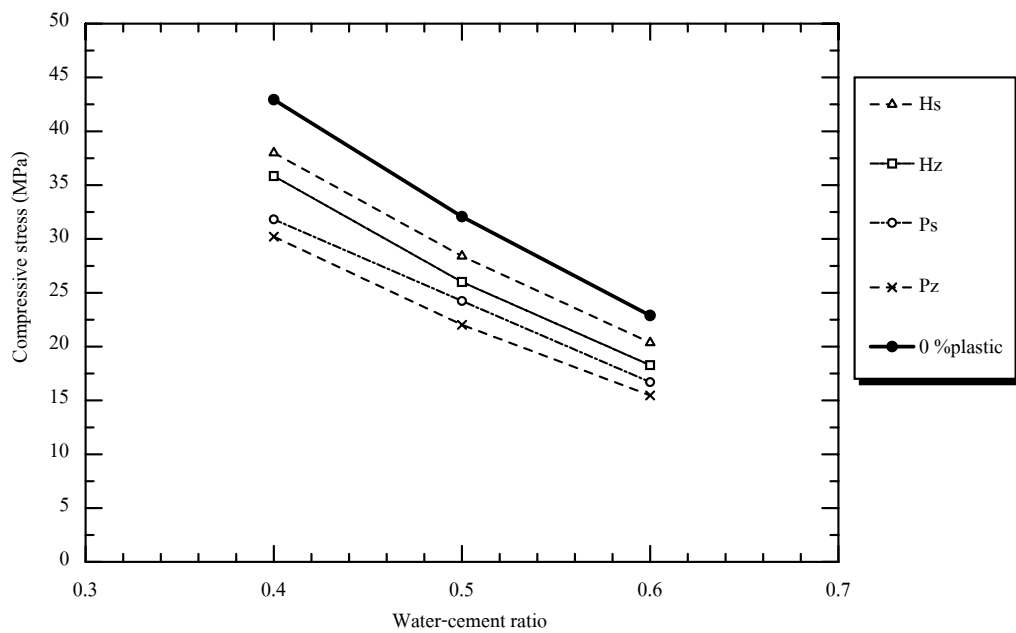
รูปที่ 4.18 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (0.5 % plastic)



รูปที่ 4.19 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.0 % plastic)



รูปที่ 4.20 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.5 % plastic)



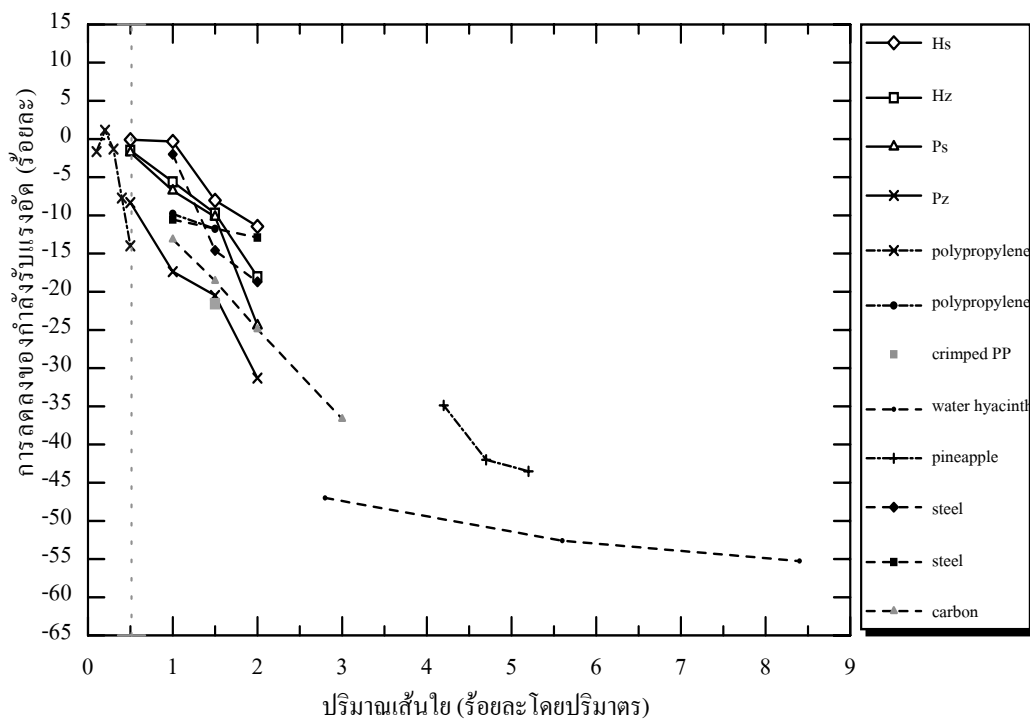
รูปที่ 4.21 กำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (2.0 % plastic)

จากกราฟรูปที่ 4.18-4.21 จะเห็นว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก ที่ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร กำลังรับแรงอัดมีค่าใกล้เคียงกันทุกลักษณะเส้น

พลาสติกและใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก เมื่อคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.0, 1.5, และ 2.0 โดยปริมาตร จะให้กำลังรับแรงอัดแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อเสริมด้วยเส้นพลาสติกลักษณะต่างกัน แต่ยังคงมีกำลังรับแรงอัดลดลงเป็นเส้นตรงทุกลักษณะเส้นพลาสติก ยังพบว่า คอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกที่ทำจากพลาสติกประเภทเดียวกัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกขอบตรงสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกขอบซิกแซก เหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2

#### 4.3.4 ผลเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกกับเส้นใยชนิดต่างๆ

การเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE ในคอนกรีตมีผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดต่างๆ

คอนกรีตเสริมเส้นใยกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ที่เสริมในคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 2 โดยปริมาตร จะเห็นว่า การเสริมเส้นพลาสติก Hs, Hz, และ Ps ให้กำลังรับแรงอัดลดลงน้อยกว่าเส้นใยโพลิโพรพิลีนและเส้นใยคาร์บอน และมีร้อยละการลดลงใกล้เคียงกับเส้นใยเหล็ก ส่วนเส้นใยธรรมชาติจะเสริมในปริมาณมากกว่าร้อยละ 2 ให้กำลังรับแรงอัดลดลงมากกว่า กำลังรับแรงอัดยังขึ้นกับชนิด ขนาด

และรูปร่างของเส้นใย จะพบว่าเส้นพลาสติกซิกแซกกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงมากกว่าเส้นพลาสติกตรง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับผลที่ได้ในคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนแบบลอนที่ทำให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตลดลงมากกว่าน้อยกว่าเส้นใยตรงที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน

#### 4.4 กำลังรับแรงดัด

การวัดการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกใช้แล้วและคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก ซึ่งแสดงในค่าโมดูลัสแตกร้าว โดยเป็นค่าหน่วยแรงดึงที่สูงที่สุด ณ จุดแตกร้าว ตัวอย่างทดสอบเป็นคานขนาด 10×10×30 ซม. อายุบ่ม 28 วัน ให้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงดัด

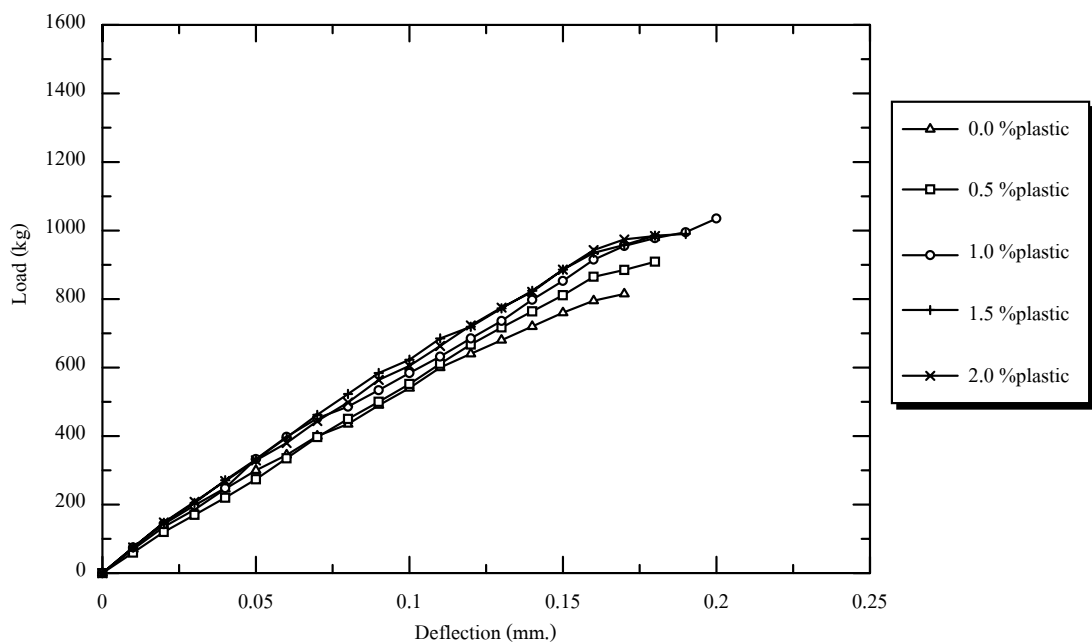
ชื่อ ตัวอย่างทดสอบ	โมดูลัสแตกร้าวเฉลี่ย (MPa)				
	ปริมาณเส้นพลาสติก ( ร้อยละ โดยปริมาตร)				
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
F0.4Hs	2.81	3.20	3.60	3.49	3.42
F0.4Hz	2.81	3.65	4.13	4.02	3.91
F0.4Ps	2.81	4.10	4.65	4.50	4.20
F0.4Pz	2.81	4.85	5.13	4.93	4.64
F0.5Hs	2.67	3.08	3.43	3.19	2.85
F0.5Hz	2.67	3.21	3.65	3.54	3.06
F0.5Ps	2.67	3.75	3.90	3.75	3.45
F0.5Pz	2.67	3.90	4.35	4.05	3.75
F0.6Hs	2.32	2.77	3.15	3.00	2.58
F0.6Hz	2.32	2.94	3.42	3.22	2.82
F0.6Ps	2.32	3.42	3.87	3.60	3.12
F0.6Pz	2.32	3.60	4.07	3.90	3.60

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกกับคอนกรีตธรรมดาพบว่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึง 50 ซึ่งขึ้นกับปริมาณเส้นพลาสติก ชนิดของพลาสติก และลักษณะของขอบเส้นพลาสติกที่ได้แก่ Hs, Hz, Ps, และ Pz กำลังรับดัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET สูงกว่าค่ากำลังดัดของที่เส้นพลาสติกชนิด HDPE เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อ

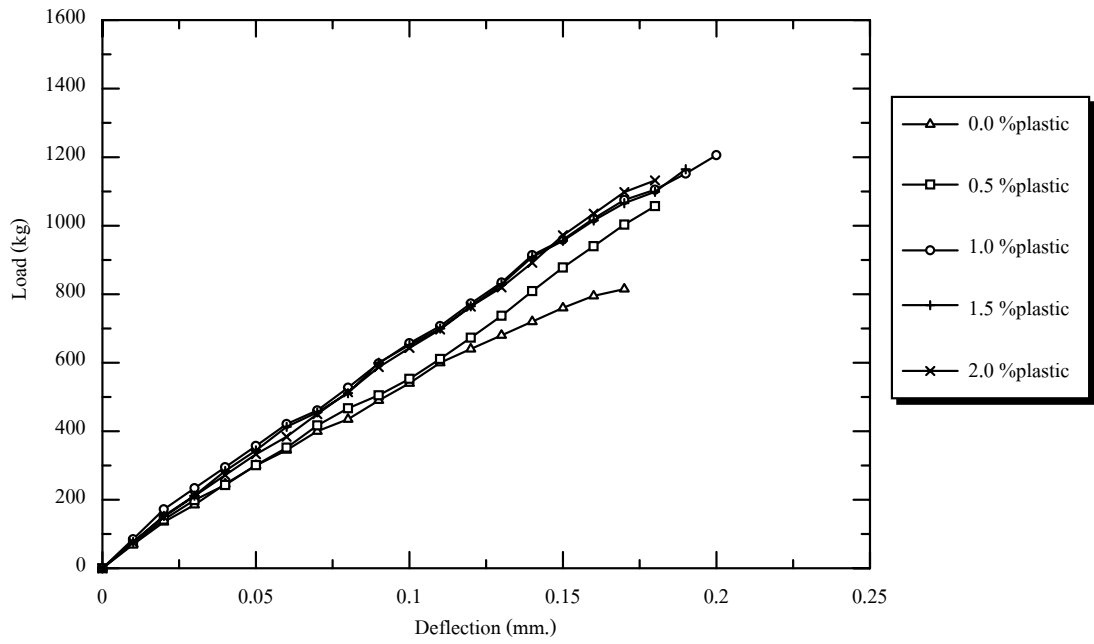
ซีเมนต์และปริมาณพลาสติกเดียวกัน และเมื่อพิจารณาจากลักษณะของเส้นพลาสติกพบว่า กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกซิกแซกสูงกว่าที่เสริมเส้นพลาสติกตรง

#### 4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงดัด

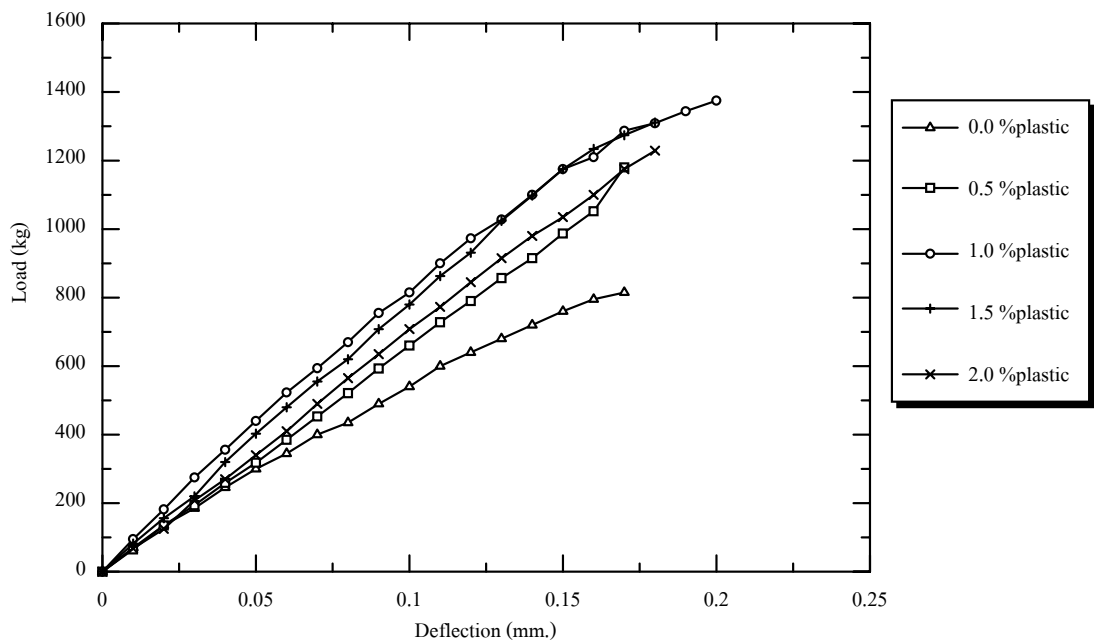
เมื่อพล็อตน้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.23-4.34 เนื่องจากเครื่องทดสอบการรับแรงดัดจะวัดค่าน้ำหนักกดได้ถึงน้ำหนักสูงสุดเท่านั้น แม้ว่าตัวอย่างทดสอบจะยังรับน้ำหนักได้อีกแต่ไม่สามารถวัดค่าได้ จะเห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกจะสามารถรับน้ำหนักกดได้มากกว่าคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก และมีระยะการโก่งตัวเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.0 จะรับน้ำหนักกด และมีระยะการโก่งตัวสูงที่สุด ส่วนคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET รับน้ำหนักกดและมีระยะการโก่งตัวสูงกว่าเส้นพลาสติก HDPE ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกสูงกว่าคอนกรีตไม่เสริมเส้นพลาสติกมากดังในรูปที่ 4.25 เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นกราฟในรูปที่ 4.23 เส้นกราฟสูงกว่าเพียงเล็กน้อย และคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกซิกแซกสามารถรับน้ำหนักกดและมีระยะการโก่งตัวสูงกว่าเส้นพลาสติกตรง



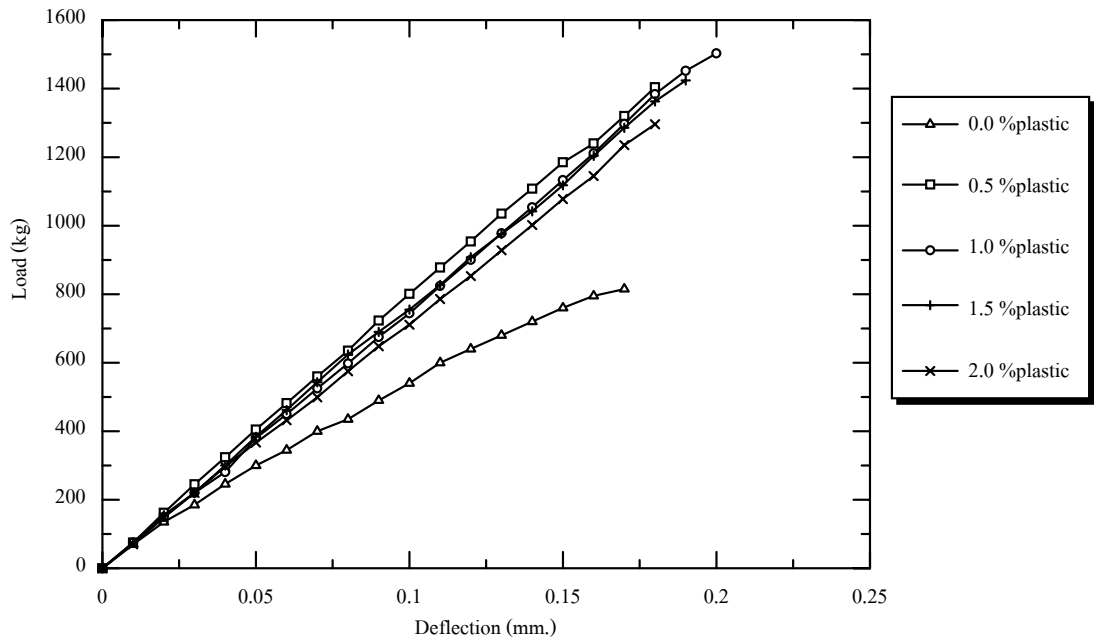
รูปที่ 4.23 น้ำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c=0.4)



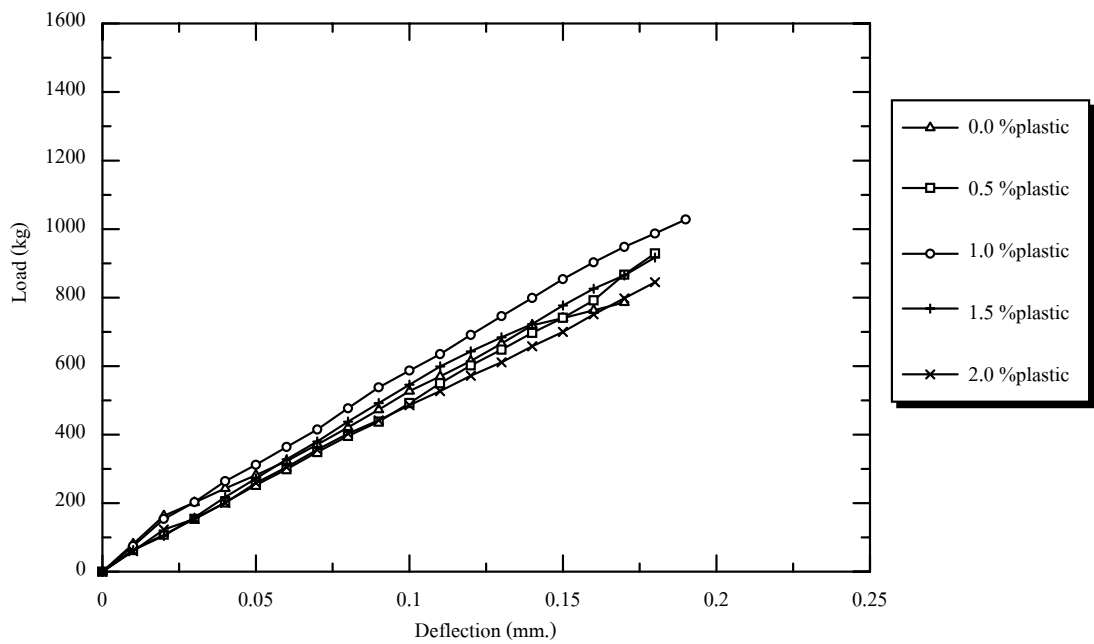
รูปที่ 4.24 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c=0.4)



รูปที่ 4.25 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c=0.4)

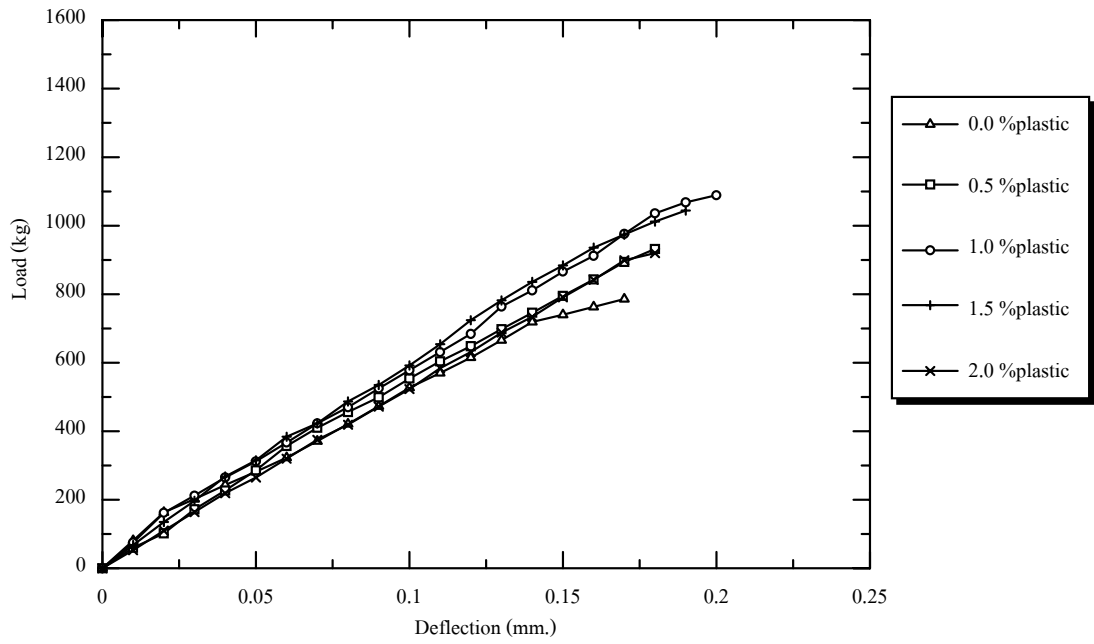


รูปที่ 4.26 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c=0.4)

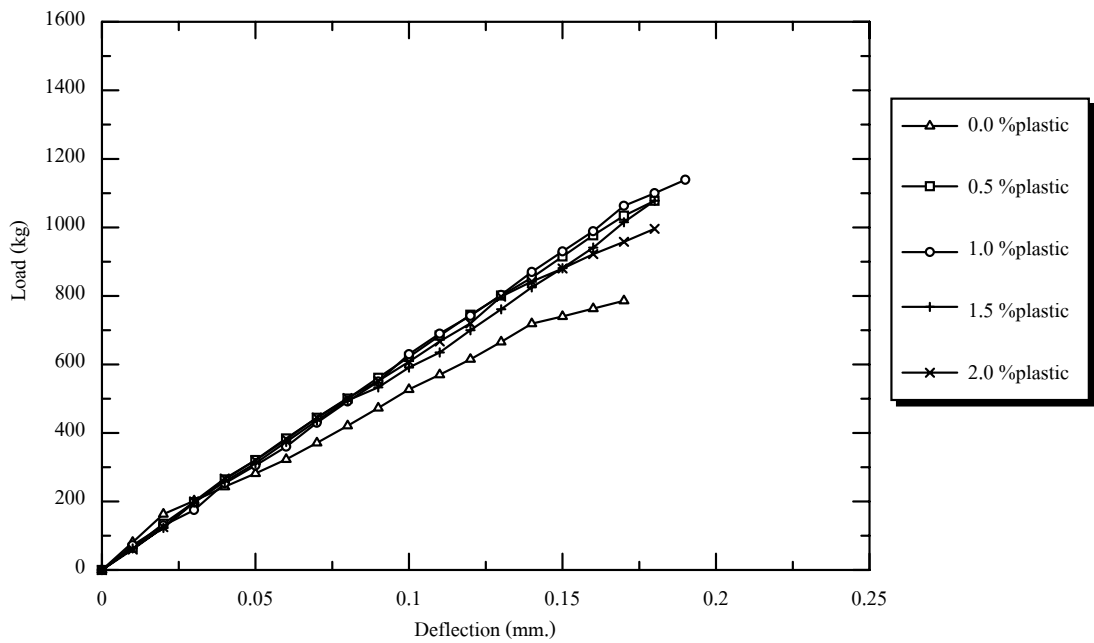


รูปที่ 4.27 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c=0.5)

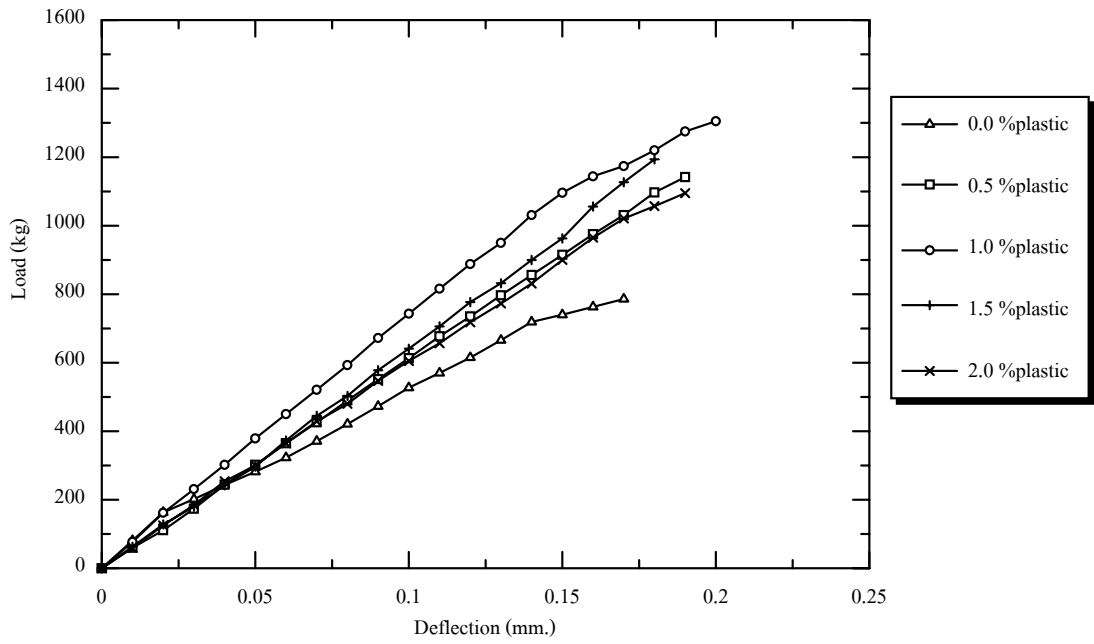




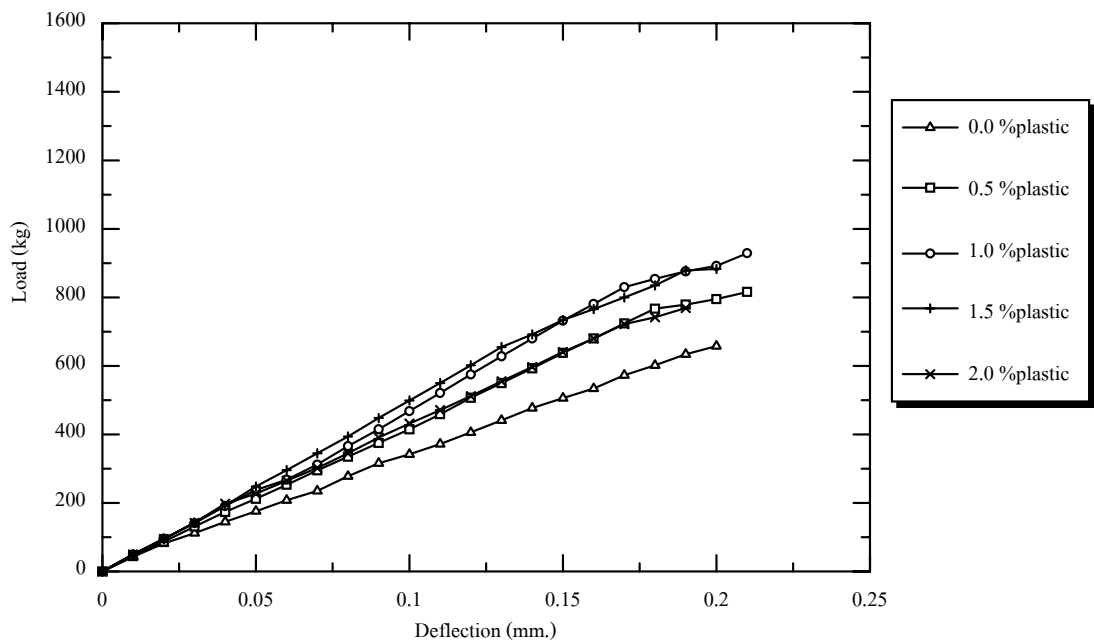
รูปที่ 4.28 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c=0.5)



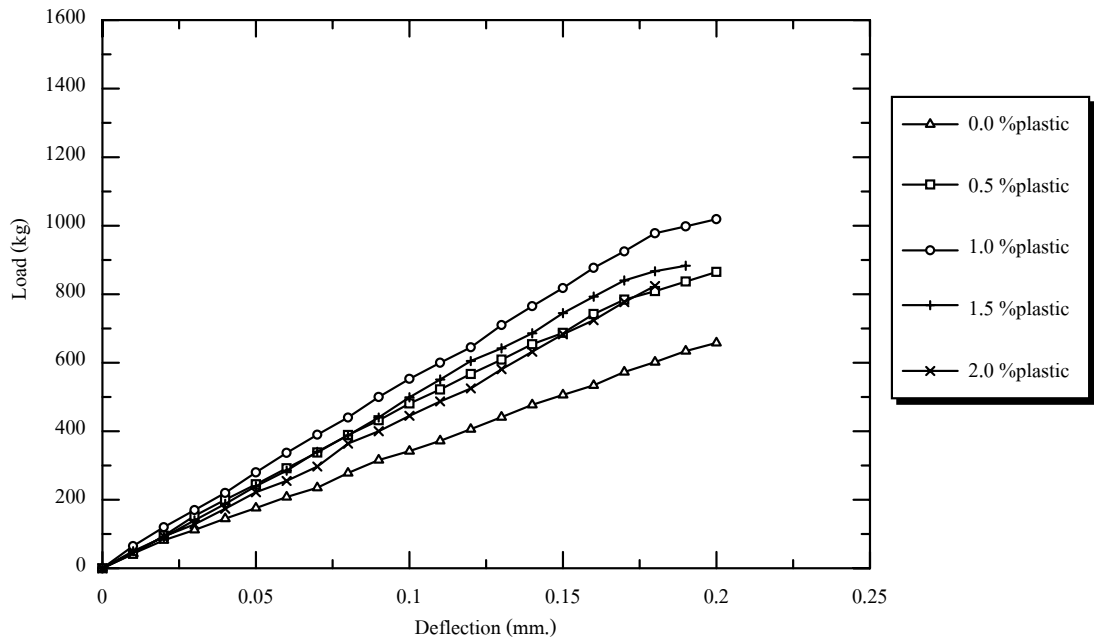
รูปที่ 4.29 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c=0.5)



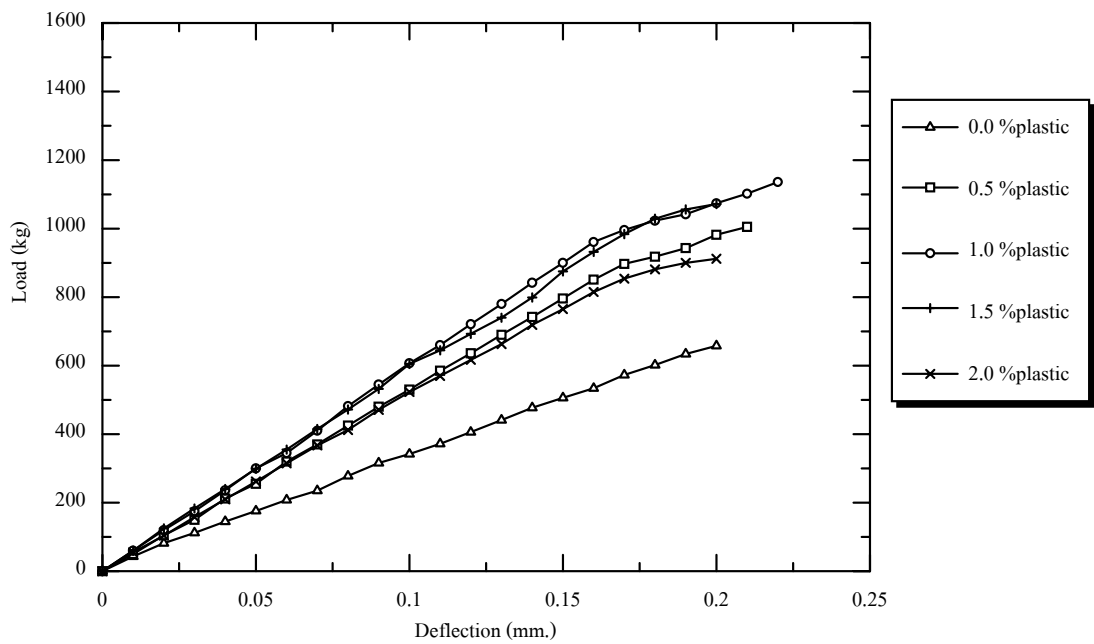
รูปที่ 4.30 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c=0.5)



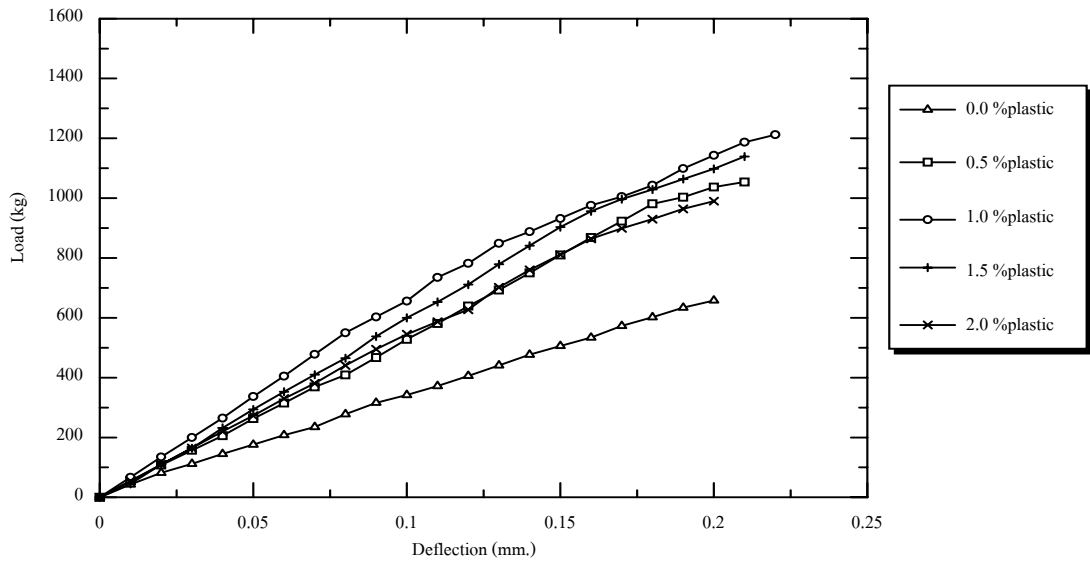
รูปที่ 4.31 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hs (w/c=0.6)



รูปที่ 4.32 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Hz (w/c=0.6)



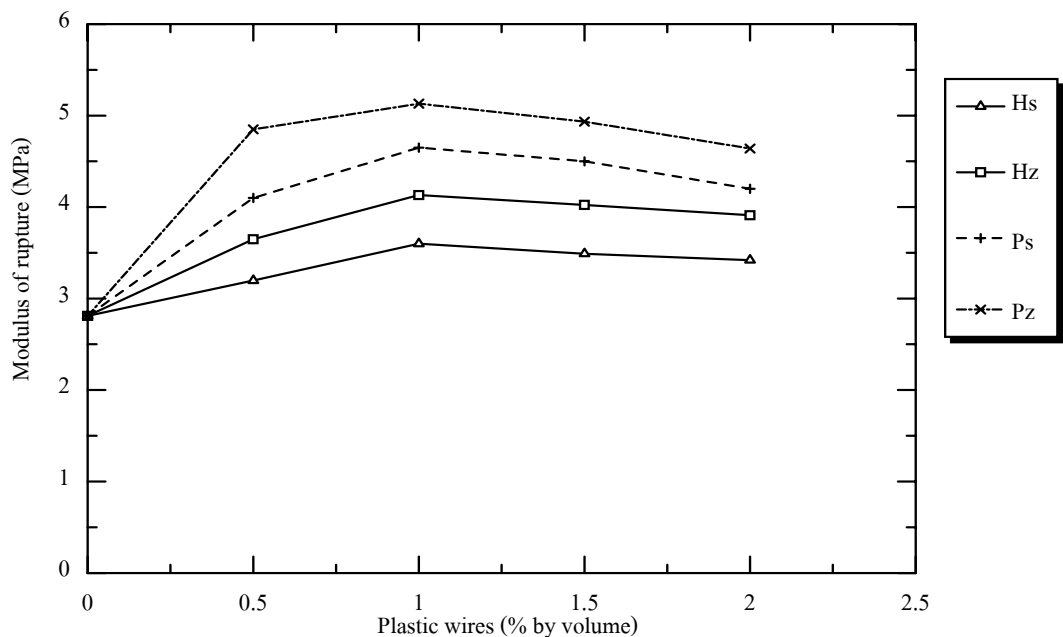
รูปที่ 4.33 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Ps (w/c=0.6)



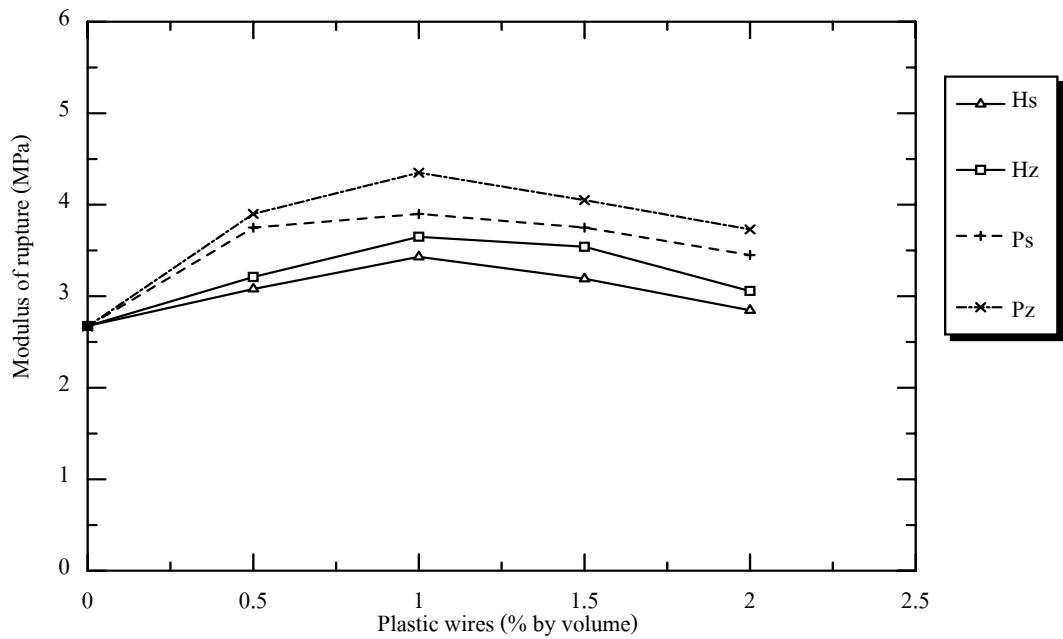
รูปที่ 4.34 นำหนักกดสัมพันธ์กับระยะการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz (w/c=0.6)

#### 4.4.2 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกต่อกำลังรับแรงดัด

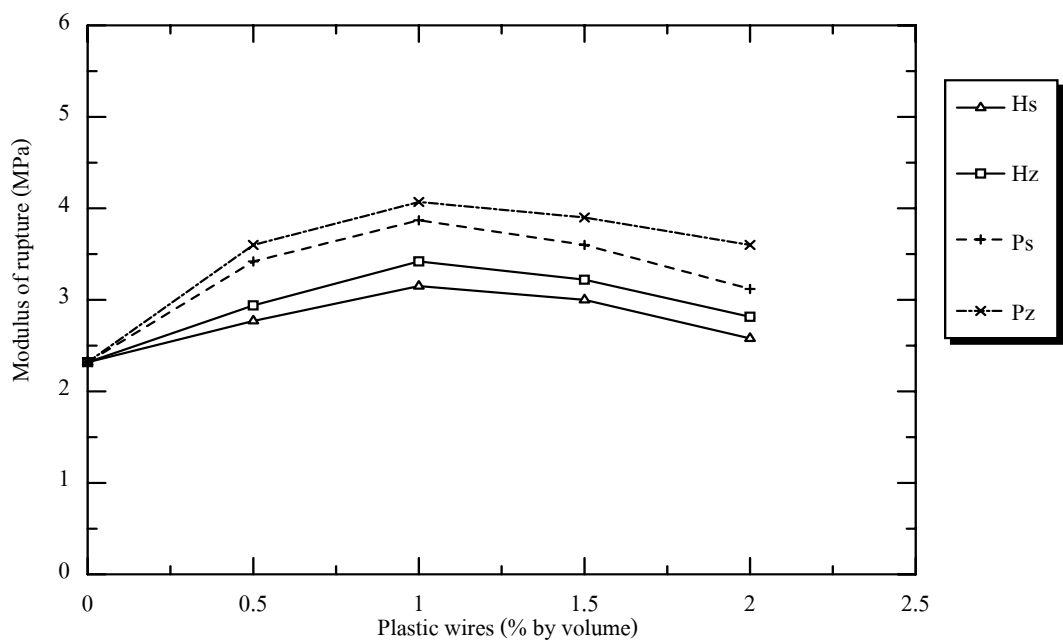
เมื่อพล็อตโมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีตร้อยละ 0.0, 0.5, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตร และมีลักษณะเส้นพลาสติกเป็น Hs, Hz, Ps, และ Pz ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5, และ 0.6 จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.35-4.37



รูปที่ 4.35 โมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.4)



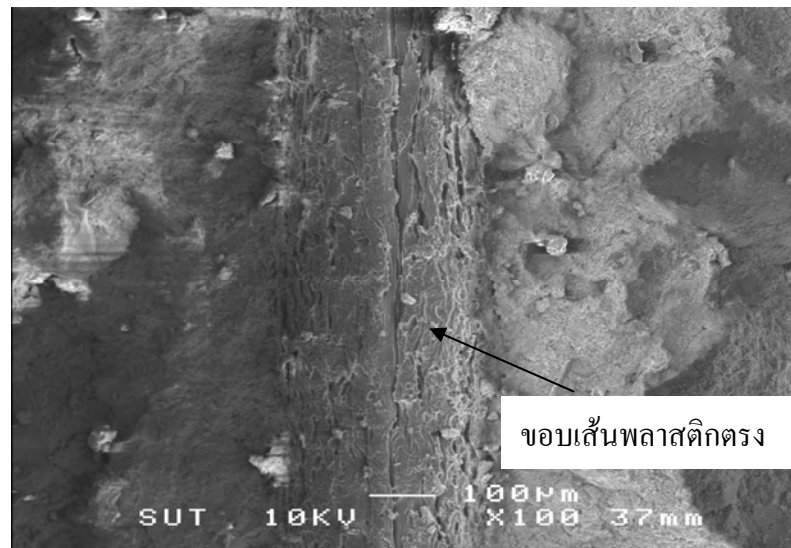
รูปที่ 4.36 โมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.5)



รูปที่ 4.37 โมดูลัสแตกร้าวสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.6)

จากกราฟรูปที่ 4.35-4.37 จะเห็นว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา โดยโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก มีค่าสูงสุดเมื่อคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์เดียวกัน เมื่อพิจารณาคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกตามชนิด และลักษณะของขอบเส้นพลาสติกพบว่า ที่ปริมาณเส้นพลาสติกเท่ากัน ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ เส้นพลาสติก Ps, Hz, และ Hs ตามลำดับ การเสริมเส้นพลาสติกที่ทำจากพลาสติกชนิด PET ให้โมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าการเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE เนื่องจากพลาสติกชนิด PET มีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าพลาสติกชนิด HDPE ส่วนคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ทำจากพลาสติกชนิดเดียวกันในปริมาณเส้นพลาสติกที่เท่ากัน คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกซิกแซกให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกตรง เนื่องจากเส้นพลาสติกขอบซิกแซกจะมีการยึดเกาะในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าเส้นพลาสติกขอบซิกแซก ดังแสดงในรูปที่ 4.38- 4.39



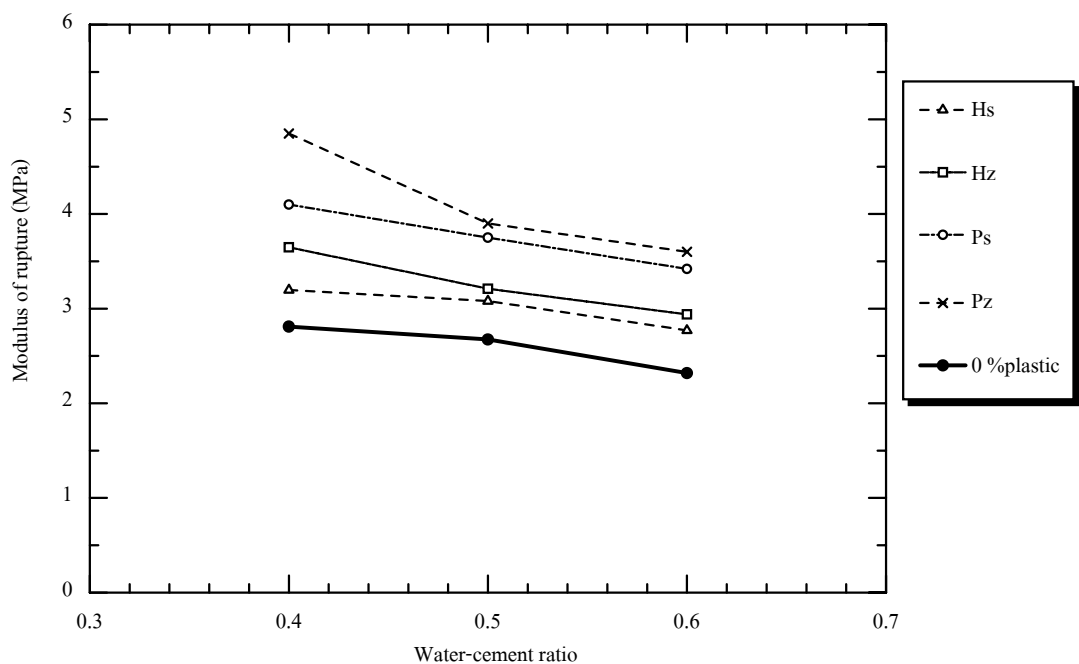
รูปที่ 4.38 ลักษณะเส้นพลาสติกขอบตรงในเนื้อคอนกรีต



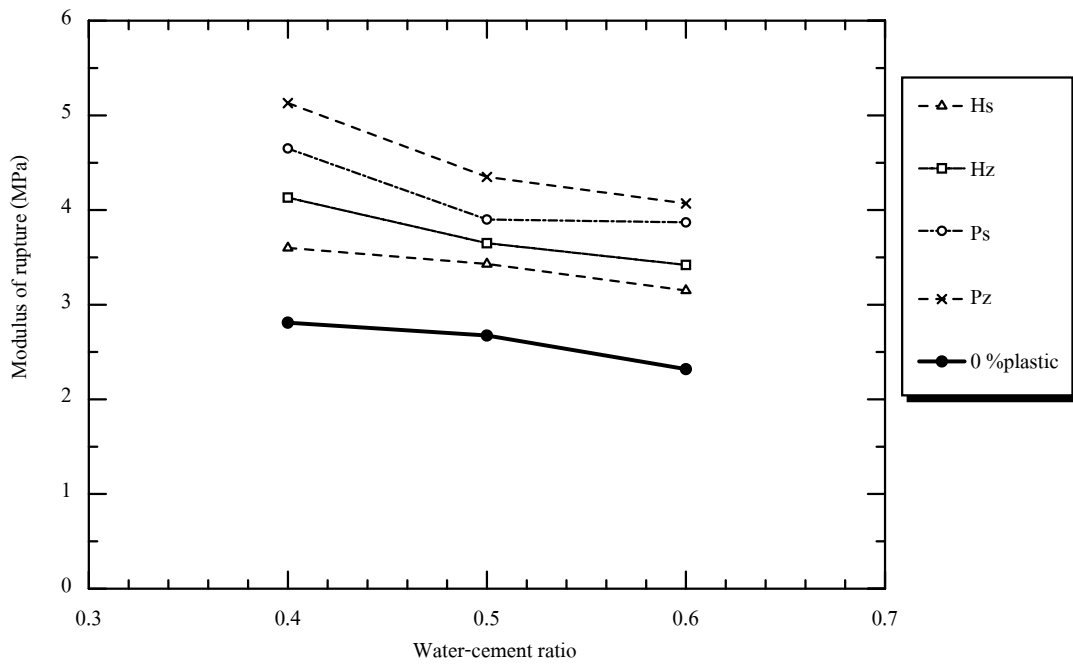
รูปที่ 4.39 ลักษณะเส้นพลาสติกซิกแซกในเนื้อคอนกรีต

#### 4.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงดัด

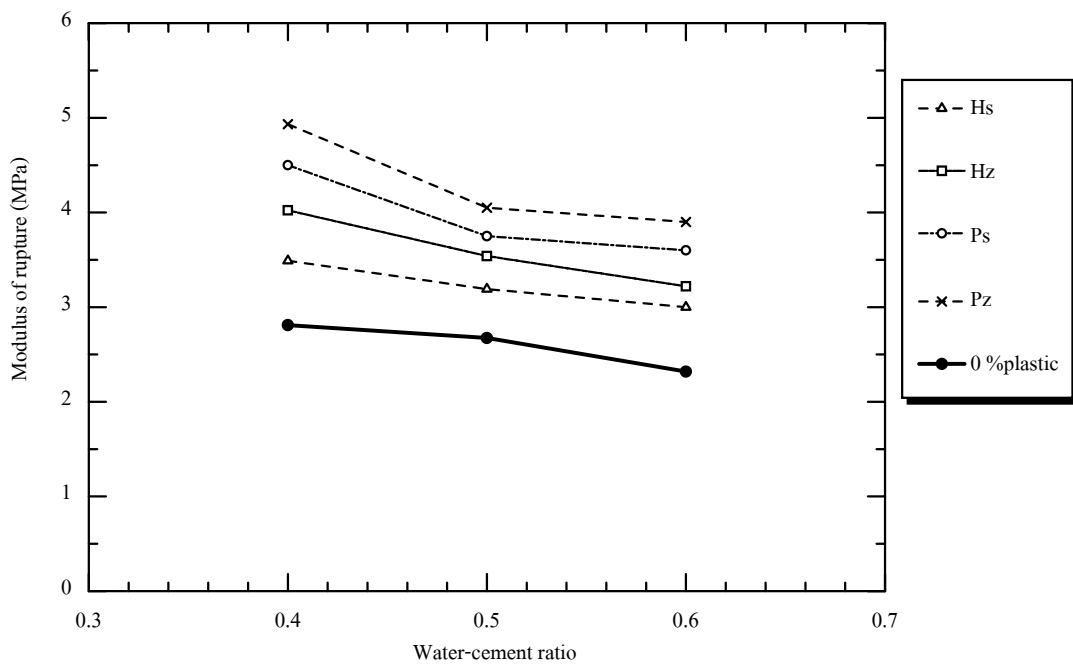
เมื่อพล็อตกำลังรับแรงดัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกลักษณะต่างๆซึ่งได้แก่ Hs, Hz, Ps, และ Pz ที่ปริมาณพลาสติก 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 จะได้กราฟดังในรูปที่ 4.40 – 4.43



รูปที่ 4.40 กำลังรับแรงดัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (0.5% plastic)

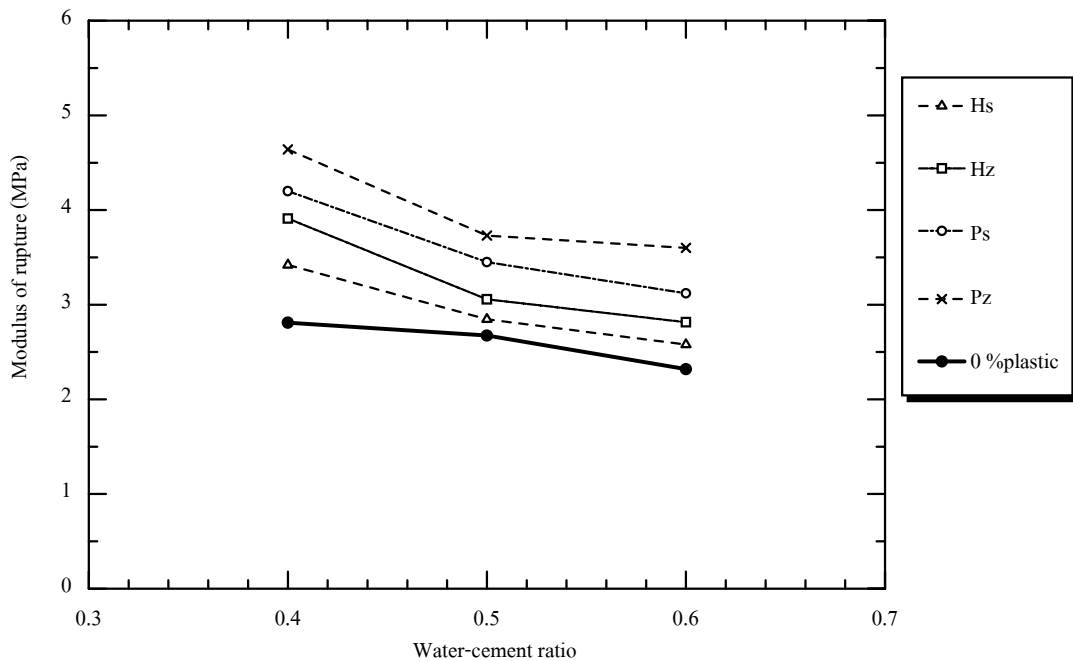


รูปที่ 4.41 กำลังรับแรงดัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.0% plastic)



รูปที่ 4.42 กำลังรับแรงดัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (1.5% plastic)





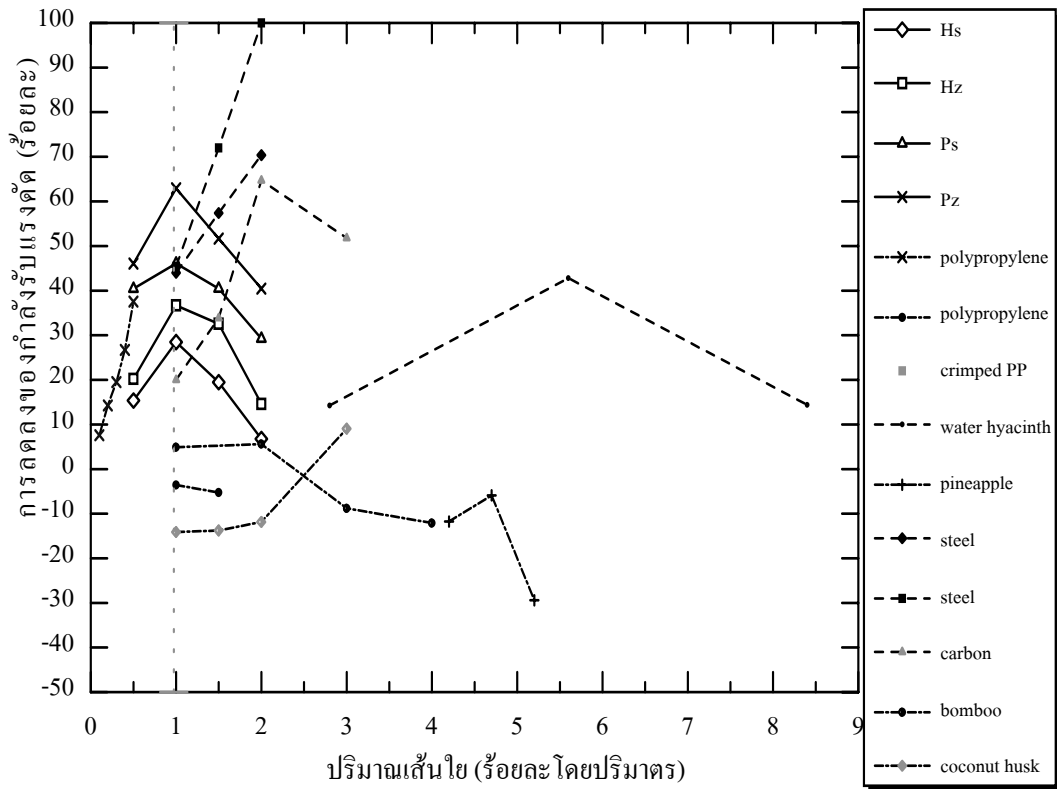
รูปที่ 4.43 กำลังรับแรงดัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (2.0% plastic)

จะเห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา และโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณร้อยละ 0.5 โมดูลัสแตกร้าวลดลงเป็นเส้นตรง แต่การเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.0, 1.5, และ 2.0 โมดูลัสแตกร้าวลดลงเป็นเส้นโค้ง ซึ่งจะชันมากที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.5 แสดงว่าเส้นพลาสติกช่วยให้คอนกรีตรับน้ำหนักกดและมีการโค้งตัวได้ดีขึ้น ซึ่งคอนกรีตในช่วงดังกล่าวจะแข็งและเปราะกว่าคอนกรีตในช่วง 0.5 ถึง 0.6 และคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz มีค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงที่สุด รองลงมาคือ Ps, Hz, และ Hs ตามลำดับ

#### 4.4.4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกกับเส้นใยชนิดต่างๆ

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มคล้ายคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ซึ่งเป็นกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์เหมือนกัน ซึ่งการเสริมเส้นพลาสติกให้กำลังรับแรงดัดสูงสุดที่สัดส่วนเส้นใยร้อยละ 1.0 และการเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.1 มีร้อยละการเพิ่มสูงกว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยคาร์บอน รวมถึงเส้นใยธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 การเสริมเส้นพลาสติก Pz ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้ร้อยละการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดสูงกว่าเส้นใยเหล็ก แต่การเสริมเส้นพลาสติก Hs และ Hz ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้ร้อยละการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าเส้นใยเหล็ก ส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใยคาร์บอนให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่าร้อยละ 1.0 ซึ่งกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริม

เส้นใยนั้นขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ชนิด รูปร่าง ขนาด และปริมาณของเส้นใย จึงมีปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมแตกต่างกัน



รูปที่ 4.44 กำลังรับแรงตัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

#### 4.5 โมดูลัสยืดหยุ่น

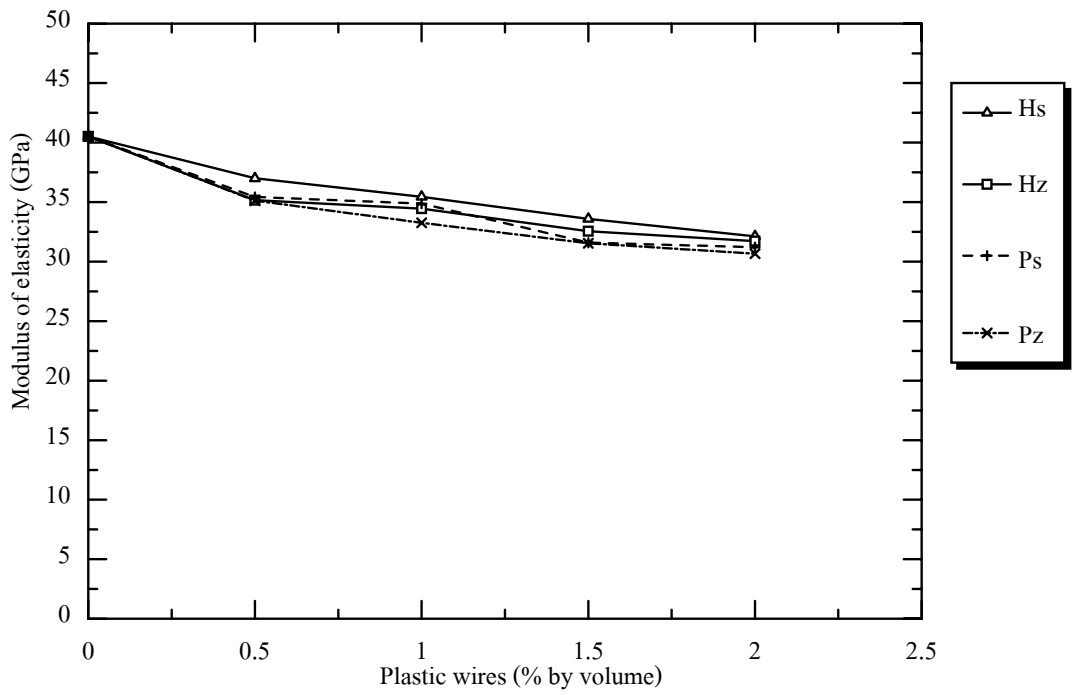
โมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกใช้แล้ว และคอนกรีตธรรมดาแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาประมาณร้อยละ 3 ถึง 24 ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นพลาสติก ชนิดของพลาสติก และลักษณะของขอบเส้นพลาสติก โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงมากที่สุดร้อยละ 8 ถึง 24 ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงร้อยละ 3 ถึง 15

ตารางที่ 4.4 โมดูลัสยืดหยุ่น

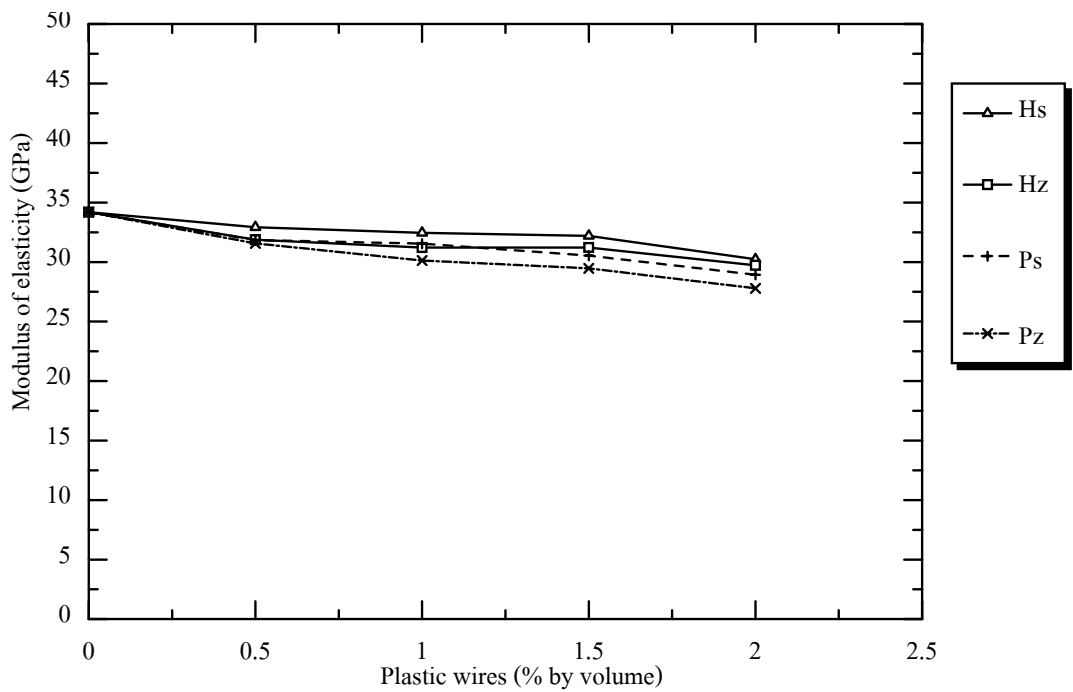
ชื่อ ตัวอย่างทดสอบ	โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย (MPa)				
	ปริมาณเส้นพลาสติก ( ร้อยละ โดยปริมาตร)				
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
C0.4Hs	40.51	37.00	35.45	33.60	32.13
C0.4Hz	40.51	35.16	34.45	32.56	31.72
C0.4Ps	40.51	35.43	34.87	31.59	31.21
C0.4Pz	40.51	35.12	33.26	31.54	30.67
C0.5Hs	34.19	32.93	32.45	32.20	30.23
C0.5Hz	34.19	31.88	31.22	31.22	29.73
C0.5Ps	34.19	31.84	31.55	30.54	28.93
C0.5Pz	34.19	31.56	31.13	29.47	27.79
C0.6Hs	29.74	28.98	28.95	28.39	28.19
C0.6Hz	29.74	28.46	28.63	27.97	27.53
C0.6Ps	29.74	27.95	28.32	26.94	26.84
C0.6Pz	29.74	27.53	26.70	26.36	25.06

#### 4.5.1 อิทธิพลของปริมาณพลาสติกต่อโมดูลัสยืดหยุ่น

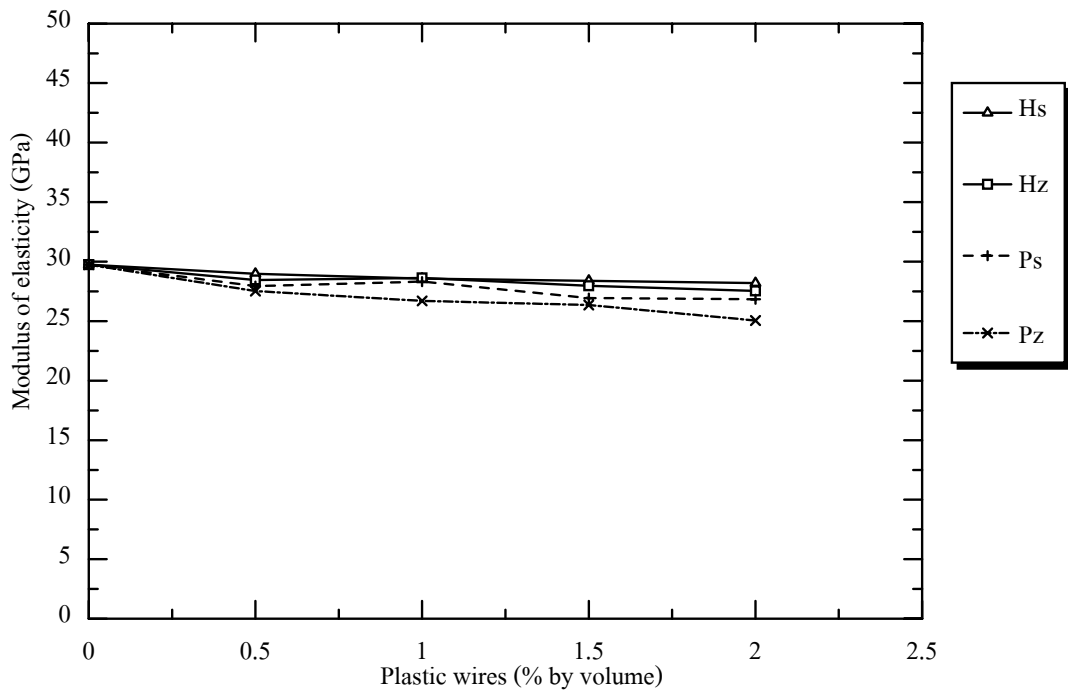
เมื่อพล็อตโมดูลัสยืดหยุ่นสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.45-4.47 โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าต่ำที่สุดเมื่อคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณสูงสุดที่ใช้ในการศึกษาคือ ร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน เมื่อพิจารณาชนิด และลักษณะของเส้นพลาสติกพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกมีค่าน้อยกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จึงทำให้ชนิดพลาสติกและลักษณะของขอบเส้นพลาสติกมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยมาก



รูปที่ 4.45 โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.4)



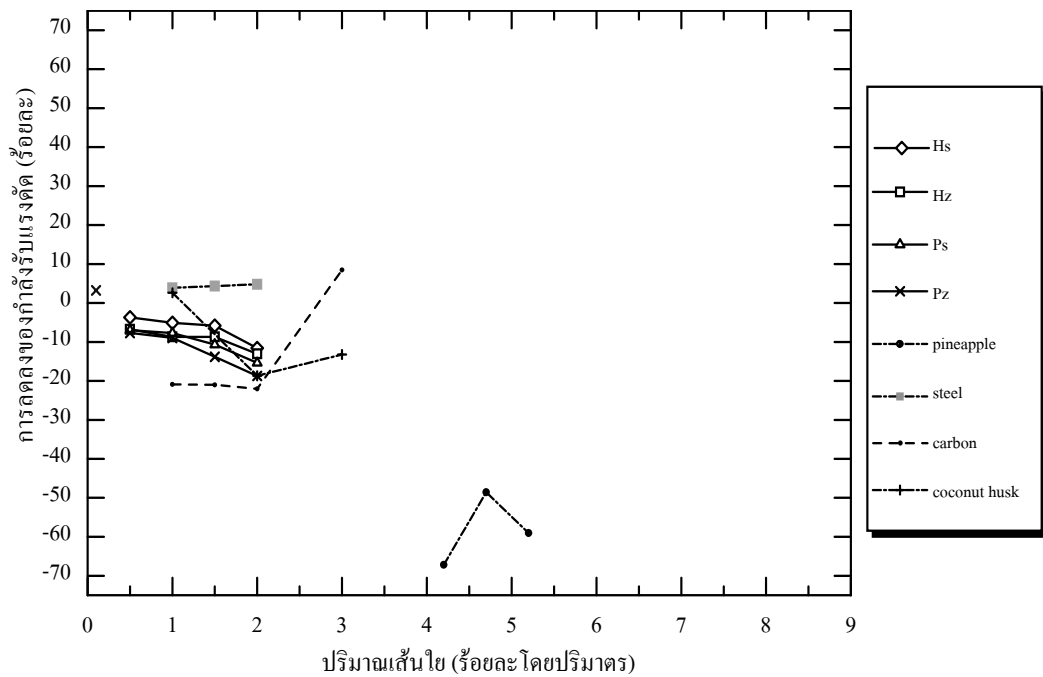
รูปที่ 4.46 โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.5)



รูปที่ 4.47 โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพันธ์กับปริมาณเส้นพลาสติก (w/c = 0.6)

#### 4.5.2 การเปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกกับเส้นใยชนิดต่างๆ

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE มีโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง มีแนวโน้มคล้ายคอนกรีตเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีโมดูลัสลดลงเมื่อเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 ซึ่งเป็นกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์เหมือนกัน รวมถึงการเสริมเส้นใยธรรมชาติในปริมาณดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.48 ส่วนการเสริมเส้นใยธรรมชาติปริมาณมากกว่าร้อยละ 2.0 ให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงมาก คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กให้โมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการเพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก



รูปที่ 4.48 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่าง ๆ

#### 4.6 ลักษณะการวิบัติ

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบการรับแรงอัดพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกและคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกมีการวิบัติแบบเดียวกันคือ วิบัติเนื่องจากแรงอัดและแรงเฉือนร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.48 จะสังเกตเห็นได้ว่า รอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต จะทำมุมประมาณ 50-60 องศาับแนวระดับ สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตวิบัติในลักษณะดังกล่าว อาจเนื่องจาก คอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งแรงเสียดทานระหว่างห้วงคและตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวด้านข้าง ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนไป และลักษณะวิบัตินี้เหมือนกับที่เกิดกับคอนกรีตเสริมเส้นใยจากพรมที่ใช้แล้ว (Wang, 1994)



รูปที่ 4.49 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอก

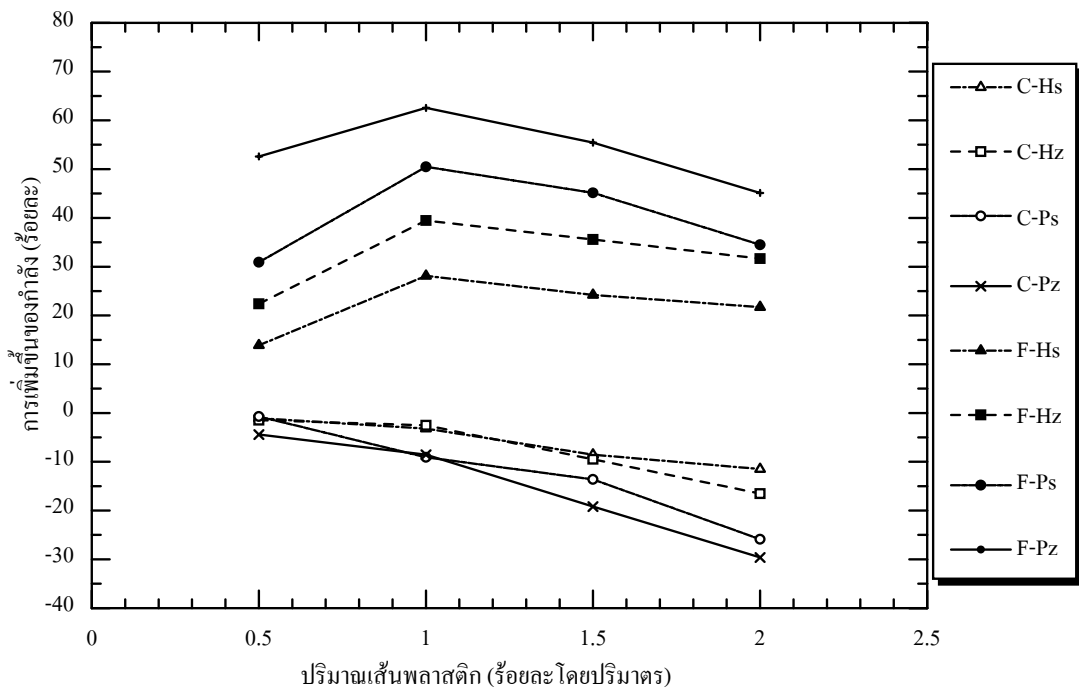
พิจารณาลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดัดพบว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกทุกลักษณะได้แก่ Hs, Hz, Ps และ Pz ที่ปริมาณเส้นพลาสติกร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร มีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก โดยที่ผิวล่างบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบแตกออกเป็นสองส่วนแยกจากกันในแนวตั้งอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับน้ำหนักกดสูงสุด แต่คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตร เมื่อคานตัวอย่างทดสอบได้รับน้ำหนักกดสูงสุด รอยแตกที่เกิดขึ้นไม่ทำให้คานแยกเป็นสองส่วนออกจากกัน โดยมีเส้นพลาสติกเชื่อมรอยแตกไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.49 การวิบัตินี้มีลักษณะเดียวกับคอนกรีตที่เสริมเส้นใยจากพรมที่ใช้แล้ว (Wang, 1994) และเส้นใยเหล็ก (Gupta, 2000)



รูปที่ 4.50 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติก

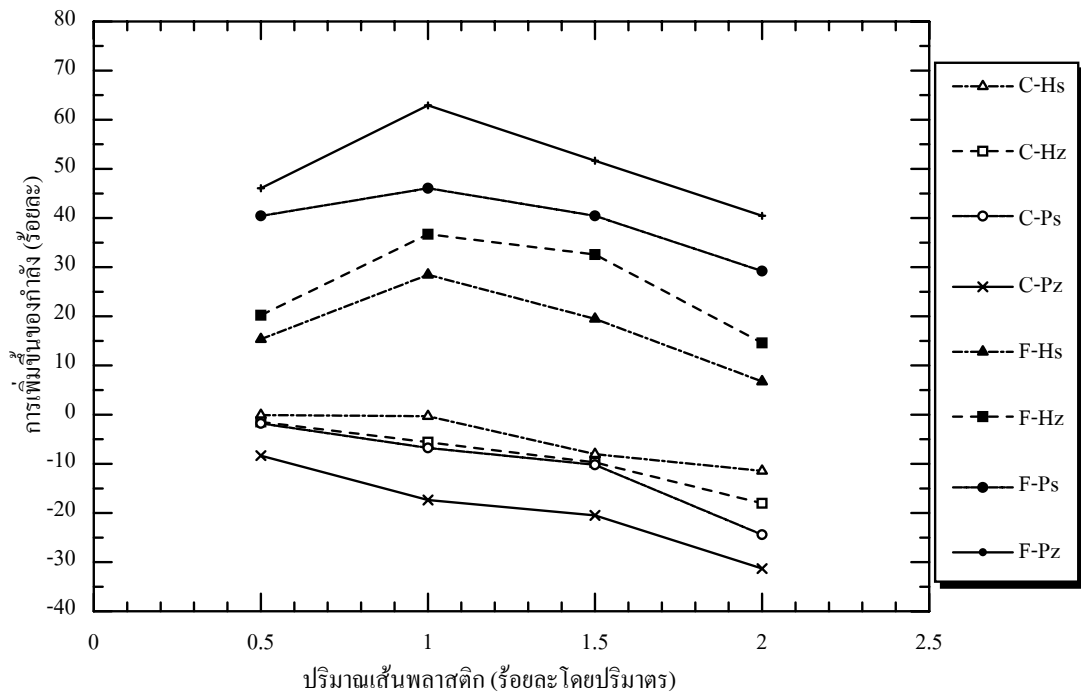
#### 4.7 การเปรียบเทียบการรับแรงอัดและการรับแรงดัด

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นให้กำลังรับแรงอัดลดลง แต่มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นการนำไปใช้งานควรพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดที่ยอมรับได้ให้เหมาะสมกับงาน ซึ่งร้อยละการเพิ่มขึ้นของการรับแรงดัดและร้อยละการลดลงของกำลังรับแรงอัดแสดงในรูปที่ 4.50-4.52

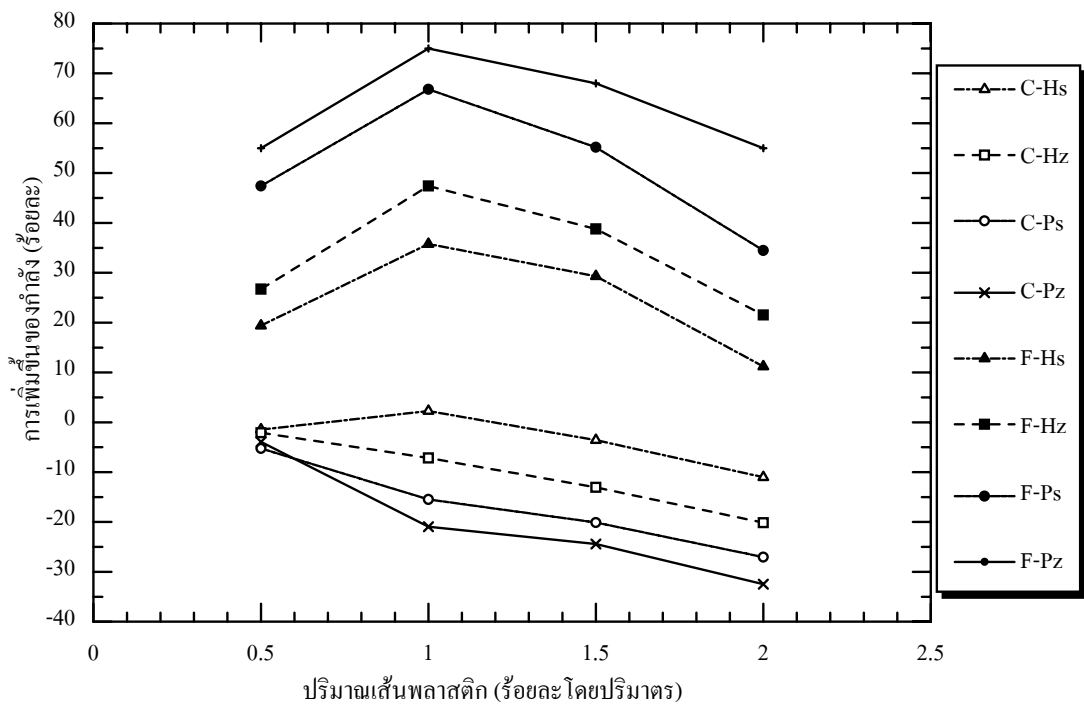


รูปที่ 4.51 การเพิ่มขึ้นของกำลังดัดและการลดลงของกำลังรับแรงอัด ( $w/c = 0.4$ )





รูปที่ 4.52 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและการลดลงของกำลังรับแรงอัด (w/c = 0.5)



รูปที่ 4.53 การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและการลดลงของกำลังรับแรงอัด (w/c = 0.6)

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกใช้แล้วแบบสั้นที่ทำจากขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วสองชนิดได้แก่ PET และ HDPE และเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ทดสอบได้กับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก โดยพิจารณาจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) กำลังรับแรงดัด (flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่น และลักษณะการวิบัติ (mode of failure) ตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 3 ค่าได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6 เส้นพลาสติกแบบสั้นชนิด PET และ HDPE หนา 0.5 และ 0.6 มม. ตามลำดับ โดยเส้นพลาสติกมีขนาดกว้าง 1.5 มม. ยาว 25.4 มม. เส้นพลาสติกมี 2 รูปร่างคือ ตรงและซิกแซก และปริมาณปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีตเป็นร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต จากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 กำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกประมาณร้อยละ 1 ถึง 30 ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และเส้นพลาสติกลักษณะเดียวกัน โดยการเสริมเส้นพลาสติก Hs ให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงที่สุด รองลงมาเป็นเส้นพลาสติก Hz, Ps และเส้นพลาสติก Pz ให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณเส้นพลาสติกเดียวกัน คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกชนิด PET และเส้นพลาสติกซิกแซกให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเส้นพลาสติกตรง

##### 5.1.2 กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึง 50 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก และการเสริมเส้นพลาสติกทุกลักษณะปริมาณร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร จะให้กำลังรับแรงดัดสูงที่สุด ซึ่งเส้นพลาสติกที่ให้กำลังรับแรงดัดดีที่สุดคือเส้นพลาสติก Pz รองลงมาเป็นเส้นพลาสติก Ps, Hz ส่วนเส้นพลาสติก Hs ให้กำลังรับแรงดัดต่ำที่สุดที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณเส้นพลาสติกเดียวกัน คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก

ชนิด PET ให้กำลังรับแรงดัดสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE และรูปร่างของเส้นพลาสติกมีผลต่อกำลังรับแรงดัด โดยเส้นพลาสติกซิกแซกให้กำลังรับแรงดัดสูงกว่าเส้นพลาสติกตรง

### 5.1.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกลดลงประมาณร้อยละ 3 ถึง 24 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก ซึ่งที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 จะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงมากที่สุด ส่วนชนิดและรูปร่างเส้นพลาสติกมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยมาก

### 5.1.4 ลักษณะการวิบัติ

ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นประมาณร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร มีลักษณะการวิบัติเป็นแบบทันทีทันใด โดยจะแยกออกจากกันเป็นสองส่วนเมื่อได้รับน้ำหนักกดสูงสุดเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก และเมื่อเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยปริมาตรเมื่อคอนกรีตวิบัติจะมีเส้นพลาสติกเชื่อมรอยแตกทำให้คอนกรีตไม่แยกออกจากกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการใช้งาน

การใช้เส้นใยประเภทต่างๆเสริมในคอนกรีตไม่ได้เป็นหลักในการเพิ่มกำลังของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเส้นใยในการผสมแบบเดียวกันแต่เส้นใยจะเข้ามาเชื่อมช่องว่างของรอยแตกร้าวจึงมีประสิทธิภาพดีในการควบคุมการแตกร้าวและความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างที่ต้องรับสภาวะการกระแทก หรืองานที่ต้องควบคุมการแตกร้าวเช่น กระเบื้องปูหลังคา อิฐบล็อก พื้นถนน ฐานรองเครื่องจักร และงานวิจัยนี้ยังเป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยต่อไป

## 5.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 5.4.1) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น โดยเส้นพลาสติกทำจากขวดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วจึงมีข้อจำกัดของขนาดเส้นพลาสติก
- 5.4.2) ความยาวของเส้นพลาสติกเพียงค่าเดียว คือ 25.4 มม. ซึ่งอาจจะน้อยเกินไป ทำให้ผลการทดสอบไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร
- 5.4.3) อายุของตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ศึกษาเพียงค่าเดียวคือที่ 28 วัน

#### 5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

- 5.5.1) ควรมีการศึกษาการลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้น
- 5.5.2) ความยาวของเส้นพลาสติกควรศึกษามากกว่า 1 ค่านี้ เพื่อให้การศึกษาที่ได้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น
- 5.5.3) รูปร่างของเส้นพลาสติกที่มีปลายงอหรือโค้ง

## รายการอ้างอิง

- วินิต ช่อวิเชียร (2539). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พยุศักดิ์ ศรีอำไพ. (1999). **คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มอร์ต้าเสริมเส้นใยผักตบชวา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยรังสิต.
- พรชัย ธรรมอักษร. (1994). **อิทธิพลของเส้นใยโพลีโพรพิลีนต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนพัช พรหมมาณพ. (1998). **คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มอร์ต้าเสริมเส้นใยผักตบชวา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ASTM C39-96, **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C469-94, **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C78-94, **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third – Point Loading)**. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Balaguru, P. N., and Shah, S. P. (1992). **Fiber Reinforced Cement Composites**. Singapore: McGraw-Hill.
- Brooks, D. W., and Giles, G. A. (2002). **PET Packaging Technology**. Sheffield: Sheffield Academic Press Ltd.
- Derucher, K. N., Korfiatis, G. P., and Ezeldin, A. S. (1994). **Materials for Civil and Highway Engineers** (3th ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Fukushima, T., Shirayama, K., Hitotsuya, K., and Maruyama, T. (1992). Mechanical characteristics of chopped fiber reinforced composites mainly using carbon fiber. In R.

- N. Swamy (ed.). **Fiber reinforced cement and concrete** (pp. 965-979). London: E & FN Spon.
- Gupta, P., Banthia, N., and Yan, C. (2000). Fiber reinforced wet-mix shotcrete under impact. **Journal of Materials in Civil Engineering**. (2000, February): 81-90.
- Khajuria, A., and Balaguru, P. (1992). Plastic shrinkage characteristics of fiber reinforced cement composites. In R. N. Swamy (ed.). **Fiber reinforced cement and concrete** (pp. 82-90). London: E & FN Spon.
- MacGregor, J. G. (1991). **Reinforced concrete mechanics and design** (2th ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Neville, A. M. (1981). **Properties of Concrete** . Malaysia: Longman.
- Nitima Tantadilok. (2003). **Effect of Steel Fibers and Fly Ash on Concrete Strength**. M.S. thesis, Kasetsart University.
- Raghavan, D., Huynh, H., and Ferraris, C. F. (1998). Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. **Journal of Materials Science**. 33: 1745-1752.
- Ramirez-Coretti, A. (1992). Physical-mechanical properties of fiber cement elements made of rice straw, sugar cane bagasse, banana raquis and coconut husk fibers. In R. N. Swamy (ed.). **Fiber reinforced cement and concrete** (pp. 1203-1216). London: E & FN Spon.
- Selke, S. E. (1997). **Understanding Plastics Packaging Technology**. Munich: Carl Hanser Verlag.
- Sobhan, K., and Mashnad, M. (2002). Tensile strength and toughness of Soilcement-fly-ash composite reinforced with recycled high-density polyethylene strips. **Journal of Materials in Civil Engineering**. (2002, March): 177-184.
- Swamy, R. N. (1988). **Natural Fiber Reinforced Cement and Concrete**. London: Blackie.
- Wang, Y., Wu, H. C., and Li, V. C. (2000). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled plastic fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**. (2000, November): 314-319.
- Wei-Ling Lin. (1992). Toughness behaviour of fiber reinforced concrete. In R. N. Swamy (ed.). **Fiber reinforced cement and concrete** (pp. 299-315). London: E & FN Spon.

ภาคผนวก ก

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

# วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

## ก.1 คอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุผสม (composite material) ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุผสม ได้แก่ ทราย หินหรือกรวด ซึ่งรวมเรียกว่า มวลรวม (aggregates) และน้ำผสมเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ โดยให้ส่วนผสมของคอนกรีตที่เหลวพอเทได้และสะดวกในการใช้งาน (good workability) คอนกรีตที่ดีนั้น ได้จากการที่อนุภาคของมวลรวมทั้งหมด (all-in aggregate) ทั้งอนุภาคเล็กและใหญ่ ทุกๆอนุภาคถูกเคลือบและหุ้มไว้ด้วยซีเมนต์เพสต์ (cement paste) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกัน ทำให้เกิดเป็นคุณสมบัติจับตัวเกาะแน่นกับวัสดุผสมได้ โดยทั่วไปคอนกรีตจะแข็งตัวเมื่ออายุประมาณ 24 ชั่วโมง และเมื่อได้รับการบ่มขึ้นจะสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ ทั้งนี้ความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสมที่ใช้

### ก.1.1 ส่วนผสมสำหรับคอนกรีต

#### ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทราย และน้ำ จะได้เป็นมอร์ต้า (mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อ สำหรับงานก่ออิฐ หรือ ปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น และหากนำไปผสมรวมกับหิน ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต (concrete) ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modifioid Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ซึ่งไม่ควรใช้สำหรับงานโครงสร้างขนาดใหญ่เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้



ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตมวล (mass concrete) เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งอุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มียอดประกอบที่ป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดซ้ำและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

### วัสดุผสม (aggregates)

วัสดุผสมที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ หินย่อย กรวด และทราย ซึ่งต้องแข็งแรง ทนทาน สามารถรับแรงอัดได้ดี ไม่ขยายตัวมาก และไม่มีสารเคมีเจือปน นอกจากนี้วัสดุผสมต้องมีขนาดใหญ่-เล็กกละกันดีเพื่อช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างก้อนน้อย ทำให้ใช้ซีเมนต์เพสต์ที่น้อยลงและราคาของคอนกรีตก็ถูกลง

การแบ่งวัสดุผสมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักจะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

1. วัสดุผสมเบา (lightweight aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300 ถึง 1100 กก./ม<sup>3</sup>
2. วัสดุผสมปกติ (normal weight aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2400 ถึง 3000 กก./ม<sup>3</sup>
3. วัสดุผสมหนัก (heavyweight aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4000 กก./ม<sup>3</sup>

คุณสมบัติของมวลรวม

- กำลัง (strength) มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ
- ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (impact and abrasion resistance) คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีตที่จะต้องถูกกระทำจากการกระแทกหรือขัดสี เช่น งานผิวถนน พื้นโรงงาน จึงควรมีความแข็งแรง เนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่มหรือเป็นรูพรุนหรือแตกกระเอียดได้ง่าย
- ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (chemical stability) มวลรวมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือกับสิ่งแวดล้อมภายนอก มวลรวมบางประเภทจะทำปฏิกิริยากับด่าง (alkalis) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นและขยายตัวก่อให้เกิดรอยร้าว
- รูปร่างและลักษณะผิว (particle shape and surface texture) รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดมากกว่าคุณสมบัติของ

คอนกรีตแข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบหรือมีรูปร่างแบนและยาวจะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเท่าได้ (workability) เดียวกัน ส่วนลักษณะผิวของมวลรวมจะมีผลโดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยว เมื่อมีผิวหยาบด้านหรือมีรูพรุนมาก จะทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวดี แต่ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากขึ้น

- ส่วนคละ (gradation) ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเท่าได้และปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต การทำคอนกรีตที่ดีแต่ละก้อนของมวลรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีส่วนที่เหมาะสมเมื่อนำมาผสมรวมกัน

### **น้ำ (water)**

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาดมีความขุ่นได้ไม่เกิน 2,000 ppm. (ส่วนในล้าน) ปราศจากกรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริม โดยปกติน้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ ถือว่ามีคุณภาพดีพอสำหรับงานคอนกรีต นอกจากนั้นหน้าที่หลักของน้ำในการใช้ผสมคอนกรีต คือ

- ทำหน้าที่เข้าผสมกับปูนซีเมนต์และทำปฏิกิริยาทางเคมีแล้วเกิดความร้อน ที่เรียกว่า heat of hydration ทำให้ผงซีเมนต์นั้นกลายเป็นปูน และเป็นซีเมนต์เหนียว ซึ่งเป็นตัวประสานผิวระหว่างเม็ดของวัสดุผสม เกาะยึดกันแน่นเมื่อแข็งตัว
- ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าเกาะโดยรอบและแข็งตัวยึดติดกันแน่น
- ทำหน้าที่หล่อลื่นให้วัสดุทั้ง 3 อย่างนี้ เกิดความเหลว สามารถเทและเขย่าเข้าแบบหล่อให้เป็นรูปต่างๆได้

### **สารผสมเพิ่ม (admixtures)**

ในการทำงานบางครั้งอาจต้องใช้สารผสมเพิ่มในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติอื่นที่ต้องการ เช่น ให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น หรือก่อตัวช้าลง ประเภทของสารผสมเพิ่มที่นิยมใช้ประกอบด้วย

- สารเพิ่มฟองอากาศ (air-entraining admixture) ตามมาตรฐาน ASTM C 260 ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำ ช่วยเพิ่มปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต
- สารเคมีผสมเพิ่ม (chemical admixture) ตามมาตรฐาน ASTM C 494 ซึ่งเป็นสารประกอบเคมีที่ละลายน้ำ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตสด เช่น สารลดปริมาณน้ำ สารหน่วงหรือเร่งการก่อตัว เป็นต้น

- สารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (mineral admixture) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งเป็นวัสดุผงละเอียด เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยการช่วยปรับส่วนขนาดของวัสดุผสมให้ดีขึ้น และยังช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้บางส่วน ได้แก่ เช่น เถ้าลอย วัสดุปอชโซลานและซิลิกาฟูม
- สารผสมเพิ่มอื่นๆ (miscellaneous admixtures) เป็นสารผสมเพิ่มที่ยังไม่จัดอยู่ในมาตรฐานของ ASTM ได้แก่ สารเพิ่มการยึดเหนี่ยว (bonding agent) สารลดการกัดกร่อน (corrosion agent) เป็นต้น

### ก.1.2 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีต (curing) เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ระบายออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้ว เร็วเกินไป เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและทนทานตามต้องการ ซึ่งระยะเวลาการบ่มคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ส่วนผสมของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ อุณหภูมิและความชื้นขณะทำการบ่ม ตลอดจนระยะเวลาในการบ่มให้นับจากวันที่หล่อคอนกรีตเสร็จแล้ว 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดธรรมดา ควรได้รับการบ่มขึ้นติดต่อกันอย่างน้อย 7-14 วัน ปูนซีเมนต์ชนิดให้ความแข็งแรงสูงต้องการเวลาน้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่ง และปูนซีเมนต์ชนิดแข็งตัวช้าต้องการเวลามากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดธรรมดา ดังตารางที่ ข.1 ซึ่งกำหนดเวลาอย่างน้อยที่สุดที่คอนกรีตควรได้รับการบ่ม ก่อนถอดแบบหล่อคอนกรีต

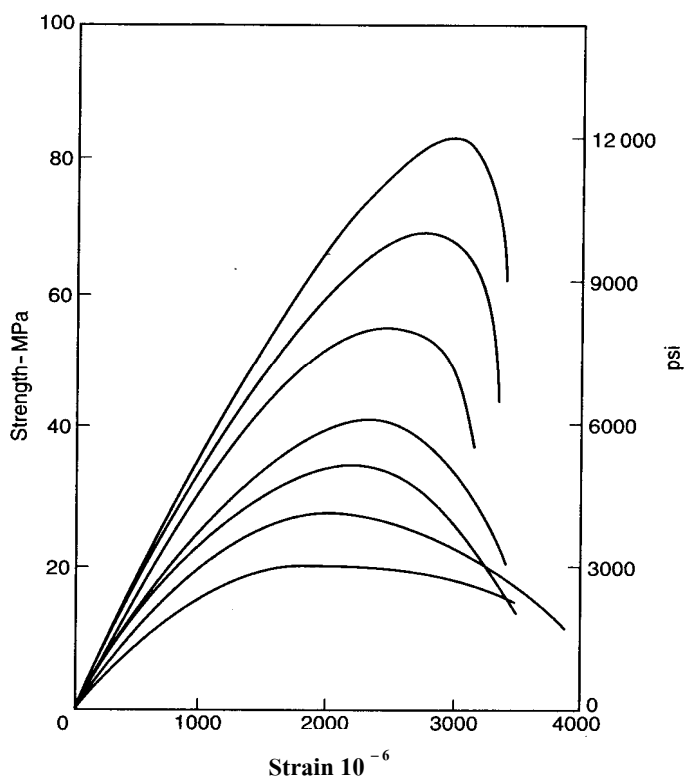
ตารางที่ ก.1 ระยะเวลาบ่มคอนกรีต

ประเภทของงานคอนกรีต	ระยะเวลาบ่มคอนกรีตของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, วัน
เสา คาน และกำแพง	7
พื้น พื้นถนนในบ้าน	8
ถนนชั้นหนึ่ง หรือลานบิน	14
โครงสร้าง โค้งหรือพิเศษอื่นๆ	14

### ก.2 การแตกร้าวของคอนกรีต

จากคุณสมบัติของส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุเปราะ จะมีการขยายตัวของ การแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับรอยแตกร้าวที่กว้างที่สุด และเมื่อได้รับแรงกดอัด จะมีการขยายตัวขนานกับทิศทางของหน่วยแรงกดอัด (compressive stress) เมื่อพิจารณากราฟ

ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตเป็นแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear) ดังรูปที่ ก.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (stress-strain curve) ของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดที่อายุ 28 วัน สามารถอธิบายได้จากการแตกร้าวขนาดเล็กมากๆ (microcrack) ที่เกิดภายในซึ่งมีความยาว 3.175 ถึง 12.700 มม. (0.125 ถึง 0.500 นิ้ว) ซึ่งเกิดบริเวณรอยเชื่อมระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ที่เรียกว่าการแตกร้าวของการยึดเหนี่ยว (bond crack) ส่วนบริเวณรอยเชื่อมระหว่างมอร์ต้าร์กับมวลรวมเรียกว่าการแตกร้าวของมอร์ต้าร์ (mortar crack)



รูปที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดที่อายุ 28 วัน (Neville, 1981)

การเกิดการแตกร้าวขนาดเล็กมากๆ (microcrack) และการวิบัติของคอนกรีตที่ได้รับแรงกดอัดในแนวแกนอย่างต่อเนื่องแบ่งออกเป็น 4 ช่วงได้แก่

ช่วงที่ 1 การหดตัว (shrinkage) ของซีเมนต์เพสต์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันและการแข็งตัวของคอนกรีต ในช่วงก่อนที่คอนกรีตจะได้รับแรงกระทำ การแตกร้าวขนาดเล็กมากๆที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อคอนกรีตน้อย เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 30%ของกำลังรับแรงกดอัด

ช่วงที่ 2 เมื่อหน่วยแรงมากกว่า 30 ถึง 40 %ของกำลังรับแรงกดอัด ที่ผิวของมวลรวมจะมีแรงกดอัดมากกว่าแรงดึงและแรงเฉือนที่บริเวณรอยเชื่อมของซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นเรียกการแตกร้าวของการยึดหน่วง (bond crack) และเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีแรงกระทำมากขึ้น

ช่วงที่ 3 เมื่อมีแรงกระทำมีค่าประมาณ 50 ถึง 60%ของกำลังรับแรงกดอัด การแตกร้าวของมอร์ต้า (mortar crack) จะเกิดขึ้นและมีทิศทางเดียวกับแรงกดอัด เนื่องจากรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงดึงตามขวางเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้น เรียกว่า discontinuity limit

ช่วงที่ 4 ที่ 75 ถึง 80%ของกำลังรับแรงกดอัด จำนวนของการแตกร้าวของมอร์ต้า (mortar crack) เพิ่มขึ้นและรูปแบบของการแตกร้าวขนาดเล็กมากๆ (microcrack) เริ่มเป็นรูปแบบเดิม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเป็นแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear) มากขึ้น ช่วงนี้เรียกว่าหน่วยแรงวิกฤต (critical stress)

### ก.3 พลาสติก

พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่ส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สาร (inorganic) ที่มีไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) เป็นองค์ประกอบ โมเลกุลเป็นลูกโซ่ยาวหรือเป็นร่างแห โดยโครงสร้างแล้วส่วนใหญ่ไม่มีรูปผลึก ความแข็งแรงและความอ่อนเหนียวของพลาสติกอาจแตกต่างกันได้มาก โดยปกติพลาสติกมีความหนาแน่นต่ำ มีอัตราการเปลี่ยนรูปร่างสูง (strain rate) ไวต่ออุณหภูมิและปฏิกิริยาเคมีจากสิ่งแวดล้อม

พลาสติกแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) และเทอร์โมเซตติง (thermosetting) ซึ่งเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น เป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวและเหนียว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง เช่น PET HDPE โพลีโพรพิลีน และไนลอน ส่วนเทอร์โมเซตติงจะเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยปฏิกิริยาเคมีโดยไม่สามารถใช้ความร้อนในการเปลี่ยนรูปร่างจึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้ เทอร์โมเซตติงมีความแข็งแรงและประะกว่าเทอร์โมพลาสติก เช่น อีพ็อกซี และผลิตภัณฑ์จำพวกเมลามีน

โดยส่วนใหญ่กำลังของพลาสติกจะหมายถึงกำลังรับแรงดึง ซึ่งพลาสติกบางชนิดมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงถึง 100 MPa (K. N. Derucher, 1994) เช่น โพลีโพรพิลีนมีกำลังรับแรงดึงประมาณ 31 ถึง 41 MPa PET มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 48 ถึง 72 MPa HDPE มีกำลังรับแรงดึงประมาณ 17 ถึง 44.8 MPa ไนลอนมีกำลังรับแรงดึงประมาณ 76 ถึง 95 MPa เป็นต้น

นอกจากกำลังรับแรงดึงแล้วยังมีคุณสมบัติของพลาสติกอื่นๆ ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น จุดหลอมเหลว ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด และลักษณะทางกายภาพอื่นๆ

ภาคผนวก ข

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

## การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

### ข.1 การเตรียมเส้นพลาสติก

เส้นพลาสติกได้จากพลาสติกชนิด HDPE และ PET จากขวดน้ำดื่มดังแสดงในรูปที่ ข.1 และตัดให้มีขนาดกว้าง 1.5 มม. ยาว 25.4 มม. โดยเส้นพลาสติกมีสองรูปร่างคือ ตรงและซิกแซก การตัดเส้นพลาสติกตรงใช้เครื่องตัดกระดาษดังรูปที่ ข.2 ส่วนการตัดเส้นพลาสติกซิกแซกใช้เครื่องไฮดรอลิกปั๊ม ดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.1 ขวดน้ำดื่มที่ทำจากพลาสติกชนิด HDPE และ PET



รูปที่ ข.2 เครื่องตัดเส้นพลาสติกตรง





รูปที่ ข.3 เครื่องตัดเส้นพลาสติกชักแซก

## ข.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด ตัวอย่างทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกขนาด  $\phi 15 \times 30$  ซม. โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C39

### ข.2.1 วัตถุประสงค์

- 1.) หากำลังรับแรงกดอัดของแท่งตัวอย่างทดสอบ
- 2.) หาแรงกดอัดสูงสุด
- 3.) หากการตอบสนองต่อแรงกระทำในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (stress-strain curve)
- 4.) หาโมดูลัสยืดหยุ่น
- 5.) หากลักษณะการวิบัติ (mode of failure) ของแท่งทดสอบเมื่อได้รับน้ำหนักกด

### ข.2.2 เครื่องมือ

- 1.) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)
- 2.) เครื่องผสมปูน
- 3.) แบบหล่อแท่งรูปทรงกระบอก ขนาด  $\phi 15 \times 30$  ซม.
- 4.) a table vibrator
- 5.) แท่นเคลือบปลายคอนกรีต

- 6.) เตาหลอมกำมะถัน
- 7.) ที่ตักกำมะถัน
- 8.) เครื่องเหล็ก
- 9.) เวอร์เนีย



รูปที่ ข.4 แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก



รูปที่ ข.5 เครื่องเขย่าคอนกรีต

### ข.2.3 วิธีการหล่อตัวอย่างทดสอบ

- 1.) ประกอบแบบหล่อให้เรียบร้อย ถ้ามีเศษปูน คราบสนิม ไขมัน ให้กำจัดออกให้หมด แล้วทาผิวด้วยจาระบีกราไฟต์ (เบอร์ 2) หรือทาน้ำมันที่ไม่ทำให้แบบหล่อหรือคอนกรีตเสียหาย เพื่อป้องกันคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วติดกับแบบหล่อ
- 2.) การผสมคอนกรีต จากการกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กำหนดหาส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวม (หินและทราย) และน้ำ รวมทั้งปริมาณเส้นใยที่ใช้ ในแต่ละปริมาณที่ใช้อจะหาปริมาณออกมาเป็นน้ำหนักเพื่อง่ายต่อการหาส่วนผสม โดยน้ำหนักของเส้นพลาสติกเท่ากับความหนาแน่นคูณกับปริมาตรของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งความหนาแน่นของ PET และ HDPE เป็น 0.95 และ 1.3 g/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ ใช้การผสมด้วยเครื่องผสม ก่อนทำการผสมควรมีการเตรียมเครื่องโดยการใช้ส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้แต่ใช้เพียงครั้งเดียวผสมในเครื่องผสมแล้วเททิ้ง เพื่อให้เครื่องผสมมีซีเมนต์มอร์ต้าเคลือบผิวในพร้อมที่จะผสม เริ่มผสมโดยการใส่มวลรวมลงไปก่อนแล้วตามด้วยน้ำประมาณ 2 ใน 3 ส่วนของน้ำที่ต้องการใช้เดินเครื่องผสม 1 นาที หลังจากนั้นใส่ปูนซีเมนต์และน้ำที่เหลือแล้วเดินเครื่องผสมต่อ 3 นาทีและพัก 3 นาที จึงใส่เส้นพลาสติกที่ใช้แล้วเดินเครื่องผสมอีก 3 ถึง 5 นาที หลังจากนั้นเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสมลงในภาชนะที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่มีรอยร้าว ภาชนะควรใหญ่พอที่จะใช้พลั่วตักพลิกคอนกรีตไปมาได้เพื่อป้องกันการแยกตัว
- 3.) เติมคอนกรีตลงแบบหล่อเป็นจำนวน 3 ชั้นเท่าๆกัน ใช้ a table vibrator เขย่าแต่ละชั้น เมื่อชั้นบนสุดเสร็จแล้วใช้เกรียงเหล็กขนาดส่วนที่เกินออก แสดงดังรูปที่ ข.5
- 4.) ทิ้งไว้ให้แข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง ทำการเอาแบบหล่อออกแล้วนำไปบ่มโดยการหุ้มด้วยพลาสติกตามระยะเวลาที่กำหนด แสดงดังรูปที่ ข.7

### ข.2.4 การเคลือบปลายแท่งทดสอบ

- 1.) หลอมกัมมะถันโดยใช้อุณหภูมิที่ผู้ผลิตแนะนำ ไม่ใช่อุณหภูมิสูงเกินไปและหลอมช้ากันหลายหน เพราะจะทำให้สารเคลือบเหนียวแทนที่จะเปราะ
- 2.) ใช้เปล่งลวดทำความสะอาดแท่งทดสอบ และเช็ดให้แห้ง
- 3.) ทำความสะอาดแท่งเคลือบปลาย พร้อมทั้งประกอบลงบนโครงด้วยยึดให้เรียบร้อยโดยไม่เอียง แล้วทาน้ำมันลงบนแท่งเคลือบปลายให้ทั่วโดยทาเพียงบางๆ

- 4.) เทศสารเคลือบปริมาณที่พอเหมาะ ประมาณครึ่งหนึ่งของความลึกของแท่นเคลือบปลาย แล้วรีบกดตัวอย่างทดสอบลงบนสารเคลือบ พยายามรักษาแนวตั้งไว้ การรูดตัวอย่างลงบนแกนเหล็กฉากและการกดแท่งตัวอย่างทดสอบควรใช้เวลาให้น้อยที่สุด เพราะต้องการทำให้เสร็จก่อนที่สารเคลือบจะแข็งตัว ผิวเคลือบต้องไม่เสียรูปและแตกร้าว
- 5.) เมื่อสารเคลือบแข็งตัวแล้ว ให้ยกแท่นเคลือบปลายออกโดยการเคาะรอบนอกของแท่นเคลือบ ถ้าปลายแท่งตัวอย่างทดสอบมีรูหรือหลุมลึกกว่า 6 มม.ขึ้นไป ให้เทศสารเคลือบลงในหลุมแล้วทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงก่อนนำแท่งตัวอย่างทดสอบไปเคลือบปลาย

### ข.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดเป็นรูปคานขนาด 10×10×50 ซม. โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C78

#### ข.3.1 วัตถุประสงค์

- 1.) หากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต โดยน้ำหนักกดเป็นจุด
- 2.) หากการตอบสนองของแรงกระทำในรูปของการโก่งตัวกับน้ำหนักกด
- 3.) หาโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture)

#### ข.3.2 เครื่องมือ

- 1.) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)
- 2.) อุปกรณ์ประกอบเครื่องทดสอบหากำลังรับแรงดัด มีหัวกด (loading head) และฐานรองคานตัวอย่างทดสอบ (support block)
- 3.) เครื่องผสมปูน
- 4.) แบบหล่อแท่งคานทดสอบ ขนาด 10×10×50 ซม.
- 5.) a table vibrator
- 6.) เกรียงเหล็ก



รูปที่ ข.6 แบบหล่อตัวอย่างคาน

### ข.3.3 วิธีการหล่อตัวอย่างทดสอบ

- 1.) ขนาดของคานตัวอย่างทดสอบมีความยาวมากกว่า 3 เท่าของความลึกและไม่  
น้อยกว่า 350 ซม. ความกว้างอย่างน้อยเป็นสามเท่าของความยาวเส้นพลาสติก  
และมีความลึกอย่างน้อยเป็นสามเท่าของความยาวเส้นพลาสติก
- 2.) การผสมคอนกรีต จากการกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คำนวณหา  
ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวม (หินและทราย) และน้ำ รวมทั้งปริมาณเส้น  
พลาสติกที่ใช้ ในแต่ละปริมาณที่ใช้จะหาปริมาณออกมาเป็นน้ำหนักเพื่อจ่ายต่อ  
การหาส่วนผสม โดยน้ำหนักของเส้นพลาสติกเท่ากับคานหนาแน่นคูณกับ  
ปริมาตรของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งความหนาแน่นของ PET และ HDPE เป็น  
0.95 และ 1.3 g/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ ใช้การผสมด้วยเครื่องผสม ก่อนทำการผสมควร  
มีการเตรียมเครื่องโดยใช้ส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้แต่ใช้เพียงครึ่ง  
เดียวผสมในเครื่องผสมแล้วเททิ้ง เพื่อให้เครื่องผสมมีซีเมนต์มอร์ต้าเคลือบผิว  
ในพร้อมที่จะผสม เริ่มผสมโดยการใส่มวลรวมลงไปก่อนแล้วตามด้วยน้ำ  
ประมาณ 2 ใน 3 ส่วนของน้ำที่ต้องการใช้เดินเครื่องผสม 1 นาที หลังจากนั้นใส่  
ปูนซีเมนต์และน้ำที่เหลือแล้วเดินเครื่องผสมต่อ 3 นาทีและพัก 3 นาที จึงใส่  
เส้นพลาสติกที่ใช้แล้วเดินเครื่องผสมอีก 3 ถึง 5 นาที หลังจากนั้นเทคอนกรีต  
ออกจากเครื่องผสมลงในภาชนะที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่มีรอยร้าว ภาชนะควรใหญ่  
พอที่จะใช้พลั่วตักพลิกคอนกรีตไปมาได้เพื่อกันการแยกตัว
- 3.) นำส่วนผสมคอนกรีตเทลงในแบบหล่อเป็น 2 ชั้นเท่าๆกัน เขย่าแบบหล่อคาน  
ตัวอย่างทดสอบในแต่ละชั้นด้วย a table vibrator แล้วปรับผิวหน้าของ

ส่วนผสมให้เรียบสม่ำเสมอตลอดความยาวของกานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดง  
ในรูปที่ ข.5

- 4.) ทิ้งไว้ให้แข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง ทำการเอาแบบหล่อออกแล้วนำไปบ่มโดย  
การหุ้มด้วยพลาสติกตามอายุที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ ข.7



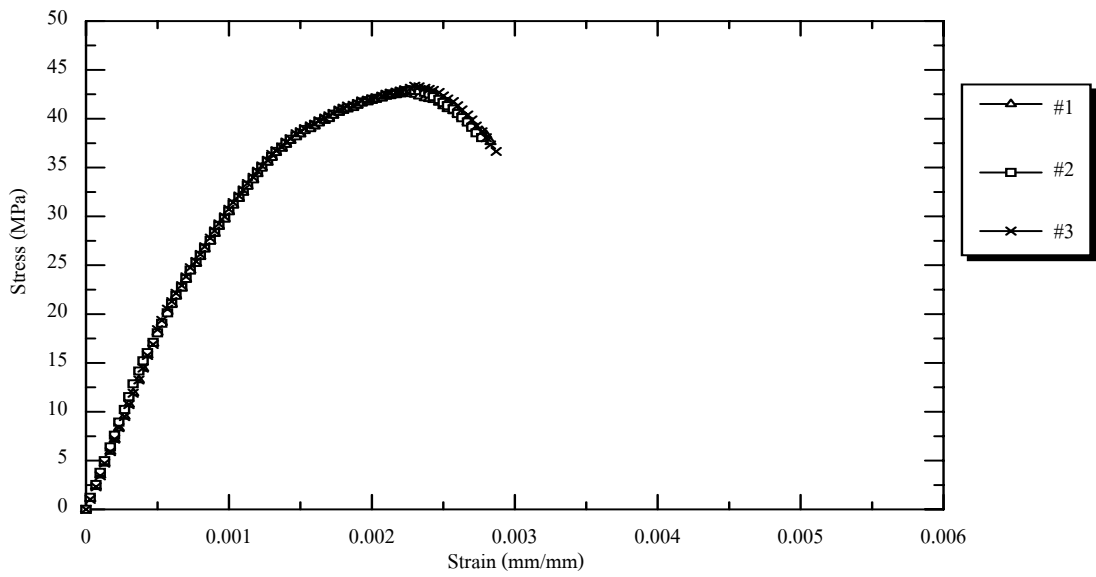
รูปที่ ข.7 การบ่มตัวอย่าง

**ภาคผนวก ค**

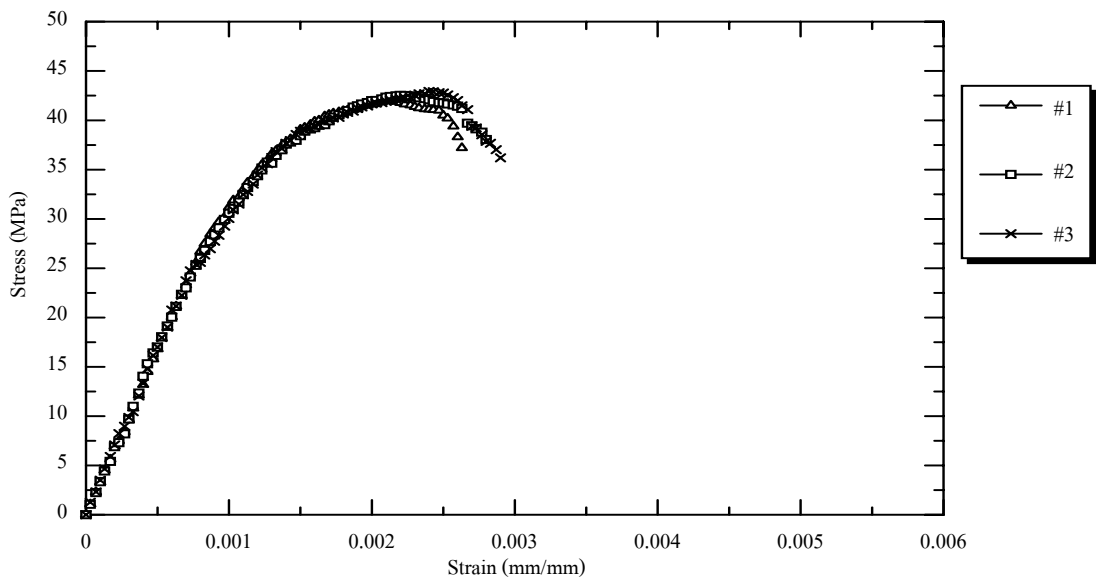
**ผลการทดสอบ**

## ผลการทดสอบ

### ค.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

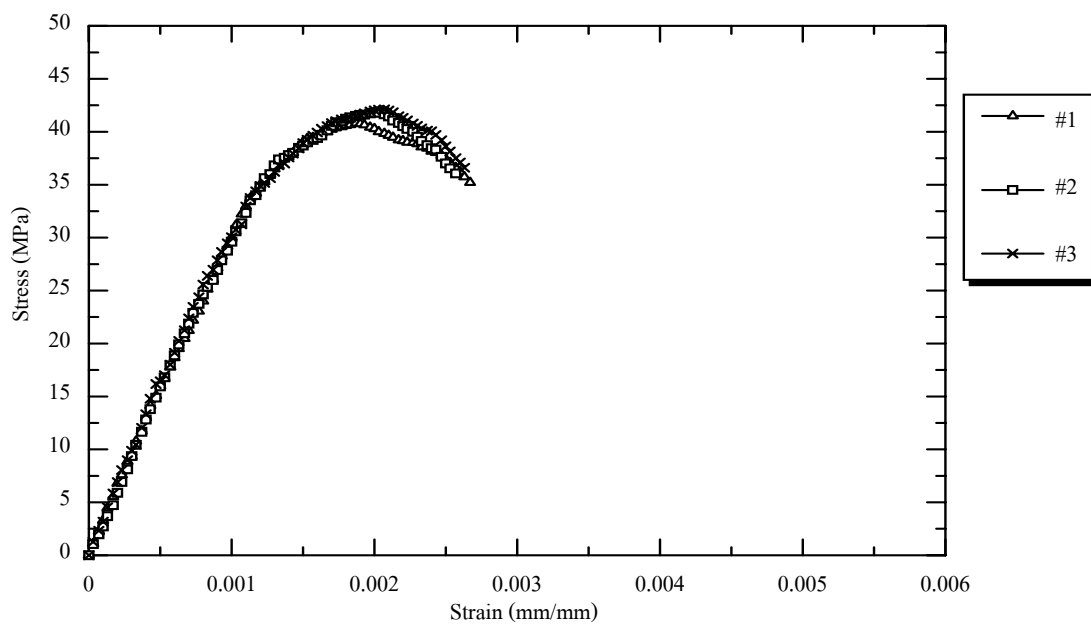


รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hs0.0

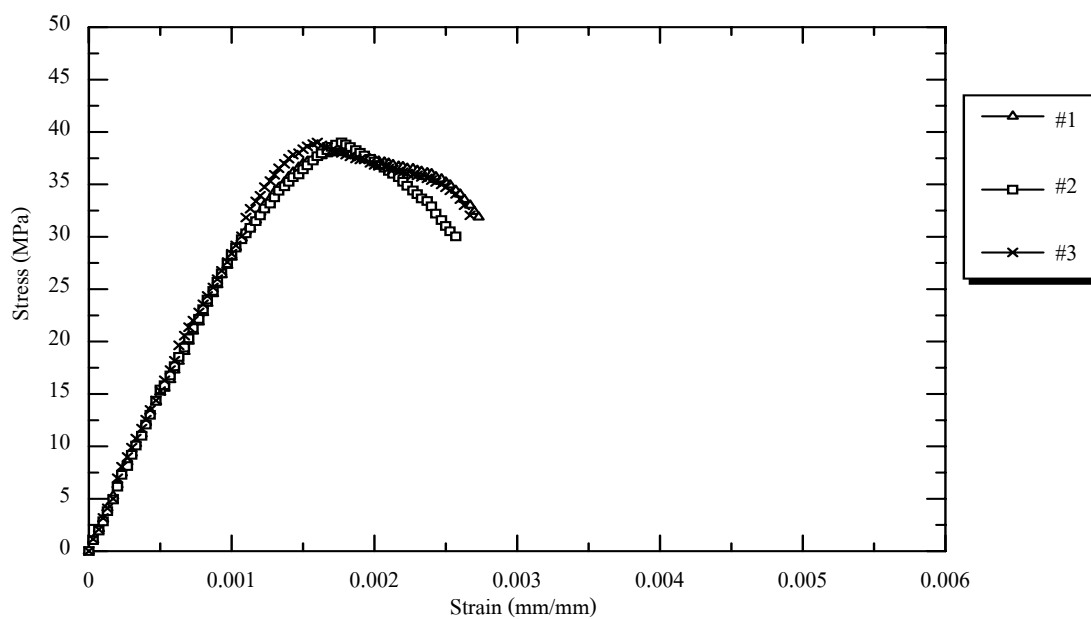


รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hs0.5

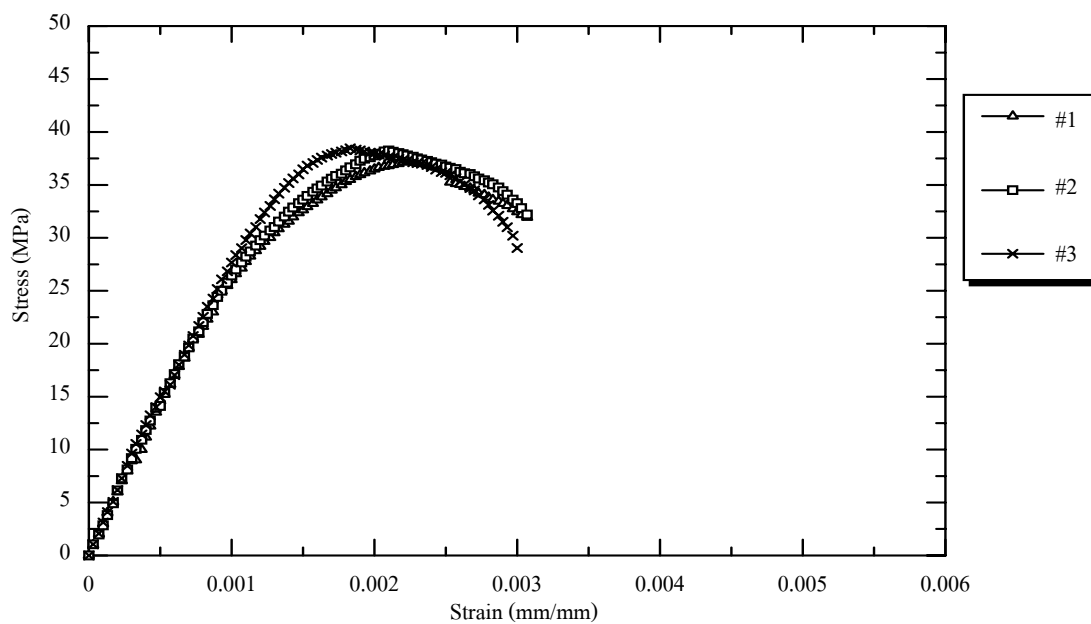




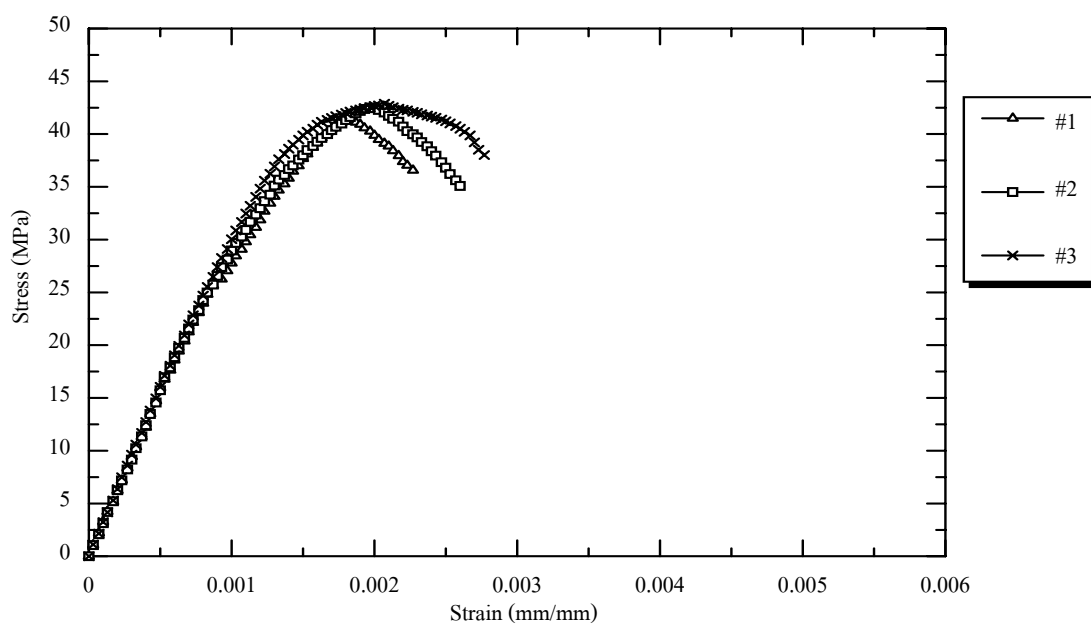
รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hs1.0



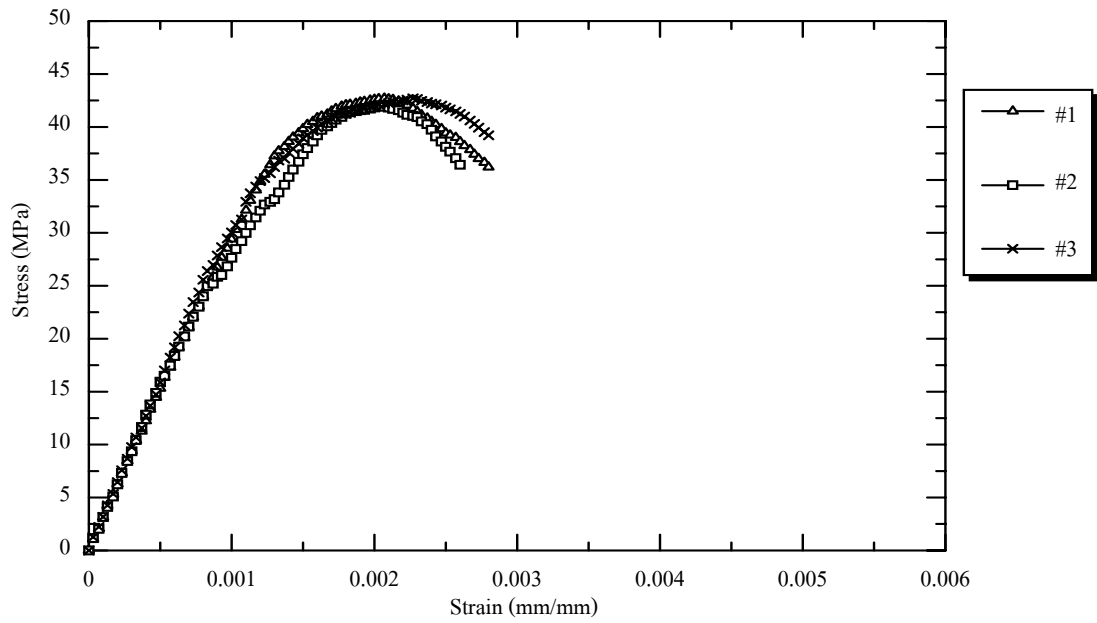
รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hs1.5



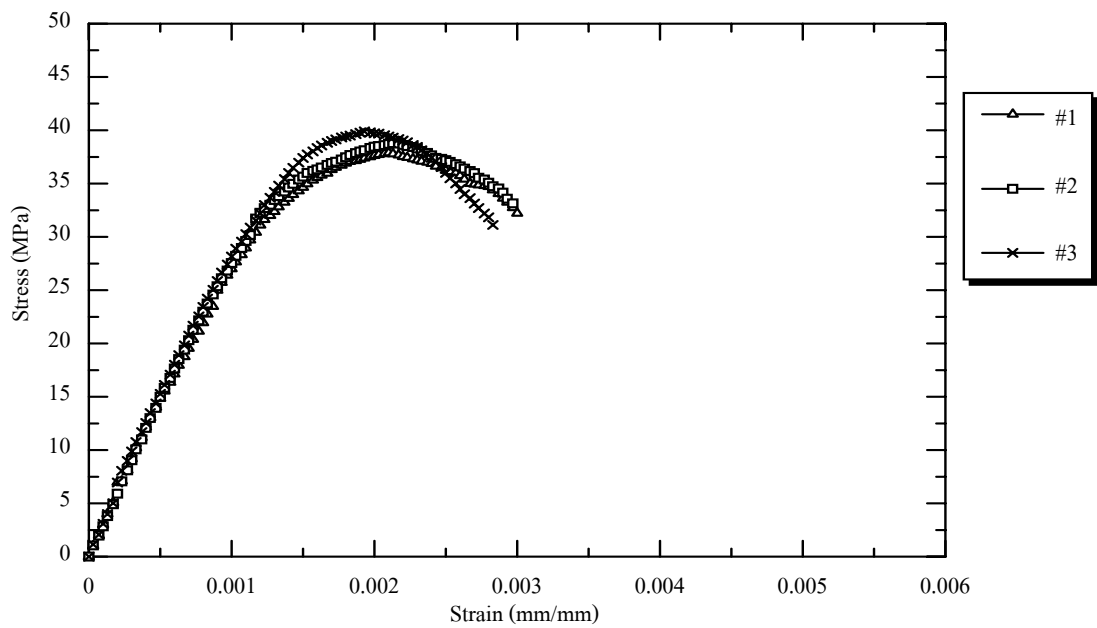
รูปที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hz2.0



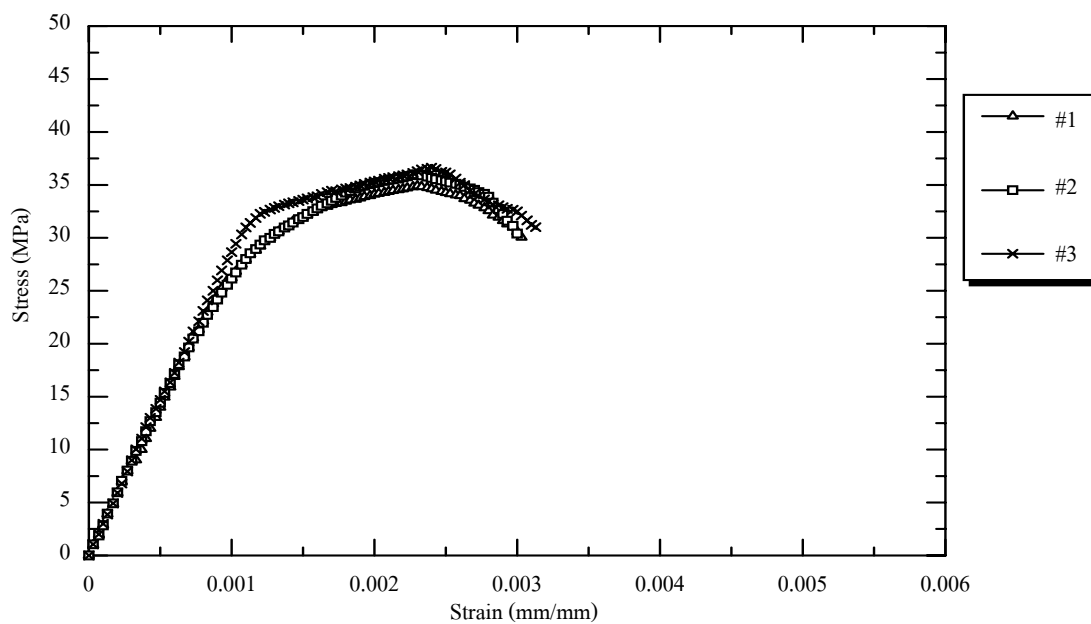
รูปที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hz0.5



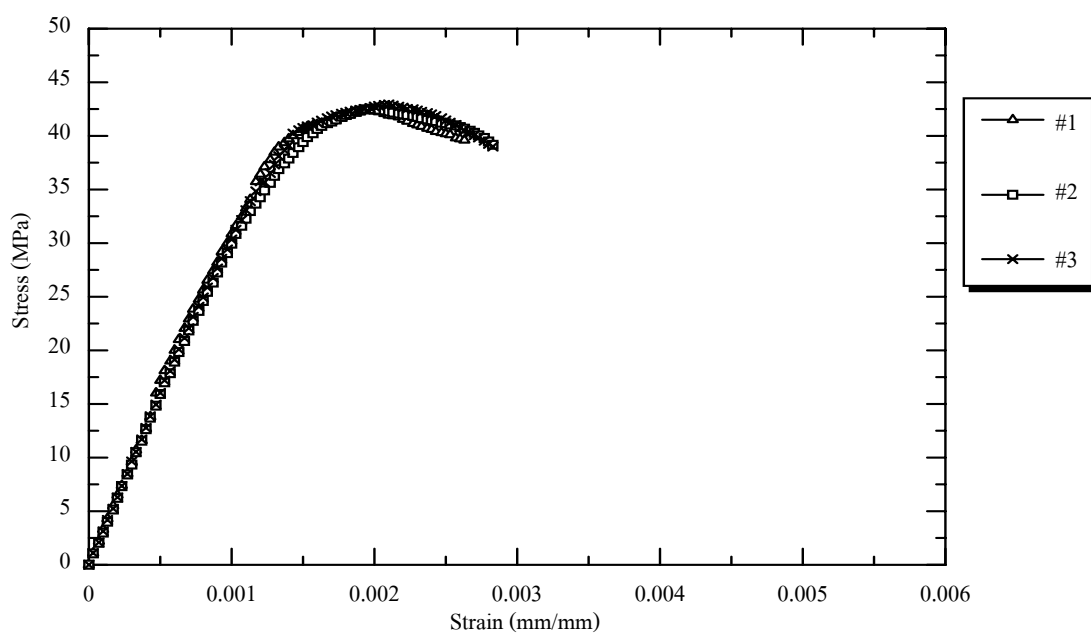
รูปที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hz1.0



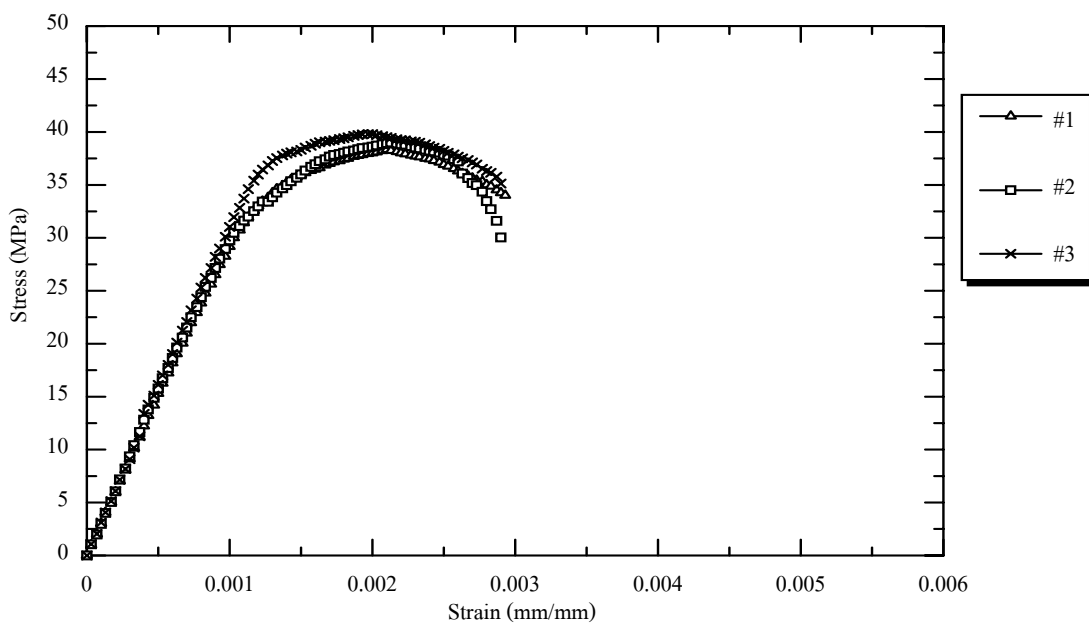
รูปที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hz1.5



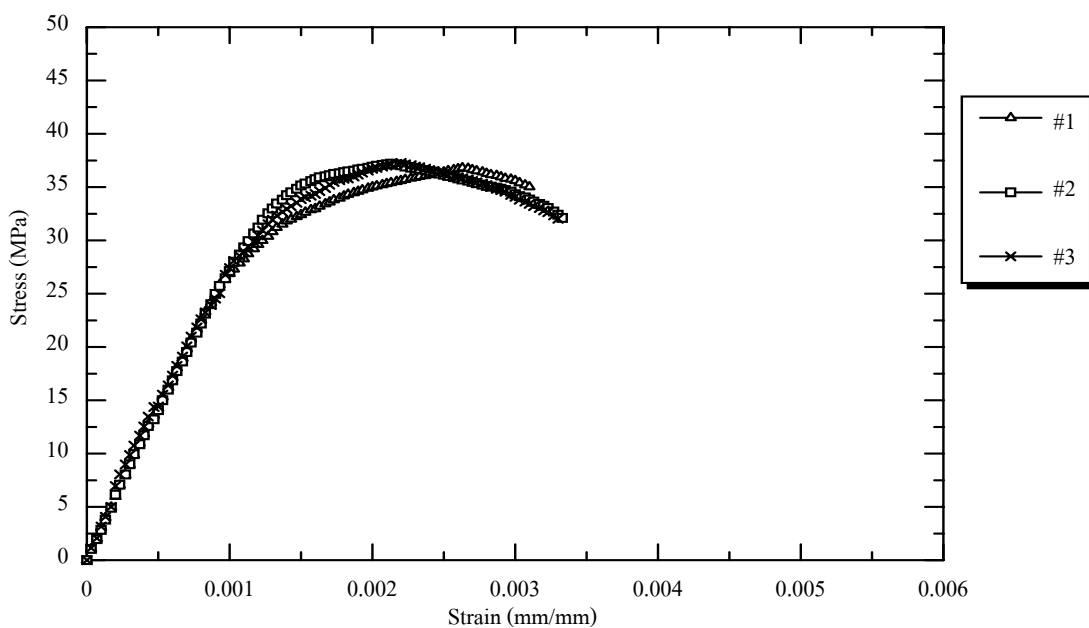
รูปที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Hz2.0



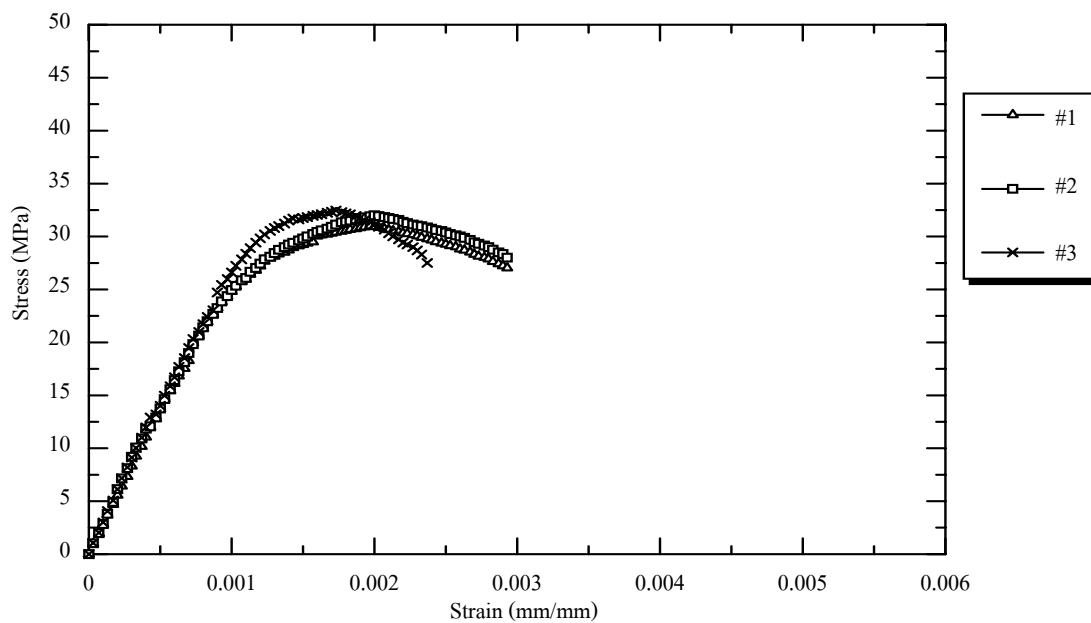
รูปที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Ps0.5



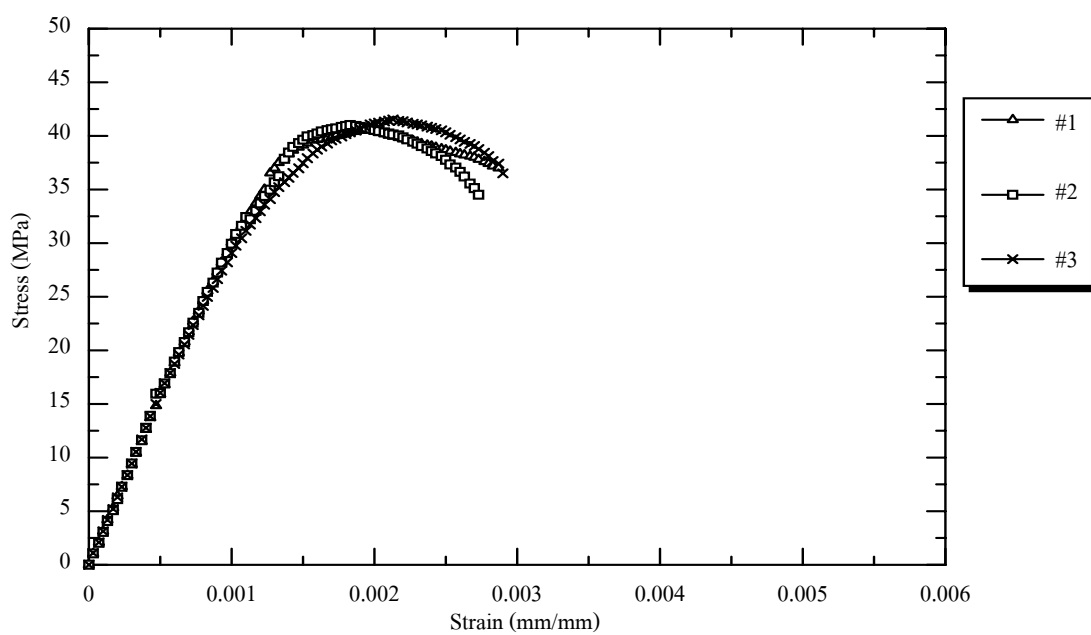
รูปที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Ps1.0



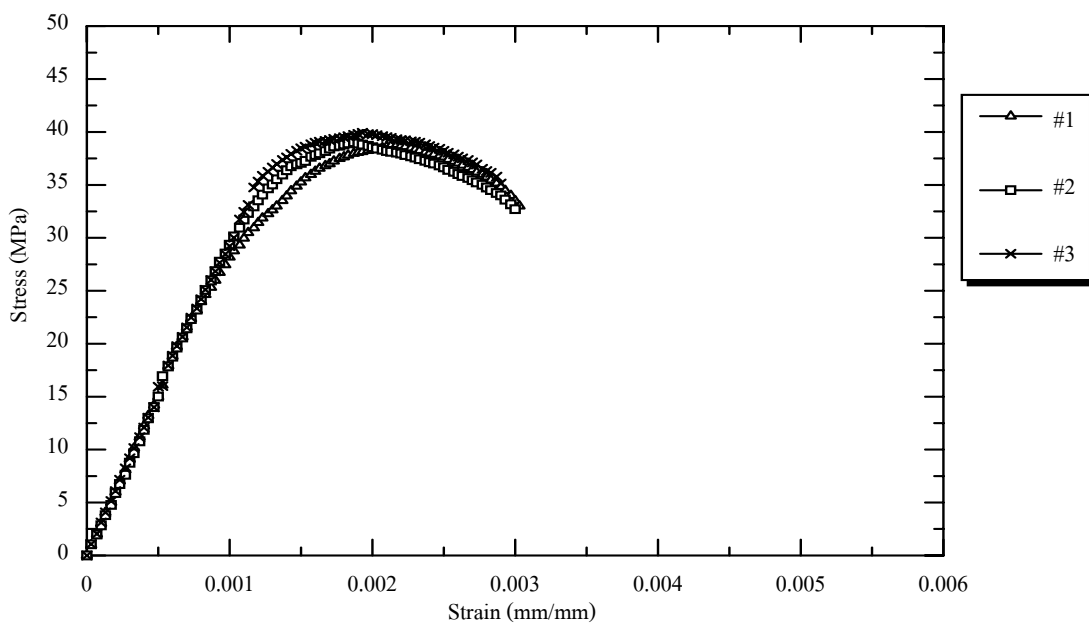
รูปที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Ps1.5



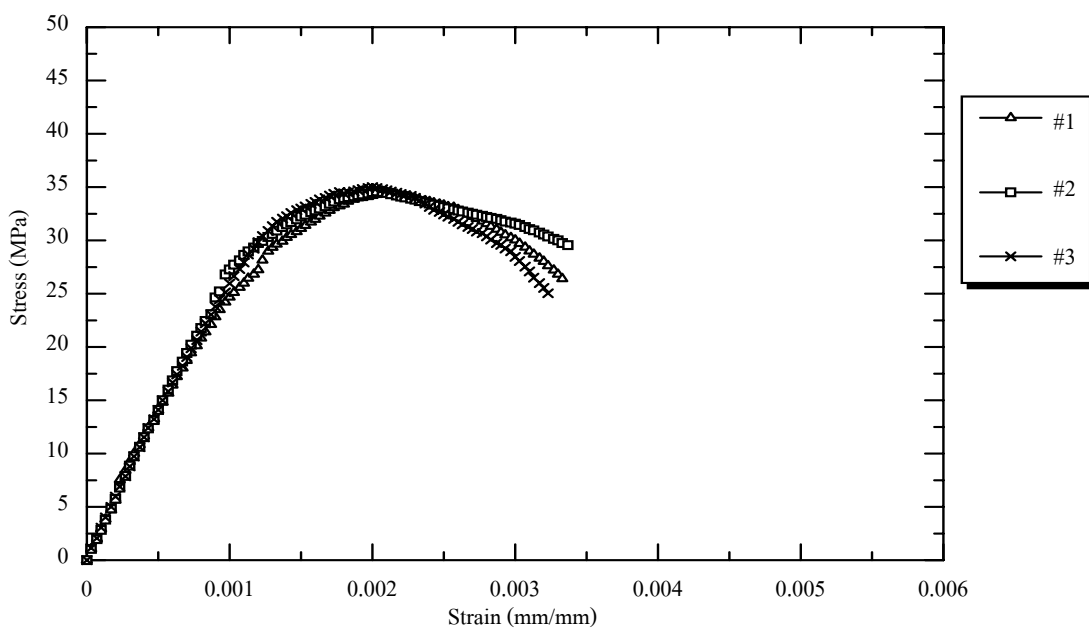
รูปที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Ps2.0



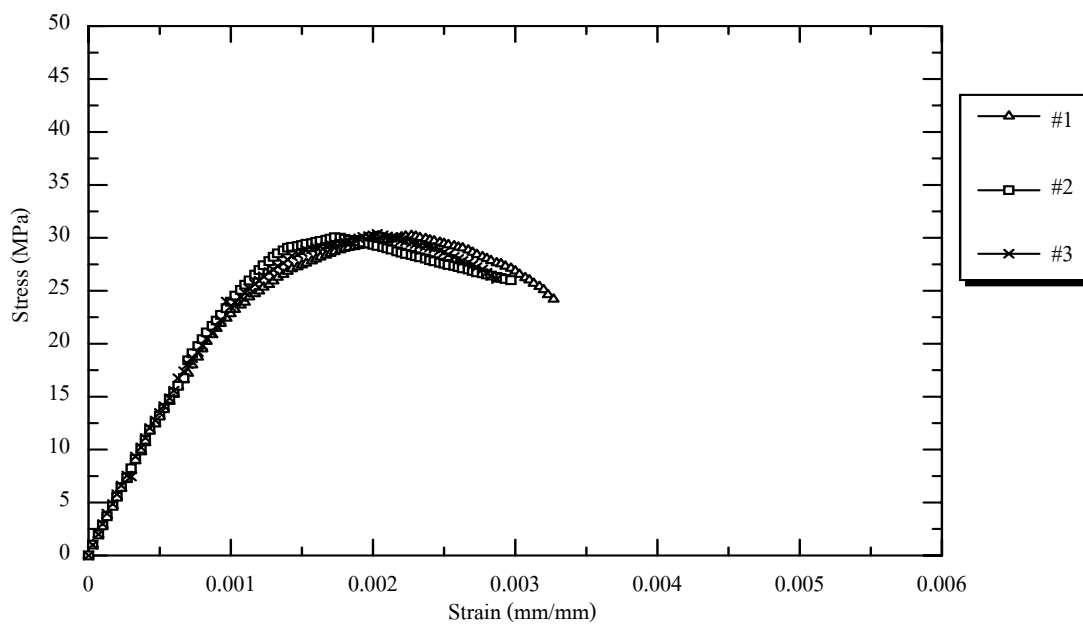
รูปที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Ps0.5



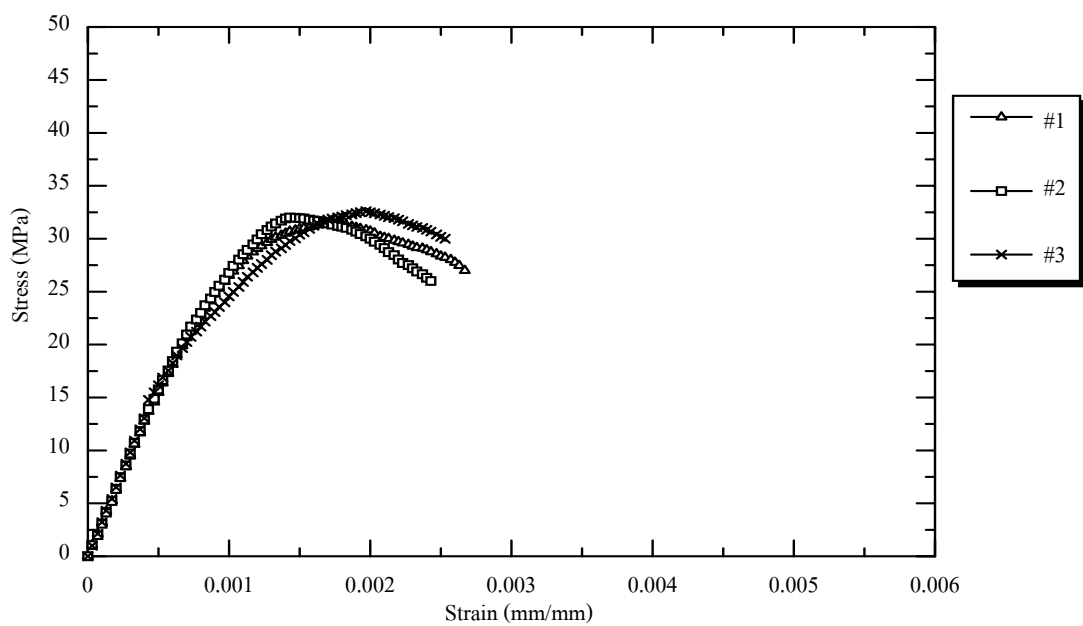
รูปที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Pz1.0



รูปที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Pz1.5

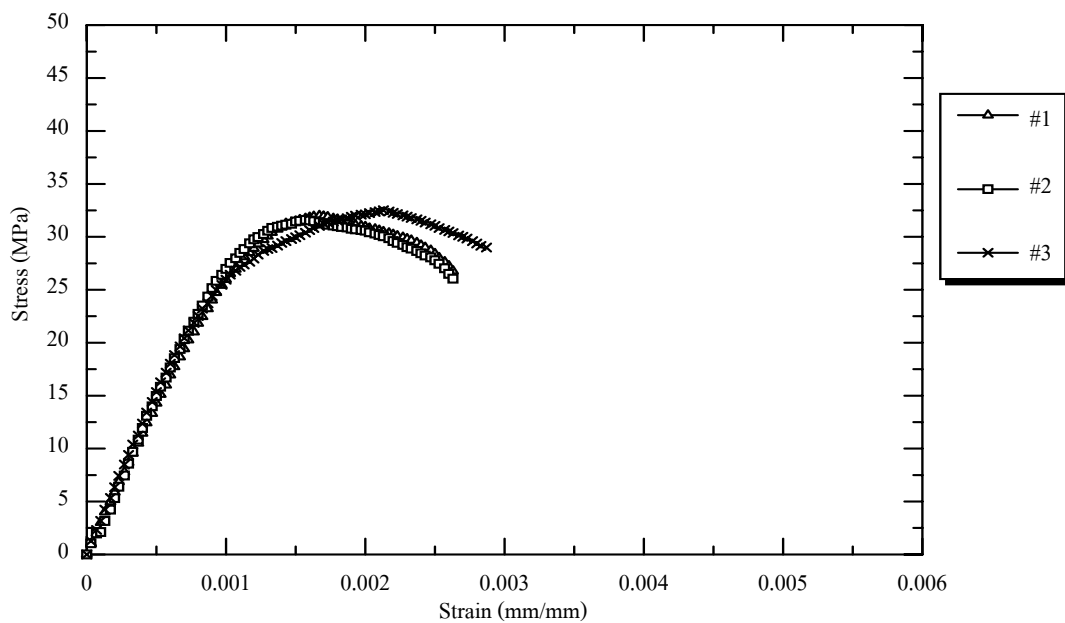


รูปที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.4Pz2.0

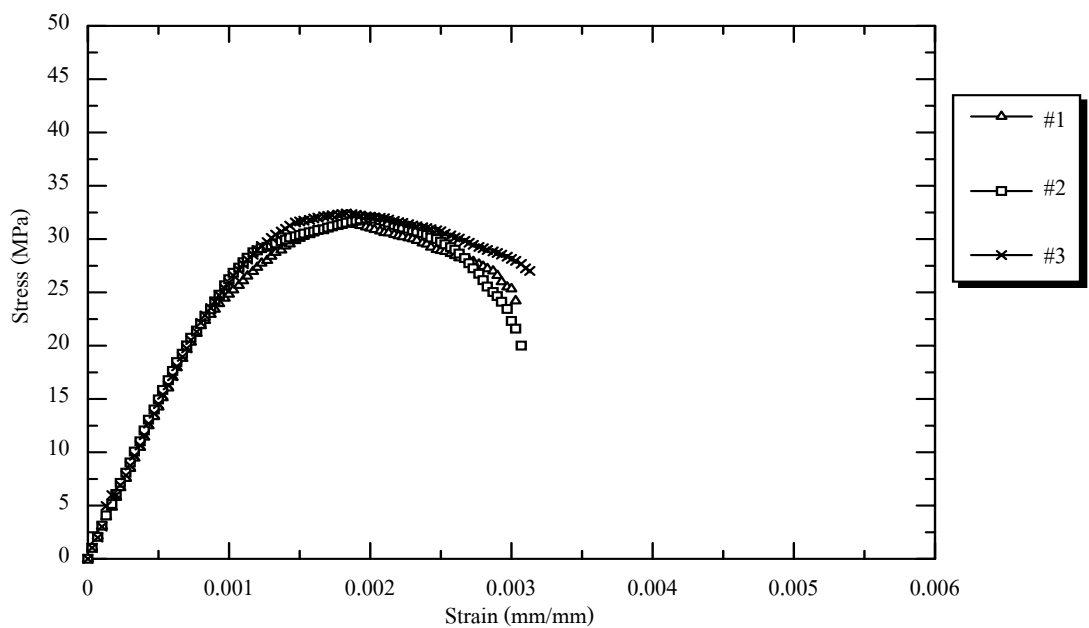


รูปที่ ค.18 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hs0.0

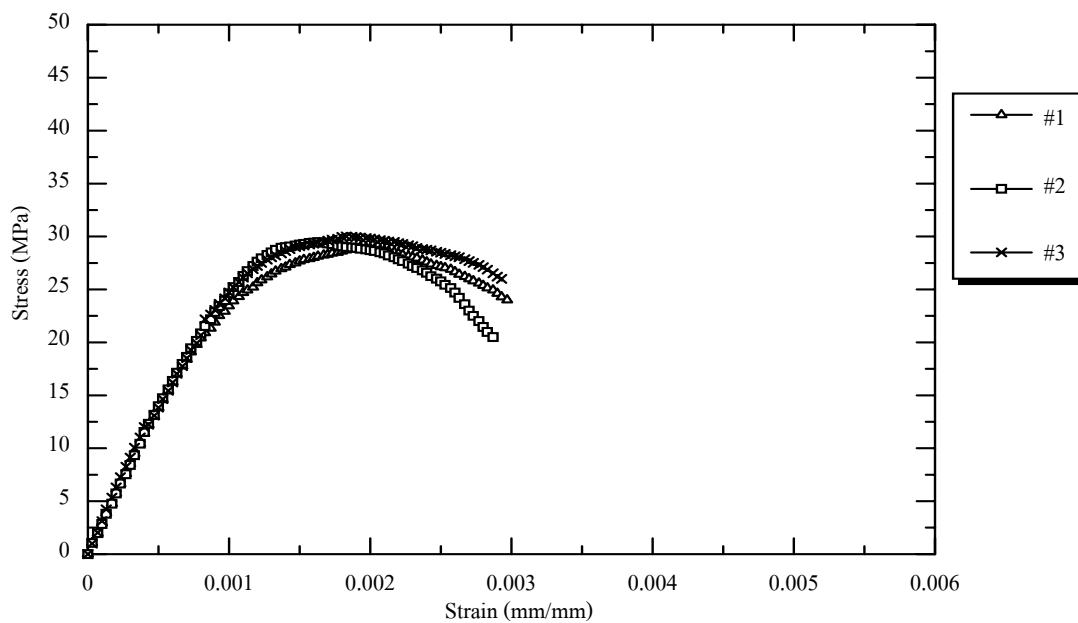




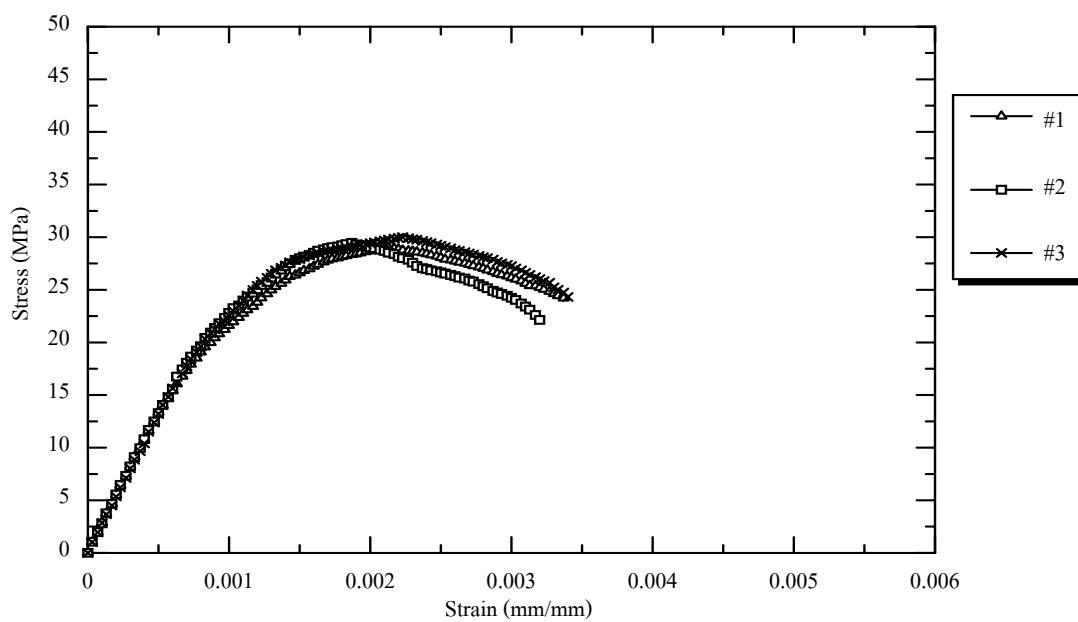
รูปที่ ค.19 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hs0.5



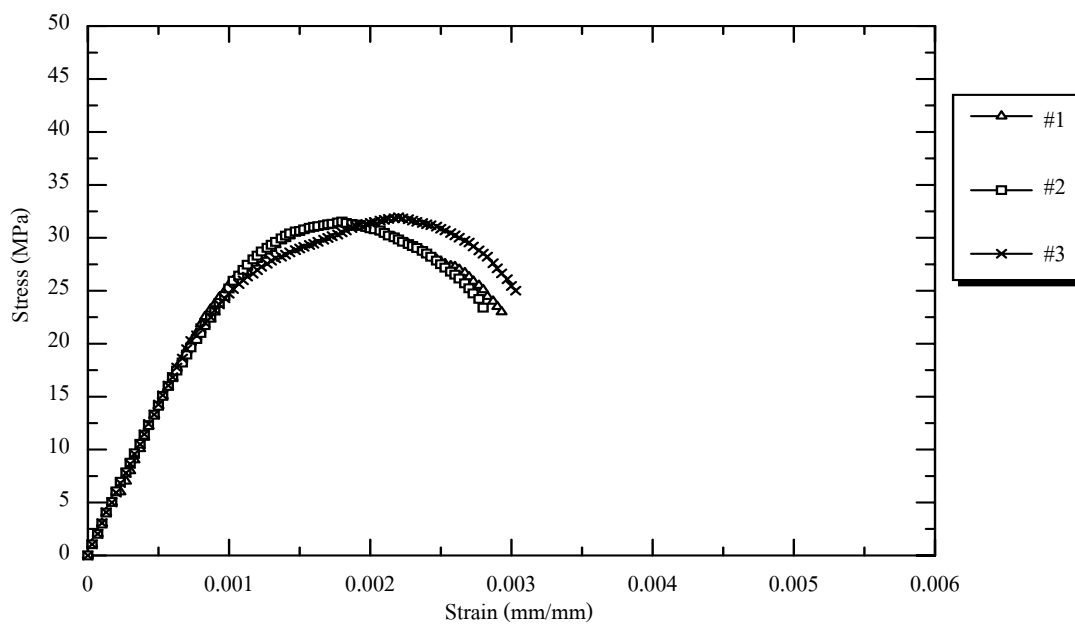
รูปที่ ค.20 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hs1.0



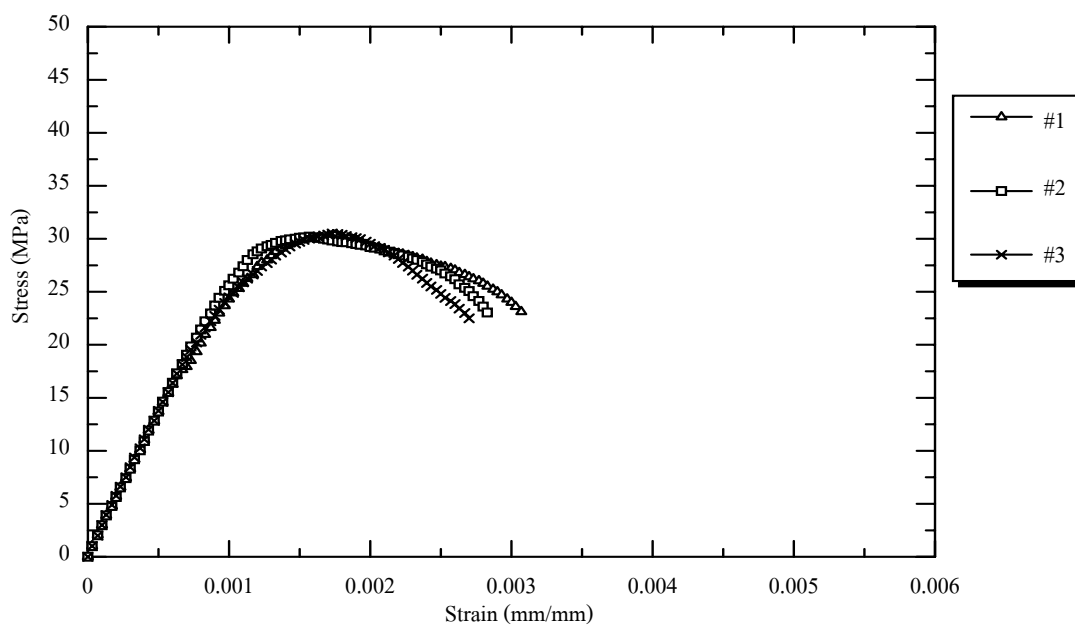
รูปที่ ค.21 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hs1.5



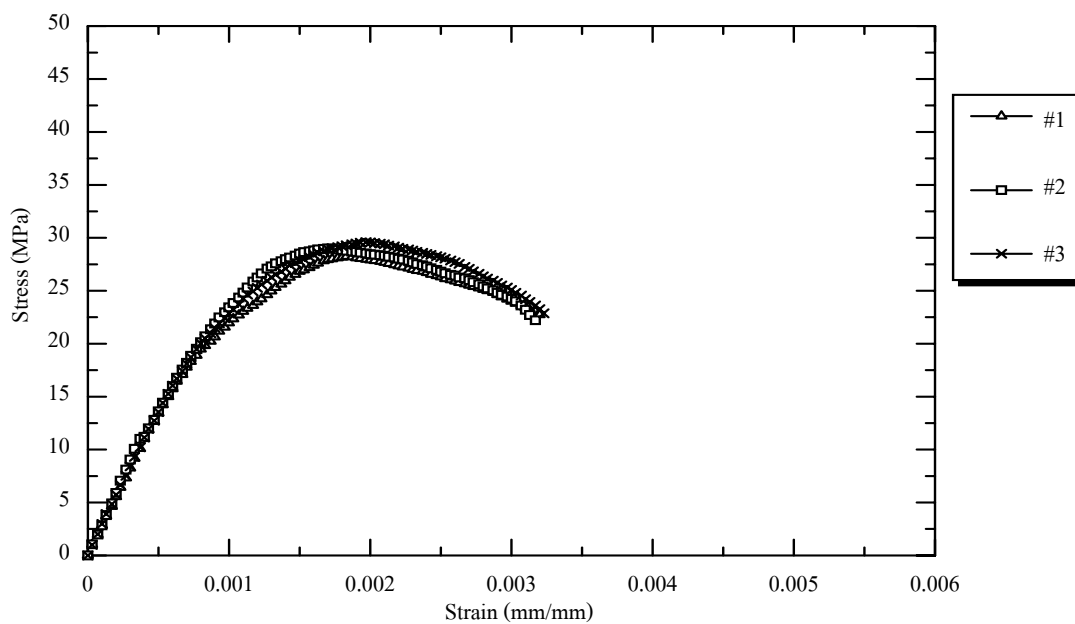
รูปที่ ค.22 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hs2.0



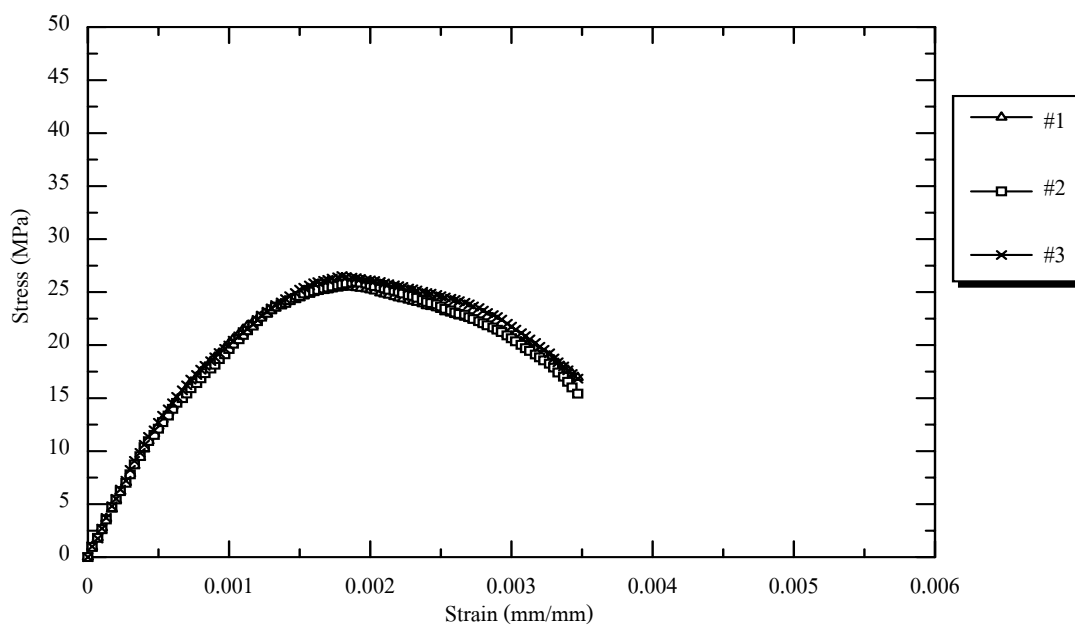
รูปที่ ค.23 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hz0.5



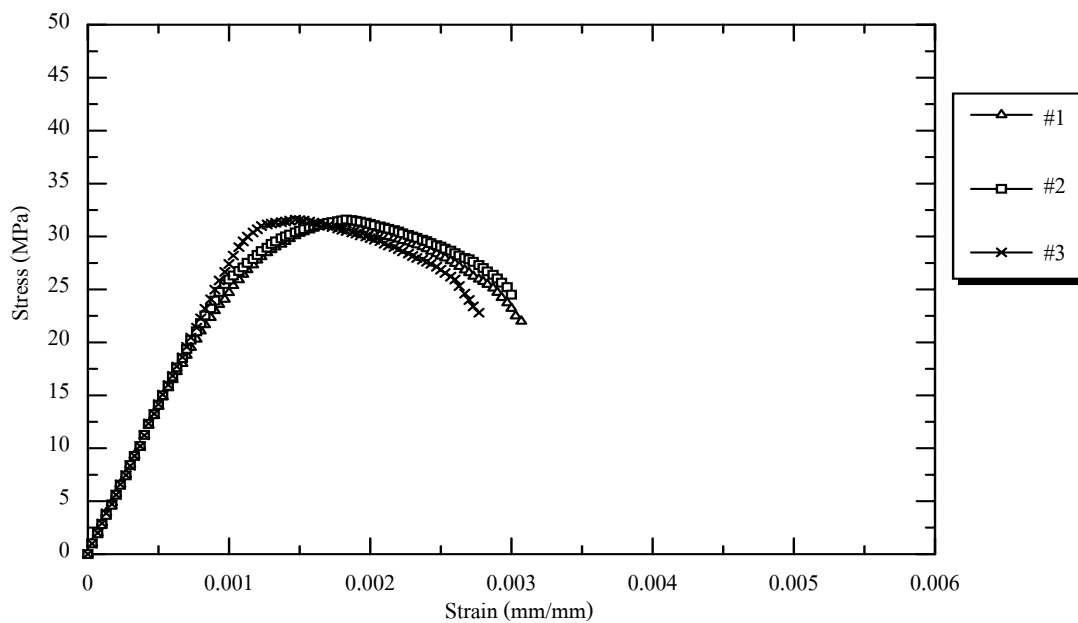
รูปที่ ค.24 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hz1.0



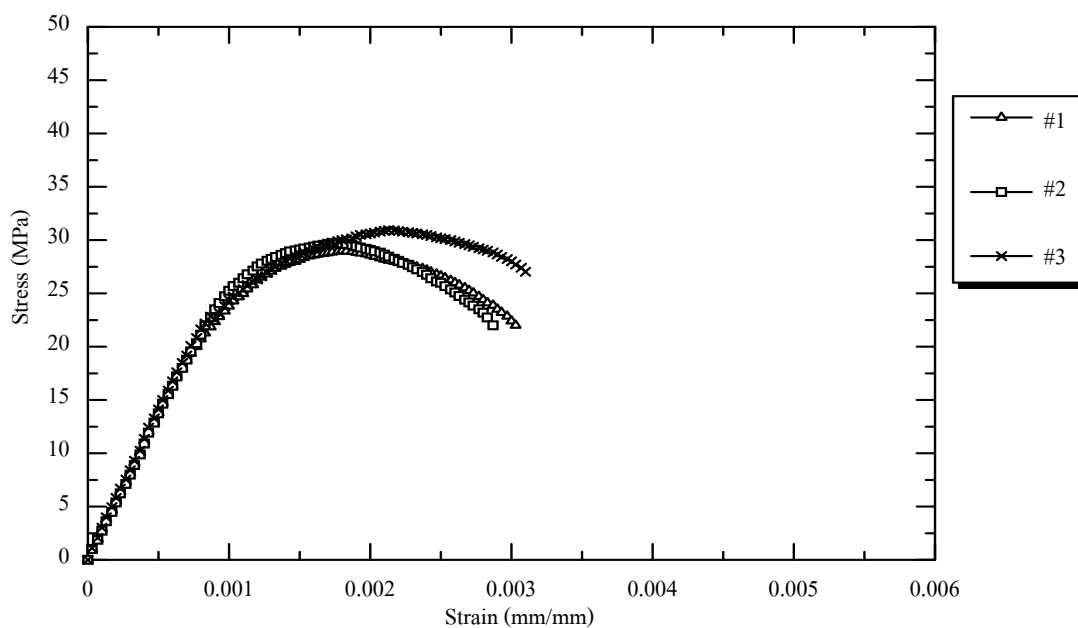
รูปที่ ค.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hz1.5



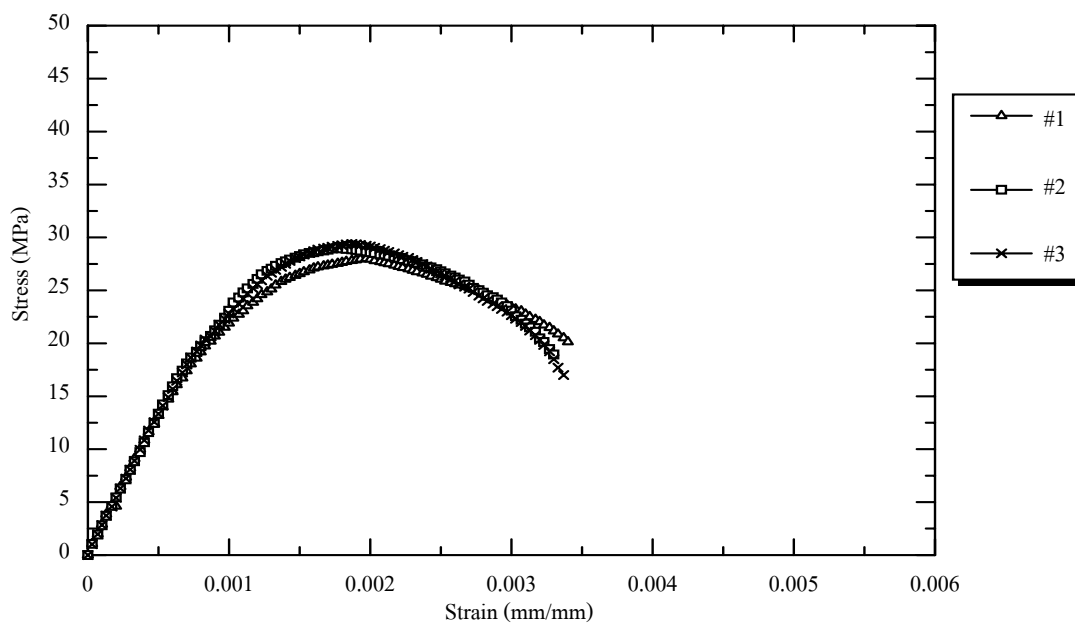
รูปที่ ค.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Hz2.0



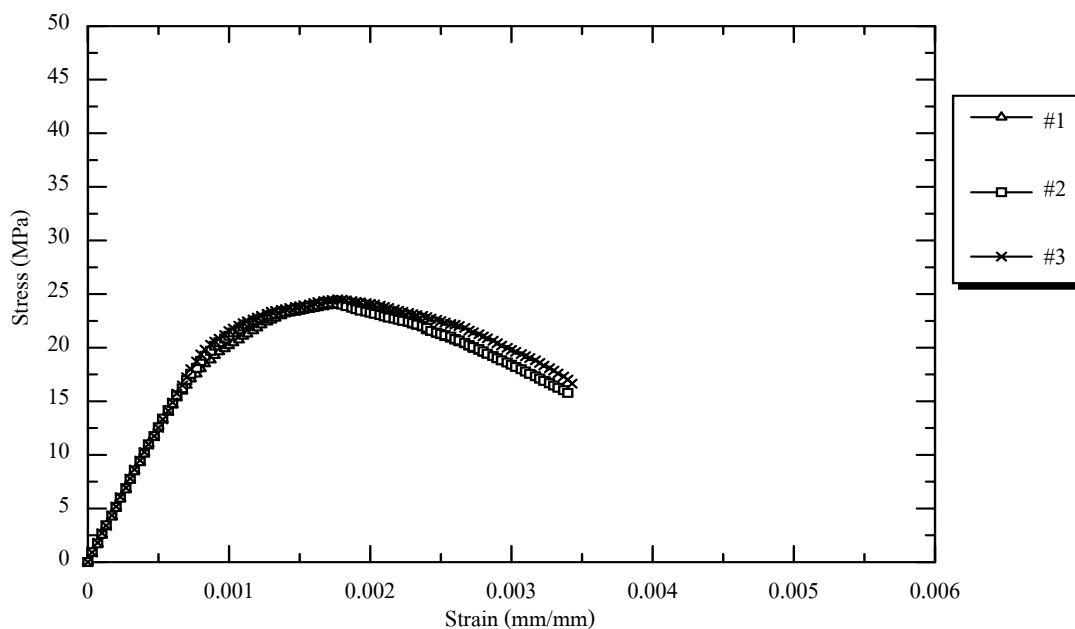
รูปที่ ค.27 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Ps0.5



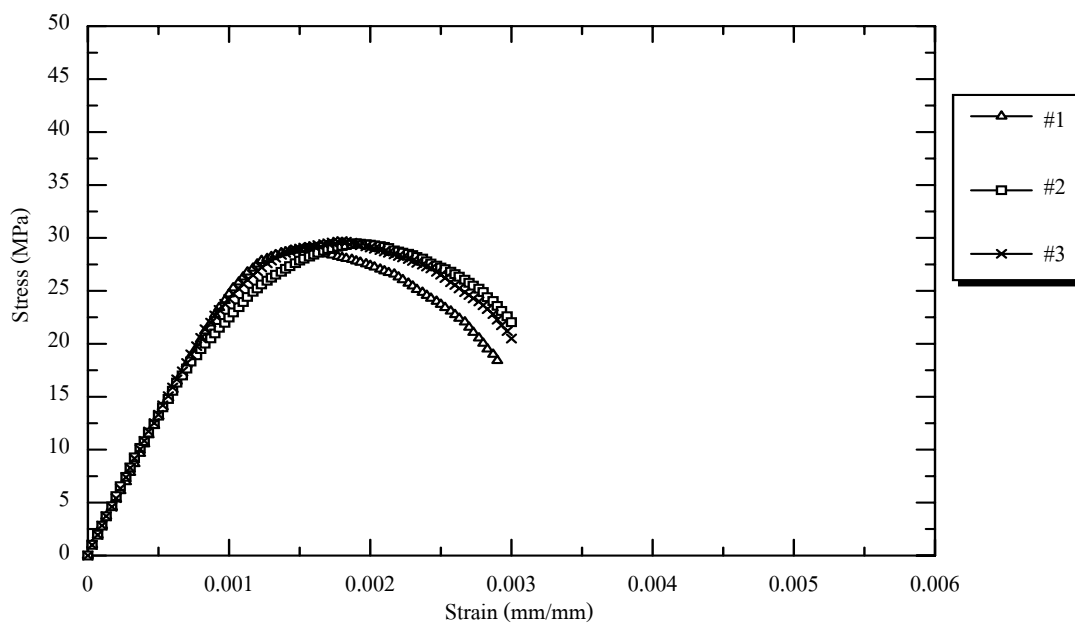
รูปที่ ค.28 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Ps1.0



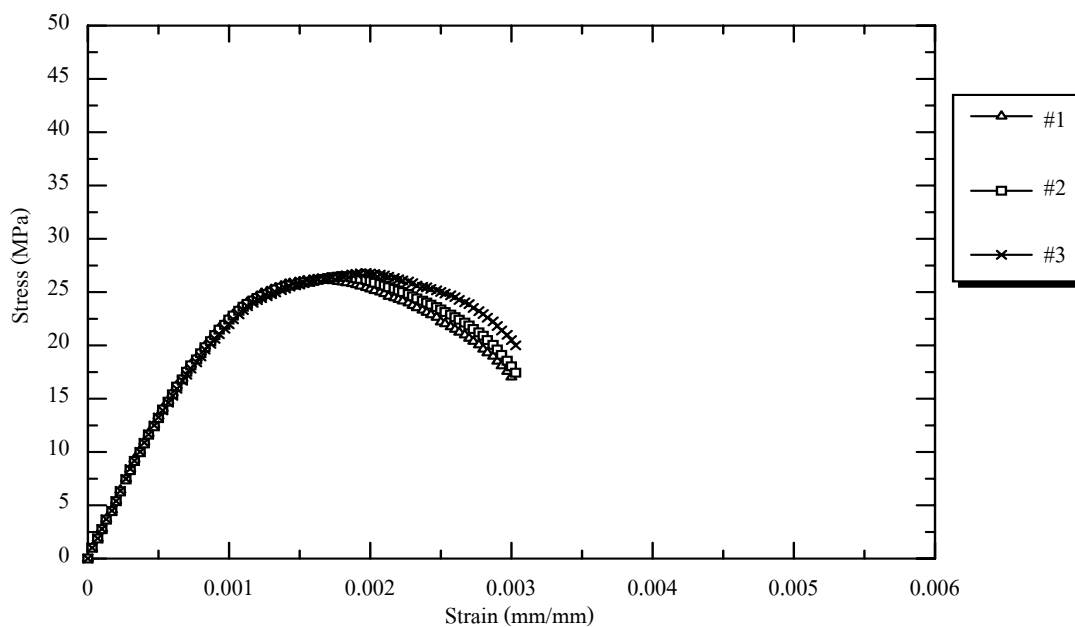
รูปที่ ค.29 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Ps1.5



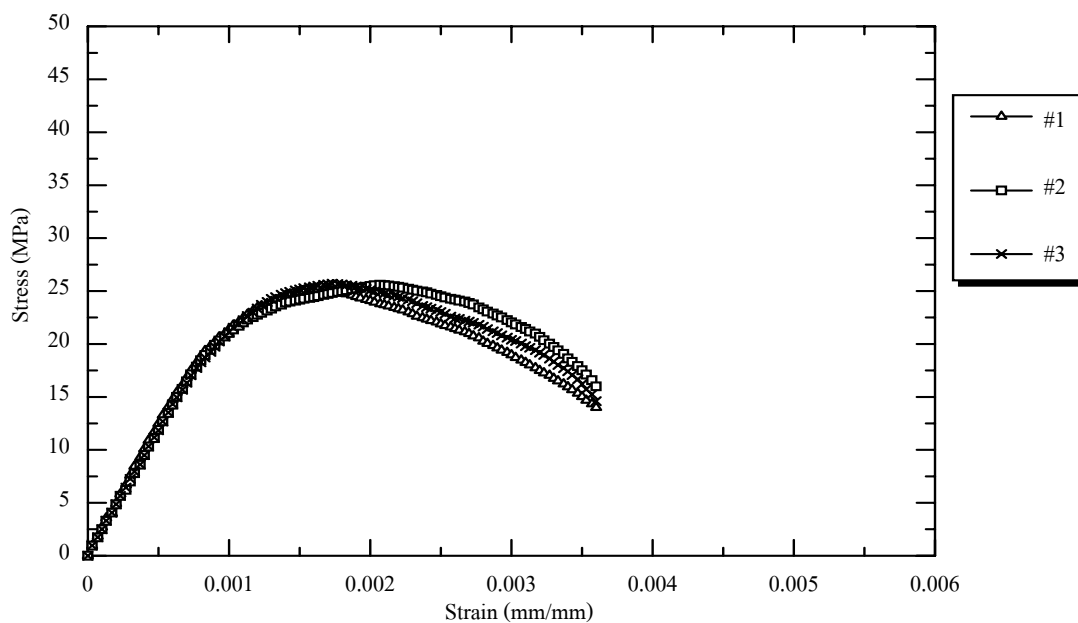
รูปที่ ค.30 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Ps2.0



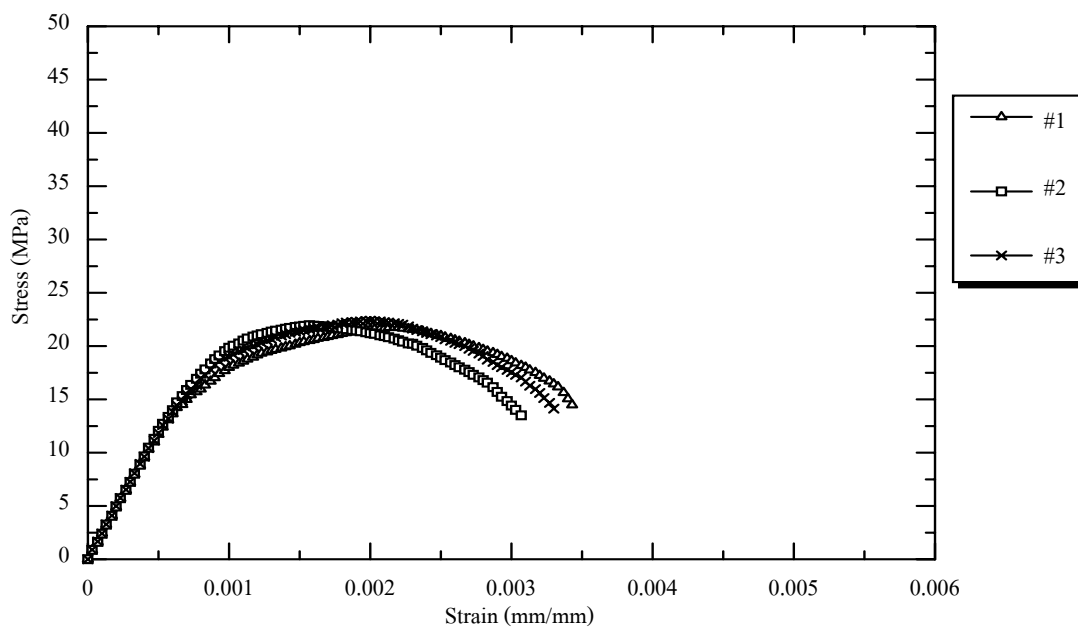
รูปที่ ค.31 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Pz0.5



รูปที่ ค.32 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Pz1.0

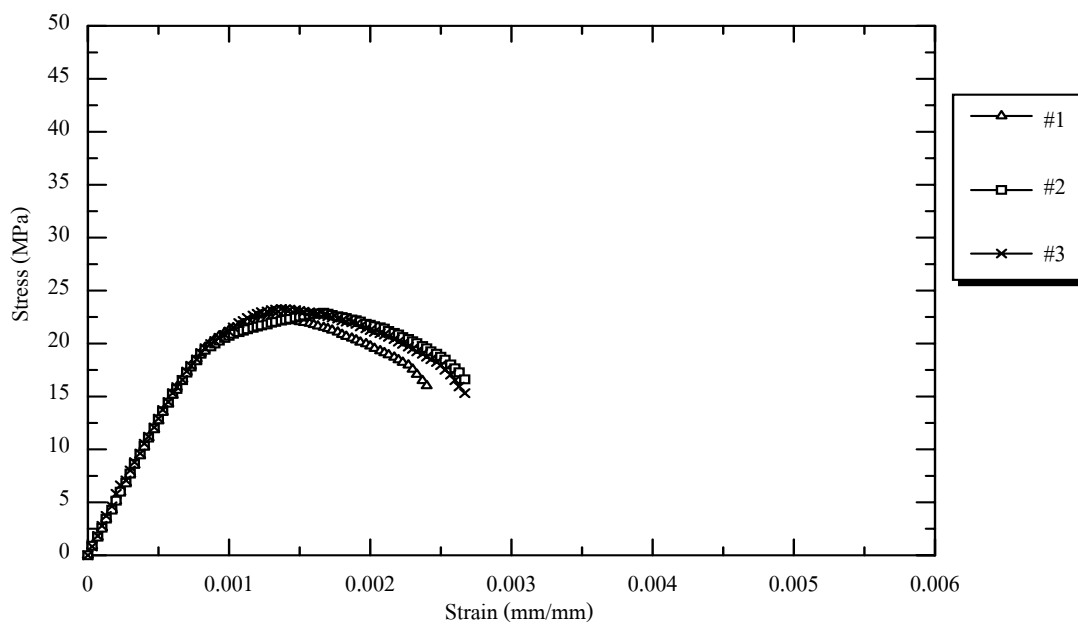


รูปที่ ค.33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Pz1.5

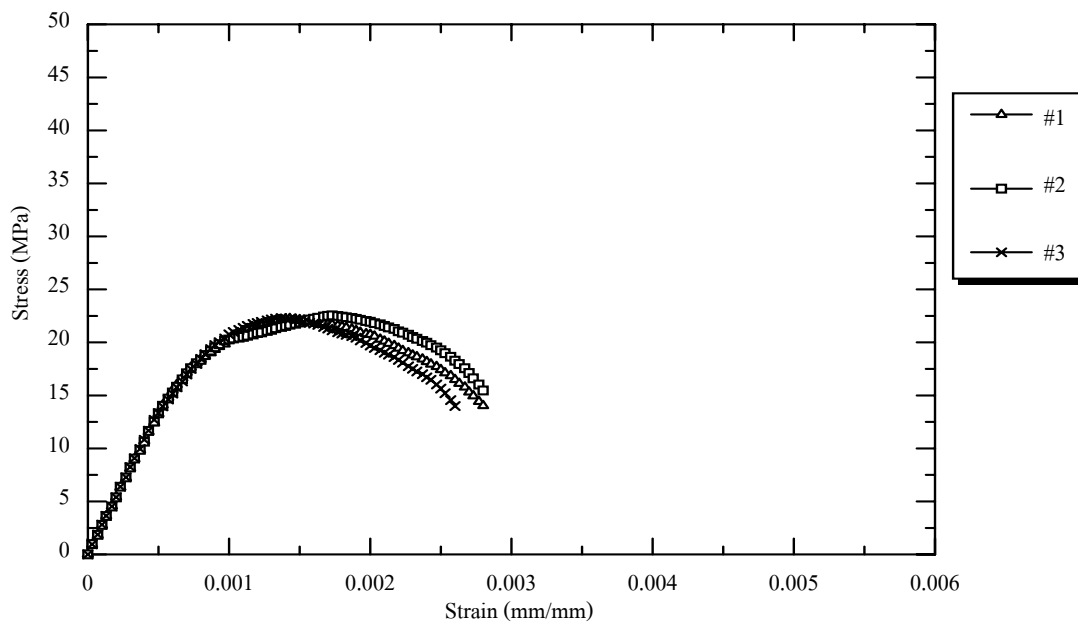


รูปที่ ค.34 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.5Pz2.0

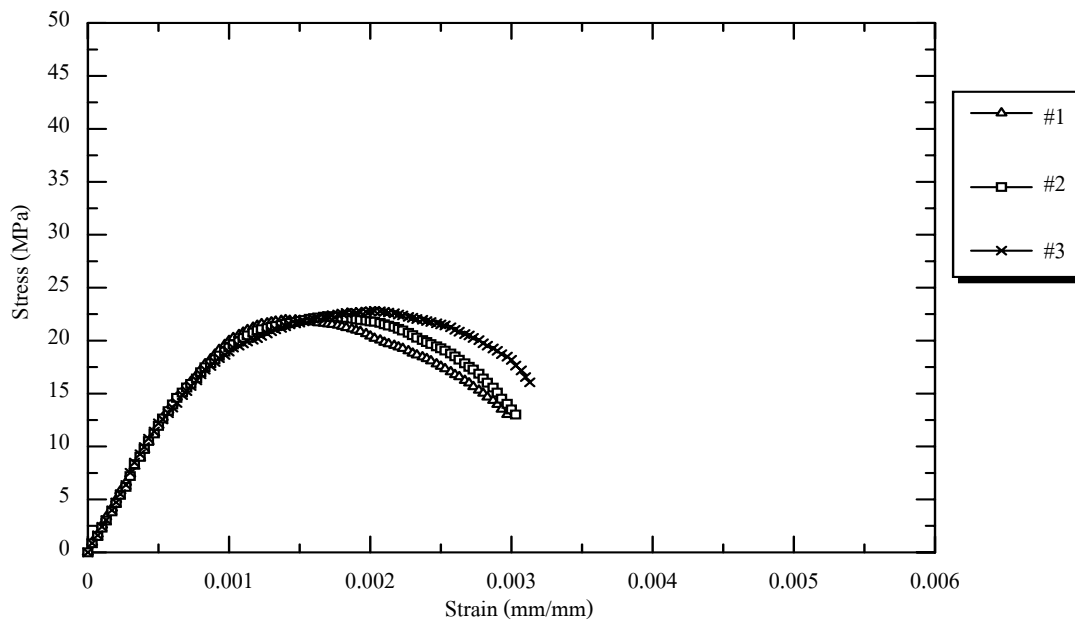




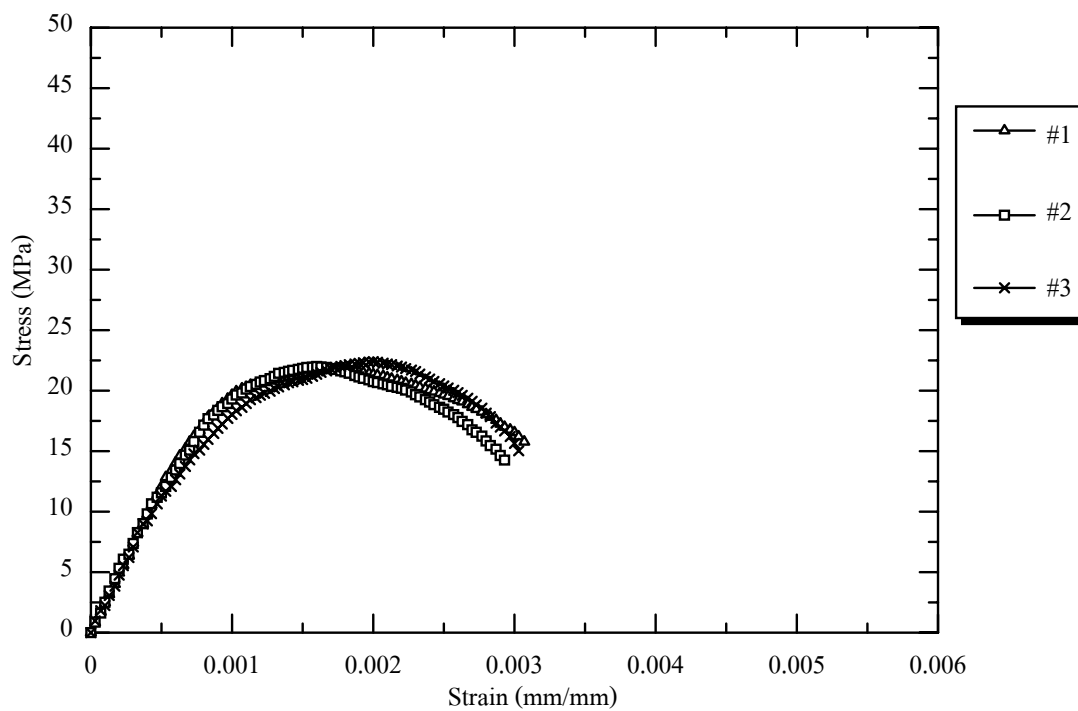
รูปที่ ค.35 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hs0.0



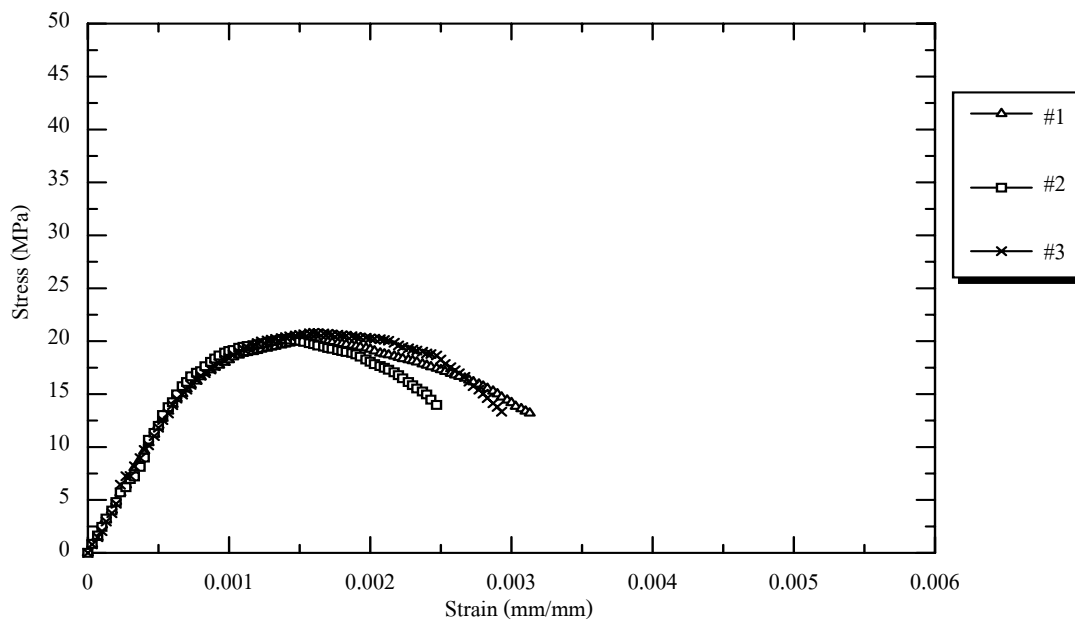
รูปที่ ค.36 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hs0.5



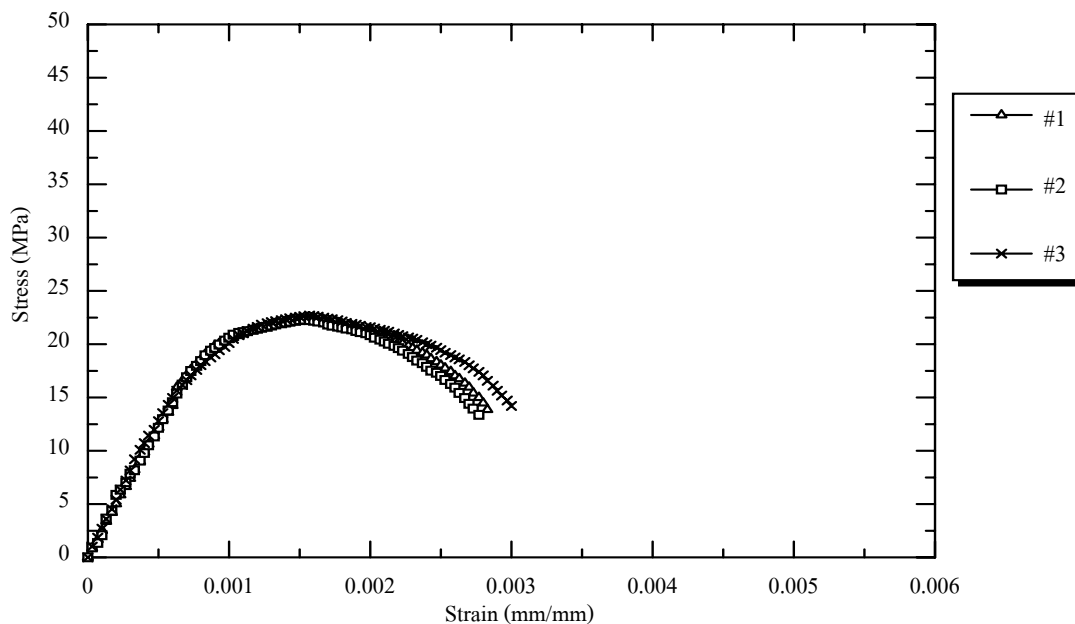
รูปที่ ค.37 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hs1.0



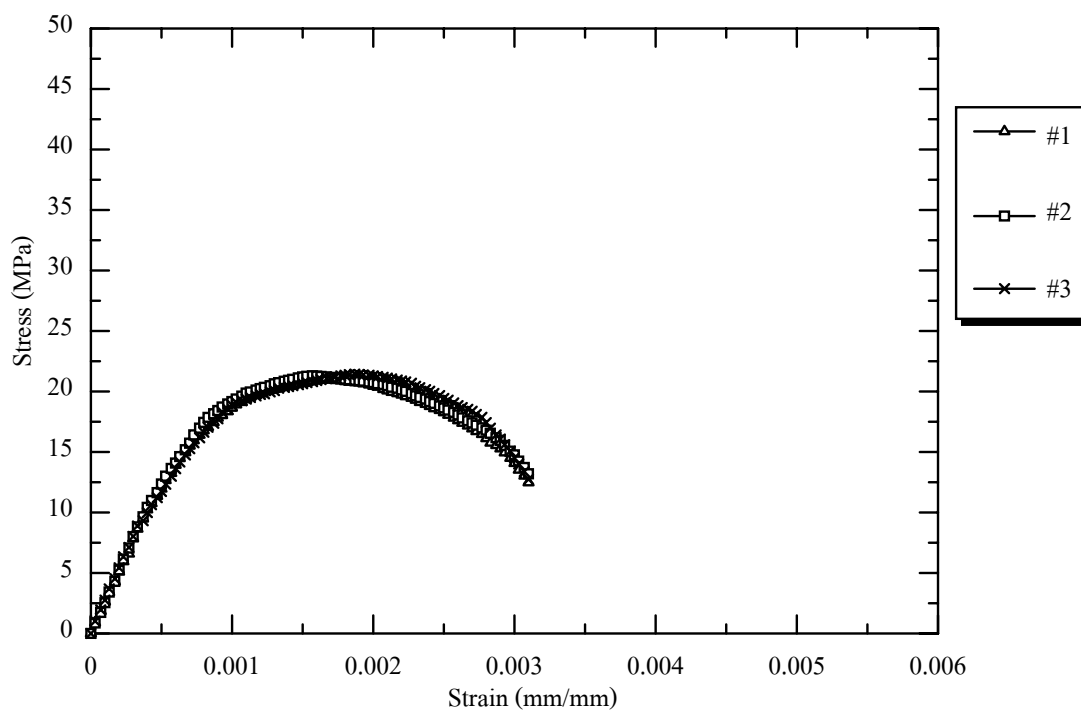
รูปที่ ค.38 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hs1.5



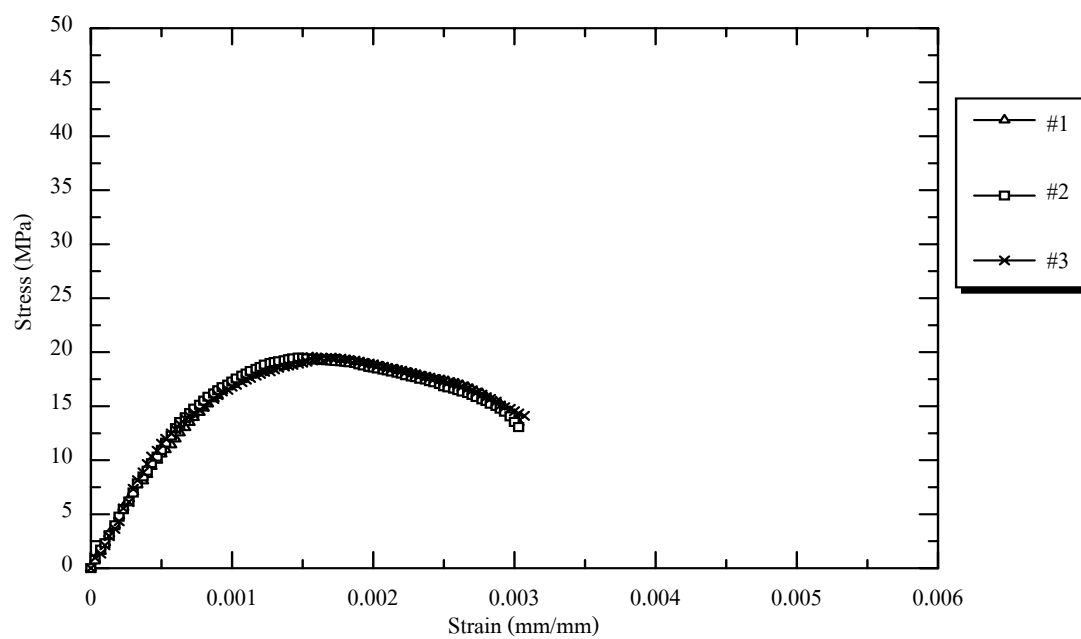
รูปที่ ค.39 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hz2.0



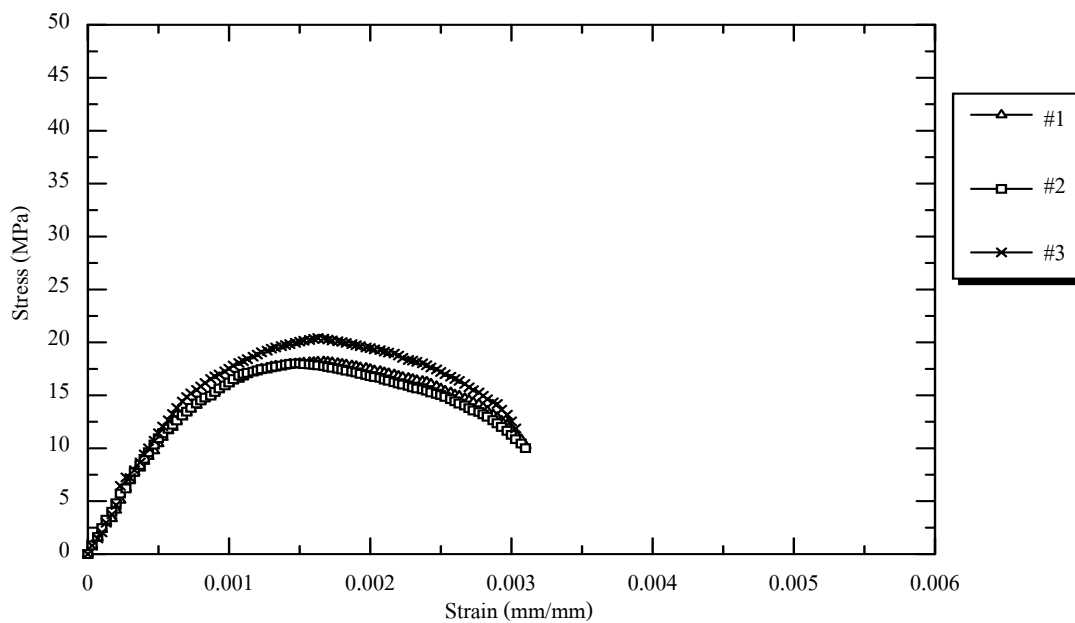
รูปที่ ค.40 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hz0.5



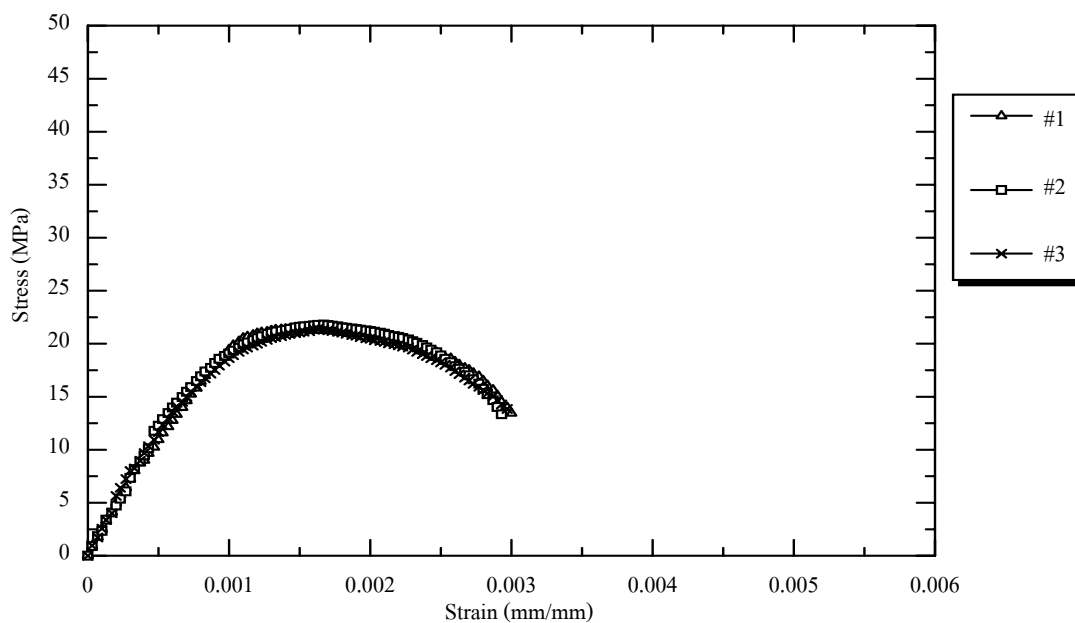
รูปที่ ค.41 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hz1.0



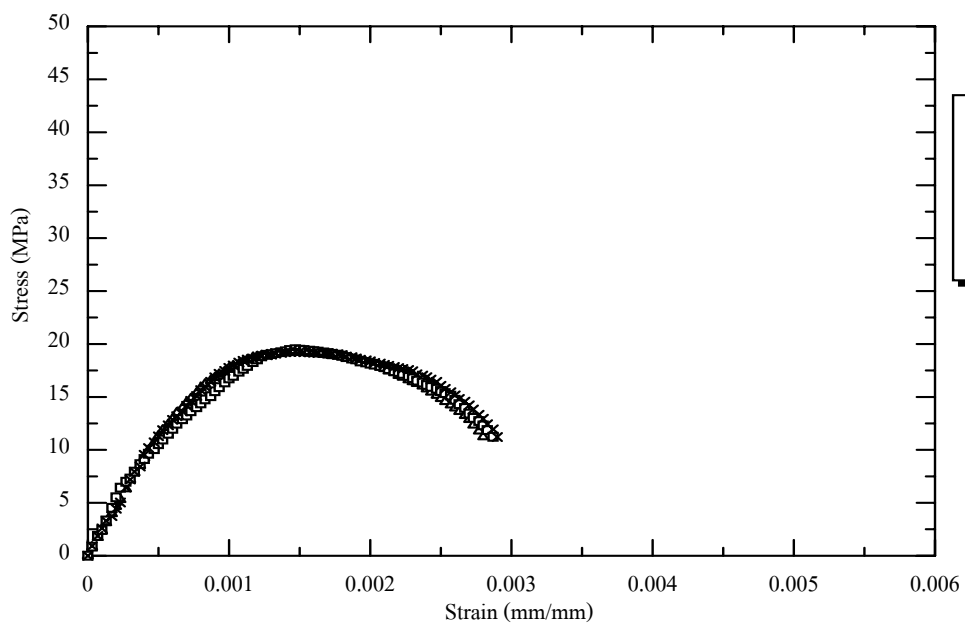
รูปที่ ค.42 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hz1.5



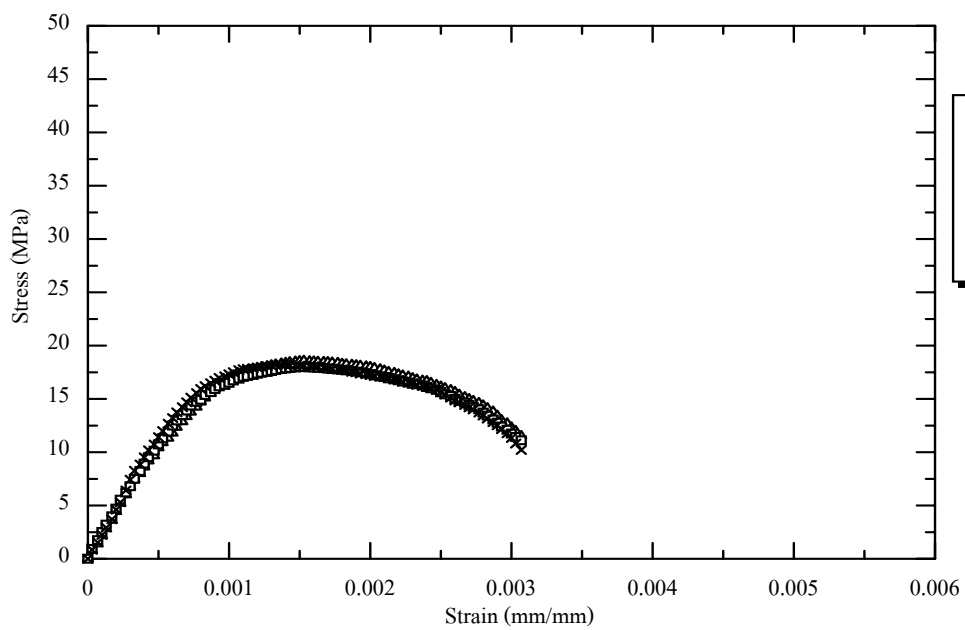
รูปที่ ค.43 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Hz2.0



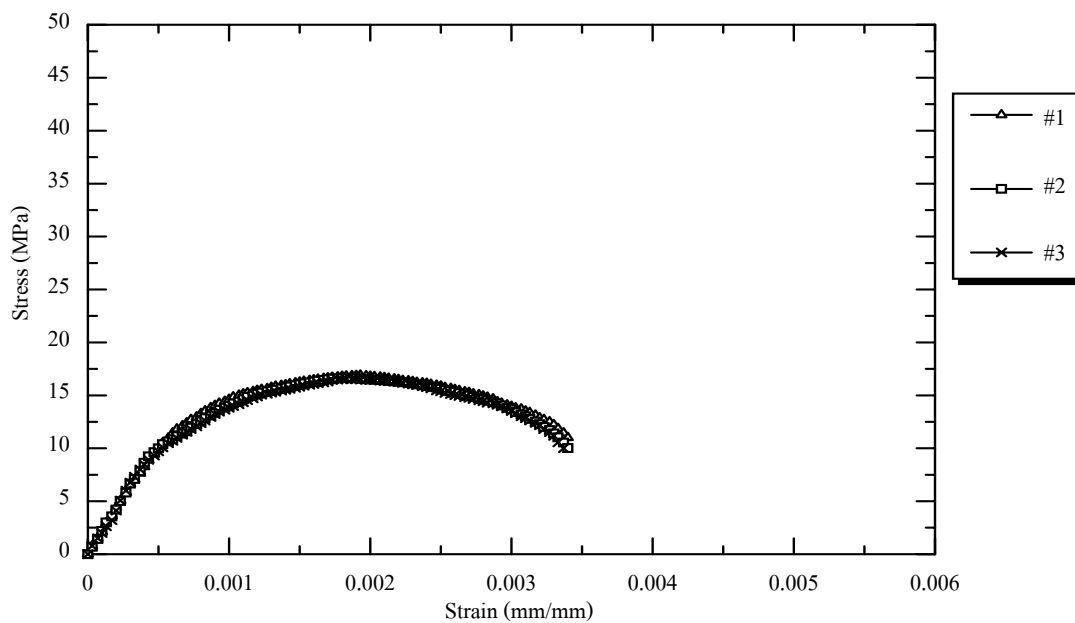
รูปที่ ค.44 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Ps0.5



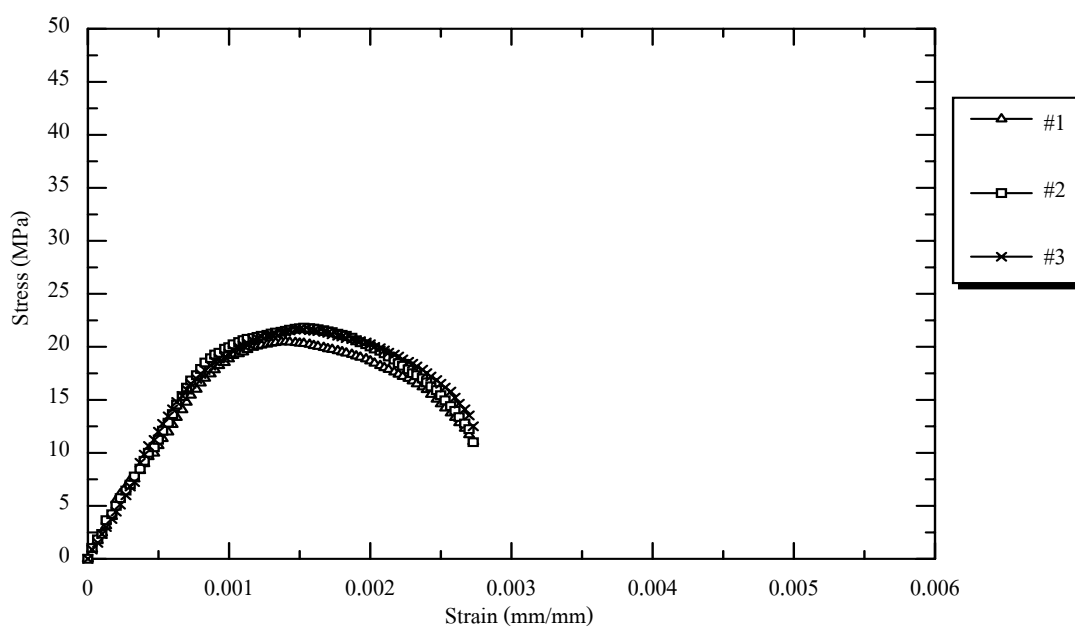
รูปที่ ค.45 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Ps1.0



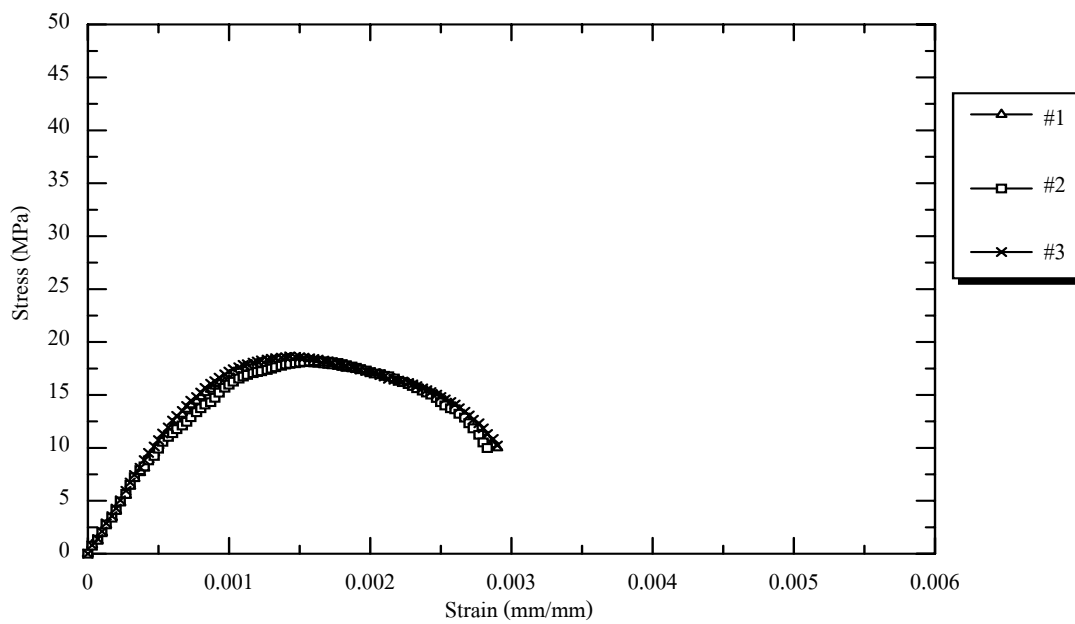
รูปที่ ค.46 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Ps1.5



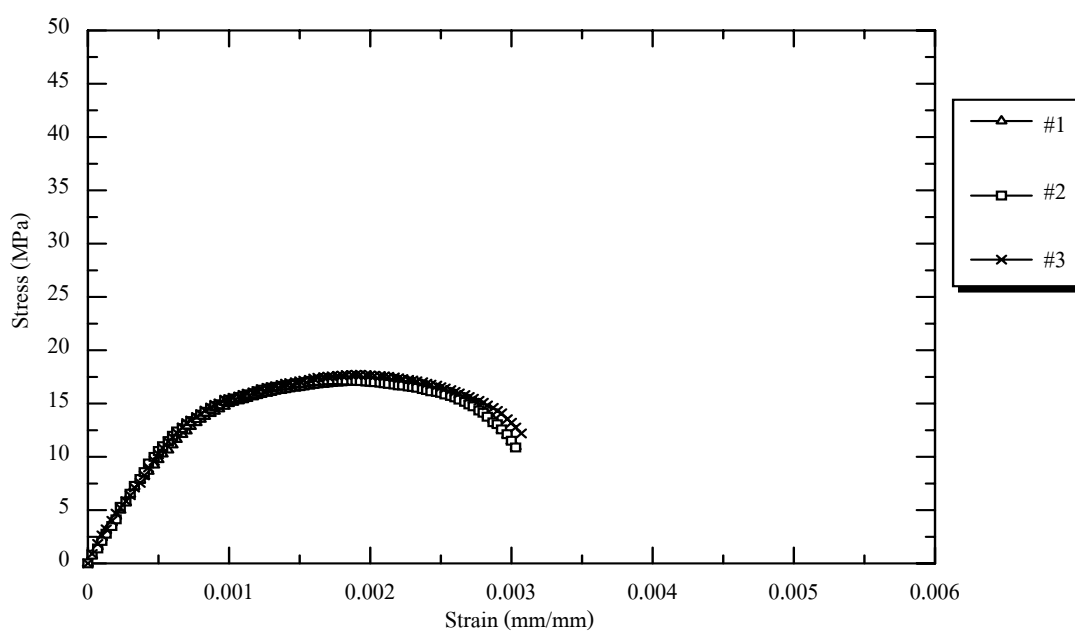
รูปที่ ค.47 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Ps2.0



รูปที่ ค.48 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Pz0.5

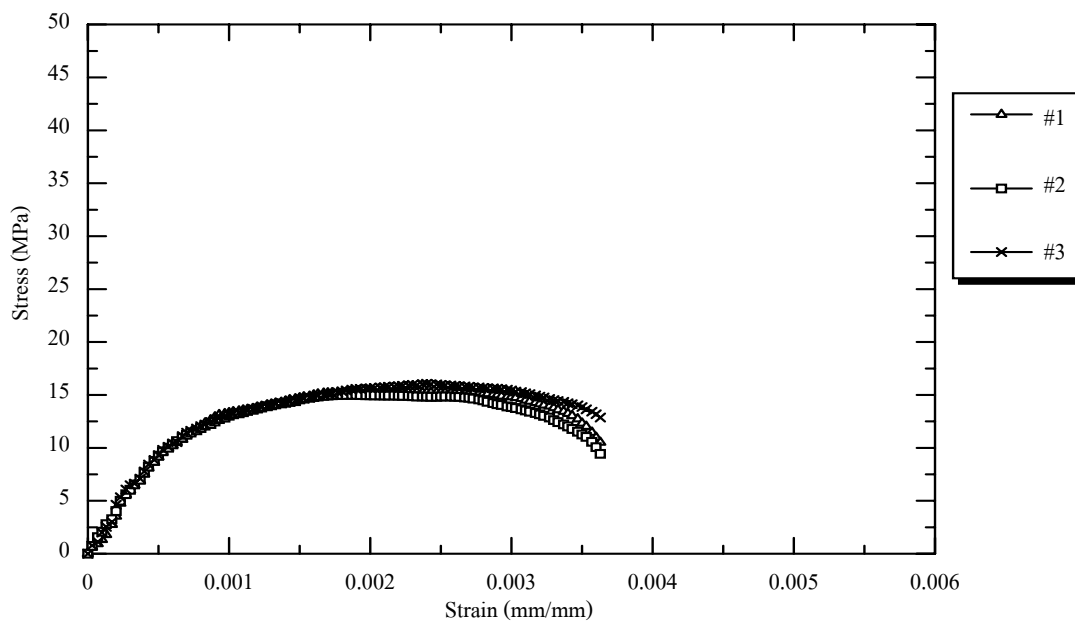


รูปที่ ค.49 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Pz1.0



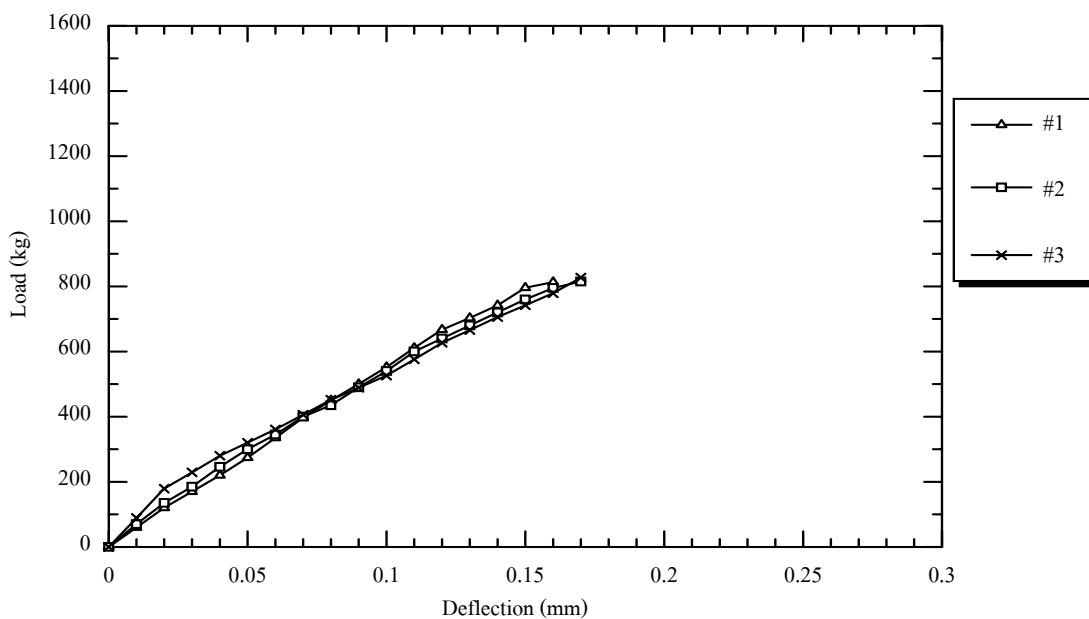


รูปที่ ค.50 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Pz1.5

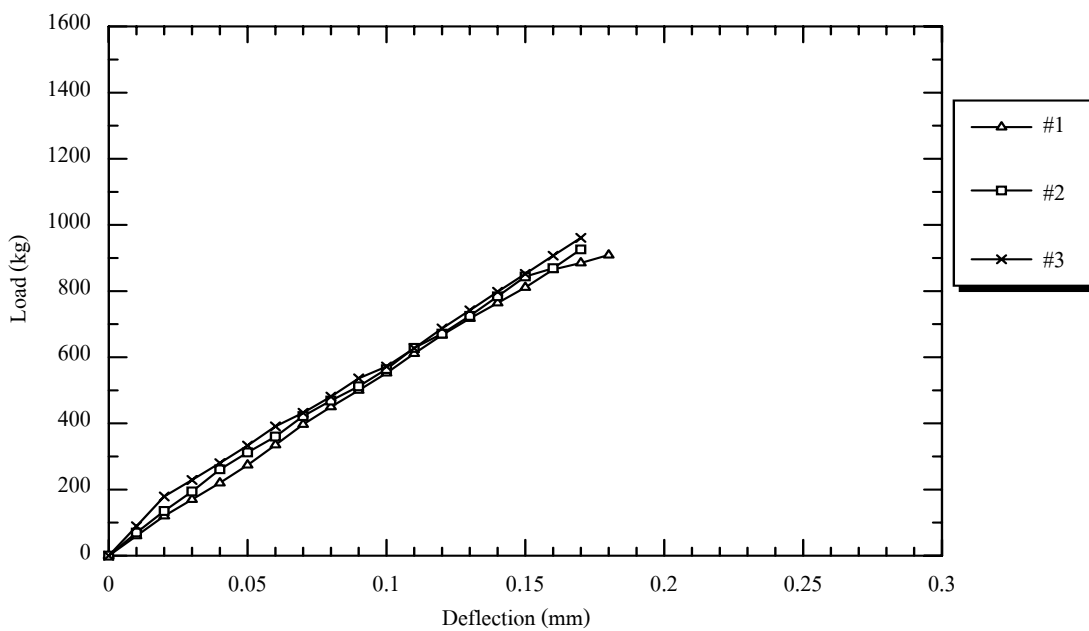


รูปที่ ค.51 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ C0.6Pz2.0

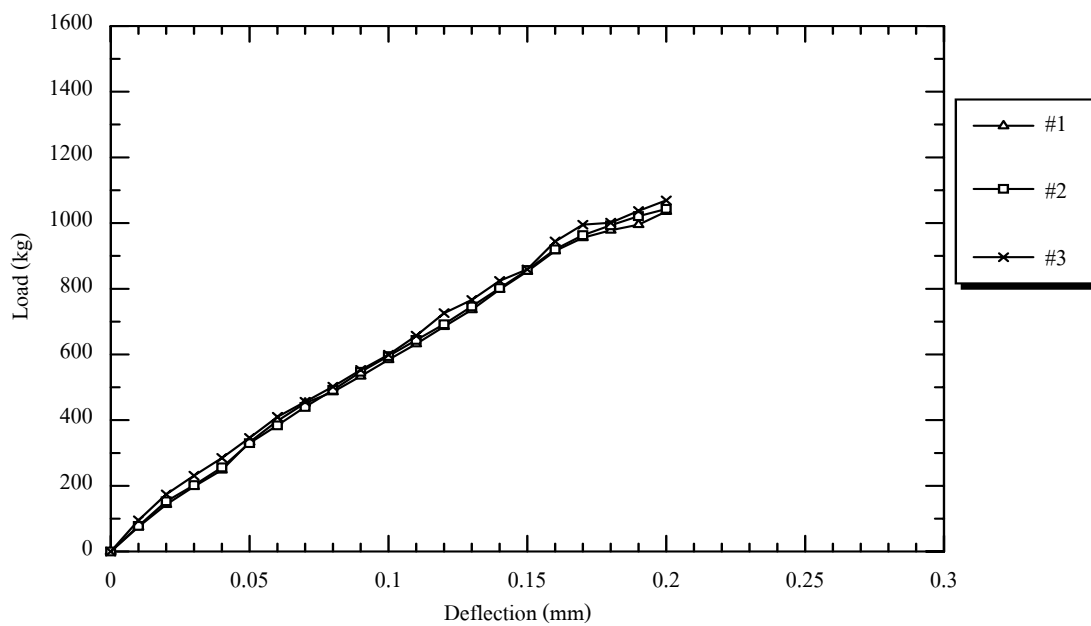
## ค.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด



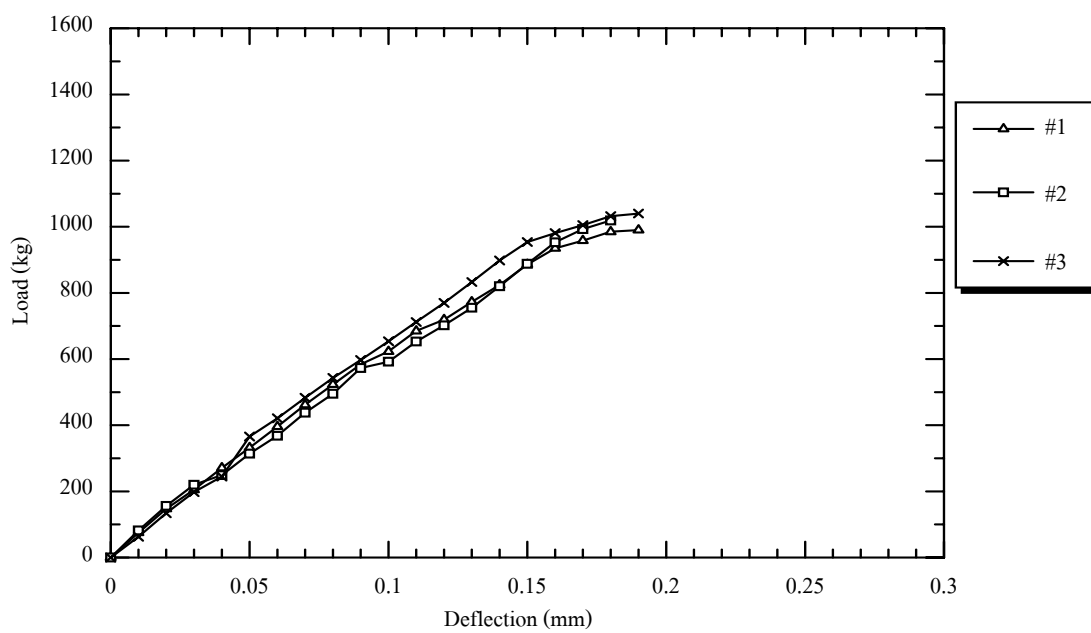
รูปที่ ค.52 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hs0.0



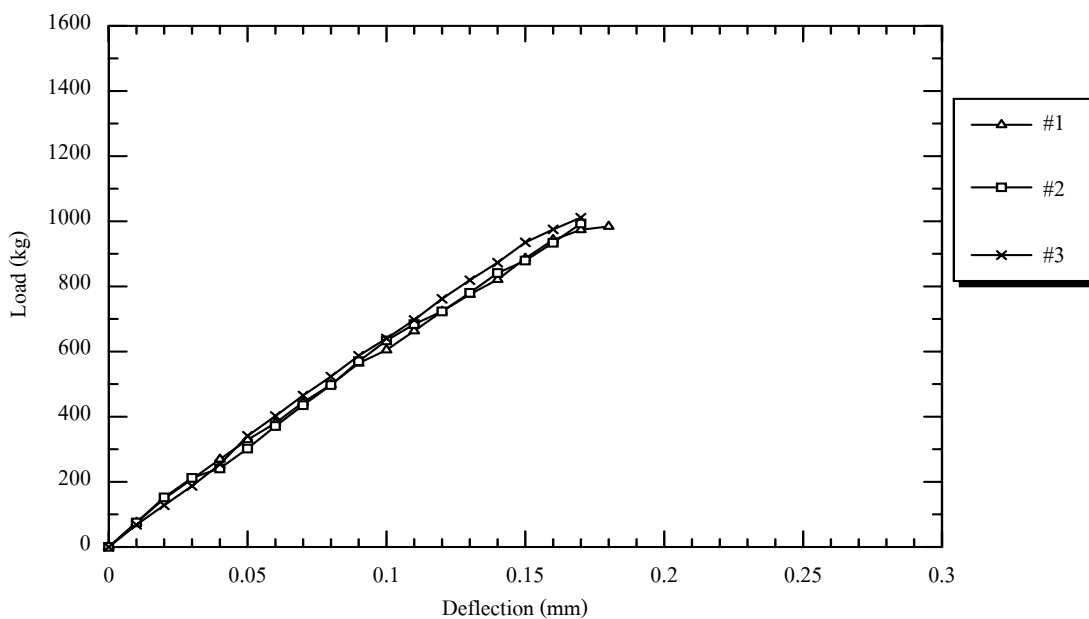
รูปที่ ค.53 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hs0.5



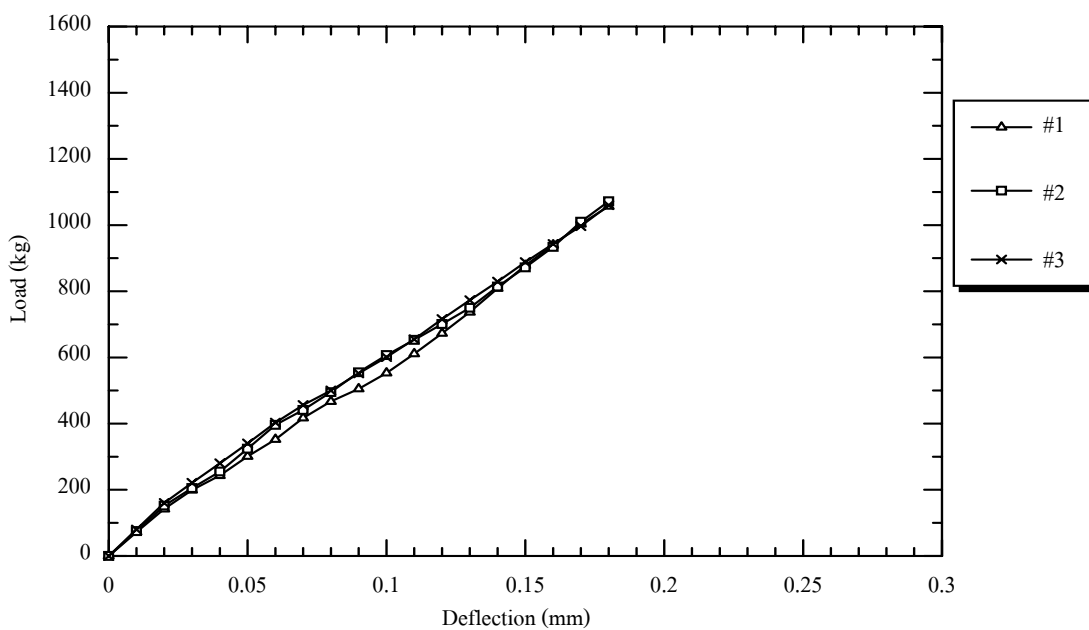
รูปที่ ค.54 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hs1.0



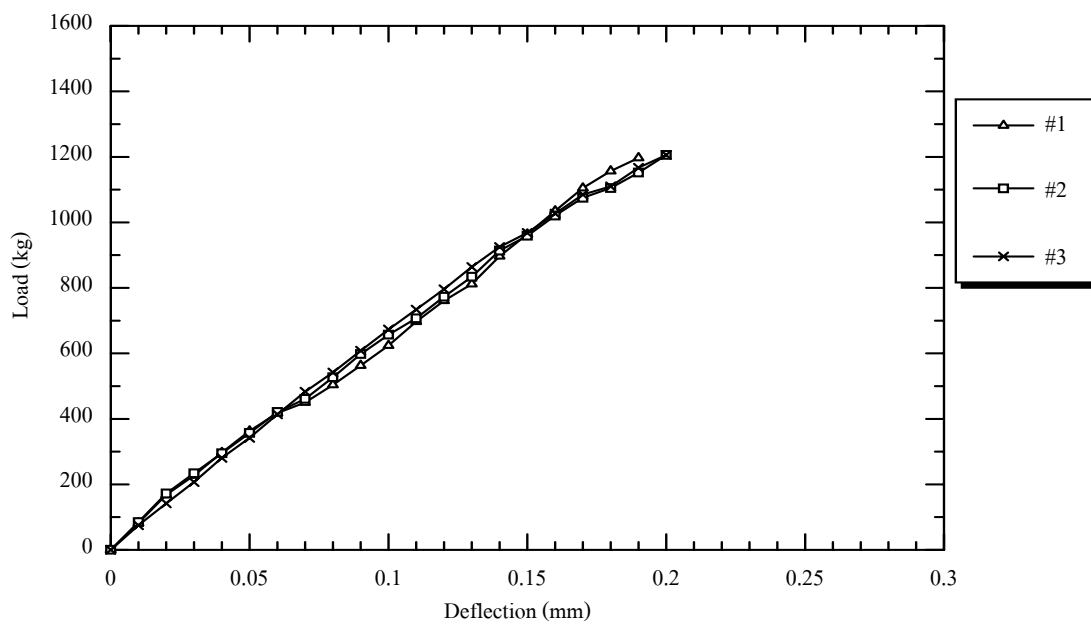
รูปที่ ค.55 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hs1.5



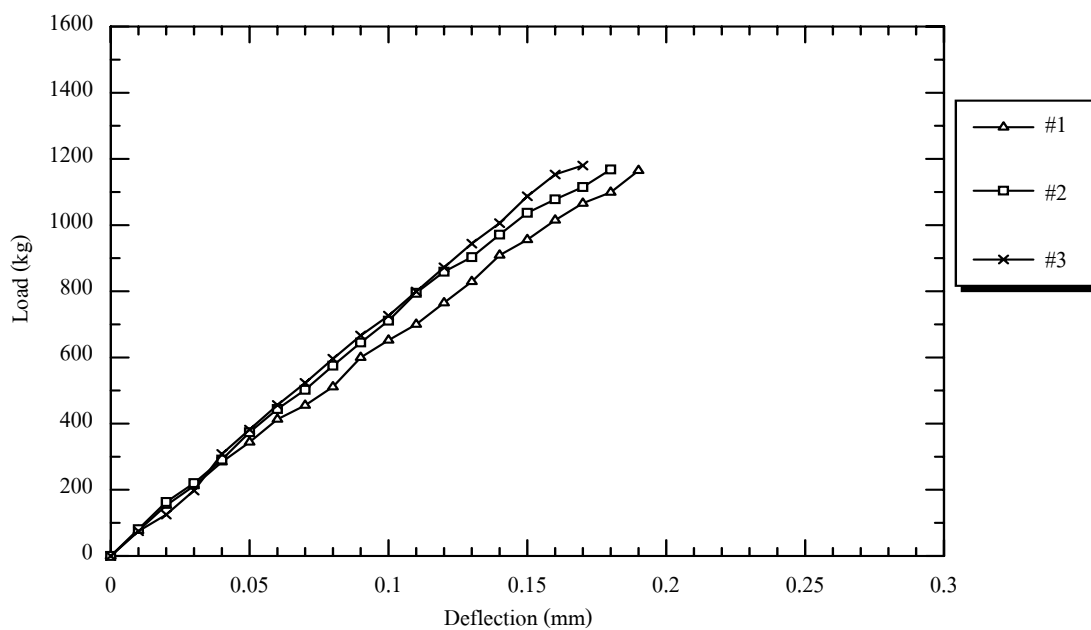
รูปที่ ค.56 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hz2.0



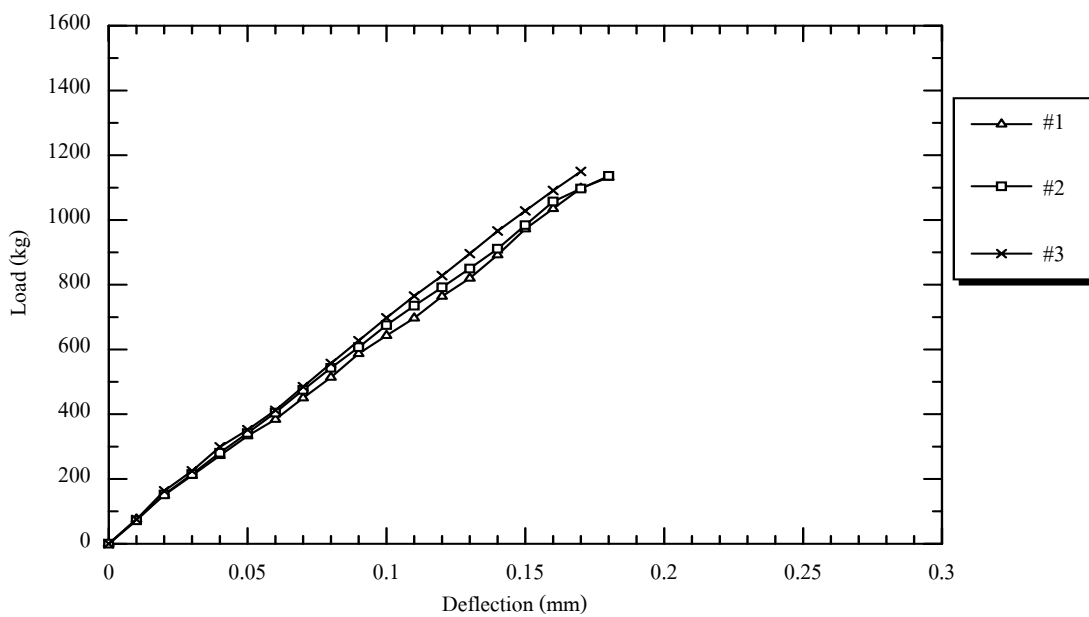
รูปที่ ค.57 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hz0.5



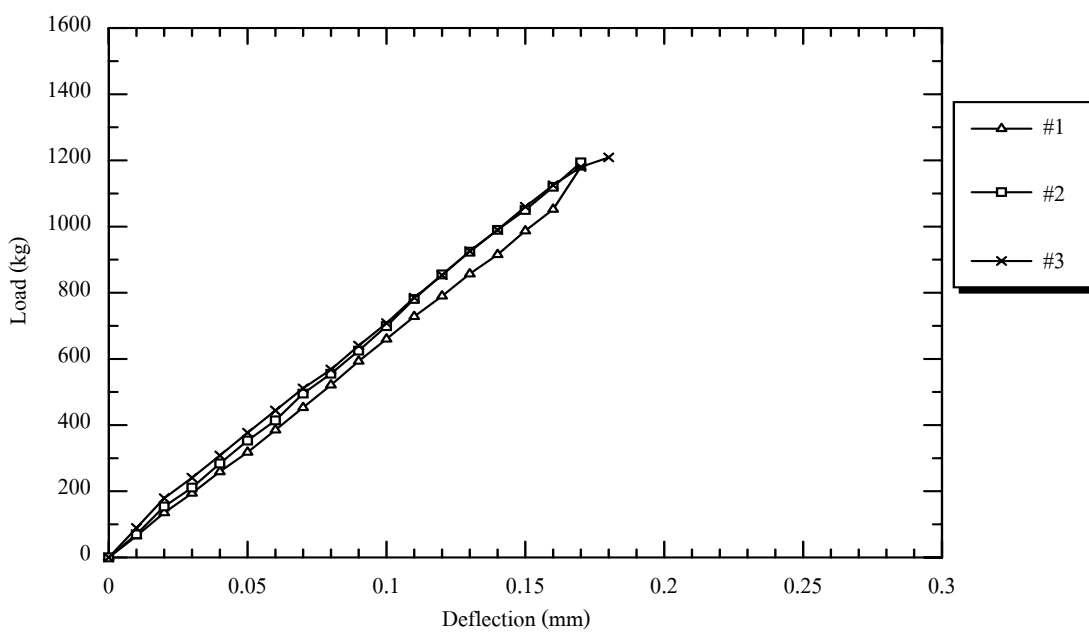
รูปที่ ค.58 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hz1.0



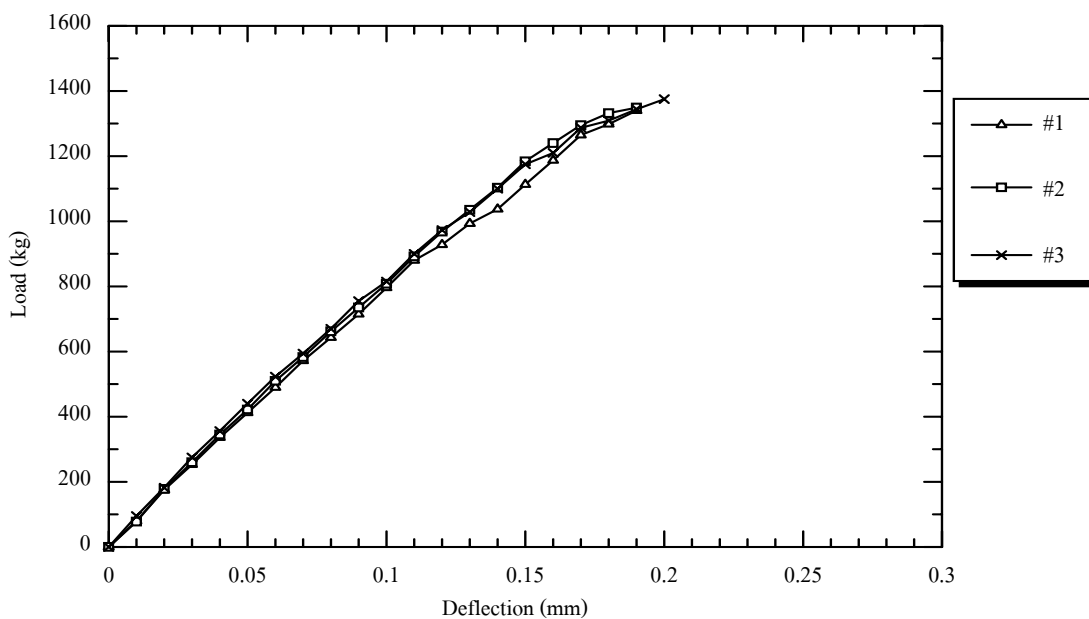
รูปที่ ค.59 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hz1.5



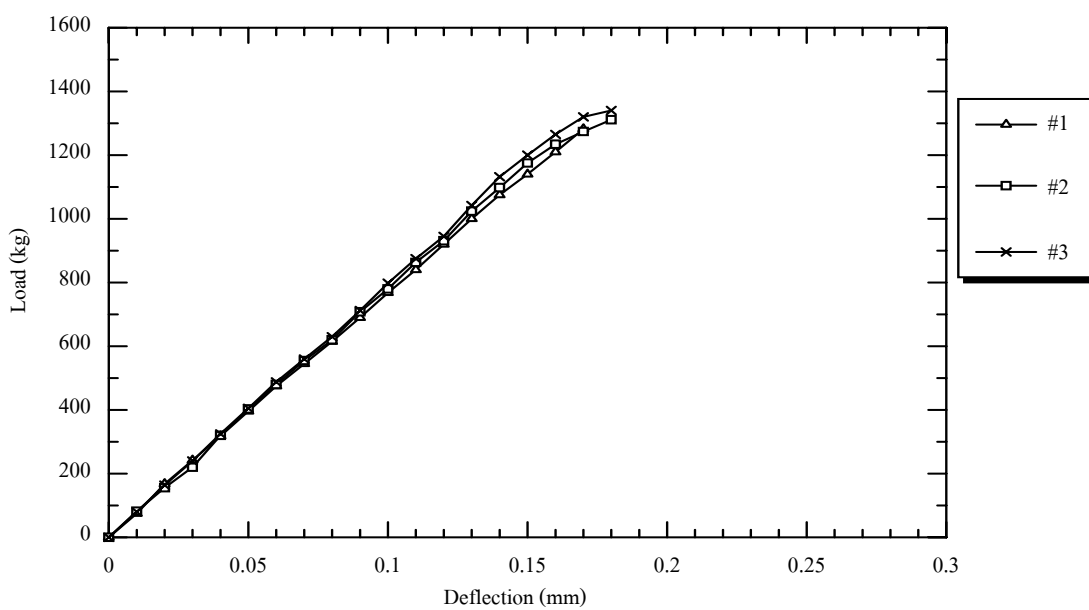
รูปที่ ค.60 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Hz2.0



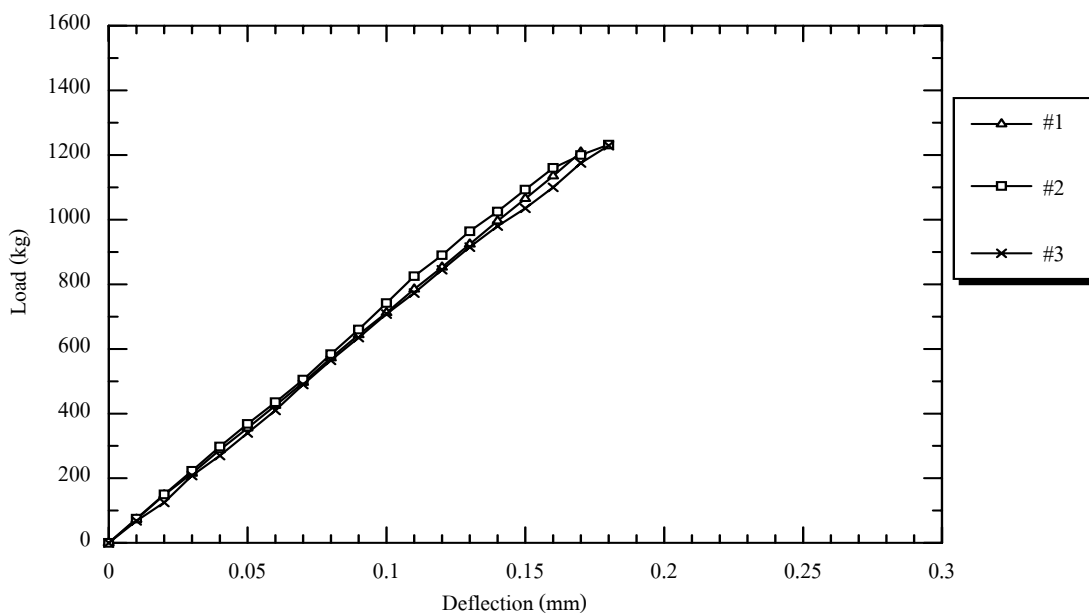
รูปที่ ค.61 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Ps0.5



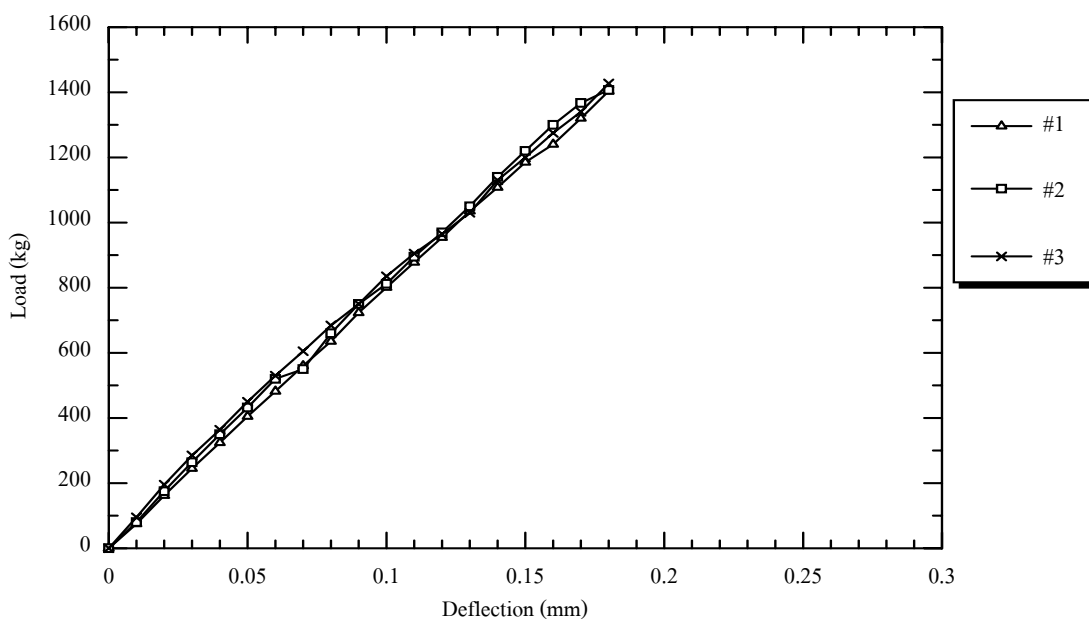
รูปที่ ค.62 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Ps1.0



รูปที่ ค.63 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Ps1.5

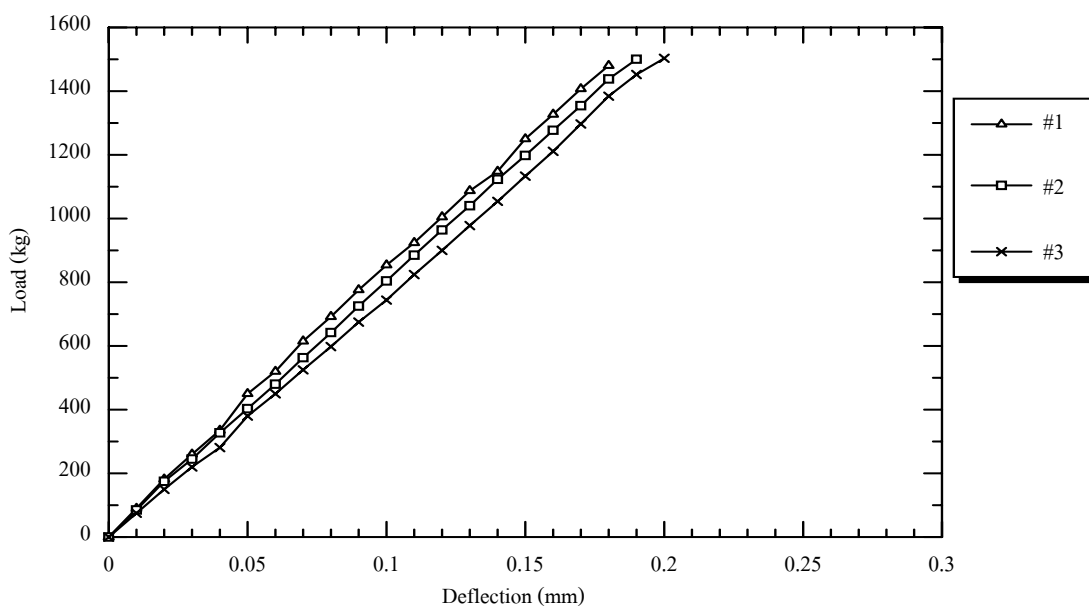


รูปที่ ค.64 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Ps2.0

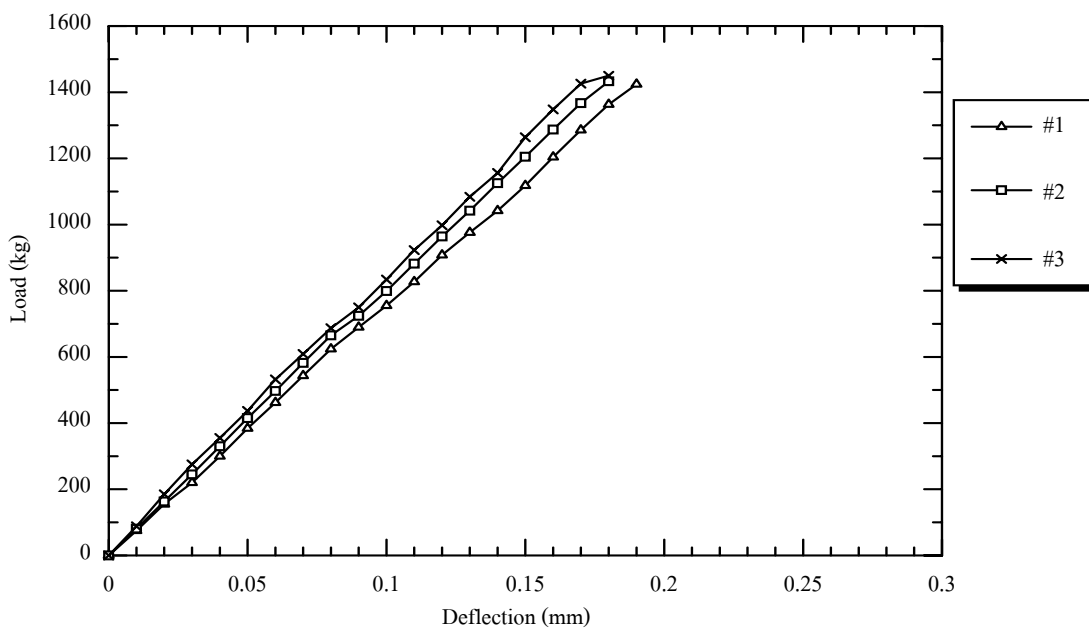


รูปที่ ค.65 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Pz0.5

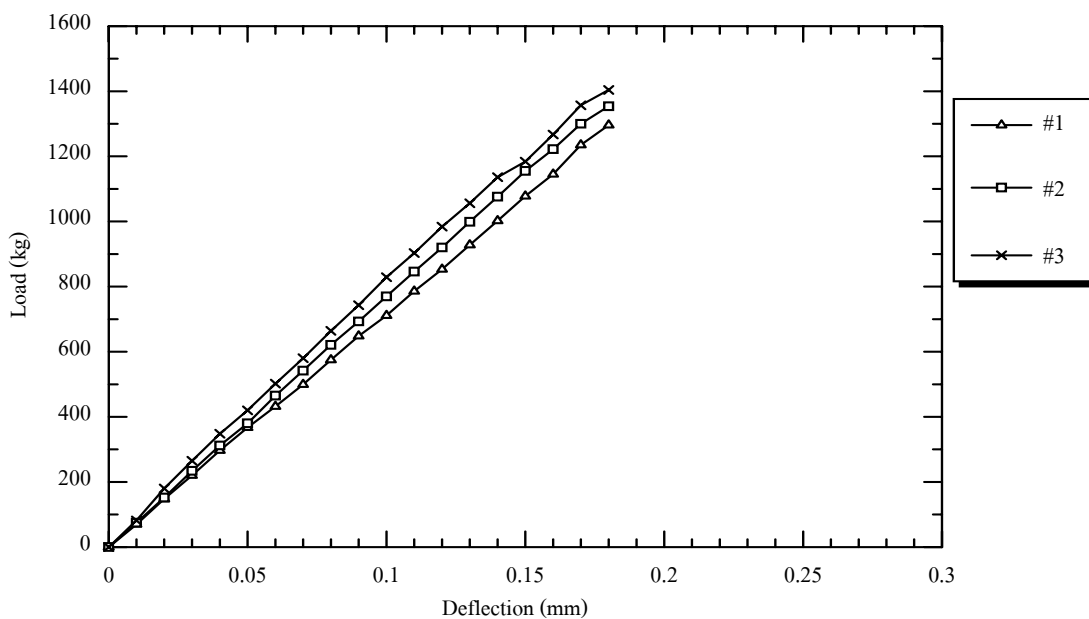




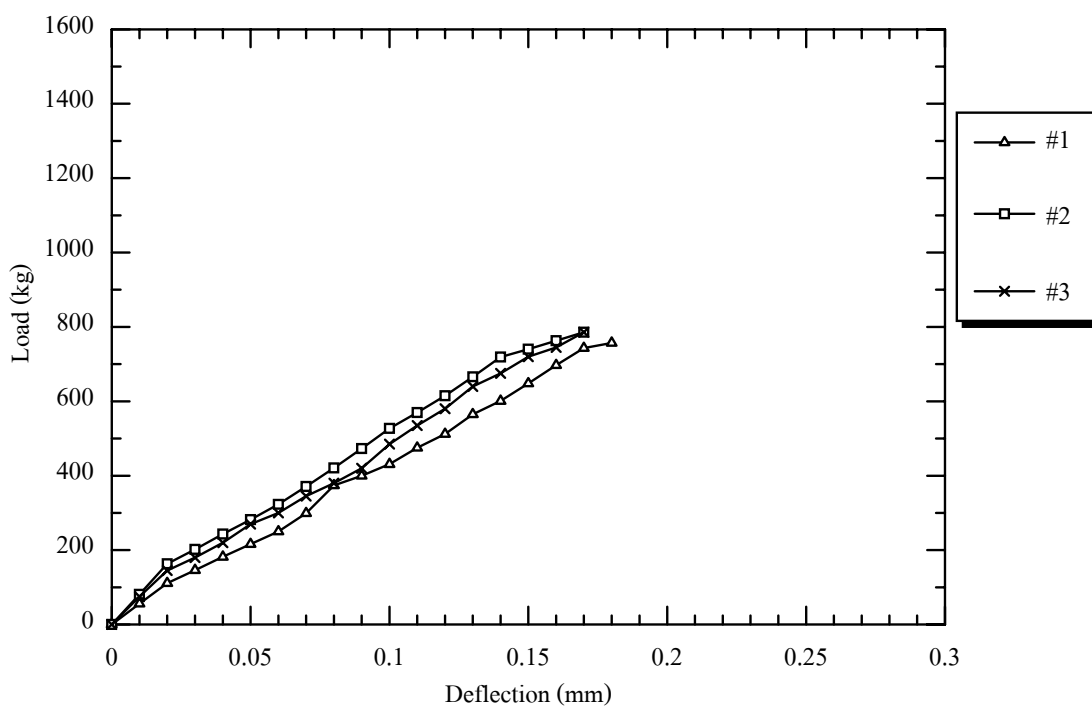
รูปที่ ค.66 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Pz1.0



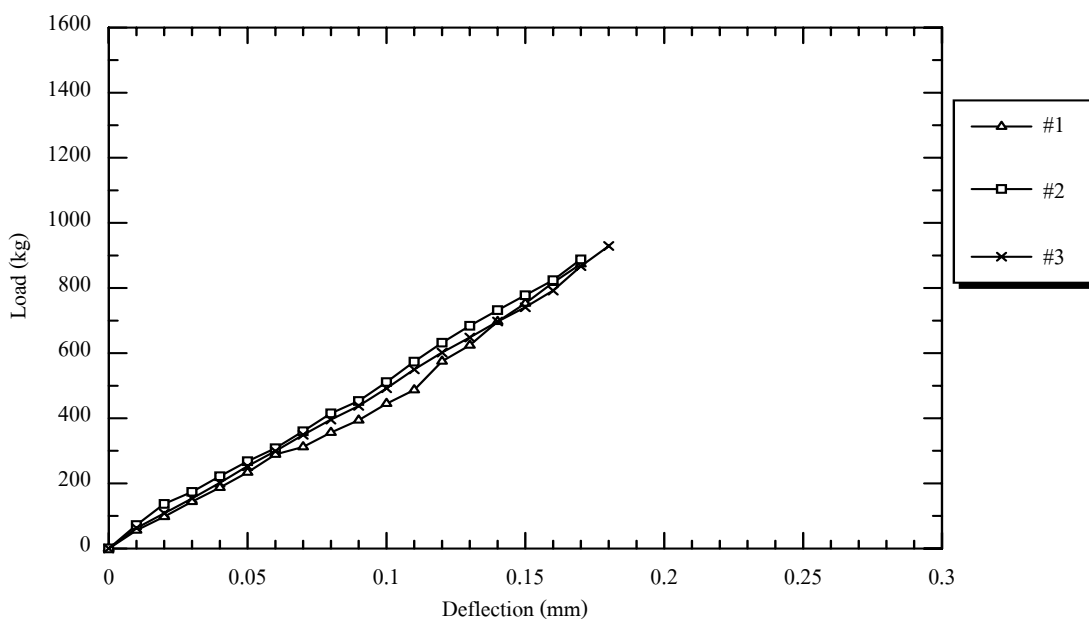
รูปที่ ค.67 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Pz1.5



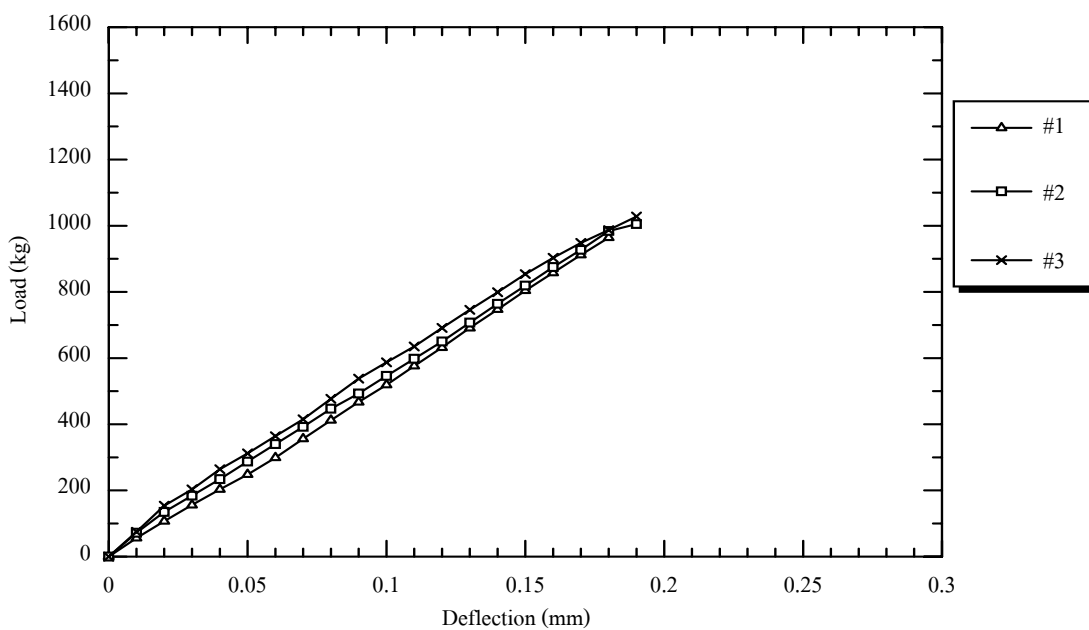
รูปที่ ค.68 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.4Pz2.0



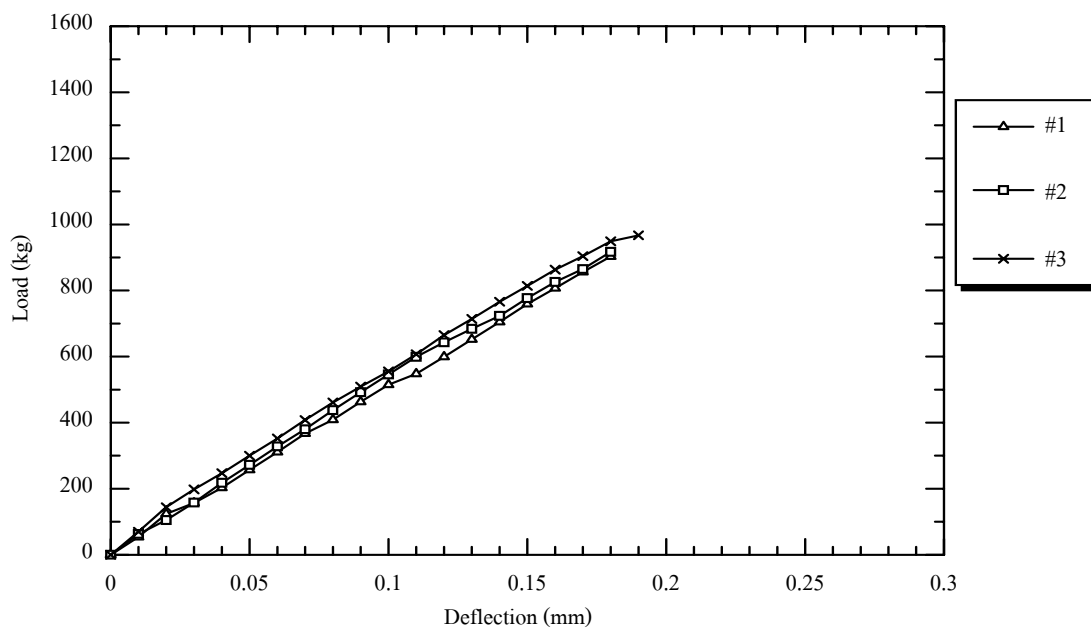
รูปที่ ค.69 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hs0.0



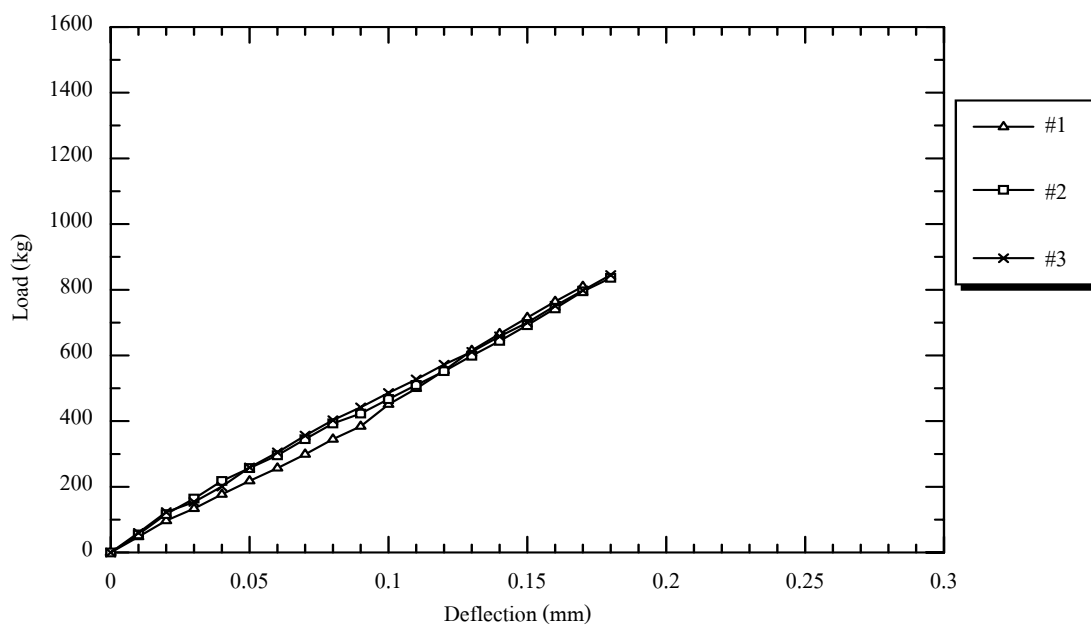
รูปที่ ค.70 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hs0.5



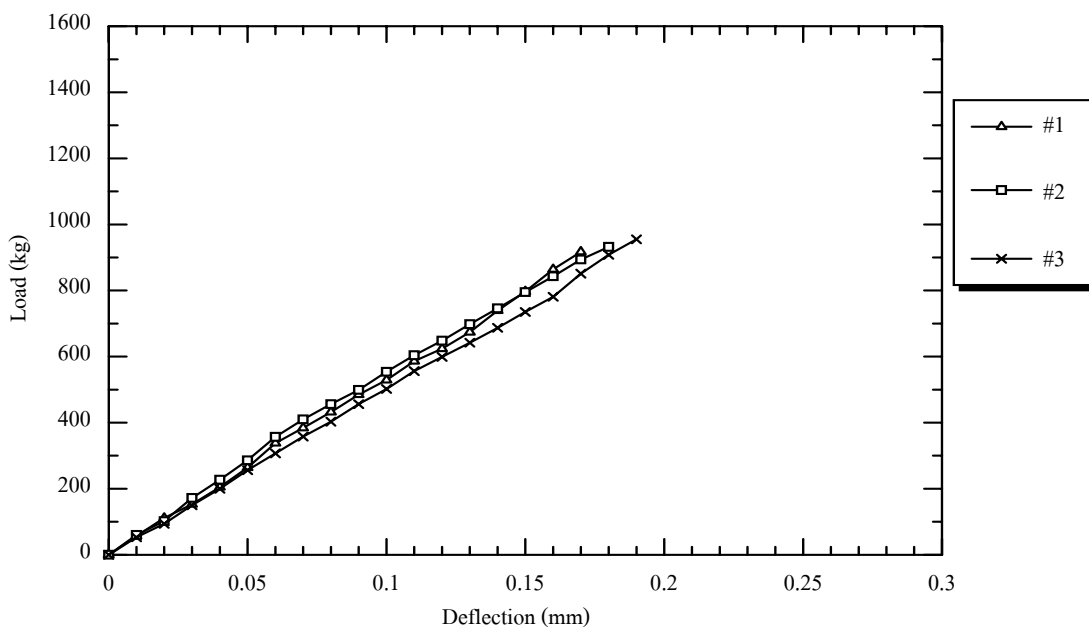
รูปที่ ค.71 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hs1.0



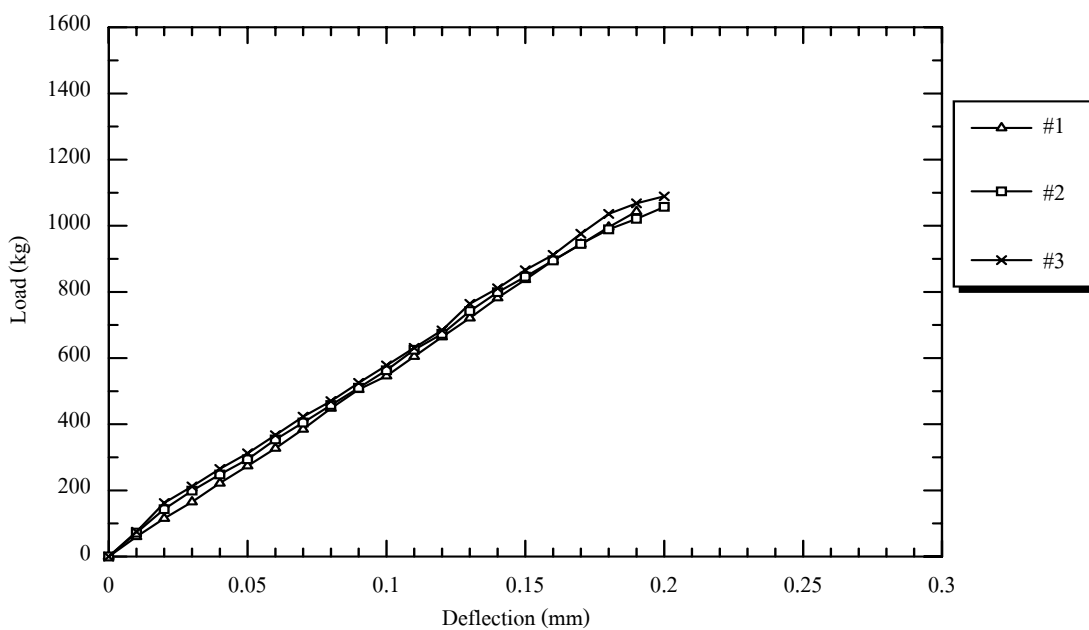
รูปที่ ค.72 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hs1.5



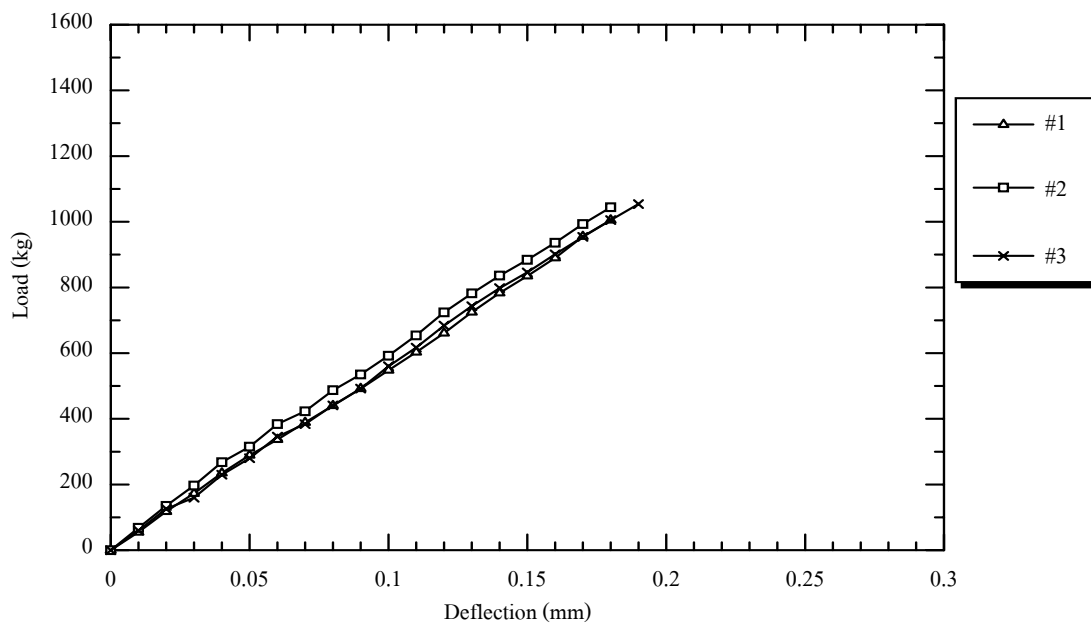
รูปที่ ค.73 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hs2.0



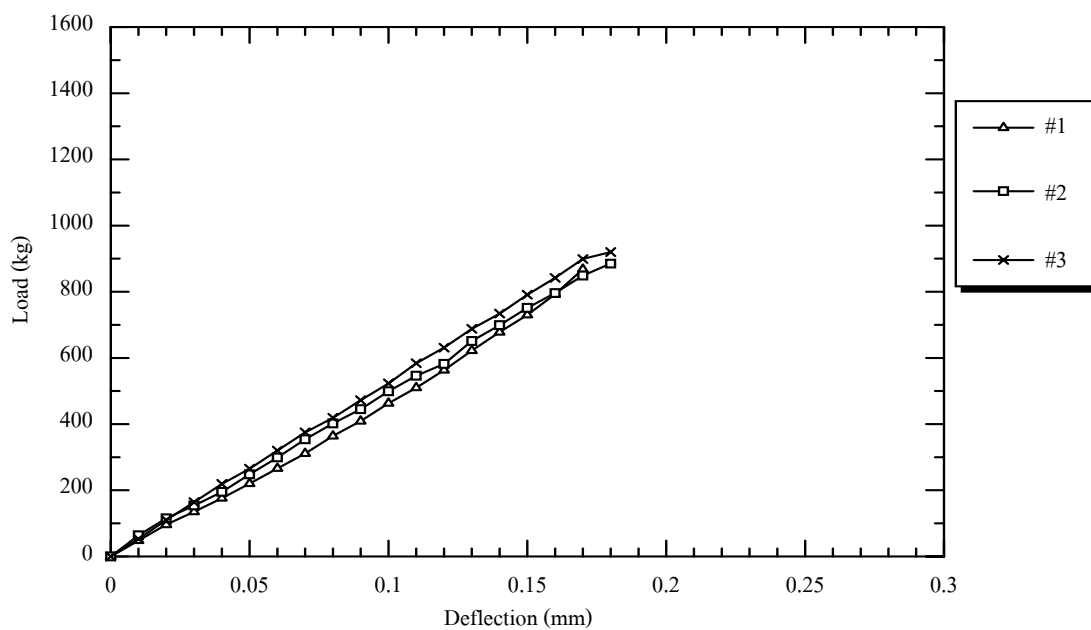
รูปที่ ค.74 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hz0.5



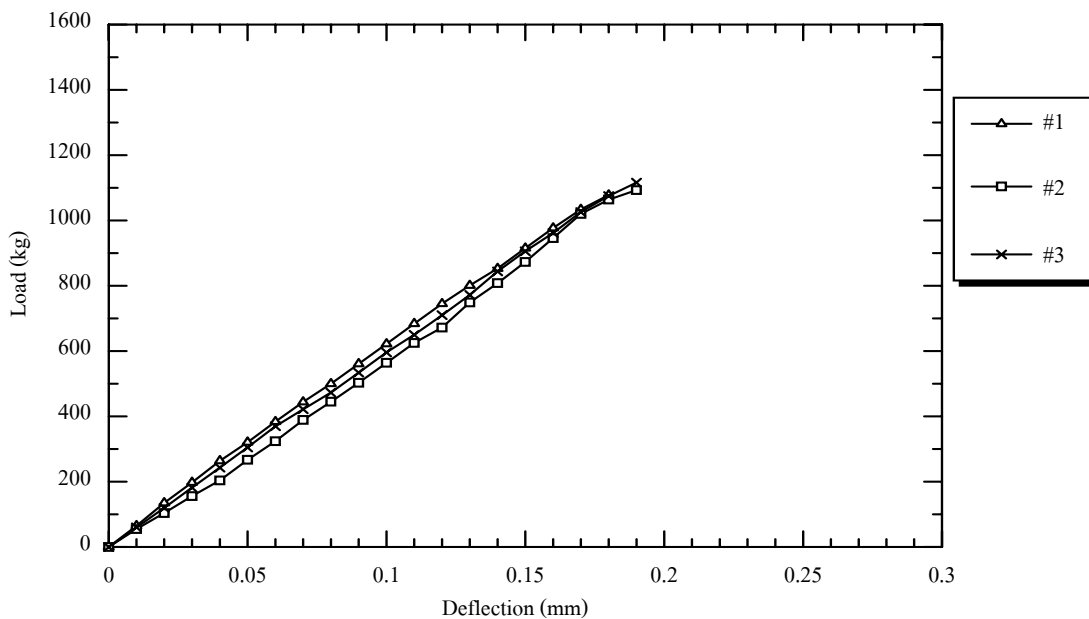
รูปที่ ค.75 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hz1.0



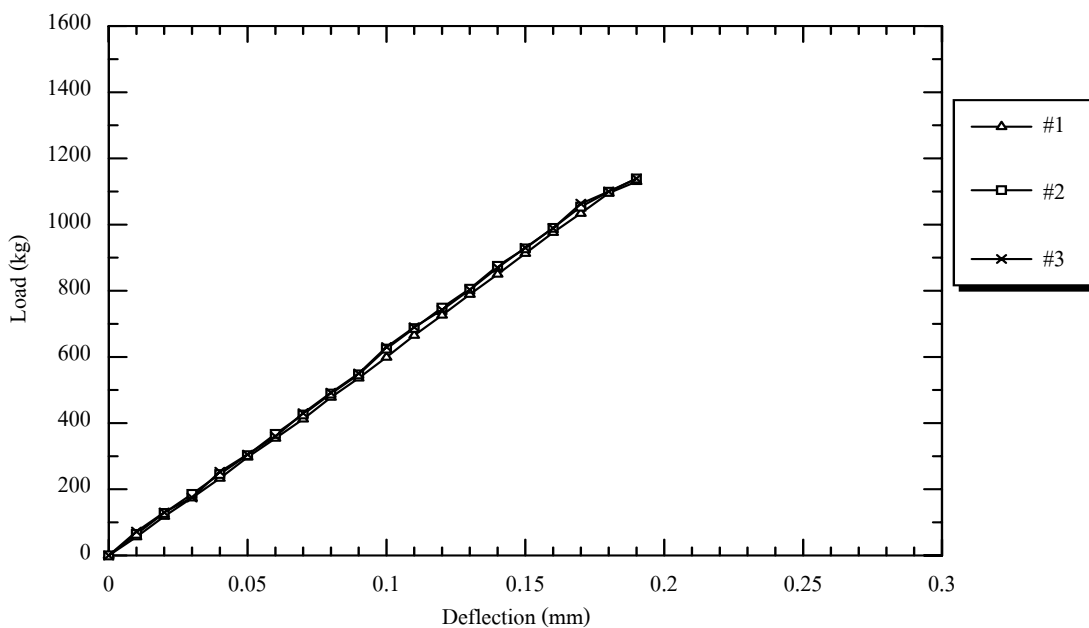
รูปที่ ค.76 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hz1.5



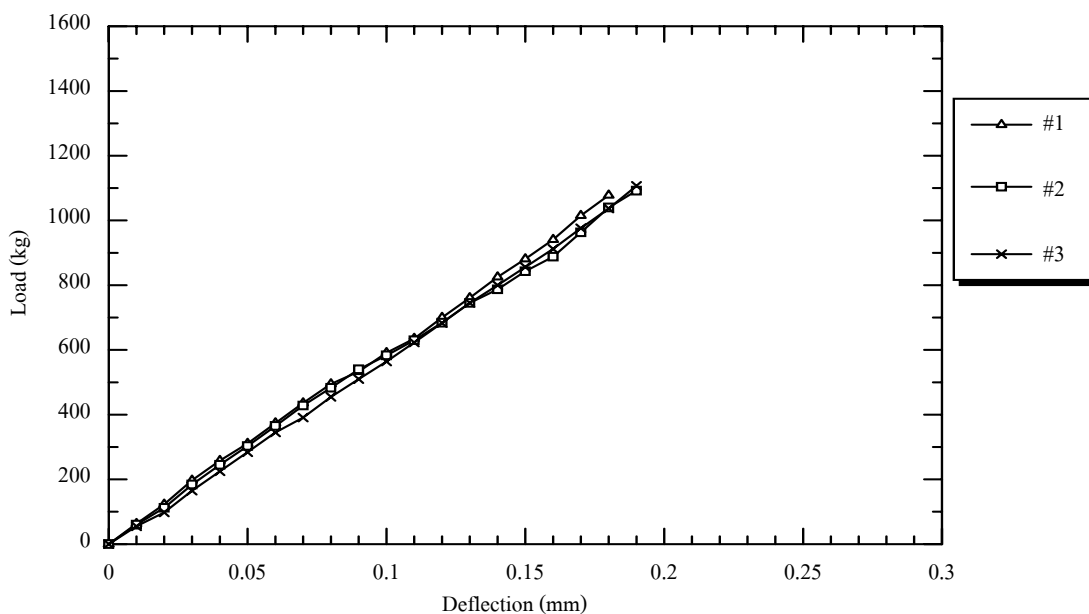
รูปที่ ค.77 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Hz2.0



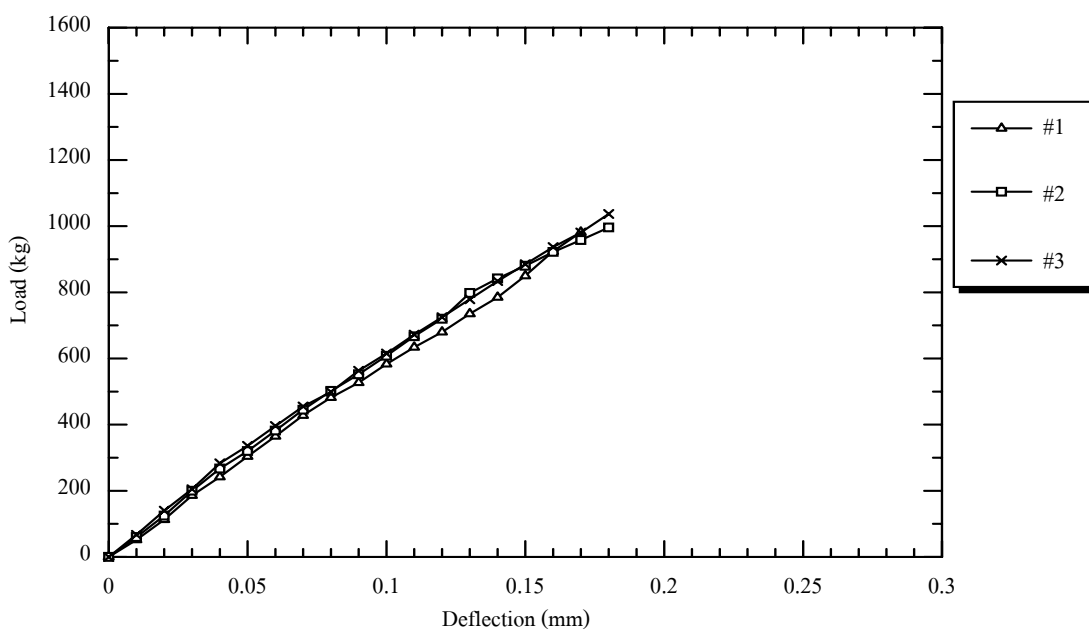
รูปที่ ค.78 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Ps0.5



รูปที่ ค.79 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Ps1.0

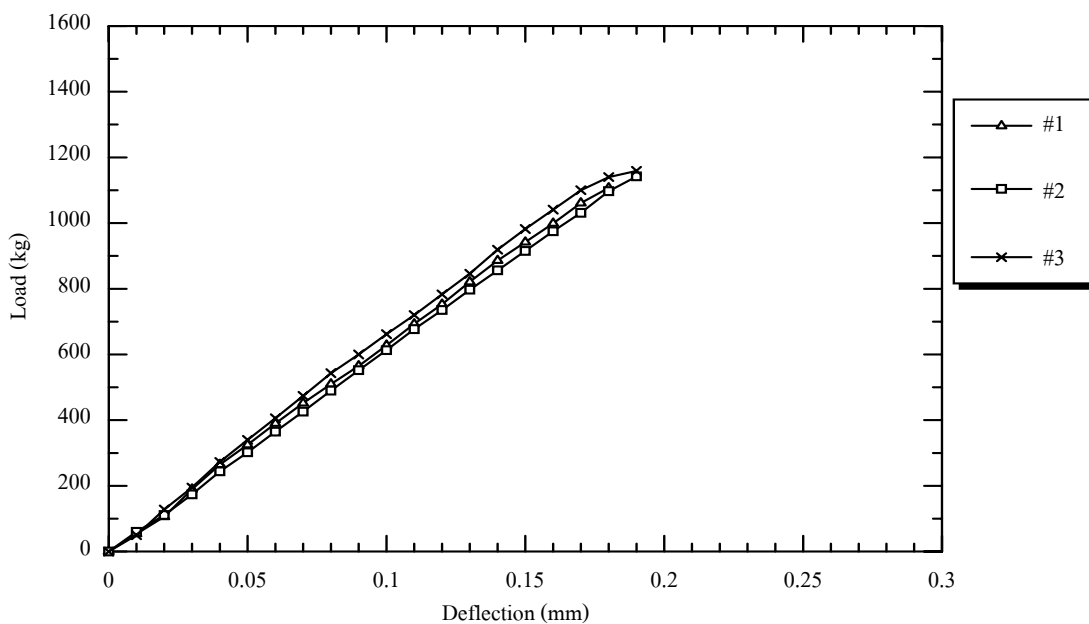


รูปที่ ๘.๘๐ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Ps1.5

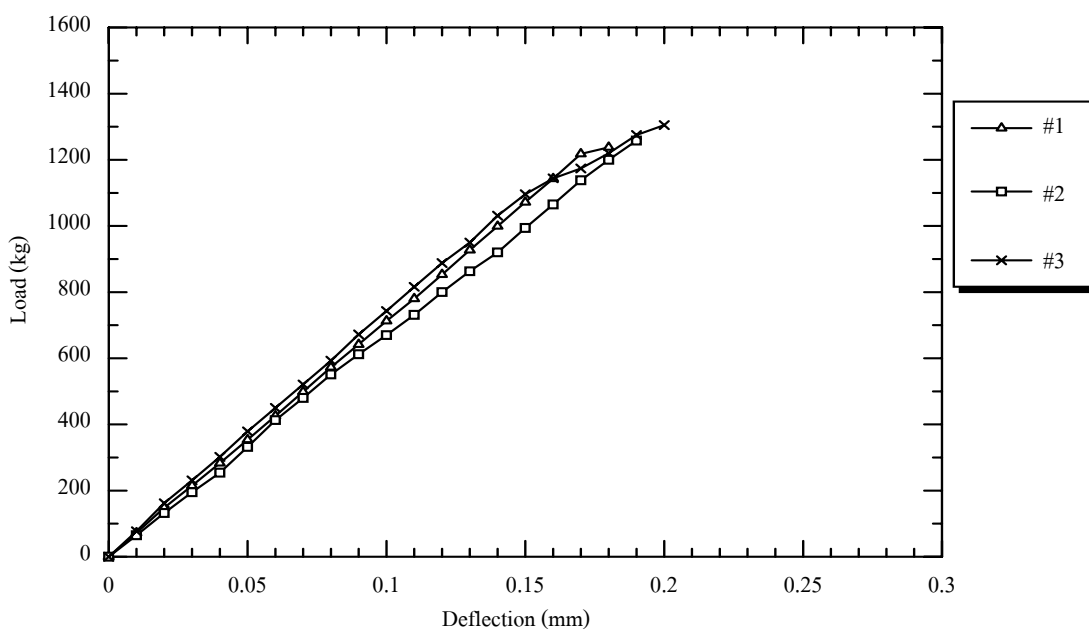


รูปที่ ๘.๘๑ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Ps2.0

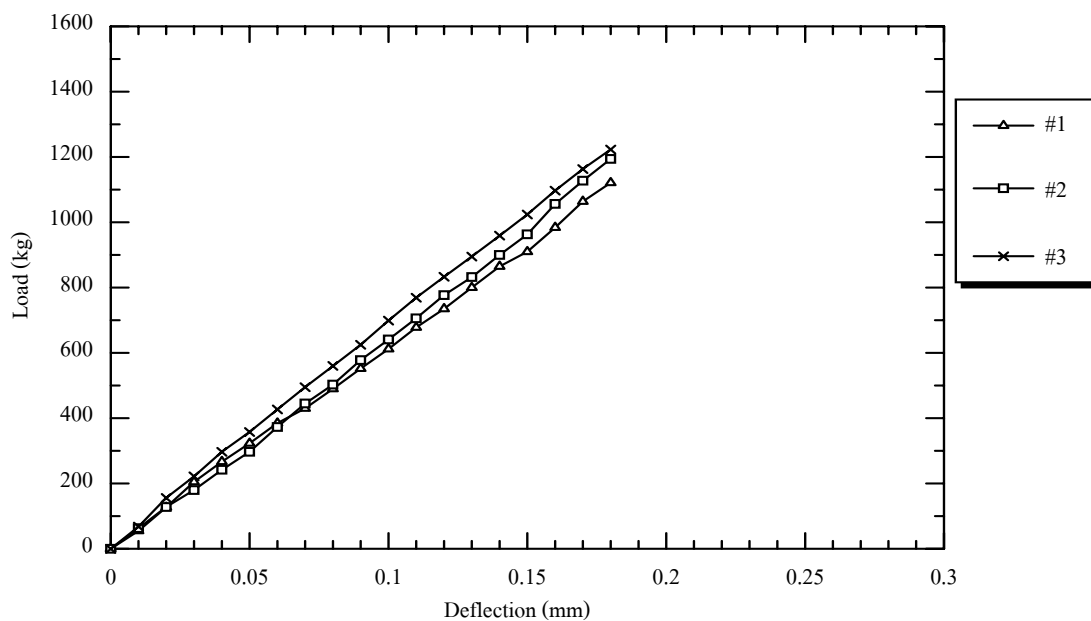




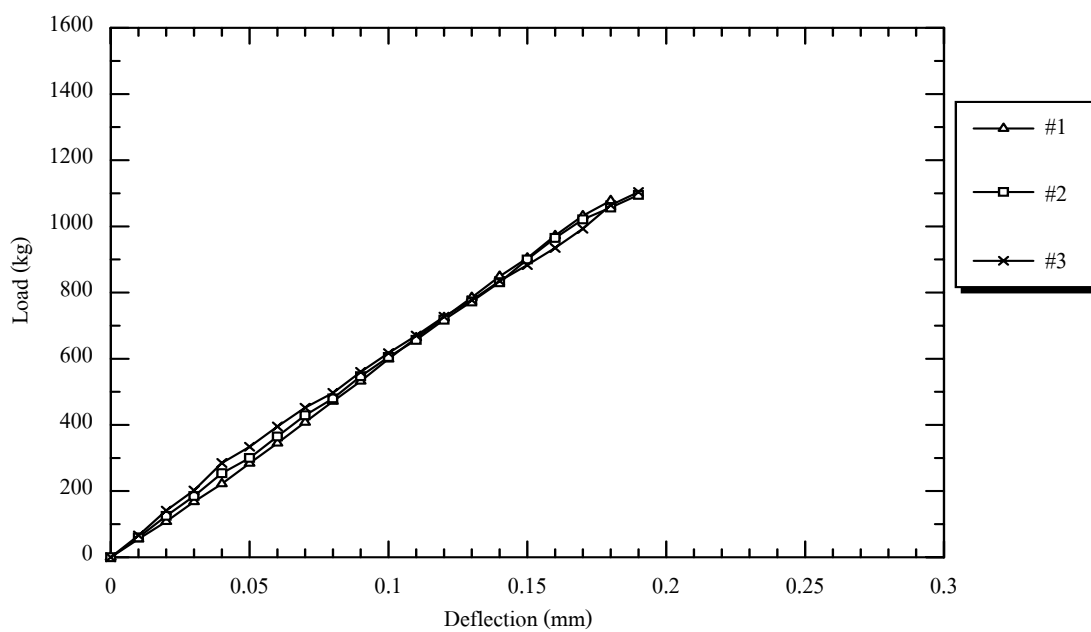
รูปที่ ค.82 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Pz0.5



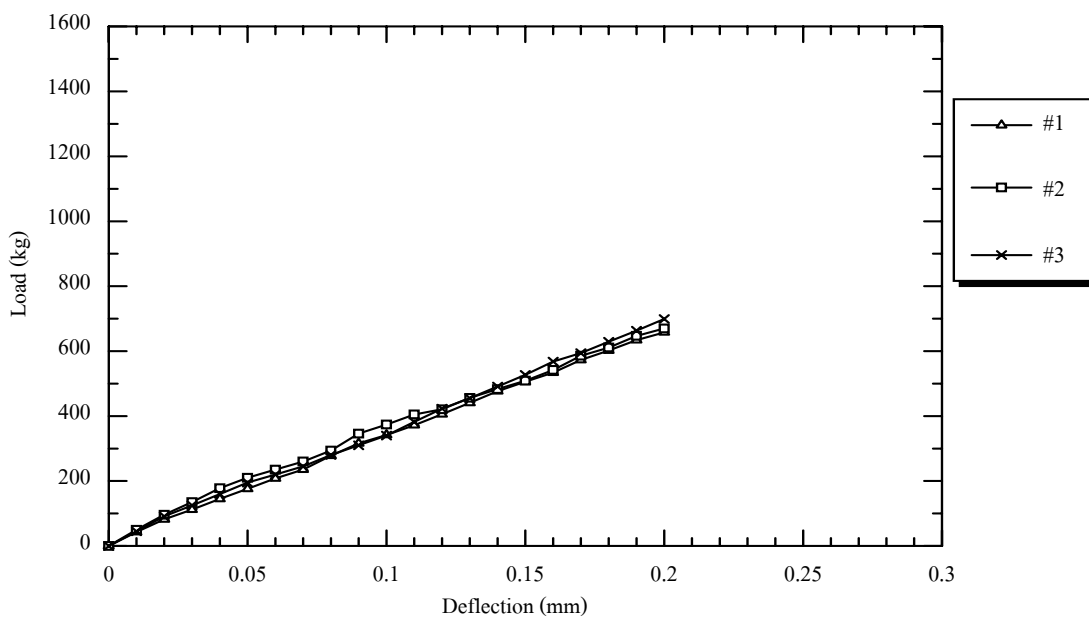
รูปที่ ค.83 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Pz1.0



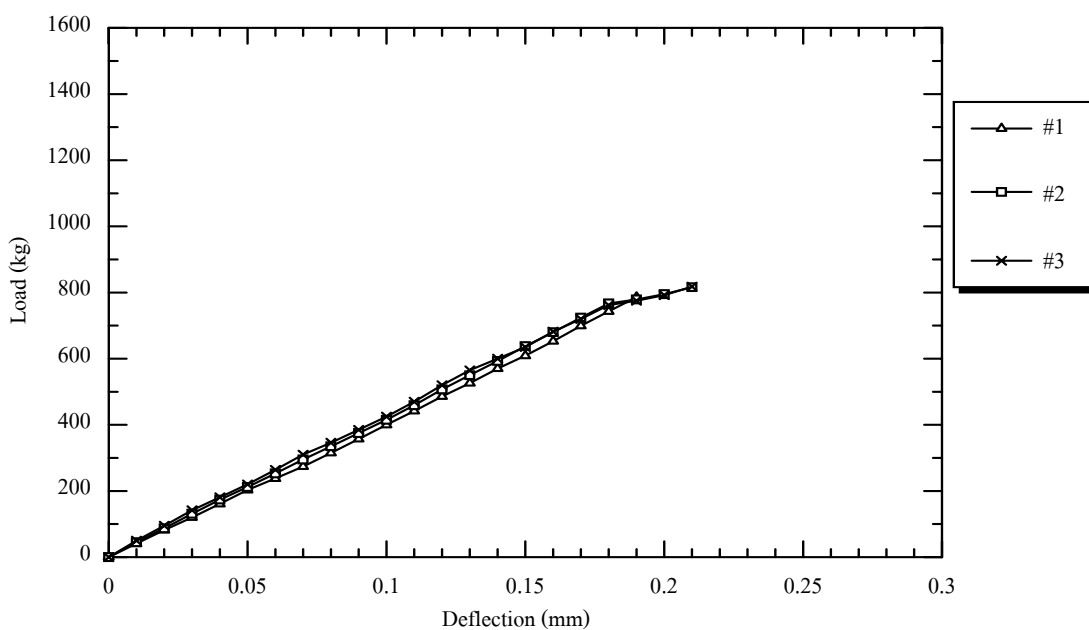
รูปที่ ๘.๘๔ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Pz1.5



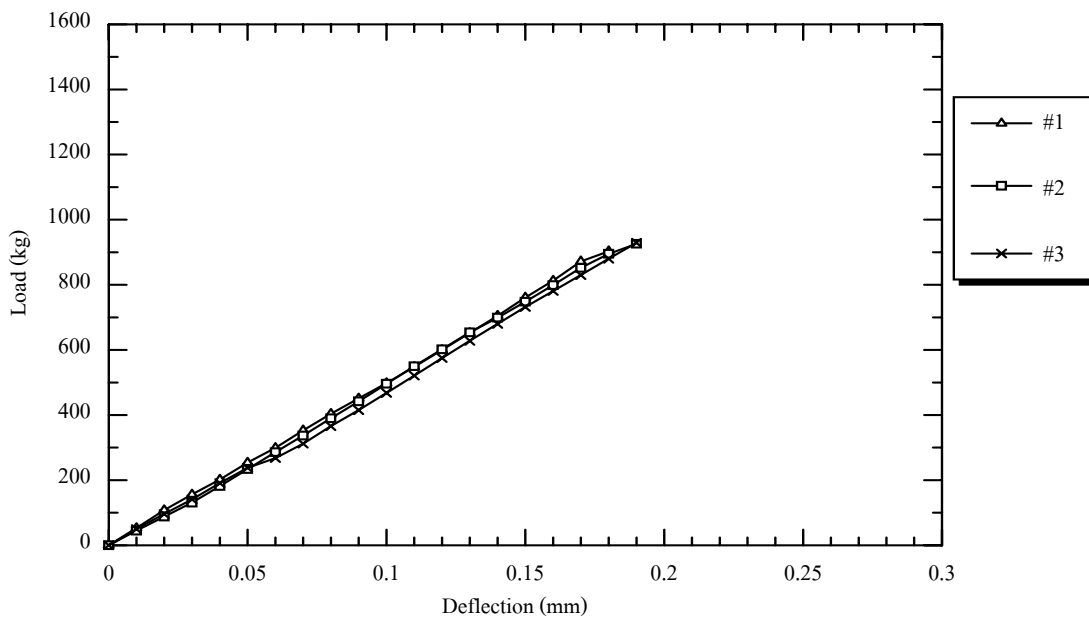
รูปที่ ๘.๘๕ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.5Pz2.0



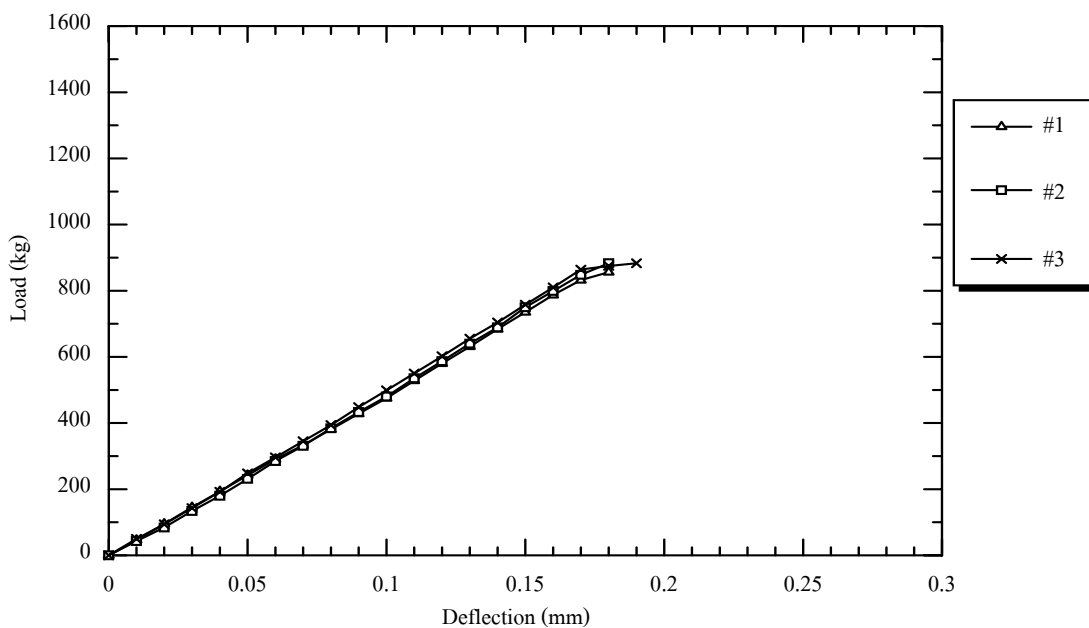
รูปที่ ๘.๘๖ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hs0.0



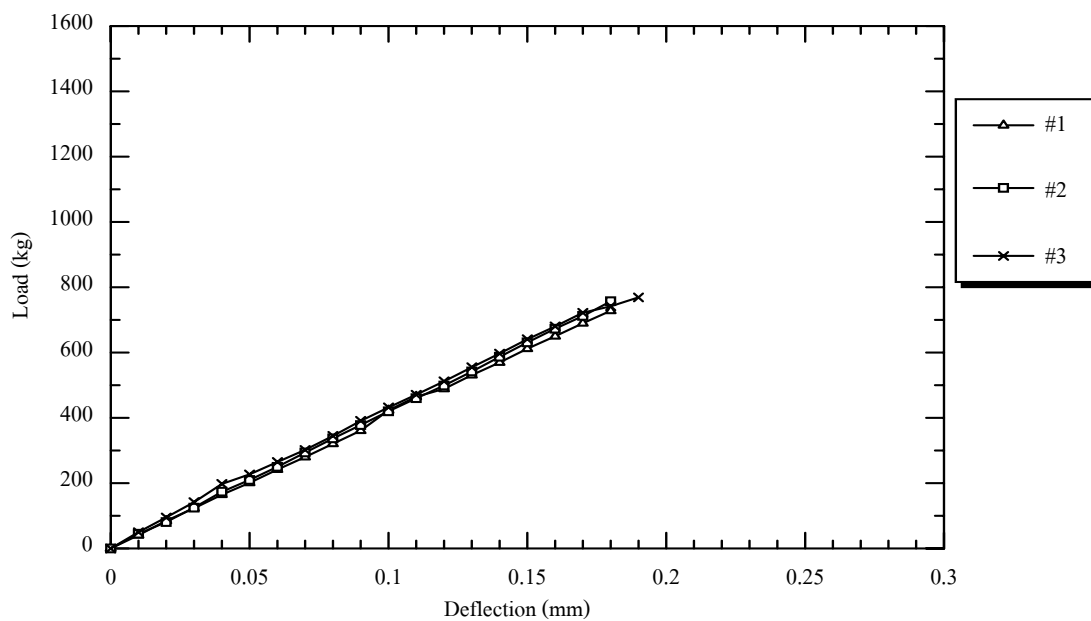
รูปที่ ๘.๘๗ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hs0.5



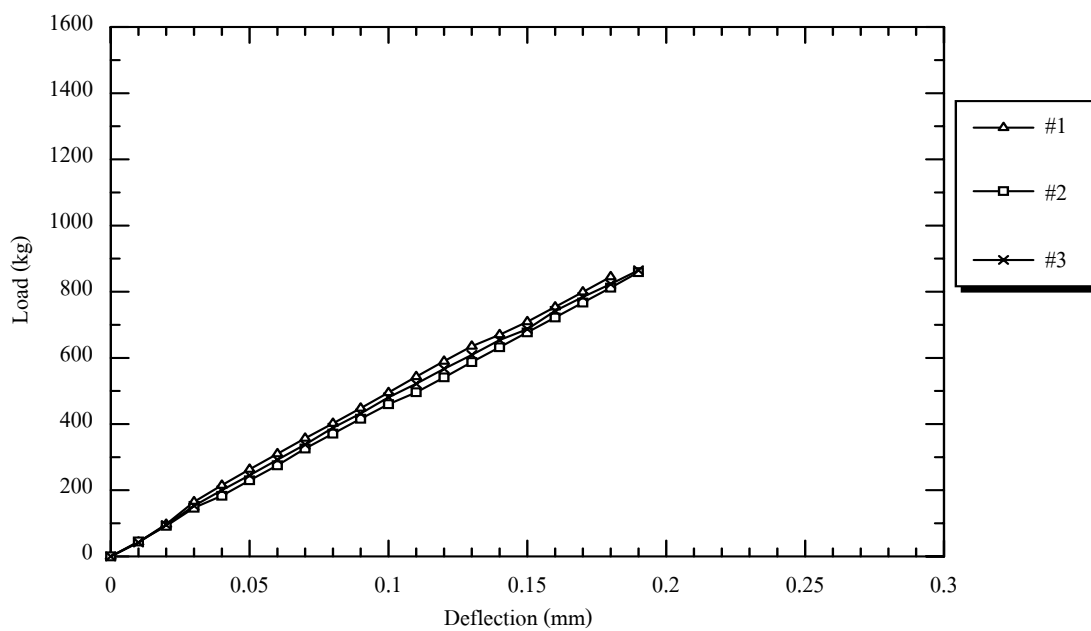
รูปที่ ค.88 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hs1.0



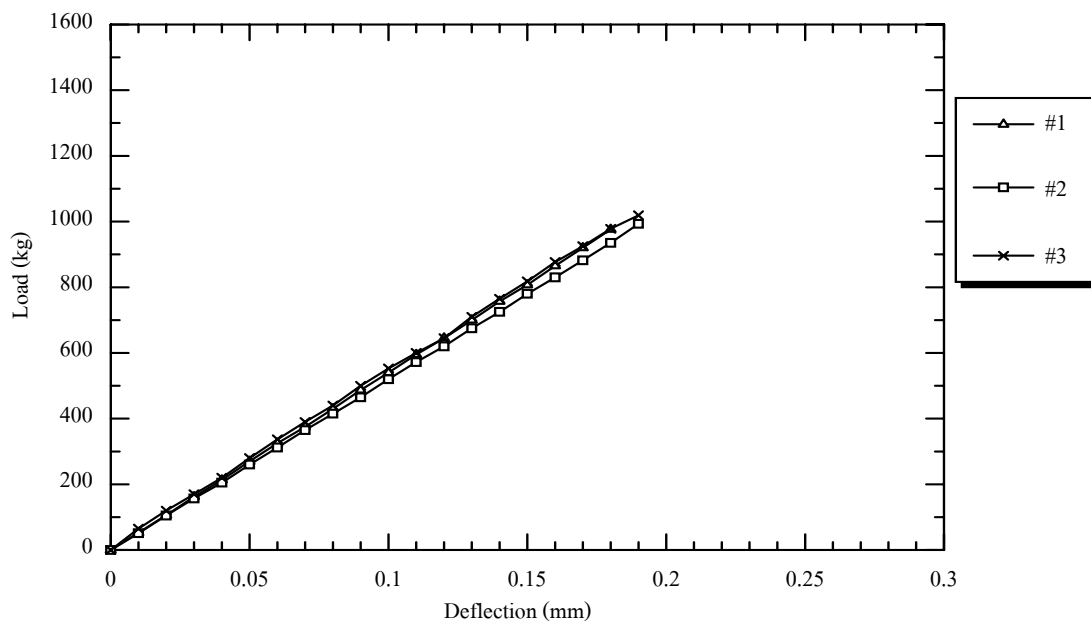
รูปที่ ค.89 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hs1.5



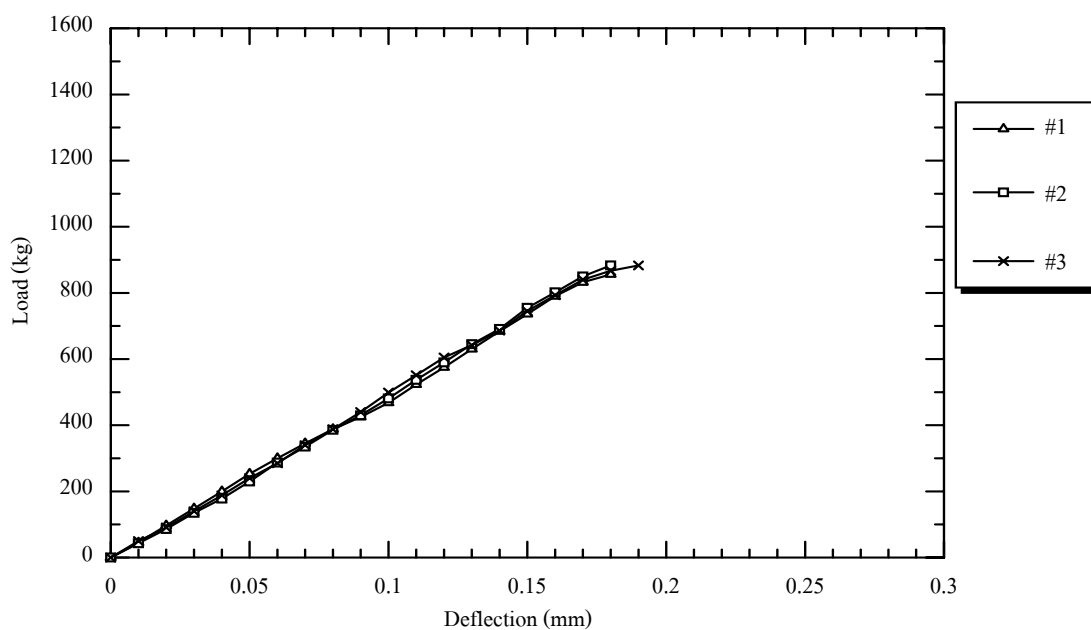
รูปที่ ค.90 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hz2.0



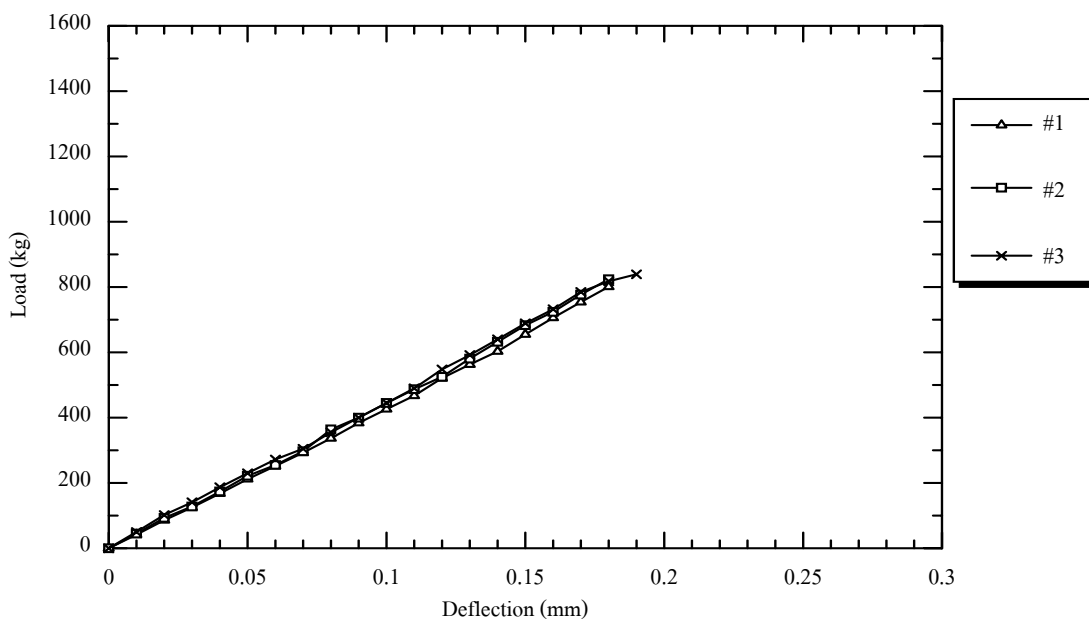
รูปที่ ค.91 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hz0.5



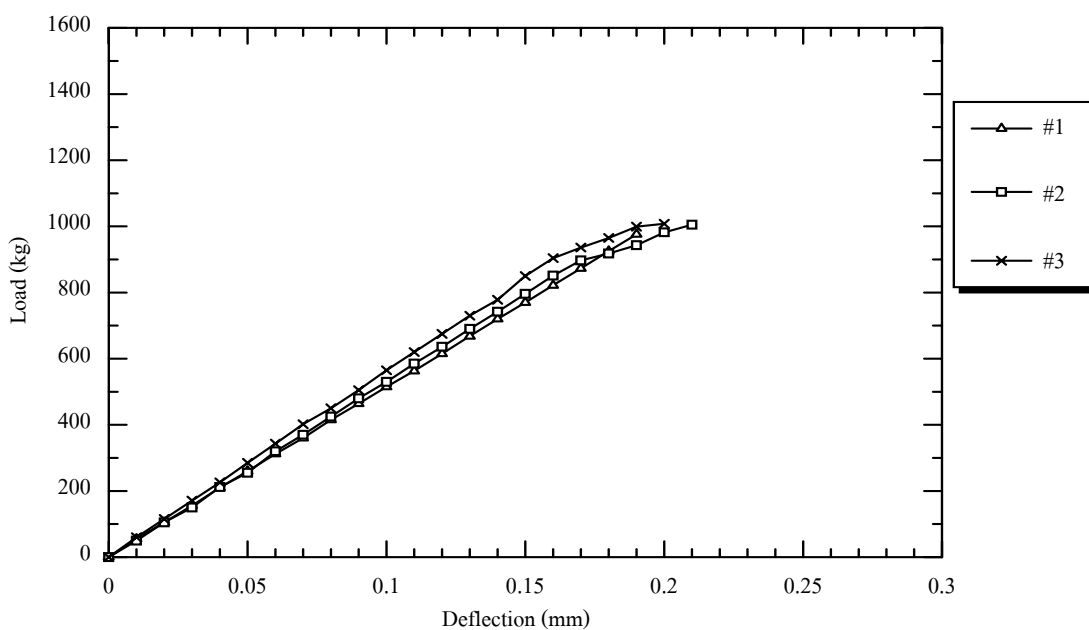
รูปที่ ค.92 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hz1.0



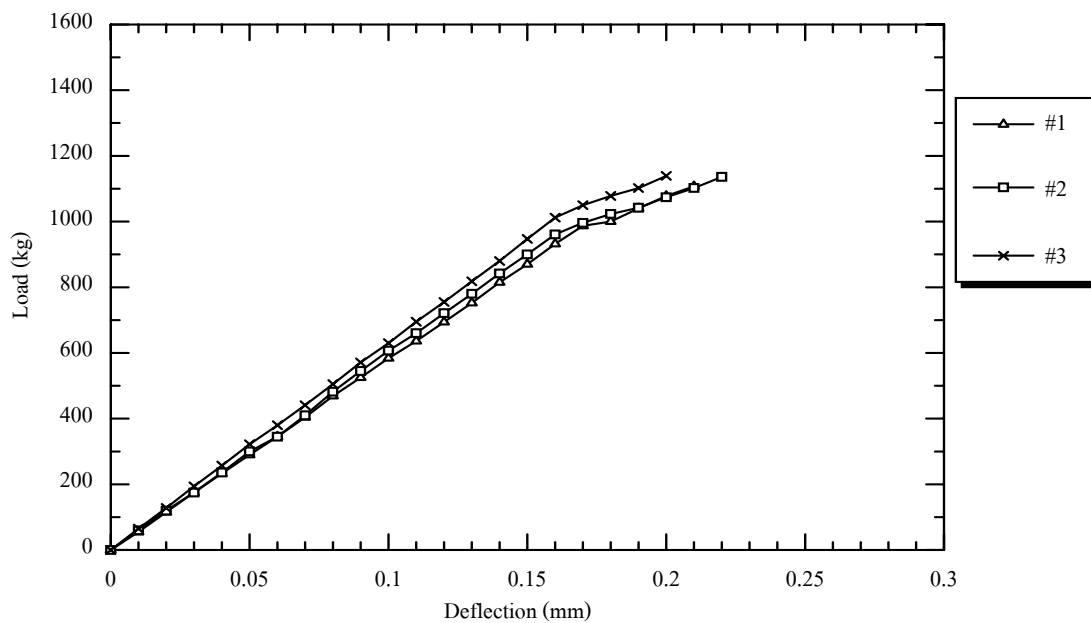
รูปที่ ค.93 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hz1.5



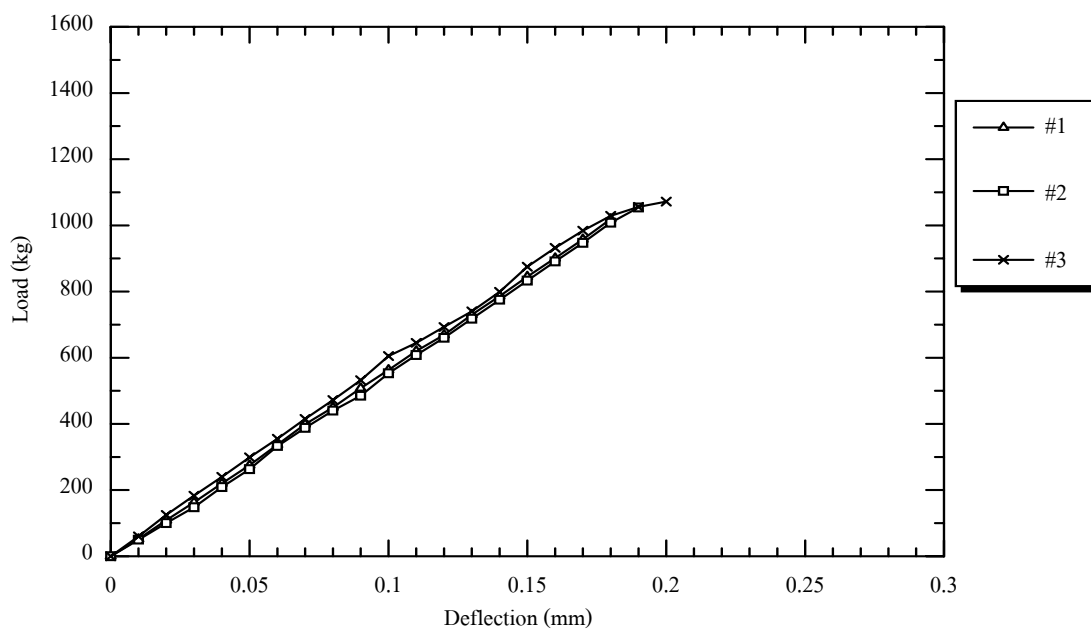
รูปที่ ค.94 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Hz2.0



รูปที่ ค.95 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Ps0.5

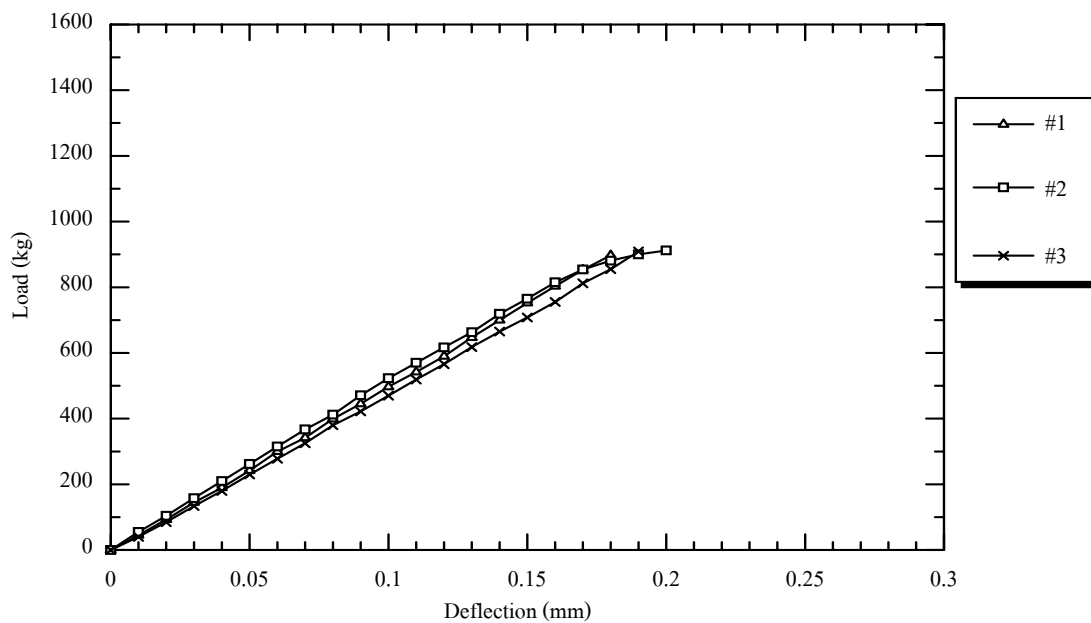


รูปที่ ค.96 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Ps1.0

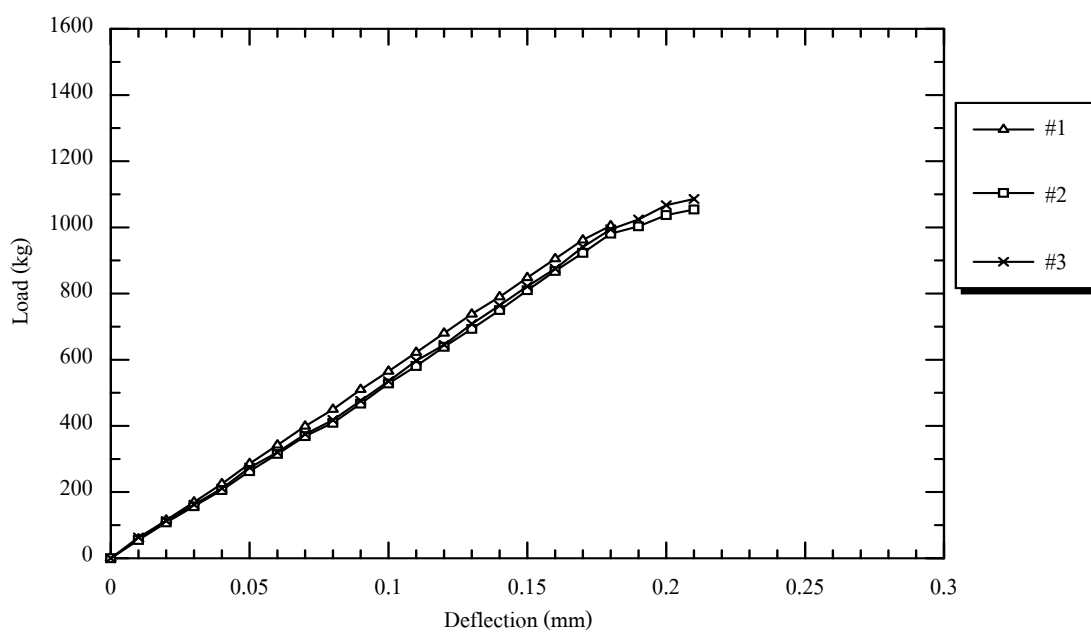


รูปที่ ค.97 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Ps1.5

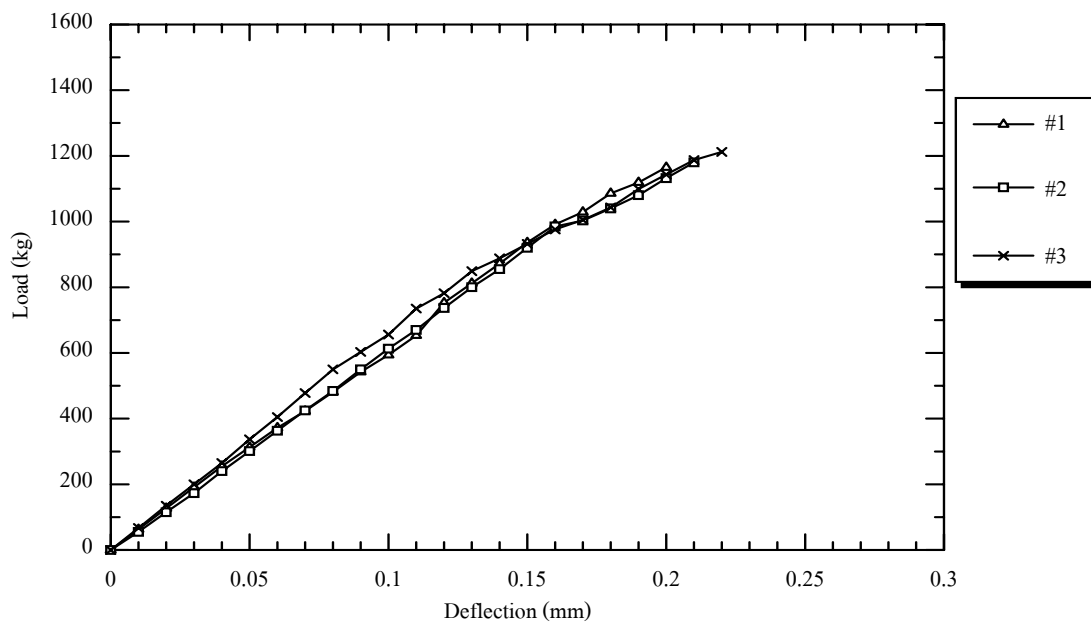




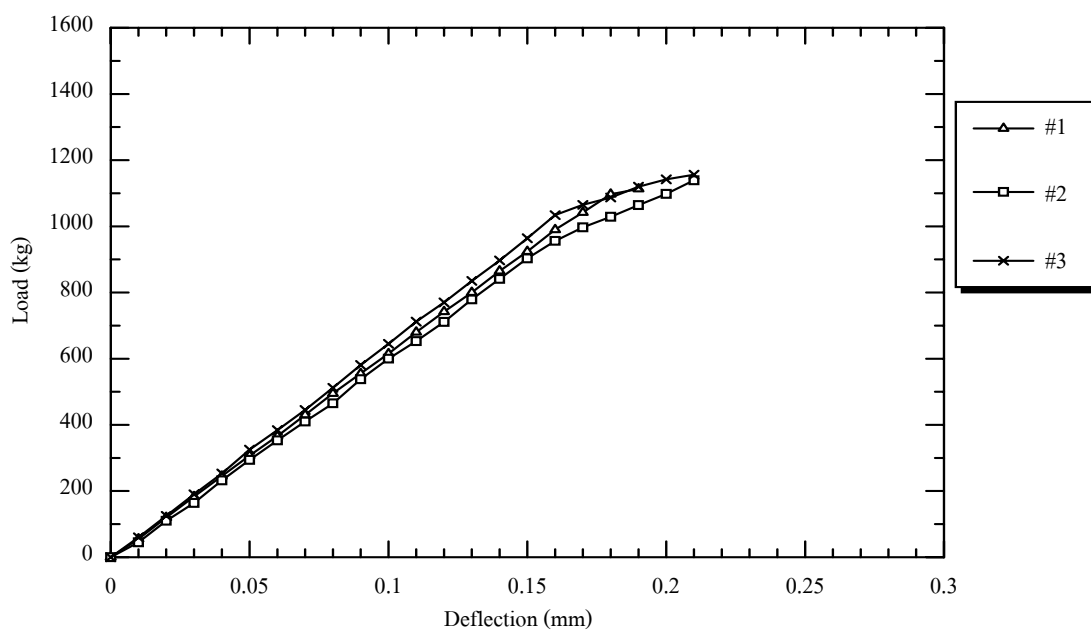
รูปที่ ค.98 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Ps2.0



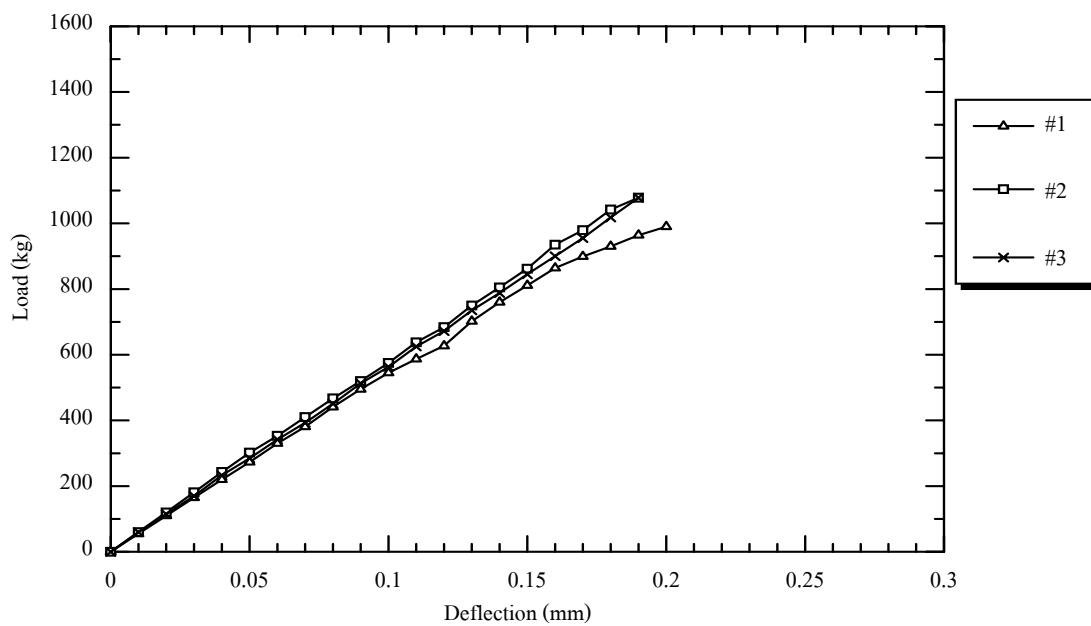
รูปที่ ค.99 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Pz0.5



รูปที่ ค.100 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Pz1.0



รูปที่ ค.101 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Pz1.5



รูปที่ ค.102 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบ F0.6Pz2.0

ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

การศึกษาการใช้เส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นผสมในคอนกรีต

# INVESTIGATION OF THE USE OF RECYCLED SHORT PLASTIC WIRES IN CONCRETE.

อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเศรษฐ์<sup>1</sup> (Amornrat Suriyawichitseranee) (amrntsu@yahoo.com)

สิทธิชัย แสงอาทิตย์<sup>2</sup> (Sittichai Seangatith) (sitichai@sut.ac.th)

อำนาจ อภิชาติวัลลภ<sup>3</sup> (Amnat Apichatvullop) (amnat@sut.ac.th)

<sup>1</sup>นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
<sup>3</sup>รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**บทคัดย่อ :** ในช่วงที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยจำนวนมากประสบความสำเร็จในการนำเส้นใยประเภทต่างๆ เช่น โพลีโพรพิลีน (polypropylene) และไนลอน มาผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึง การดูดซึมพลังงาน และลดการแตกร้าวของคอนกรีต แต่ยังไม่มียานวิจัยคอนกรีตเสริมเส้นใย polyethylene terephthalate (PET) และ high density polyethylene (HDPE) แม้ว่าเส้นใยทั้งสองชนิดจะมีคุณสมบัติทางกลที่ก้ำกึ่งรับแรงดึงสูงใกล้เคียงกับโพลีโพรพิลีนและไนลอน และเป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นส่วนใหญ่ของขยะพลาสติกซึ่งนับวันจะมีปริมาณมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีนำพลาสติก PET และ HDPE มาเสริมคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และลดการแตกร้าว โดยใช้เส้นพลาสติก PET และ HDPE ที่ใช้แล้วแบบสั้นผสมในคอนกรีต ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ รูปร่างเส้นพลาสติกตรงและซิกแซก และปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีต พบว่า การเสริมเส้นพลาสติกให้กำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกมากขึ้น แต่จะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น

**ABSTRACT :** In the past few years, a number of researchers have successfully used plastic fibers such as polypropylene and nylon as reinforcing fibers in concrete. The fibers increase the

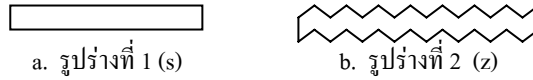
tensile strength and energy absorption, and reduce cracking in concrete. However, so far no researchers have tried polyethylene terephthalate (PET) and high density polyethylene (HDPE) as reinforcing fibers in concrete although they have tensile strengths close to that of the polypropylene and nylon and are readily available from plastic wastes. This research experimented with PET and HDPE plastic wires as reinforcing materials for concrete to determine the optimal amount and shape of plastic wires. The studied parameters were water-cement ratio, fiber shape: straight and zigzag, and percent of plastic fiber. From the tests, it was found that, by increasing the amount of plastic wires, the compressive strength and the modulus of elasticity of the concrete were decreased and the flexural strength of concrete were increased.

**KEYWORDS:** Short Plastic Wires, Compressive Strength, Flexural Strength, Recycled Plastic, Concrete.

## 1 บทนำ

นักวิจัยหลายท่านประสบความสำเร็จในการทำคอนกรีตเสริมเส้นใยประเภทต่างๆ ทั้งเส้นใยบริสุทธิ์และเส้นใยที่ทำจากวัสดุที่ใช้แล้ว เช่น โพลีโพรพิลีน (polypropylene) [1], [2] และไนลอน (nylon) [3] เส้นใยทำให้คอนกรีตรับแรงดึง คุณสมบัติทางกลได้มากขึ้น และลดการแตกร้าวของคอนกรีต โดยคอนกรีตดังกล่าวเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานพื้นถนน อิฐบล็อก หรือกระเบื้องปูหลังคา เพื่อให้โครงสร้างเหล่านี้สามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแล้วจากการศึกษาคุณสมบัติทางกลของพลาสติกที่ใช้แล้ว พบว่า PET (polyethylene terephthalate) และ HDPE (high density polyethylene) มีกำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 20 – 40 MPa [4] ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังรับแรงดึงของโพลีโพรพิลีนและไนลอน แต่ยังไม่มีการนำพลาสติกสองชนิดนี้ซึ่งมีปริมาณเป็นส่วนใหญ่ของขยะพลาสติกที่สามารถหาได้ง่ายมาใช้เป็นเส้นใยเสริมกำลังของคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ลองทำคอนกรีตเสริมเส้นใยพลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณและรูปร่างของเส้นพลาสติก PET และ HDPE ที่เหมาะสม ศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกแบบสั้นที่ทำจากพลาสติกที่ใช้แล้วดังกล่าว ในที่นี้คุณสมบัติทางกลที่สนใจประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และลักษณะการวิบัติ ตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 3 ค่าได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6 เส้นพลาสติกแบบสั้นชนิด PET และ HDPE ที่ได้จากขวดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้ว โดยเส้นพลาสติกมีขนาดกว้าง 1.5 มม. ยาว 25.4 มม. ความหนาของเส้นพลาสติก PET และ HDPE เป็น 0.5 และ 0.6 มม.

ตามลำดับ เส้นพลาสติกมี 2 รูปร่างคือ ตรงและซิกแซก ดังแสดงในรูปที่ 1 และปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีตร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต



รูปที่ 1 รูปร่างเส้นพลาสติกที่ใช้

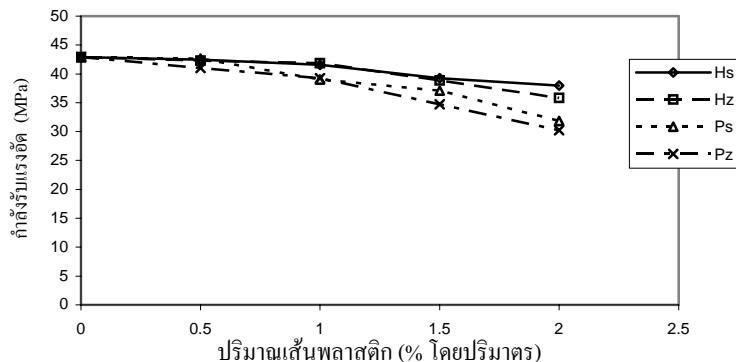
## 2 ตัวอย่างและวิธีทดสอบ

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด  $\varnothing 15 \times 30$  ซม. โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 39-96 [5] สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ตัวอย่างทดสอบเป็นคานคอนกรีตขนาด  $10 \times 10 \times 50$  ซม. โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 78-94 [6] และในการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 469-94 [7] ตัวอย่างทดสอบถูกบ่มในถุงพลาสติกและเก็บไว้ในห้องบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบกำลังรับแรงดัดมีจำนวนอย่างละ 60 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่าง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนเส้นพลาสติกมีดังนี้ H แทน HDPE, P แทน PET, s แทนเส้นพลาสติกตรง และ z แทนเส้นพลาสติกซิกแซก เช่น Hs หมายถึง เส้นพลาสติก HDPE ตรง เป็นต้น

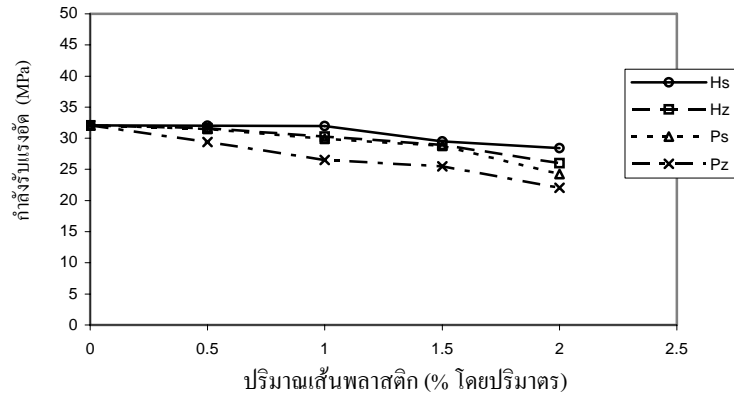
## 3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 3.1 กำลังรับแรงอัด

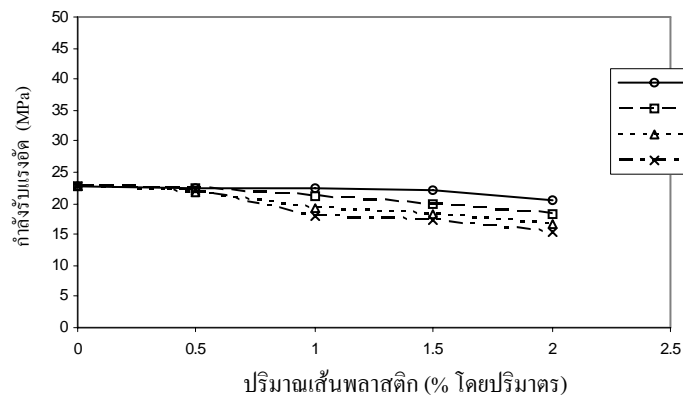
การทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่า เมื่อพลีตกำลังรับแรงอัดกับปริมาณเส้นพลาสติกจะได้กราฟเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2-4 จะเห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 2 กราฟกำลังรับแรงอัดที่ w/c เท่ากับ 0.4



รูปที่ 3 กราฟกำลังรับแรงอัดที่ w/c เท่ากับ 0.5



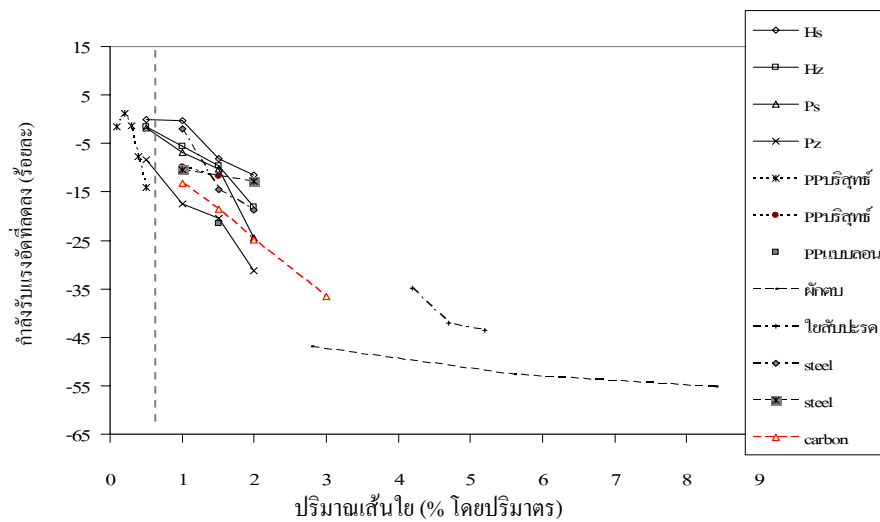
รูปที่ 4 กราฟกำลังรับแรงอัดที่ w/c เท่ากับ 0.6

กำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้น ในส่วนของชนิดพลาสติก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกชนิด PET ทั้งนี้่าจะมีสาเหตุมาจากชนิด HDPE มีความยืดหยุ่นและโค้งงอได้ง่ายกว่าพลาสติกชนิด PET ทำให้เส้นพลาสติกชนิด HDPE แทรกอยู่ในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าเส้นพลาสติกชนิด PET สำหรับรูปร่างของเส้นพลาสติกพบว่า เส้นพลาสติกตรงจะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเส้นพลาสติกซิกแซก โดยสรุปแล้วคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกในปริมาณที่เท่ากันและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน คอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติก Hs มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือ Hz, Ps และ Pz ตามลำดับ

การเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE ในคอนกรีตมีผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้ใน [1], [11]-[16] ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ที่เสริมในคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 2 โดยปริมาตร จะเห็นว่าการเสริมเส้น



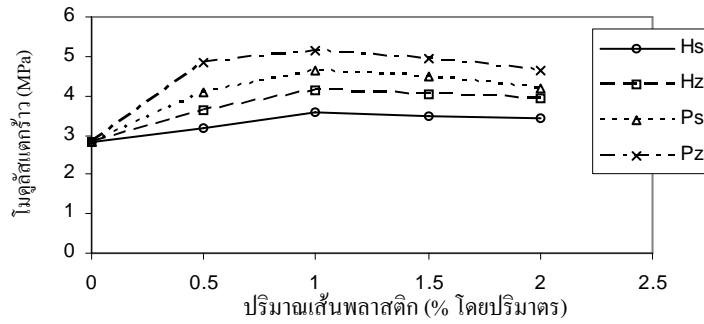
พลาสติก Hs, Hz, และ Ps ให้กำลังรับแรงอัดลดลงน้อยกว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยคาร์บอน และมีร้อยละการลดลงใกล้เคียงกับเส้นใยเหล็ก ส่วนเส้นใยธรรมชาติจะเสริมในปริมาณมากกว่าร้อยละ 2 ให้กำลังรับแรงอัดลดลงมากกว่า กำลังรับแรงอัดยังขึ้นกับชนิด ขนาด และรูปร่างของเส้นใย จะพบว่าเส้นพลาสติกชิกแซกกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงมากกว่าเส้นพลาสติกตรง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับผลที่ได้ในคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนแบบลอนที่ทำให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตลดลงน้อยกว่าเส้นใยตรงที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน



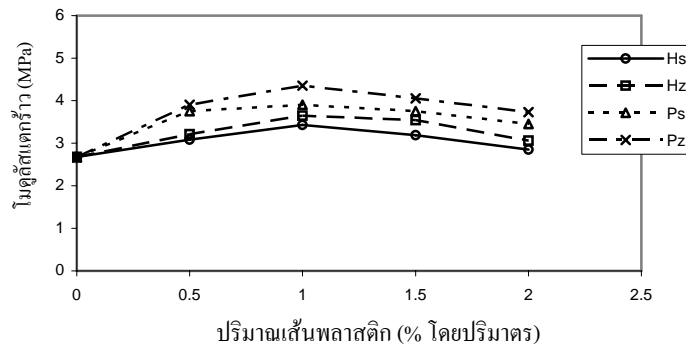
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

### 3.2 กำลังรับแรงค้ำ

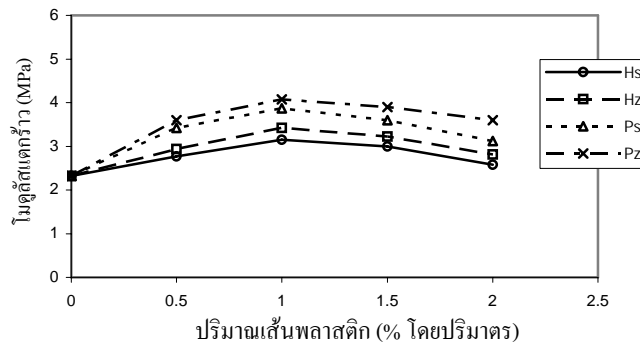
กำลังรับแรงค้ำสามารถใช้ค่าโมดูลัสแตกร้าวในการเปรียบเทียบ จากการศึกษาเมื่อพล็อตค่าโมดูลัสแตกร้าวกับปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีต ได้กราฟเส้นโค้งคว่ำดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟโมดูลัสแตกร้าวที่ w/c เท่ากับ 0.4



รูปที่ 7 กราฟโมดูลัสแตกร้าวที่ w/c เท่ากับ 0.5



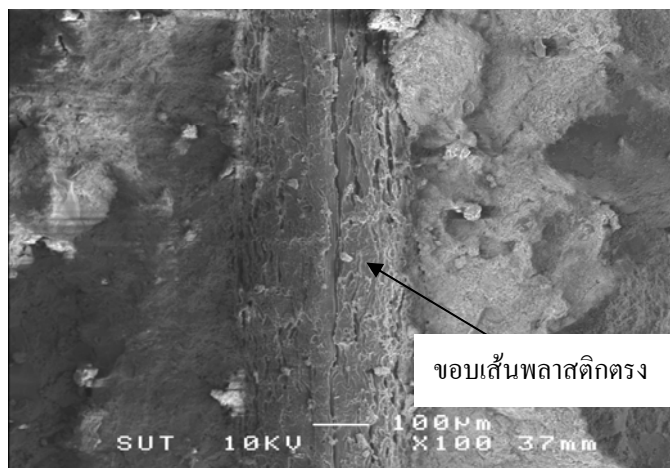
รูปที่ 8 กราฟโมดูลัสแตกร้าวที่ w/c เท่ากับ 0.6

ซึ่งพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกประมาณร้อยละ 5 ถึง 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน โมดูลัสแตกร้าวมีค่าสูงสุดเมื่อคอนกรีตมีปริมาณเส้นพลาสติกร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร เมื่อพิจารณาคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกตามชนิด และรูปร่างของขอบเส้นพลาสติกพบว่า ที่ปริมาณเส้นพลาสติกเท่ากัน ค่า

โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ เส้นพลาสติก Ps, Hz และ Hs ตามลำดับ การเสริมเส้นพลาสติกชนิด PET ให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าการเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE เนื่องจากพลาสติกชนิด PET มีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าพลาสติกชนิด HDPE คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกซิกแซกให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกตรง ทั้งนี้เส้นพลาสติกซิกแซกทำให้การยึดเกาะของเส้นพลาสติกกับเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าเส้นพลาสติกตรง ดังแสดงในรูปที่ 9 - 10

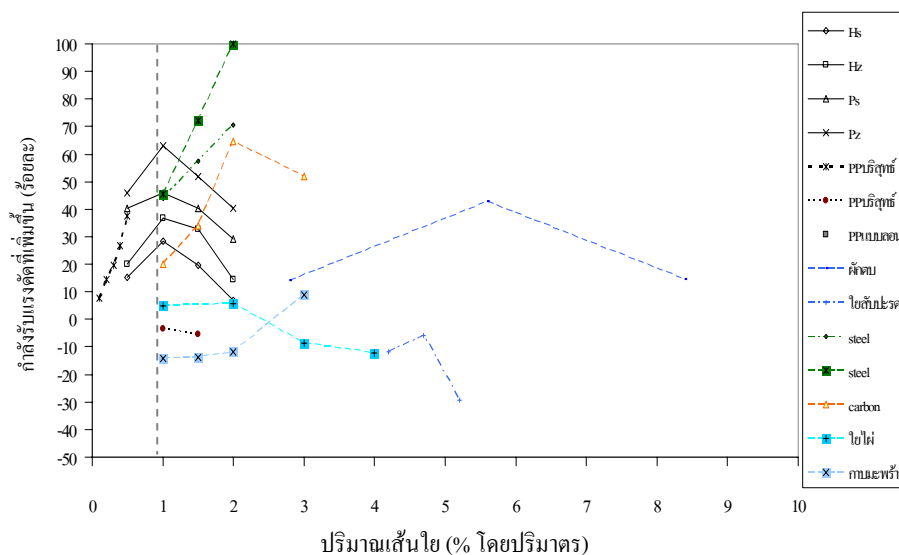


รูปที่ 9 เส้นพลาสติกขอบซิกแซกในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 10 เส้นพลาสติกขอบขอบตรงในเนื้อคอนกรีต

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มคล้ายคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ได้ใน [1] และ [8] ซึ่งเป็นกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์เหมือนกัน ซึ่งการเสริมเส้นพลาสติกให้กำลังรับแรงดัดสูงที่สุดปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 และการเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 0.1 มีร้อยละการเพิ่มสูงกว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยคาร์บอน รวมถึงเส้นใยธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 11 การเสริมเส้นพลาสติก Pz ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้ร้อยละการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดสูงกว่าเส้นใยเหล็ก แต่การเสริมเส้นพลาสติก Hs และ Hz ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้ร้อยละการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าเส้นใยเหล็ก ส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใยคาร์บอนให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่าร้อยละ 1.0 ซึ่งกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยนั้นขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ชนิด รูปร่าง ขนาด และปริมาณของเส้นใย จึงมีปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมแตกต่างกัน



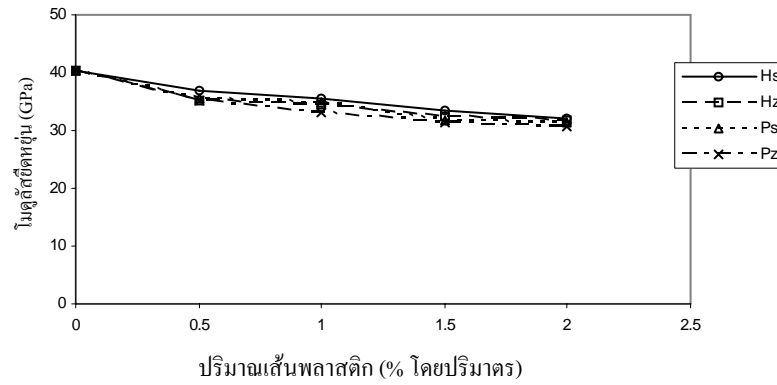
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

### 3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

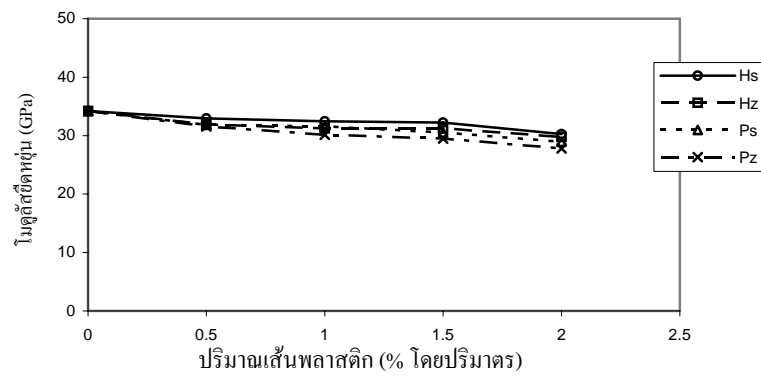
เมื่อพล็อตโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดัดกับปริมาณเส้นพลาสติกจะได้กราฟเกือบเส้นตรงดังที่แสดงในรูปที่ 12 – 14

ซึ่งแสดงว่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก (ร้อยละ 3 ถึง 24) คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงมากที่สุด(ร้อยละ 8 ถึง 24) ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โมดูลัสยืดหยุ่นลดลง(ร้อยละ 3 ถึง 15) เมื่อพิจารณาชนิดพลาสติก และรูปร่างของเส้น

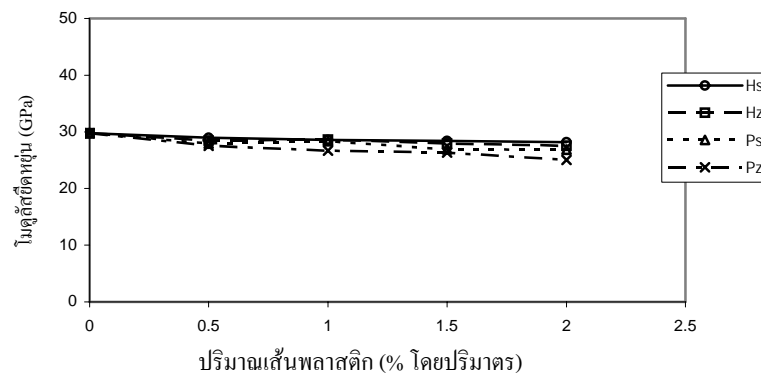
พลาสติกพบว่า เส้นพลาสติกทั้งสองชนิดและทั้งสองรูปร่างให้โมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะมีความมาจากโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



รูปที่ 12 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ w/c เท่ากับ 0.4

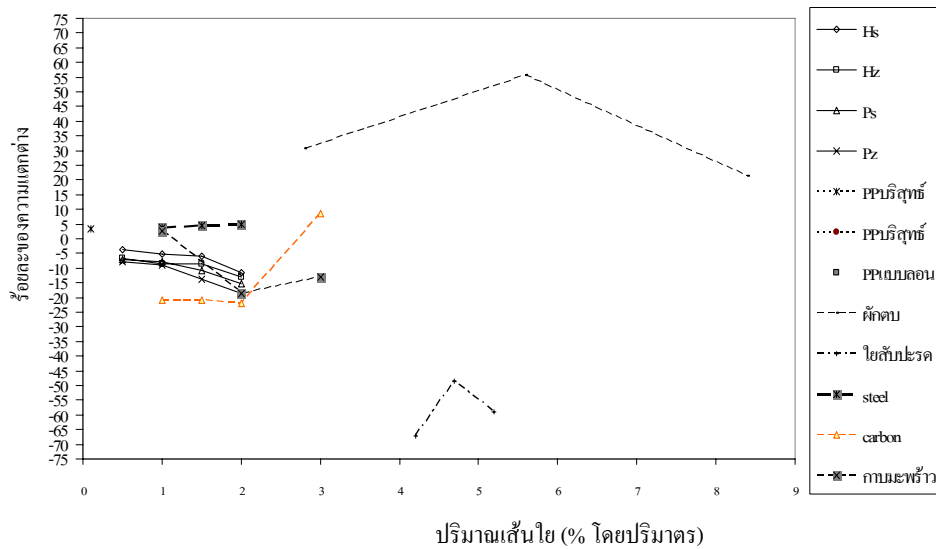


รูปที่ 13 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ 14 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ w/c เท่ากับ 0.6

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE มีโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงแต่ไม่มากนัก ซึ่งผลคล้ายกับคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

### 3.4 ลักษณะการวิบัติ

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบการรับแรงอัดพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกและคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกมีการวิบัติแบบเดียวกันคือ วิบัติเนื่องจากแรงอัดและแรงเฉือนร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 16 จะสังเกตเห็นได้ว่า รอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต จะทำมุมประมาณ 50-60 องศากับแนวระดับ สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตวิบัติในลักษณะดังกล่าว เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งแรงเสียดทานระหว่างห้กคและตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากการขยายตัวด้านข้าง ทำให้หน่วยแรง ที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนไป และลักษณะวิบัตินี้เหมือนกับที่เกิดกับคอนกรีตเสริมเส้นใยจากพรมที่ใช้แล้ว [9]



รูปที่ 16 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอก

สำหรับการวิบัติของคานคอนกรีตพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกทั้ง 4 แบบ ได้แก่ Hs, Hz, Ps และ Pz ที่ปริมาณเส้นพลาสติกร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร มีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก คือคานตัวอย่างทดสอบจะขาดที่กึ่งกลางจากด้านล่างและแยกเป็นสองส่วนอย่างรวดเร็วเมื่อแรงกระทำขึ้นถึงค่าสูงสุด แต่คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกร้อยละ 1.0, 1.5 และ 2.0 คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยแยกที่กึ่งกลางแต่ไม่ขาดเป็นสองส่วน เพราะมีเส้นพลาสติกยึดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งคล้ายกับที่เกิดกับคอนกรีตที่เสริมเส้นใยจากพรมที่ใช้แล้ว [9] และเส้นใยเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยประเภทต่างๆเสริมในคอนกรีตวัตถุประสงค์หลักไม่ใช่เพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตแต่เพื่อเส้นใยจะเข้ามาเชื่อมช่องว่างของรอยแตกร้าวและเพิ่มความเหนียว [10]



รูปที่ 17 แสดงลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติก

#### 4 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่า การเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นในคอนกรีตสามารถสรุปผลดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นพลาสติก Hs ให้กำลังรับแรงอัดลดลงน้อยที่สุด และ Pz ให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด

2. คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และการเสริมเส้นพลาสติกทุกแบบ ปริมาณร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร จะให้กำลังรับแรงดัดสูงที่สุด เส้นพลาสติกที่ให้กำลังรับแรงดัดดี ที่สุดคือเส้นพลาสติก Pz ส่วนเส้นพลาสติก Hs ให้กำลังรับแรงดัดต่ำที่สุด

3. คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง และชนิดและรูปร่างของเส้นพลาสติกมีผล ต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยมาก

4. การวัดขีดของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกร้อยละ 0.5 เป็นแบบทันทีทันใด เช่นเดียวกับ คอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก และเมื่อเสริมเส้นพลาสติกร้อยละ 1.0, 1.5, และ 2.0 เส้นพลาสติก จะยืดช่วยให้คอนกรีตไม่ขาดจากกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ตระกูล อร่ามรักษ์, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และพรชัย ชรรณอักษร, 2000. อิทธิพลของเส้นใยโพลีโพรพิลีนต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6: MAT-25 – MAT-30.
- [2] Naaman, A. E., Garcia, S., Korkmaz, M., and Li, V.C., 1996. Investigation of the use of carpet waste PP fibers in concrete. Journal of materials in civil engineering: 782 – 791.
- [3] Khajuria, A., and Balaguru, P., 1992. Fiber reinforced cement and concrete. London: E&FN Spon.
- [4] Selke, S. E., 1997. Understanding Plastics Packaging Technology. Munich: Carl Hanser Verlag.
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1996. Annual Book of ASTM Standards: Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens: C39. Volume 04.02. New York: Clearance Center.
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994. Annual Book of ASTM Standards: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading): C78. Volume 04.02. New York: Clearance Center.
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994. Annual Book of ASTM Standards: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression: C469. Volume 04.02. New York: Clearance Center.
- [8] Gupta, P., Banthia, N., and Yan, C., 2000. Fiber reinforced wet-mix shotcrete under impact. Journal of materials in civil engineering: 81–90.



- [9] Wang, Y., Zureick, A. H., Cho, B. S., and Scott, D. E., 1994. Properties of fiber reinforced concrete using recycled fibers from carpet industrial waste. Journal of materials science, 29(16) : 191-4199.
- [10] Derucher, K. N., Korfiatis, G. P., and Ezeldin, A. S., 1994. Materials for Civil and Highway Engineers. 3<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall.
- [11] อนพัช พรหมมานพ, 2541. คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มอร์ต้าเสริมเส้นใยสับปะรด. มหาวิทยาลัยรังสิต. มหาวิทยาลัยรังสิต.
- [12] พยุงศักดิ์ ศรีอำไพ, 2542. คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มอร์ต้าเสริมเส้นใยผักตบชวา. มหาวิทยาลัยรังสิต. มหาวิทยาลัยรังสิต.
- [13] Nitima Tantadilok, 2003. EFFECT OF STEEL FIBERS AND FLY ASH ON CONCRETE STRENGTH. Kasetsart University.
- [14] Fukushima, T., Shirayama, K., Hitotsuya, K., and Maruyama, T., 1992. Fiber Reinforced Cement and Concrete. London:E&FN Spon.
- [15] Ramirez-Coretti, A., 1992. Fiber Reinforced Cement and Concrete. London:E&FN Spon.
- [16] Swamy, R. N., 1988. Natural Fiber Reinforced Cement and Concrete. London:Blackie.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวอมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 ศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาในปี พ.ศ. 2538 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2541 ในระหว่างที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มีความสนใจในด้านวิศวกรรมโครงสร้างเป็นอย่างมาก จึงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในการปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2545 และจากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางการเสริมเส้นใยในคอนกรีต เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง ดังแสดงในภาคผนวก ง