

## พฤติกรรมและวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัด ของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย

ทวีชัย สำราญวานิช<sup>1</sup> อภินันท์ ภูซัน<sup>2</sup> และ สุรสิทธิ์ หมั่นวิชา<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

### บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยต่างๆ ได้แก่ เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก ในอัตราส่วนร้อยละ 0.1 ร้อยละ 0.2 และร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคองกรีต และเสนอวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดที่สภาวะต่างๆ โดยได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กของแต่ละส่วนผสมคองกรีต รวมทั้งกำลังรับแรงอัด แรงดึง แรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่นของคองกรีตด้วย จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดในคานคองกรีตเสริมเหล็กเท่ากัน การใช้เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกผสมในส่วนผสมคองกรีต ช่วยให้กำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใย และที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 0.1-0.2 โดยปริมาตรของคองกรีต กำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกมีค่าสูงกว่าที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้ว แต่ที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคองกรีต กำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงกว่าที่ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก สุดท้ายพบว่า วิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยที่สภาวะต่างๆ ซึ่งได้เสนอไว้ในบทความนี้ สามารถทำนายค่ากำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

**คำสำคัญ :** กำลังรับแรงดัด / คองกรีตเสริมเหล็ก / เส้นใย / เส้นใยเหล็ก / เส้นใยแก้ว / เส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก

<sup>1</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>2</sup>นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

## **Behavior and Calculation Method of the Flexural Strength of Reinforced Concrete Beam with Fiber**

**Taweechai Sumranwanich<sup>1</sup>, Apinan Phuchan<sup>2</sup>, and Surasit Manwicha<sup>2</sup>**

Burapha University, Saensuk, Muang, Chonburi 20131

### **Abstract**

This paper aims to study the flexural strength behavior of reinforced concrete beam with various types of fiber, which were steel fiber, glass fiber and acrylic fiber and to propose a method for calculating the flexural strength of reinforced concrete beam with fiber. The fiber contents in reinforced concrete were 0.1% 0.2% and 0.5% by volume of concrete. The compressive strength, tensile strength, flexural strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete were also investigated. From the experimental results, when the flexural reinforcement of reinforced concrete (RC) beam was kept constantly, the RC beams with acrylic fiber, glass fiber and steel fiber exhibited higher flexural strength and ductility than a RC beam without fiber. For fiber content of 0.1-0.2% by volume of concrete, the flexural strength of RC beam with acrylic fiber was larger than those of steel fiber and glass fiber. But, for fiber content of 0.5% by volume of concrete, the flexural strength of RC beam with steel fiber was higher than those of glass fiber and acrylic fiber. Finally, the proposed method for calculating the flexural strength of reinforced concrete beam with fiber at various states can predict the flexural strength of reinforced concrete beam with satisfactory error.

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Civil Engineering.

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Civil Engineering.

## 1. บทนำ

ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะให้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด ส่วนแรงดึงจะให้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านทาน ทั้งนี้เพราะว่าคอนกรีตสามารถต้านทานแรงอัดได้ดีมาก แต่มีความต้านทานแรงดึงได้น้อย ในขณะที่เหล็กเสริมมีคุณสมบัติต้านทานทั้งแรงดึงและแรงอัดได้ดี นอกจากนี้ทั้งเหล็กเสริมและคอนกรีตต่างมีค่าสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวใกล้เคียงกัน จึงไม่เกิดปัญหาเมื่อคอนกรีตมีการยึดหดตัว [1] ส่วนเส้นใย (Fiber) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึงได้สูงมากเมื่อเทียบกับเหล็กเสริม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เส้นใยมาช่วยทำหน้าที่รับแรงดึงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กนอกเหนือจากเหล็กเสริม ซึ่งจะช่วยให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังต้านทานแรงดัดสูงขึ้น

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยต่างๆ ได้แก่ เส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก ในอัตราส่วนผสมต่างๆ รวมทั้งเสนอวิธี

การคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยที่สภาวะต่างๆ อีกด้วย

## 2. การทดลอง

### 2.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ต่อปริมาตรคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตรประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จำนวน 301 กก. ทราย 824 กก. และหิน 1,030 กก. โดยมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.60 อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมเท่ากับ 0.45 และใช้เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก (Acrylic fiber) ผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต โดยที่ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยได้แสดงในรูปที่ 1 ส่วนขนาดและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยทั้งสามชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และปริมาณการผสมเส้นใยแต่ละชนิดในส่วนผสมคอนกรีตและค่าการยุบตัวของคอนกรีตได้แสดงไว้ในตารางที่ 2



(ก) เส้นใยเหล็ก



(ข) เส้นใยแก้ว



(ค) เส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก

รูปที่ 1 ลักษณะและรูปร่างของเส้นใยที่ใช้

ตารางที่ 1 ขนาดและคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ใช้

ชนิดของเส้นใย	ความยาว, $l$ (ซม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง, $d$ (ซม.)	ความถ่วง จำเพาะ	กำลังรับ แรงดึง, $f_t$ (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น (กก./ซม. <sup>2</sup> )
เส้นใยเหล็ก	3.5 และ 6.0	0.0550	7.85	11,213	1,121,300
เส้นใยแก้ว	2.5	0.0007	2.33	36,989	704,547
เส้นใยอะคริลิก	2.4	0.0016	1.18	5,810	137,615

ตารางที่ 2 ปริมาณเส้นใยที่ใช้ผสมในคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร และค่าการยุบตัวของคอนกรีต

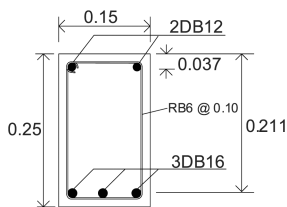
หมายเลขส่วนผสม	ปริมาณเส้นใย (%)	เส้นใยเหล็ก, SF (กก.)	เส้นใยแก้ว, GF (กก.)	เส้นใยอะคริลิก, AF (กก.)	การยุบตัว (ซม.)
B1	-	-	-	-	4.7
B2	0.1	7.85	-	-	4.5
B3	0.2	15.70	-	-	2.8
B4	0.5	39.20	-	-	1.2
B5	0.2	15.70	-	-	3.0
B6	0.1	-	2.33	-	1.2
B7	0.2	-	4.66	-	1.2
B8	0.5	-	11.65	-	0
B9	0.1	-	-	1.18	0.4
B10	0.2	-	-	2.36	0.4
B11	0.5	-	-	5.90	0

หมายเหตุ ส่วนผสม B2, B3 และ B4 ใช้เส้นใยเหล็กยาว 3.0 ซม. และส่วนผสม B5 ใช้เส้นใยเหล็กยาว 6.5 ซม.

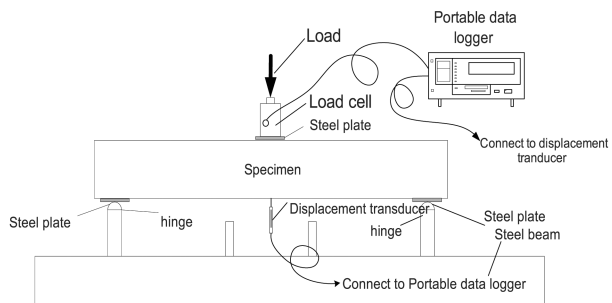
### 2.2 รายละเอียดการทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [3] การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496 [3] โดยการทดสอบทั้งสองใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตทำตามมาตรฐาน ASTM C 78 [3] โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 469 [3] และในการศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยใช้การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

แบบแรงกระทำ 3 จุด (Three-point bend test) โดยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัด 15 ซม. x 25 ซม. ยาว 140 ซม. มีระยะระหว่างจุดรองรับคานเท่ากับ 120 ซม. และเสริมเหล็กแบบต่ำกว่าสถานะสมดุล (Under reinforcement) รายละเอียดเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 2(ก) ทั้งนี้ทำการบ่มคานด้วยกระสอบชุบน้ำตลอดเวลาจนกระทั่งคอนกรีตมีอายุได้ 25 วัน จึงทำการทดสอบรายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแรงกระทำ 3 จุดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2(ข)



(ก) รายละเอียดการเสริมเหล็ก

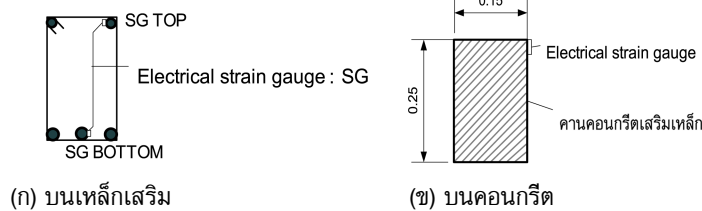


(ข) การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2 รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

ในการทดสอบใช้เครื่อง Universal testing machine ขนาด 150 ตัน เป็นต้นกำเนิดแรงกดกระทำที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอ่านค่าแรงกดจากโหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 50 ตัน ส่วนการวัดการโก่งตัวของคาน ใช้อุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) ติดตั้งที่กึ่งกลางใต้ท้องคานระหว่างที่รองรับทั้งสอง สำหรับการวัดหน่วยการยึด

หดของเหล็กเสริมภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้ Electrical-strain gauge ติดที่ผิวเหล็กตรงช่วงกึ่งกลางคานทั้งเหล็กล่างและเหล็กบนดังแสดงในรูปที่ 3(ก) และในการวัดหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านบนของคานใช้ Electrical-strain gauge ประเภทที่ติดผิวคอนกรีตติดที่ผิวด้านข้างส่วนบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทรงบริเวณช่วงกึ่งกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้ง Electrical-strain gauge

สำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลแรงกด การโก่งตัวของคาน และหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตใช้เครื่อง Portable data logger รุ่น TDS-303 เก็บบันทึกข้อมูล

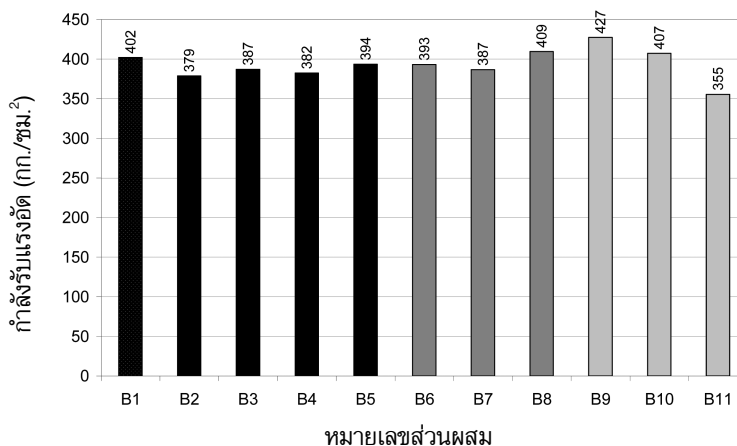
### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 3.1 คอนกรีตผสมเส้นใย

##### 3.1.1 กำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีค่าประมาณ 400 กก./ซม.<sup>2</sup> ดังแสดง

ในรูปที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากได้ควบคุมอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.60 ในทุกส่วนผสม โดยพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้วมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเล็กน้อย และสำหรับส่วนผสม B9 และ B10 ซึ่งผสมเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม เฉพาะส่วนผสม B11 จะมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าส่วนผสมอื่นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการใช้อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วมากเกินไป (ร้อยละ 0.5)

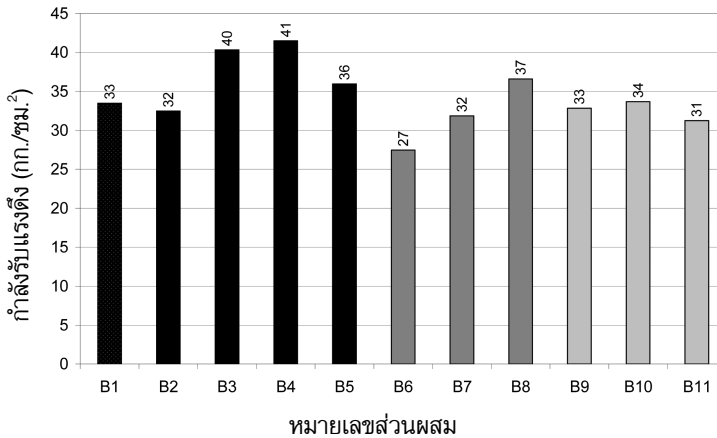


รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยต่างๆ

**3.1.2 กำลังรับแรงดึง**

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กในอัตราร้อยละ 0.2 และร้อยละ 0.5 มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก และสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย

อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเหล็กช่วยในการรับแรงดึงของคอนกรีตได้มากกว่าเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก และพบว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยที่ผสมในคอนกรีตมีปริมาณมากขึ้น

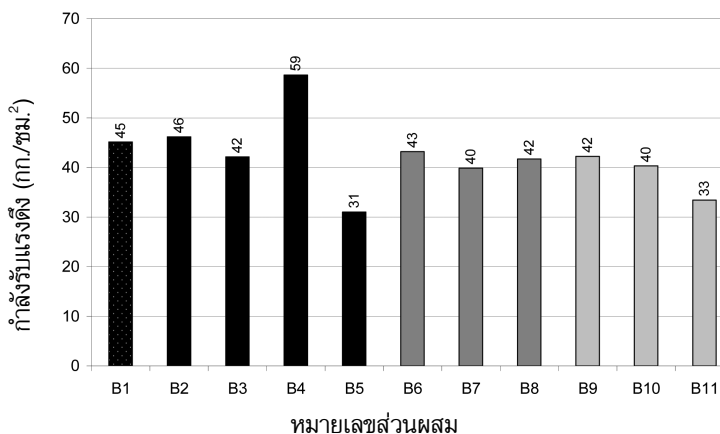


**รูปที่ 5** กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยต่างๆ

**3.1.3 กำลังรับแรงดัด**

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าส่วนผสม B4 มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยเหล็กมากที่สุด (ร้อยละ 0.5) และสำหรับส่วนผสม B5 มีค่ากำลังรับแรงดัดต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าส่วนผสม B5 ใช้เส้นใยเหล็กชนิดยาว (6.5

ซม.) ดังนั้นอาจทำให้การกระจายตัวและการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และจากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกมีกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเล็กน้อย ยกเว้นเฉพาะส่วนผสม B11 ที่มีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจน

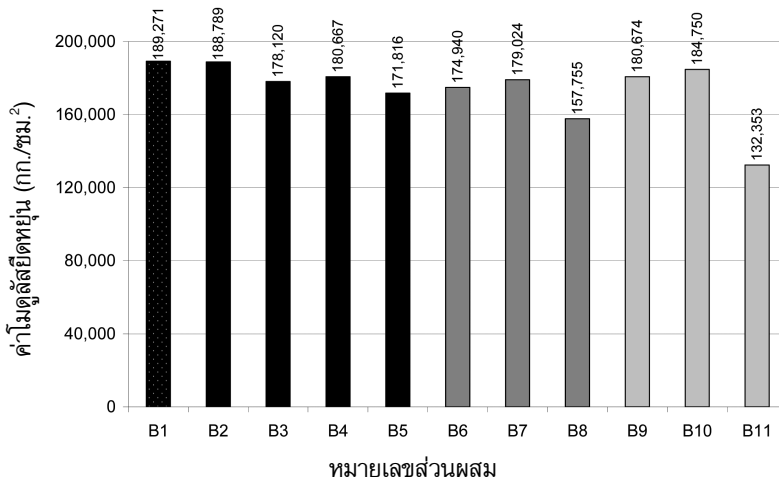


**รูปที่ 6** กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยต่างๆ

### 3.1.4 โมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเส้นใยโดยรวมแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ยกเว้นส่วนผสม B11 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณา กำลังรับ

แรงอัดของส่วนผสม B11 แล้วก็พบว่า มีค่าต่ำที่สุดเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

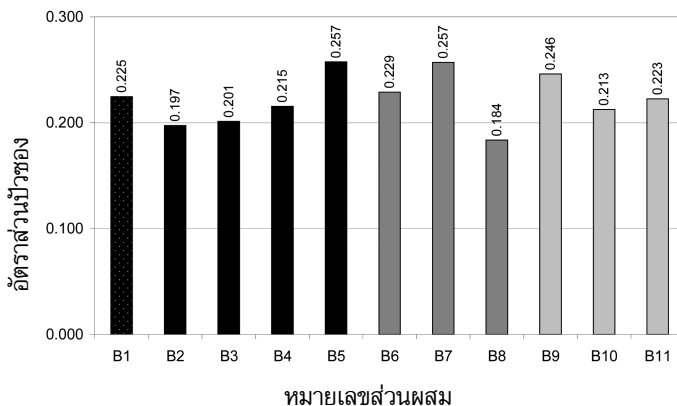


รูปที่ 7 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเส้นใยต่างๆ

### 3.1.5 อัตราส่วนปัวซอง

อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตผสมเส้นใยได้แสดงไว้ในรูปที่ 8(ก) โดยมีค่าระหว่าง 0.18-0.26 และพบว่า ส่วนผสม B8 ซึ่งผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

ของคอนกรีตมีอัตราส่วนปัวซองต่ำสุด ซึ่งอาจเป็นเพราะว่ามีปริมาณเส้นใยแก้วมากเกินไป และตัวอย่างการทดสอบหาอัตราส่วนปัวซองได้แสดงไว้ในรูปที่ 8(ข)



(ก) อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตผสมเส้นใยต่างๆ



(ข) การทดสอบหาอัตราส่วนปัวซอง

รูปที่ 8 อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตผสมเส้นใยและการทดสอบ

### 3.2 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย

ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน

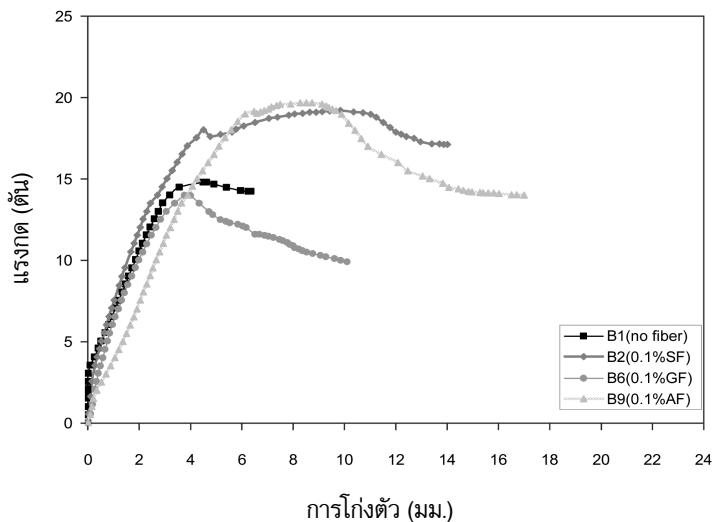
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยแบบแรงกระทำ 3 จุดในการศึกษานี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.1% เท่ากัน พบว่าคานที่ผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกมีความสามารถรับแรงกดที่กระทำ

ช่วงกึ่งกลางคานและมีค่าการโก่งตัวที่สูงกว่าคานคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย ส่วนคานที่ผสมเส้นใยแก้วรับแรงกดได้ใกล้เคียงกับคานคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย ทั้งนี้คานที่ผสมเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกสามารถรับค่าแรงกดได้สูงสุด

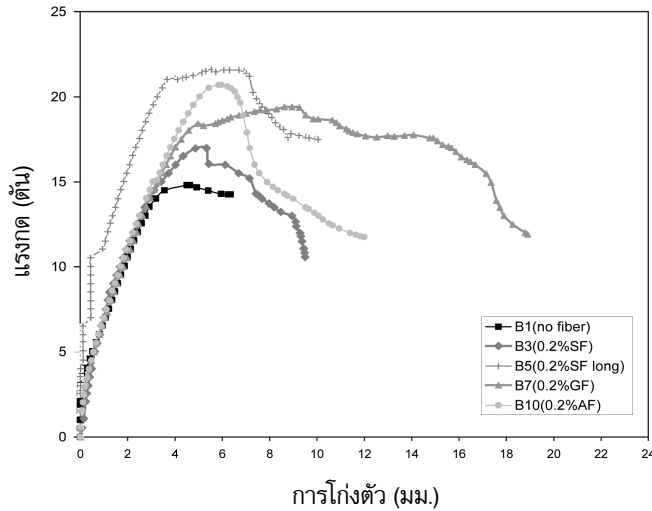


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรคอนกรีต



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.2 ซึ่งพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้น

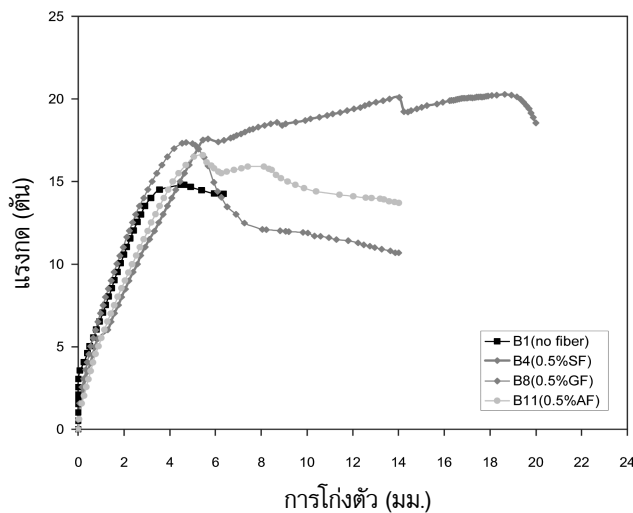
ใยสังเคราะห์อะคริลิกมีความสามารถรับแรงกดช่วงกึ่งกลางคานสูงที่สุด และเมื่อใช้เส้นใยเหล็กเส้นยาวจะรับแรงกดได้มากกว่าเส้นใยเหล็กเส้นสั้นอย่างเห็นชัดเจน



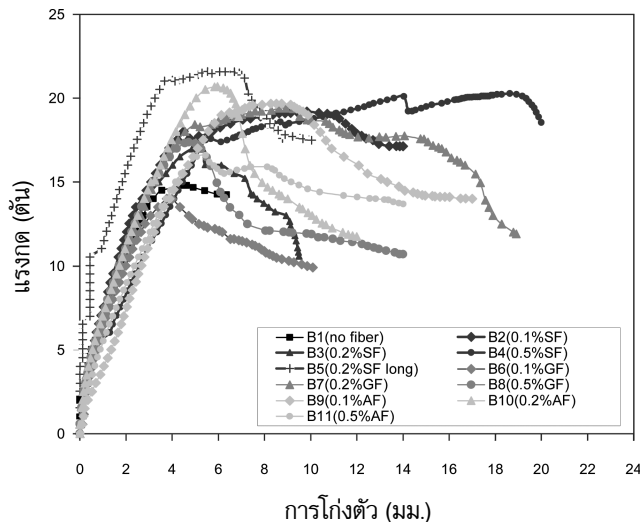
**รูปที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.2 โดยปริมาตรคอนกรีต

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.5 ซึ่งพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กมีความสามารถรับแรงกดที่กระทำช่วงกึ่งกลาง

คานได้มากกว่าคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกอย่างเห็นได้ชัด ส่วนรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของคานทุกตัวในการศึกษานี้



**รูปที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยร้อยละ 0.5 ของปริมาตรคอนกรีต



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย

#### 4. วิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย (BUU method)

ในบทความนี้ ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย (BUU method) ที่สภาวะต่างๆ อันได้แก่ กำลังรับแรงดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าว ( $M_{cr}$ ) กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก ( $M_y$ ) และกำลังรับแรงดัดสูงสุด ( $M_u$ ) โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

1) ระยะเวลาของหน้าตัดคานยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและภายหลังจากรับแรงดัด นั่นหมายถึง การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวบนหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน

2) การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ หน่วยการยึดหดตัวของเหล็กเสริมและคอนกรีตมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกัน

3) หน่วยการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003

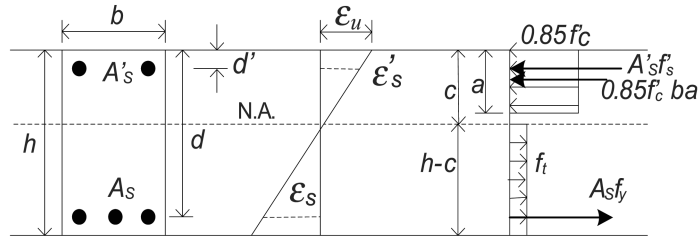
4) การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมีลักษณะสม่ำเสมอเป็นกลุ่มหน่วยแรงเทียบเท่า (Equiva-

lent stress block)

5) จำนวนเส้นใยได้แนวแกนสะเทินที่สามารถรับแรงดัดจากการดัดของคานให้คิดเป็นจำนวนหนึ่งในสามของจำนวนเส้นใยที่ผสมทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากทิศทางการกระจายตัวของเส้นใยให้อ้างอิงกับแนวแกน x, y และ z ในระบบแกนคาร์ทีเซียน

6) กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเมื่อเหล็กเสริมครากมีค่าเท่ากับร้อยละ 70 ของกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย

7) คอนกรีตส่วนที่แตกร้าวได้แกนสะเทินสามารถรับแรงดัดได้ เนื่องจากมีเส้นใยกระจายตัวอยู่ โดยให้การกระจายตัวของหน่วยแรงดัดคอนกรีตนี้มีค่าสม่ำเสมอเท่ากัน และหาได้จากจำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คูณกับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของแรงดัดของเส้นใย ทั้งนี้สมมติฐานข้อนี้เหมือนกับวิธีการของ NJIT [9] ซึ่งมีหลักการในการวิเคราะห์หาลำกำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดของคาน ดังแสดงในรูปที่ 14



(ก) รูปตัดคาน (ข) หน่วยการยึดหดตัว (ค) การกระจายของหน่วยแรงและแรง

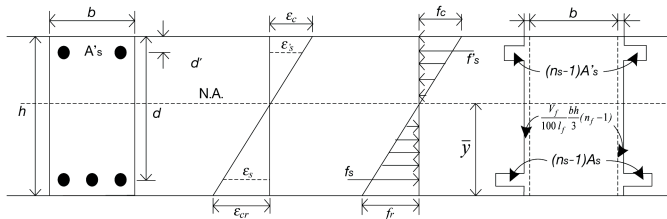
รูปที่ 14 รูปตัดคาน หน่วยการยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรงและแรง ตามวิธีการของ NJIT [9]

$$\text{ดังนั้น } M_n = A'_s f'_s (d - d') + (A_s - A'_s) f_y (d - \frac{a}{2}) + f_t b (h - \frac{a}{\beta_1}) (\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2}) \quad (1)$$

โดยที่  $f_t$  คือหน่วยแรงดึงของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย ซึ่งเท่ากับ  $0.7 P_t n_e$ ,  $P_t$  คือ แรงดึงถอนของเส้นใย (กก.),  $n_e$  คือ จำนวนของเส้นใยประสิทธิภาพในทิศทางใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งเท่ากับ  $\frac{4V_f(0.41)}{\pi d_f^2 l_f}$ ,  $V_f$  คือ ปริมาณเส้นใยในคอนกรีต (ร้อยละโดยปริมาตรของคอนกรีต),  $d_f$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ซม.)  $l_f$  คือ ความยาวของเส้นใย (ซม.) และ  $a = \beta_1 c$

#### 4.1 กำลังรับแรงดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าว (Cracking moment, $M_{cr}$ )

การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเริ่มแตกร้าวสามารถทำได้โดยการแปลงหน้าตัดเหล็กเสริมบนและล่าง และหน้าตัดของจำนวนเส้นใยประสิทธิภาพในทิศทางใดๆ ต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งคิดจากหนึ่งในสามของจำนวนเส้นใยทั้งหมดตามสมมติฐานข้อที่ 5 ให้เป็นหน้าตัดคอนกรีตล้วนเทียบเท่า ดังแสดงในรูปที่ 15



(ก) รูปตัดคาน (ข) หน่วยการยึดหดตัว (ค) การกระจายของหน่วยแรง (ง) หน้าตัดแปลง

รูปที่ 15 รูปตัดคาน หน่วยการยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง และหน้าตัดแปลง

$$\text{จาก } \epsilon_s = \frac{f_s}{E_s}, \epsilon'_s = \frac{f'_s}{E_s}, \epsilon_c = \frac{f_c}{E_c}, \epsilon_f = \frac{f_f}{E_f} \text{ และ } n_s = \frac{E_s}{E_c}, n_f = \frac{E_f}{E_c}$$

$$\text{ดังนั้น ระยะจากขอบล่างคานถึงแกนสะเทิน } \bar{y} = \frac{(bh)\frac{h}{2} + (n_s - 1)A_s(h - d) + (n_s - 1)A'_s(h - d') + \frac{V_f bh}{100 l_f \cdot 3} (n_f - 1) (\frac{h}{2})}{(bh) + (n_s - 1)A_s + (n_s - 1)A'_s + \frac{V_f bh}{100 l_f \cdot 3} (n_f - 1)} \quad (2)$$

$$\text{และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง } I_t = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } I_1 = (\frac{1}{12} bh^3) + [(bh) (\frac{h}{2} - \bar{y})^2], I_2 = (n_s - 1)A'_s [(h - d') - \bar{y}]^2, \\ I_3 = (n_s - 1)A_s [\bar{y} - (h - d)]^2, I_4 = \frac{V_f bh}{100 l_f \cdot 3} (n_f - 1) [\frac{h}{2} - \bar{y}]^2$$

ดังนั้น กำลังรับแรงดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าวเท่ากับ  $M_{cr} = \frac{f_r I_t}{y}$  (4)

และแรงกดดัดที่กระทำเมื่อคานเริ่มแตกร้าว สำหรับ Three-point bend test เท่ากับ  $P_{cr} = \frac{4M_{cr}}{L}$  (5)

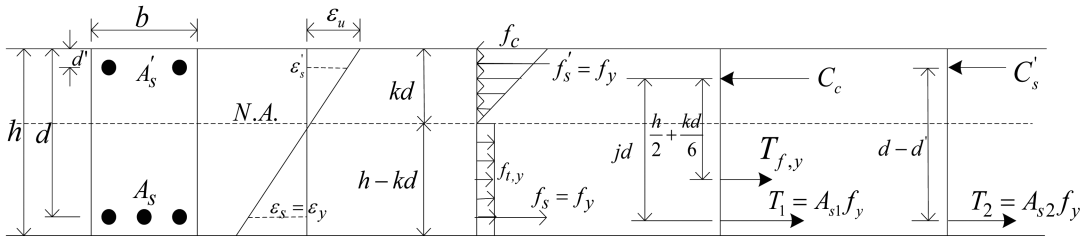
**4.2 กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก (Yielding moment,  $M_y$ )**

กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยและเสริมเหล็กต่ำกว่าสภาวะสมดุล เมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก ( $\epsilon_s = \epsilon_y$  และ  $f_s = f_y$ ) กำลังรับแรงดัดของคานมาจากสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือ  $M_{y1}$  เป็นกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการพิจารณาเสมือนเป็นคานที่มีเหล็กเสริมและเส้นใยรับแรงดึงอย่างเดียวดังรูปที่ 16(ง) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงของเหล็กเสริมรับแรงดึง  $A_{s1}$  แรงดึงของเส้นใยที่

กระจายตัวสม่ำเสมอได้แก่แกนสะเทิน และแรงอัดของคอนกรีต และส่วนที่สองคือ  $M_{y2}$  เป็นกำลังรับแรงดัดที่ได้จากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A_{s2}$  และแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A_{s'}$  ดังแสดงในรูปที่ 16(จ) ซึ่งจากรูปที่ 16 จะได้

$$M_{y1} = (A_s - A_{s'}) f_y j d + f_{t,y} b (h - kd) \left( \frac{h}{2} + \frac{kd}{6} \right) \quad (6)$$

$$M_{y2} = A_{s'} f_y (d - d') \quad (7)$$



(ก) รูปตัดคาน (ข) หน่วยการยึดหดตัว (ค) การกระจายของหน่วยแรง (ง) โมเมนต์  $M_{y1}$  (จ) โมเมนต์  $M_{y2}$

**รูปที่ 16** รูปตัดคาน หน่วยการยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์  $M_{y1}$  และโมเมนต์  $M_{y2}$

ทั้งนี้ให้  $f_{t,y} = 0.70 f_{t,n}$  ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานข้อที่ 6

สำหรับค่า  $k$  สามารถหาได้จาก  $k = -R \pm \sqrt{R^2 - Q}$  (8)

โดยที่  $R = \frac{-(\rho + \rho' - (2 \frac{f_{t,y}}{f_y}))}{-(2.0(\frac{1}{2n_s} + \frac{f_{t,y}}{f_y}))}$  และ  $Q = \frac{(\rho + \frac{\rho' d'}{d} - \frac{f_{t,y}}{f_y})}{-(\frac{1}{2n_s} + \frac{f_{t,y}}{f_y})}$

ดังนั้น กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มครากเท่ากับ  $M_y = M_{y1} + M_{y2}$  (9)

และแรงกดดัดที่กระทำเมื่อเหล็กเสริมคราก สำหรับ Three-point bend test เท่ากับ  $P_y = \frac{4M_y}{L}$  (10)

**4.3 กำลังรับแรงดัดสูงสุด (Nominal moment,  $M_n$ )**

กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยได้จากผลรวมของกำลังรับแรงดัดสองส่วน ได้แก่  $M_{n1}$  เป็นกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานที่เสมือนเป็นคานที่มีเหล็กเสริมและเส้นใยรับแรงดัดอย่างเดียวดังรูป 17(ง) โดยพิจารณาจากเหล็กเสริมรับแรงดัด  $A_{s1}$  กับแรง

อัดในส่วนของคอนกรีต และแรงดึงของเส้นใยที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบริเวณใต้แกนสะเทินกับแรงอัดของคอนกรีต และ  $M_{n2}$  เป็นกำลังรับแรงดัดที่ได้จากแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดัดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A_{s2}$  กับแรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงดัดที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A'_{s2}$  ดังรูปที่ 17(จ) ซึ่งจากรูปที่ 17 จะได้

$$M_{n1} = (A_s - A'_{s1})f_y(d - \frac{a}{2}) + f_{t,n}b(h - \frac{a}{\beta_1})(\frac{h}{2} + \frac{a}{2\beta_1} - \frac{a}{2}) \tag{11}$$

$$M_{n2} = A'_{s2}f_y(d - d') \tag{12}$$

ดังนั้น กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเท่ากับ  $M_n = M_{n1} + M_{n2}$  (13)

โดยที่  $f_{t,n} = \psi_n(\eta_n P f n e)$ ,  $\psi_n$  คือตัวประกอบเนื่องจากผลของปริมาณเส้นใย,  $\eta_n$  คือตัวประกอบกำลัง

ดัดของเส้นใย  $P_f = f_f \frac{\pi d_f^2}{4}$ ,  $n_e = \frac{4V_f(0.33)}{100\pi d_f^2 l_f}$ ,  $a = \frac{A_s f_y - A'_{s1} f'_s + f_{t,n} b h}{0.85 f'_c b + f_{t,n} \frac{b}{\beta_1}}$  และ  $f'_s = \frac{0.003 E'_s (c - d')}{c}$

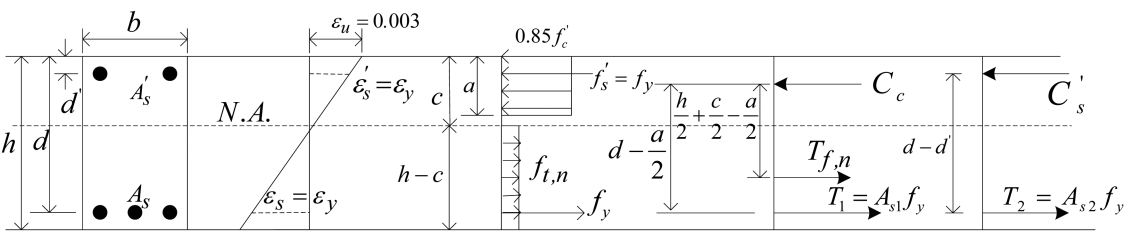
เมื่อนำผลการทดลองของผู้วิจัยมาทำการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) จะได้ค่าตัวประกอบเนื่องจากผลของปริมาณเส้นใยและค่าตัวประกอบกำลังดัดของเส้นใยแต่ละชนิด ดังนี้

สำหรับเส้นใยเหล็ก:  $\psi_n = 0.00010(V_f^{-3.724}) + 0.1036$ ,  $\eta_n = 0.45$  (14)

สำหรับเส้นใยแก้ว:  $\psi_n = 0.09031(V_f^{-0.780}) + 0.0310$ ,  $\eta_n = 0.10$  (15)

สำหรับเส้นใยสังเคราะห์อาคิลิก:  $\psi_n = 0.00530(V_f^{-2.032}) + 0.3018$ ,  $\eta_n = 0.50$  (16)

และแรงกดดัดที่กระทำสูงสุด สำหรับ Three-point bend test เท่ากับ  $P_n = \frac{4M_n}{L}$  (17)

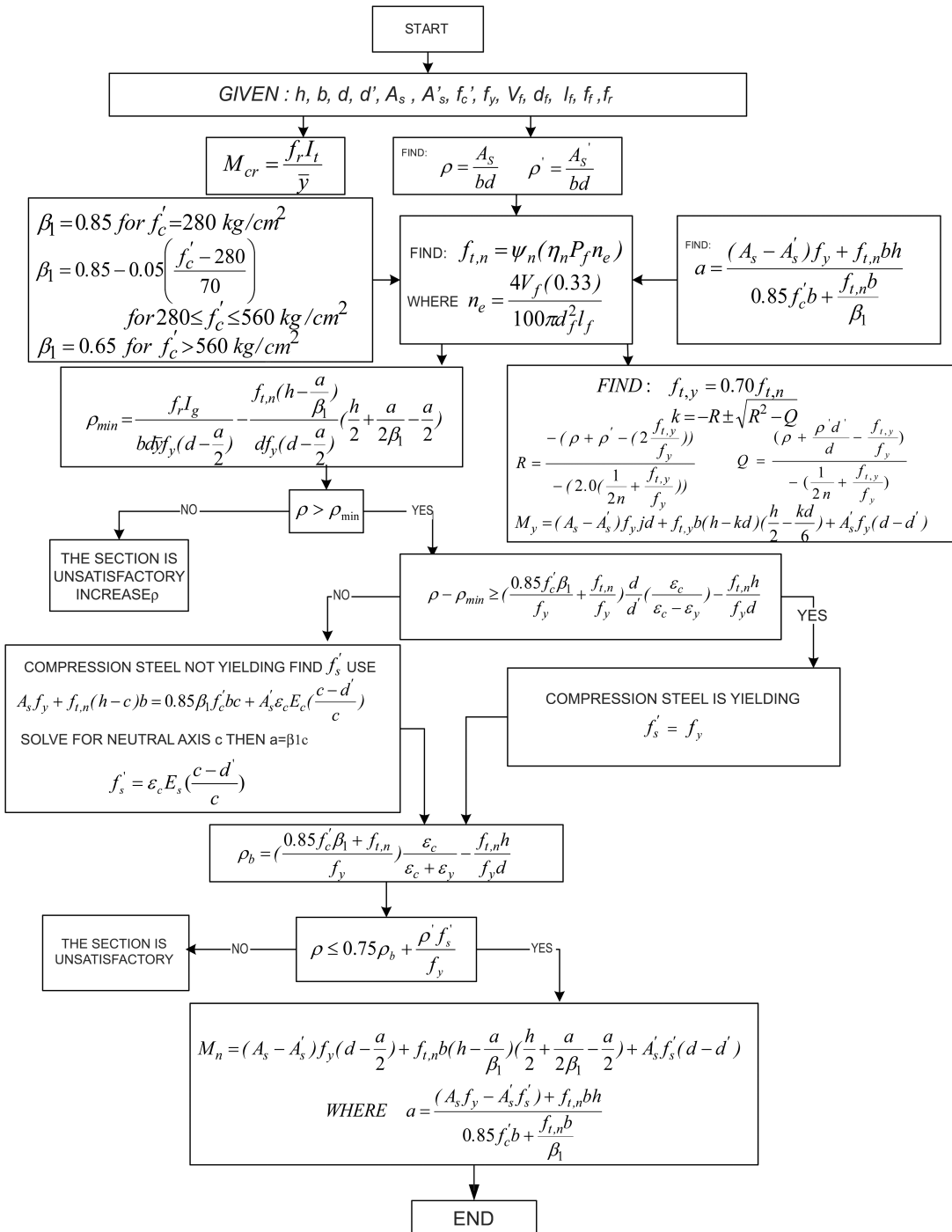


(ก) รูปตัดคาน (ข) หน่วยการยึดหดตัว (ค) การกระจายของหน่วยแรง (ง) โมเมนต์  $M_{n1}$  (จ) โมเมนต์  $M_{n2}$

**รูปที่ 17** รูปตัดคาน หน่วยการยึดหดตัว การกระจายของหน่วยแรง โมเมนต์  $M_{n1}$  และโมเมนต์  $M_{n2}$

ทั้งนี้รายละเอียดขั้นตอนการคำนวณหากำลังรับแรงดัด  
เมื่อคานเริ่มแตกกร้าว กำลังรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่ม

คราก และกำลังรับแรงดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริม  
เหล็กที่ผสมเส้นใย ได้แสดงไว้ในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ขั้นตอนการคำนวณหากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงกดดัดที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยที่ได้จากการศึกษานี้ เปรียบเทียบกับค่าแรงกดดัดที่กระทำต่อคานที่ได้จากการคำนวณตามวิธีที่ได้เสนอข้างต้น พบว่า ที่สภาวะคอนกรีตเริ่มแตกร้าว ค่าแรงกดดัดมีความคลาดเคลื่อนสูงมากเป็นบางค่า ทั้งนี้อาจ

เนื่องจากการอ่านค่าแรงกดที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กตอนเริ่มแตกร้าวพอดินั้นกระทำได้ยาก ส่วนที่สภาวะเหล็กเสริมเริ่มคราก มีผลความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก และที่สภาวะรับแรงกดดัดสูงสุดมีค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมไม่มากเช่นกัน อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

ตารางที่ 3 แรงกดดัดที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยที่สภาวะต่างๆ

แรงกดดัดที่สภาวะต่างๆ	หมายเลข ส่วนผสม	ค่าที่ได้จากการทดสอบ, A (กก.)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, B (กก.)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง, $\frac{B-A}{A} \times 100\%$
แรงกดดัดเมื่อคานเริ่มแตกร้าว ( $P_c$ )	B1	2,500	3,145	25.80
	B2	1,500	3,220	114.66
	B3	3,000	2,986	-0.46
	B4	4,000	4,140	3.50
	B5	3,500	2,221	-36.54
	B6	4,000	3,079	-23.02
	B7	3,000	2,822	-5.93
	B8	3,000	3,069	2.28
	B9	4,000	2,984	-25.41
	B10	3,500	2,829	-19.18
	B11	2,500	2,606	4.24
แรงกดดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก ( $P_k$ )	B1	14,010	14,503	3.52
	B2	16,530	17,061	3.21
	B3	- na -	15,599	-
	B4	17,520	16,559	-5.49
	B5	21,000	15,106	-28.07
	B6	- na -	16,543	-
	B7	18,020	16,806	-6.74
	B8	- na -	16,908	-
	B9	19,000	17,416	-8.34
	B10	- na -	17,471	-
	B11	15,910	19,782	24.33
แรงกดดัดสูงสุด ( $P_u$ )	B1	14,800	15,343	3.67
	B2	19,200	18,437	-3.97
	B3	16,980	16,771	-1.23
	B4	20,280	17,914	-11.67
	B5	21,600	16,187	-25.06
	B6	14,000	17,980	28.43
	B7	19,400	18,236	-6.00
	B8	17,380	18,597	7.00
	B9	19,680	19,151	-2.69
	B10	20,700	19,085	-7.80
	B11	16,600	21,374	28.76

หมายเหตุ - na - หมายถึง ไม่มีข้อมูล

## 5. การทำนายกำลังรับแรงดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กในงานวิจัยอื่น

จากวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใยที่แต่ละสภาวะ (BUU method) ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการดังกล่าวในการทำนายผลการทดลองในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้ทำการทดสอบหากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก โดยผู้วิจัยได้คำนวณหาค่าแรงกดดัดที่กระทำต่อคานที่สภาวะเหล็กเสริม

เริ่มครากกับที่สภาวะสูงสุด แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนั้น

### 5.1 การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กในงานวิจัยอื่น

รายละเอียดที่สำคัญในการทดสอบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กของนักวิจัยอื่น ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รายละเอียดการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กในงานวิจัยอื่น

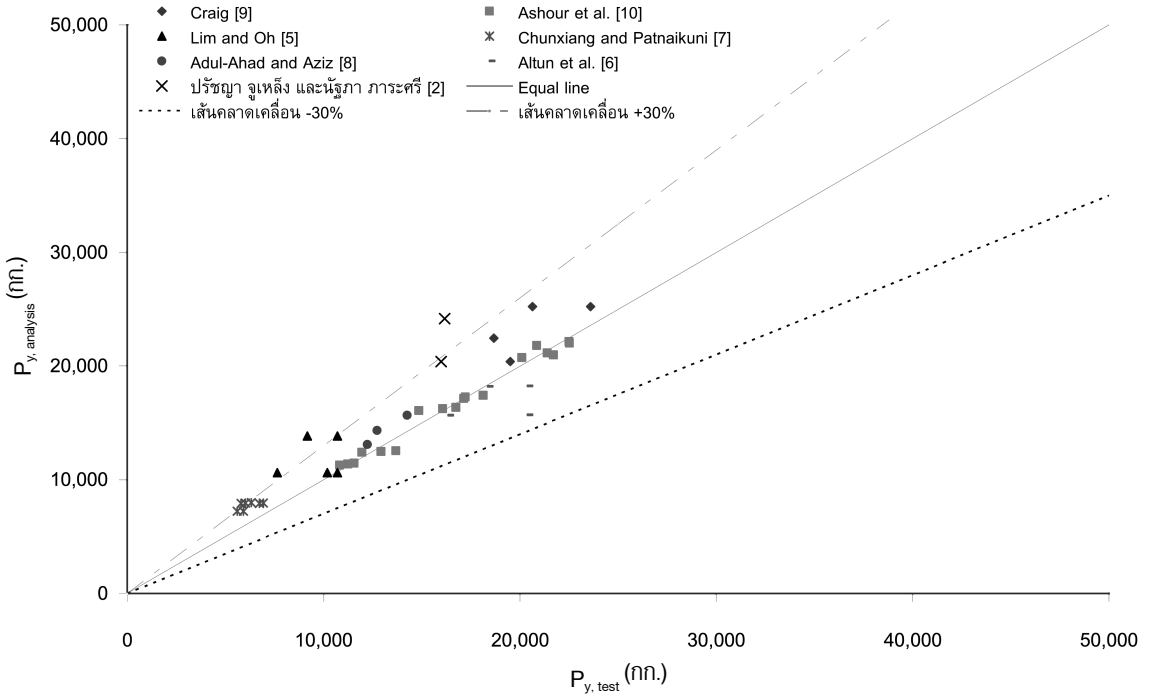
นักวิจัย	หน้าตัด $b \times h$ (ชม. x ชม.)	เหล็กล่าง	เหล็กบน	$f_t$ ของเหล็ก (กก./ชม. <sup>2</sup> )	$f_c'$ (กก./ชม. <sup>2</sup> )	$V_f$ (%)
ปริญญู จูเหล็ก และนัฐภา ภาระศรี [2]	15 x 25	3 $\phi$ 16	2 $\phi$ 12	5,577	300-315	0.5
Craig [9]	17.78 x 38.1	-	-	4,580	330-420	1.75
Chunxiang and patnaikuni [7]	12 x 15	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 6	4,077	800-1,000	1.0
Ashour et al. [10]	20 x 25	2 $\phi$ 18	2 $\phi$ 6	5,403	550-1,150	0.5, 1.0
		3 $\phi$ 18				0.5, 1.0
		4 $\phi$ 18				0.5, 1.0
Abdul-Ahad and Aziz [8]	10 x 21	2 $\phi$ 16 และ 2 $\phi$ 12	2 $\phi$ 16	4,580	180-200	0.5, 1.0, 1.5
Altun et al. [6]	30 x 30	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 16	4,580	200-320	0.36, 0.72
Lim and Oh [5]	10 x 18	2 $\phi$ 16	2 $\phi$ 10	4,281	390-440	1.0, 2.0
Cucchiara et al. [4]	15 x 25	2 $\phi$ 20	2 $\phi$ 10	6,218	400-450	1.0, 2.0

### 5.2 ผลการทำนายแรงกดดัดที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กในงานวิจัยอื่น

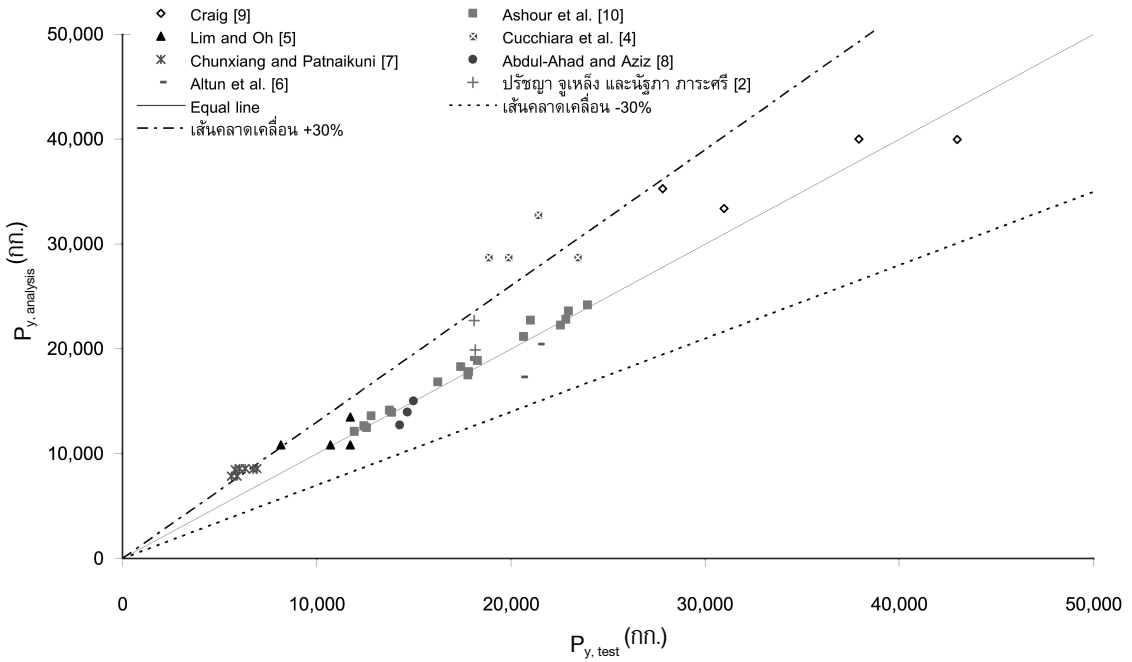
ผลการคำนวณหาแรงกดดัดที่กึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก และที่สภาวะสูงสุดตามวิธีการคำนวณที่เสนอไว้ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยอื่นๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 19

และ 20 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลแล้วพบว่า ที่สภาวะเหล็กเสริมเริ่มครากมีความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก กล่าวคือส่วนใหญ่มีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 30 และเมื่อพิจารณาที่สภาวะรับแรงกดสูงสุดพบว่า มีผลความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่สภาวะเหล็กเสริมครากอยู่เล็กน้อย แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้





รูปที่ 19 แรงกดที่กึ่งกลางคานเมื่อเหล็กเสริมเริ่มครากที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{y, test}$ ) เปรียบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ ( $P_{y, analysis}$ )



รูปที่ 20 แรงกดที่กึ่งกลางคานสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{y, test}$ ) เปรียบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ ( $P_{y, analysis}$ )

## 6. สรุปผล

จากผลการทดลองเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยที่อัตราส่วนต่างๆ และจากวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงดัดที่เสนอไว้ (BUU Method) สามารถสรุปได้ดังนี้

1) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก สามารถรับแรงกดดัดได้สูงกว่าของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ผสมเส้นใย เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตเท่ากัน

2) ที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 0.1 และร้อยละ 0.2 โดยปริมาตรของคอนกรีต การใช้เส้นใยสังเคราะห์อะคริลิกเป็นผสมในคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกดดัดได้สูงกว่าเส้นใยเหล็กและเส้นใยแก้ว แต่ที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต การใช้เส้นใยเหล็กผสมในคานคอนกรีตเสริมเหล็กกลับช่วยให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกดดัดได้สูงกว่าเส้นใยแก้วและเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก

3) เมื่อเปรียบเทียบแรงกดดัดจากการคำนวณกับแรงกดดัดจากผลการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของผู้วิจัยและนักวิจัยอื่นๆ พบว่า วิธีการที่เสนอโดยผู้วิจัย (BUU method) สามารถคำนวณหาแรงกดดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเมื่อคอนกรีตเริ่มแตกร้าว ( $P_{cr}$ ) แรงกดดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มร้าว ( $P_y$ ) และแรงกดดัดสูงสุด ( $P_n$ ) ได้โดยสามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงพอสมควร และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยทุนอุดหนุนวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2548 สัญญาที่ 23/2548 และ 24/2548

## 8. เอกสารอ้างอิง

1. วินิต ช่อวิเชียร, 2545, *การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กโดยวิธีกำลัง*

2. ปรีชญา จูเหล็ก และ นัจฉา ภาระศรี, 2547, *“การศึกษาพลังงานการแตกร้าวของคอนกรีตและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเส้นใย,”* โครงการนวัตกรรมโยธา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา.

3. Annual Book of ASTM Standard, 2000.

4. Cucchiara, C., Mendola, L.L., and Papia, M., 2004, “Effectiveness of Stirrups and Steel Fibers as Shear Reinforcement,” *Cement & Concrete Composite*, Vol. 26 pp. 777-786.

5. Lim, D.H. and Oh, B.H., 1999, “Experimental and Theoretical Investigation on the Shear of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams,” *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 937-944.

6. Altun, F., Haktanir, T., and Ari, K., 2006, “Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams,” *Construction and Building Materials*.

7. Chunxiang, Q. and Patnaikuni, I., 1999, “Properties of High-strength Steel Fiber-reinforced Concrete Beams in Bending,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 73-81.

8. Abdul-Ahad, R.B., and Aziz, O.Q., 1999, “Flexural Strength of Reinforced Concrete T-beams with Steel Fibers,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 263-268.

9. Craig, R., 1989, “Flexural Behavior and Design of Reinforced Fiber Concretes Members,” *International Conference on Recent Developments in Fiber Reinforced Cements and Concretes*, UK, September 18-20, pp. 517-563.

10. Ashour, S.A., Wafa, F.F., and Kamal, M.I., 2000, “Effect of the Concrete Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on the Flexural Behavior of Fibrous Concrete Beams,” *Engineering Structures*, Vol. 22 pp. 1145-1158.