

การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการรีเจนเนอเรทีฟในระบบลิฟต์

**ANALYSIS OF ENERGY SAVING IN ENERGY REGENERATIVE  
UNIT (ERU) FOR AN ELEVATOR SYSTEM**

ธนินทร์ พันธุ์ประยูร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการรีเจนเนอเรทีฟในระบบ  
ลิฟต์

ธนิศร์ พันธุ์ประยูร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการรีเจนเนอเรทีฟ ในระบบลิฟต์
ชื่อ-นามสกุล	นายธนิศร์ พันธุ์ประยูร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

ลิฟต์เป็นพาหนะที่ใช้ในการขนส่งที่จำเป็นสำหรับอาคารสูงซึ่งปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะมีการก่อสร้างอาคารสูงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากพื้นที่ซึ่งมีอยู่จำกัด ดังนั้นการใช้ลิฟต์จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ลิฟต์ทำงานด้วยระบบมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาระบบที่ช่วยให้ลิฟต์ใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยลง โดยใช้หลักการที่เรียกว่ารีเจนเนอเรทีฟ โดยได้มีการนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายคืนให้กับระบบของการไฟฟ้า ทำให้การใช้พลังงานโดยรวมของระบบลิฟต์มีค่าน้อยลง แต่การที่ระบบดังกล่าวจะประหยัดพลังงานได้มากน้อยอย่างไร ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลการประหยัดพลังงานของระบบลิฟต์รีเจนเนอเรทีฟซึ่งติดตั้งที่อาคารเรียนรวมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองการทำงานของระบบลิฟต์รีเจนเนอเรทีฟเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้หรือจ่ายคืนระบบไฟฟ้ากับน้ำหนักที่ลิฟต์บรรทุกด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวจากนั้นตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จริง โดยสมการความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลรูปแบบการจราจรของลิฟต์เพื่อวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานที่จะได้รับ

สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้หรือจ่ายคืนระบบไฟฟ้ากับ น้ำหนักที่ลิฟต์บรรทุก ที่ได้จากการใช้แบบจำลองเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดจริงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 9.3% และผลการประหยัดพลังงานจากการบันทึกค่าเป็นเวลา 30 วัน พบว่าระบบรีเจนเนอเรทีฟ สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ 43% เมื่อเทียบกับลิฟต์ที่ไม่ได้ติดตั้งระบบรีเจนเนอเรทีฟ

**คำสำคัญ :** รีเจนเนอเรทีฟ ผลิตไฟฟ้าจากลิฟต์ ลิฟต์ประหยัดพลังงาน

<b>Thesis Title</b>	Analysis of Energy Saving in Energy Regenerative Unit (ERU) for an Elevator System
<b>Name - Surname</b>	Mr. Thanit Phanprayool
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Dr.-Ing. Boonyang Plangklang
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

The use of elevator is now increasing due to the growth of high building. Elevator is electrical equipment driven by electric motor that consumes much energy therefore there is a technique that has been recently developed to save less energy which called Elevator Energy Regenerative Unit (EERU). This technique has been applied widely to feed generated electricity that produced by elevator motor back to the grid then the EERU can reduce overall electricity consumption. However the reduction of electric consumption depends on many factors therefore this thesis will investigate the energy saving in a regenerative elevator system that installed at RMUTT.

This thesis use MATLAB/Simulink to create the model of regenerative elevator for study the relationship between power from EERU to the grid and relation of passenger load. From this study, it can be determined its relation and verify the results by comparison the calculated power with measured power. This relation can be used for elevator's traffic pattern to estimate the amount of energy saving in the building.

From the experiment, it found that the calculated power and measured power are similar with average error 9.3%. The result of experiment data for 30 days from data logger shows that the regenerative elevator system can save energy about 43% comparing to normal elevator without ERU.

**Keywords:** Energy Regenerative Unit, Electricity from elevator, Energy saving from elevator

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 4 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองต้นแบบชิ้นงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบใจเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ให้ความสนใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณ

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

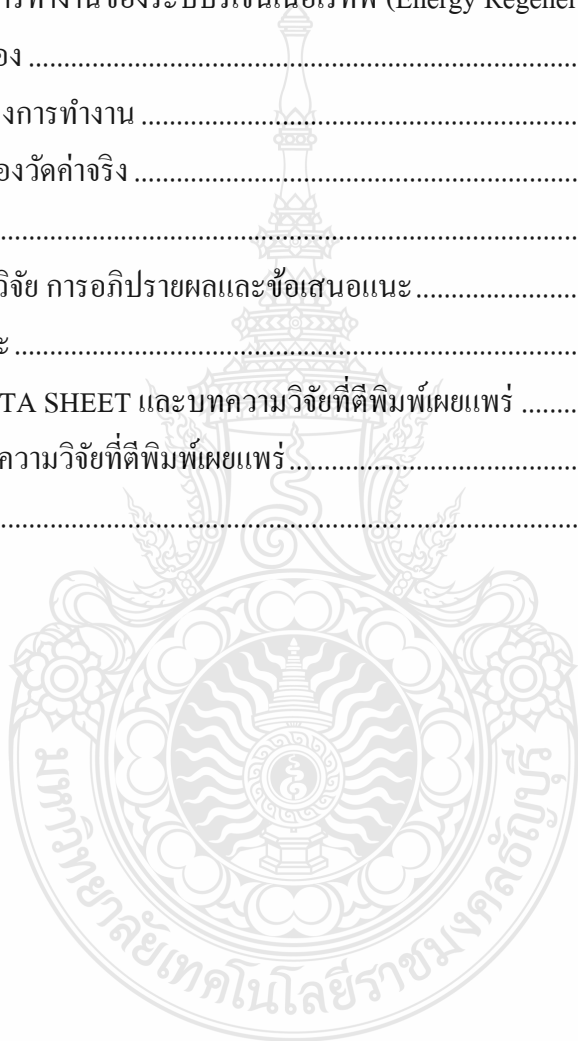
ธนิศร์ พันธุ์ประยูร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
2.1 ประวัติความเป็นมาของระบบลิฟต์.....	5
2.2 การแบ่งประเภทของลิฟต์.....	5
2.3 ส่วนประกอบของระบบลิฟต์.....	9
2.4 เทคโนโลยีในระบบลิฟต์ (Regenerative Drive Lift Technology).....	16
2.5 ระบบลิฟต์แบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Elevator).....	16
2.6 มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร.....	20
2.7 การควบคุมกระแสของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร.....	29
2.8 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และจ่ายไฟกลับให้ระบบไฟฟ้า.....	30
2.9 การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบลิฟต์.....	34
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.11 สรุป.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	36
3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบลิฟต์ตัวอย่าง.....	36
3.3 การจำลองการทำงานของระบบรีเจนเนอเรทีฟ (Energy Regenerative Unit) .....	42
3.4 วิธีการทดลอง .....	44
4.1 ผลการจำลองการทำงาน .....	47
4.2 ผลการทดลองวัดค่าจริง .....	53
4.3 สรุป .....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	58
ภาคผนวก ก DATA SHEET และบทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ .....	62
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	101



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบเครื่องควบคุมลิฟต์แบบรีเลย์และแบบไมโครคอมพิวเตอร์.....	8
2.2	โหมดการทำงานของระบบลิฟต์.....	17
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน..	43
3.2	ข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์ ชนิด PM SYNCHRONOUS GEARLESS TRACTION MACHINE สำหรับงานวิจัย .....	44
4.1	กำลังไฟฟ้าจากการจำลองที่ภาระบรรทุกต่างๆ ขณะลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้น.....	49
4.2	ผลการทดลองวัดค่าจริง .....	53





## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ระบบลิฟต์ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน .....	4
2.2 ส่วนประกอบของระบบลิฟต์.....	9
2.3 ผู้ควบคุมระบบลิฟต์.....	10
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้าพร้อมด้วยชุดเฟืองในระบบลิฟต์ .....	11
2.5 ล้อสายพาน (Sheave).....	11
2.6 เกียร์ชนิดเฟืองหนอน.....	12
2.7 เกียร์ชนิดเกียร์เฟืองกันหอย .....	13
2.8 การขับแบบไม่มีชุดเฟือง.....	13
2.9 ส่วนประกอบของตุ้มถ่วงน้ำหนัก .....	14
2.10 รางลิฟต์ .....	15
2.11 ห้องโดยสาร (Passenger Car) .....	15
2.12 โหมดการทำงานของระบบลิฟต์ ที่เป็นมอเตอร์ และเจนเนอเรเตอร์.....	17
2.13 การทำงานของมอเตอร์ในโหมดต่างๆ .....	18
2.14 กราฟการทำงานของมอเตอร์ในโหมดต่างๆ .....	19
2.15 มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรต่อล้อสายพานโดยตรงไม่ใช่เฟืองทด.....	20
2.16 โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว (2 คู่ขั้ว) .....	22
2.17 แบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	23
2.18 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่เทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์ .....	24
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแกน $qd$ และแกน $abc$ .....	25
2.20 แผนภาพกรอบของการควบคุมกระแสแบบอิสเตอร์ซิส .....	29
2.21 แผนภาพกรอบของการควบคุมกระแสแบบปรับตามสนามแม่เหล็ก.....	30
2.22 ตัวอย่างวงจรขับแบบ Non-Regenerative.....	30
2.23 ตัวอย่างวงจรขับแบบ Regenerative .....	31
2.24 วงจรบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ .....	32
2.25 DC Bus Voltage ในสภาวะ Generating และ Motoring.....	33
2.26 ข้อมูลสภาพการใช้นาระบบลิฟต์.....	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.1	ความเร็วรอบและแรงบิดในการทำงาน 4 โหมด ของมอเตอร์ ..... 38
3.2	คุณลักษณะกราฟความเร็วรอบและแรงบิดในการทำงาน 4 โหมด ของมอเตอร์..... 38
3.3	ลักษณะของ มอเตอร์แบบ Permanent Magnet Synchronous Machine สำหรับงานวิจัย
3.3.2	Energy Regenerative Unit ..... 38
3.4	แผนภาพไดอะแกรมของระบบรีเจนเนอเรทีฟ..... 39
3.5	แผนผังการทำงานของโปรแกรมสำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์และการแสดงผล..... 40
3.6	โปรแกรมบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานและแสดงผลการใช้พลังงาน ..... 41
3.7	แบบจำลองการทำงานใน MATLAB Simulink ..... 42
3.8	ตำแหน่งการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จริง..... 45
3.9	อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในห้องควบคุมของระบบลิฟต์ อาคารเรียนรวมมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี..... 45
3.10	การวัดค่าพลังงานไฟฟ้าและบันทึกผลการทดลองภายในห้องควบคุมระบบลิฟต์..... 46
3.11	ผลการจำลองการทำงาน
4.1	แบบจำลองการทำงานของ Permanent Magnet Synchronous Machine ใน MATLAB เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานในสภาวะการรับโหลดที่ต่างกัน ..... 47
4.2	ลิฟต์บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัด กรณีเคลื่อนที่ขึ้น ..... 48
4.3	ลิฟต์ตัวเปล่า กรณีเคลื่อนที่ขึ้น ..... 48
4.4	ลิฟต์บรรทุกน้ำหนัก 500 กิโลกรัม กรณีเคลื่อนที่ขึ้น ..... 49
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับภาระบรรทุกของลิฟต์ กรณีที่ลิฟต์เคลื่อนที่ขึ้น ..... 50
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับภาระบรรทุกของลิฟต์ ขณะลิฟต์เคลื่อนที่ลง..... 51
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับภาระบรรทุกของลิฟต์ที่ไม่มีระบบรีเจนเนอเรทีฟ. 53
4.8	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการคำนวณกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้กรณีลิฟต์เคลื่อนที่ ขึ้น..... 54
4.9	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการคำนวณกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้กรณีลิฟต์เคลื่อนที่ลง 55
4.10	ข้อมูลการใช้พลังงานของระบบลิฟต์ในงานวิจัยที่บันทึกไว้..... 55

## สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
d-axis		แกนอ้างอิงที่ตรงกับ สนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (Direct Axis)
q-axis		แกนอ้างอิงที่ตั้งฉากกับ สนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (Quadrature Axis)
B	นิวตันเมตร – วินาที	ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน
$e_{ss}$	เปอเซ็นต์	Steady-State Error ค่าความ ผิดพลาดผลต่างระหว่างอินพุตและ เอาต์พุตที่สภาวะคงตัว
$i_{abc}$	แอมแปร์	กระแสมอเตอร์สามเฟส
$i_d$	แอมแปร์	กระแสมอเตอร์ที่แกนอ้างอิงดี
$i_q$	แอมแปร์	กระแสมอเตอร์ที่แกนอ้างอิงคว
J	กิโลเมตร – เมตร <sup>2</sup>	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ และโหลด
$K_p$		ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain)
$K_i$		ค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัล (Integral Gain)
$K_d$		ค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (Derivative Gain)
$L_d$	เฮนรี	ความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์ที่ แกนอ้างอิงดี
$L_q$	เฮนรี	ความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์ที่ แกนอ้างอิงคว

### สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
P	ขั้ว	จำนวนขั้วแม่เหล็ก
$R_s$	โอห์ม	ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส
$T_e$	นิวตัน – เมตร	แรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์
$T_L$	นิวตัน – เมตร	แรงบิดของโหลด
$T_i$		เวลาอินทิกรัล (Integral time)
$T_d$		เวลาอนุพันธ์ (Derivative time)
$t_r$	วินาที	ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) ช่วงเวลาที่ระบบทำงานในช่วงเริ่มต้น คัดที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 10% - 90%
$t_s$	วินาที	ช่วงเวลาเข้าที่ (Setting Time) ช่วงเวลาก่อนที่สัญญาณจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State)
$t_p$	วินาที	เวลาของค่าสูงสุด (Peak Time) เวลาที่ผลตอบสนองมีค่าสูงสุด
$U_{abc}$	โวลต์	แรงดันมอเตอร์สามเฟส
$v_d$	โวลต์	แรงดันมอเตอร์ที่แกนอ้างอิงดี
$v_q$	โวลต์	แรงดันมอเตอร์ที่แกนอ้างอิงคว
$\lambda_q$	เวเบอร์	ค่าฟลักซ์ค้ำในแกนอ้างอิงคว
$\lambda_d$	เวเบอร์	ค่าฟลักซ์ค้ำในแกนอ้างอิงดี
$\lambda_{pm}$	เวเบอร์	ฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ ชักนำกระแสไฟฟ้าโดยใช้แม่เหล็ก
$\omega_m$	เรเดียน/วินาที	ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์
$\omega_r$	เรเดียน/วินาที	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
$\omega_n$		ความถี่ธรรมชาติไม่หน่วง
$\theta_m$	เรเดียน	ตำแหน่งเชิงมุมทางกลของโรเตอร์
$\theta_r$	เรเดียน	ตำแหน่งเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์
$e(t)$		สัญญาณความผิดพลาด หรือ สัญญาณปฏิบัติการ
$u(t)$		ค่าสัญญาณออกของตัวควบคุม
$y(t_p)$		ค่าผลตอบสนองที่เวลาสูงสุด
$y(t_\infty)$		ค่าผลตอบสนองคงตัว



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างอาคารในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีความทันสมัยมากขึ้น เพื่อรองรับความเจริญของประเทศและตอบสนองความต้องการทางด้านที่อยู่อาศัยที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างของอาคารโดยส่วนใหญ่จะเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานประหยัดและยังสามารถก่อสร้างให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามรูปแบบสถาปัตยกรรมได้แก่อย่างไรก็ตาม คอนกรีตเป็นวัสดุเปราะและมีความยืดหยุ่นต่ำซึ่งเป็นจุดด้อยจึงมีความพยายามที่จะหาวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวของคอนกรีตให้เพิ่มสูงขึ้นซึ่งการใช้เส้นใยเพิ่มในผสมคอนกรีตก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยจะเป็นวัสดุเหนียวและสามารถรับแรงดึงได้สูงจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียวของคอนกรีตให้ดีขึ้น

เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เป็นวัสดุเส้นใยชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติ ในการที่จะทำให้คอนกรีตมีความเหนียว (Ductility) และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ดี (Energy Absorption) หลักของการใช้เส้นใยผสมลงในคอนกรีตก็คือ การยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีตเมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งถ้าเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับมอร์ตาร์ที่เพียงพอ จะทำให้สามารถยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้หรือทำให้คอนกรีตยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มสูงขึ้นความสามารถของคอนกรีตที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก เรียกว่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งคุณสมบัติด้านความเหนียวและค่าการดูดซับพลังงานของคอนกรีตสามารถทดสอบได้จากแรงดัด (Flexural Toughness) และจากกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)

จากการศึกษาพบว่า การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถทดสอบได้หลายวิธีหนึ่งในนั้นคือการทดสอบแบบดุ่มน้ำหนัก (Drop – Weight Test) สำหรับในประเทศไทยการทดสอบคอนกรีตด้วยวิธีนี้ยังไม่แพร่หลายนักเนื่องจากเครื่องมือในการทดสอบการรับแรงกระแทกปัจจุบันมีน้อยและราคาค่อนข้างสูงดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลในการต้านทานแรงกระแทก ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใย ศึกษาพลังงานกระแทกที่รอยร้าวเริ่มต้น (First Crack) และที่การวิบัติ (Ultimate Failure) ศึกษาค่าการโก่งตัว ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหนักดุ่มและความเร็วในการกระแทก ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงวิธีที่จะทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกโดยการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ

ขึ้นมาเอง และหาวัสดุที่จะนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องโดยตรงต่อการรับกำลังและความคงทนของคอนกรีต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใส่ในคอนกรีต ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและความสามารถในการเทของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในสัดส่วนต่างๆ กัน

1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านกำลังรับแรงอัด แรงดึงผ่าซีก และกำลังรับแรงคัดของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในสัดส่วนต่างๆ กัน

1.2.3 พัฒนาเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนน้ำหนัก (Drop – Weight Impact Test)

1.2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำหนักลูกค้อน และความเร็วในการกระแทก

1.2.5 ศึกษาพลังงานกระแทก (Impact Energy) ที่รอยร้าวเริ่มต้น (First Crack) และที่การวิบัติ (Ultimate Failure) และระยะโค้งตัวของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในสัดส่วนต่างๆ กัน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทดสอบคุณสมบัติในด้าน การยุบตัว (ASTM C 143) กำลังรับแรงอัด (ASTM C 39) กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) และกำลังรับแรงคัด (ASTM C 293) ของคอนกรีตธรรมดาเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

วิธีการทดสอบแรงกระแทกในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นใหม่โดยใช้วิธีการทดสอบแบบค้อนน้ำหนัก (Drop – Weight Test) น้ำหนักค้อน 4.54 กก. และ 9.09 กก. ความเร็วในการตกกระทบ 3 ม./วินาที ตัวอย่างในการทดสอบใช้คอนกรีตรูปทรงกาน ขนาด 10 x 10 x 50 ซม.

เส้นใยในการทดสอบใช้เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) Dramix RC-60/70-BN ชนิดงอปลาย (Hook End) ความยาว 60 มม. ปริมาณที่ใส่ร้อยละ 0.50.75 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหนักลูกค้อนและความเร็วในการกระแทก จากการทดสอบด้วยวิธีค้อนน้ำหนัก

คำนวณหาค่าพลังงานกระแทกที่รอยร้าวเริ่มต้น (First Crack) ที่การวิบัติ (Ultimate Failure) และระยะโค้งตัวจากผลการทดสอบแรงกระแทก ของคอนกรีตธรรมดาเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใส่ในคอนกรีต ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กและความสามารถในการเท ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ในสัดส่วนต่างๆ กัน

1.4.2 ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลด้านกำลังรับแรงอัด แรงดึงผ่าซีก และกำลังรับแรงค้ำ ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

1.4.3 สามารถพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาใช้เองได้ โดยมีความสามารถทดสอบแรงกระทำได้ตามข้อกำหนด

1.4.4 ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลในการต้านทานแรงกระทำของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

1.4.5 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำหนักรวมและความเร็วในการกระทำ จากการทดสอบด้วยวิธีต้อน้ำหนัก

1.4.6 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับผู้สนใจ ในการศึกษาวิจัยพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตต่อไป





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึง ความคงทนของคอนกรีต คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก การดูดซับพลังงาน การต้านทานแรงกระแทก ตลอดจนงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ ต่อการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีดุ่มน้ำหนัก

#### 2.1 ความคงทนของคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากซึ่งหมายถึงความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อม ทนต่อการทำลายจากสารเคมี ทนต่อแรงกระแทกหรือการกระทำอื่นๆ ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้น คอนกรีตที่คงทนจะต้องคงสภาพได้นานตลอดอายุการใช้งาน สิ่งก่อสร้างคอนกรีตจำนวนมากที่ถูกออกแบบและก่อสร้างโดยไม่คำนึงถึงความคงทน จึงส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการซ่อมแซมรวมทั้งอายุการใช้งานของสิ่งก่อสร้างนั้นลดลงด้วย [1]

2.1.1 การเสื่อมความคงทนหรือเสื่อมสภาพของคอนกรีต (Deterioration of Concrete) สาเหตุของการเสื่อมความคงทนหรือเสื่อมสภาพของคอนกรีต สามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิดดังนี้ [1]

1) สาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การแข็งตัวและละลายของน้ำในคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ (Freezing and Thawing)

2) สาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนเนชั่น (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างและมวลรวม (Alkali – Aggregate Reaction) คอรัไวด์

3) สาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การกัดกร่อนด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

4) สาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ ตะไคร่ รา หรือแบคทีเรีย

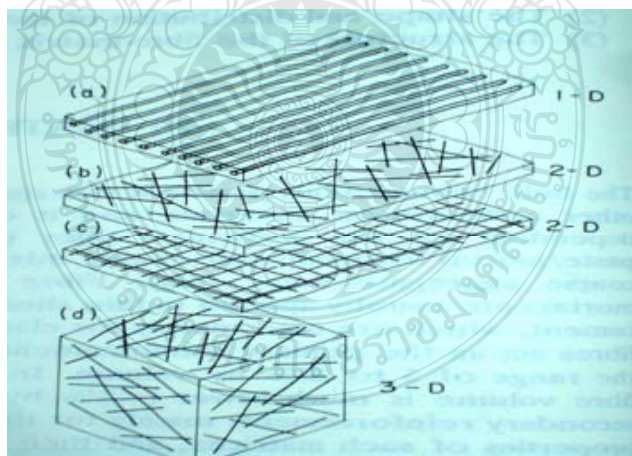
5) สาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

## 2.2 คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete)

คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดที่ดี แต่ก็จัดว่าเป็นวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle Material) มีคุณสมบัติในด้านการรับแรงดึงที่ต่ำ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด การที่จะทำให้คอนกรีตรับแรงดึงได้ดีหรือมีความเหนียว (Ductility) นั้น จำเป็นต้องใส่วัสดุเสริมกำลังเข้าไปในเนื้อคอนกรีต โดยวัสดุจำพวกเส้นใยถือว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาผสมลงในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติดังกล่าว เป็นที่รู้จักกันในชื่อ คอนกรีตผสมเส้นใยหรือ Fiber Reinforced Concrete (FRC) โดยคอนกรีตทั่วไปที่มีการเติมเส้นใยที่มีลักษณะกระจายตัวออกจากกันแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Discrete Fiber) เข้าไประหว่างการผสม ทั้งเส้นใยไฟเบอร์ ที่ได้จากรธรรมชาติ เช่น ใยหิน ฟางข้าว ป่าน ปอ เป็นต้น เส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยเซรามิก เส้นใยคาร์บอน เส้นใยไนลอน และเส้นใยโพลี โพรพิลีน เป็นต้น [2]

### 2.2.1 โครงสร้างของคอนกรีตผสมเส้นใย (Structure of Fiber Reinforced Concrete)

ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ (ก) Matrix ได้แก่ มอร์ตาร์ (ข) Reinforcement ได้แก่ เส้นใย สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC) จัดเป็นวัสดุประกอบผสมเส้นใยชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fibrous Composite Material) คือเส้นใยที่ผสมลงไปจะมีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอน อยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (d) [2]



(a) and (c) Continuous Reinforcement (b) Discrete, Short Fiber 2-D (d) Discrete, Short Fiber 3-D

ภาพที่ 2.1 การกระจายตัวของเส้นใย ในลักษณะต่างๆ [2]

เนื่องจากคอนกรีตผสมเส้นใย เป็นวัสดุประกอบ ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย ภายใต้สภาวะแรงกระทำต่างๆ จำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนดังนี้

1) โครงสร้างของมอร์ตาร์ (Structure of the Matrix) ในคอนกรีตผสมเส้นใยหมายถึงมอร์ตาร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา การผสมเส้นใยโดยทั่วไปจะผสมไม่เกินร้อยละ 2 [2]

2) รูปร่างและลักษณะการกระจายตัวของเส้นใย (Shape and Distribution of the Fibers) เส้นใยที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตนั้นมีการออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างกัน โดยเส้นใยที่มีรูปร่างต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยที่ได้แตกต่างกัน [2]

3) ผิวสัมผัสระหว่าง Matrix และเส้นใย (Structure of the Matrix-Fiber Interface) ผิวสัมผัสระหว่างมอร์ตาร์ กับเส้นใย ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใย เนื่องจากผิวสัมผัสจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่าง Matrix กับเส้นใย สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง Matrix กับเส้นใย คือลักษณะรูปร่างและชนิดของเส้นใย เส้นใยบางชนิดอาจจะทำปฏิกิริยาทางเคมี กับซีเมนต์และอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไปตามเวลาบริเวณผิวสัมผัส เช่น เส้นใยหิน (Asbestos) เป็นต้น [2] โดยทั่วไปบริเวณรอบๆ ผิวของเส้นใยจะพบว่ามีพรุนมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากมีช่องว่างที่เกิดขึ้นเนื่องจาก การเชื่อมของคอนกรีตเมื่อน้ำหรือฟองเดินทางขึ้นสู่ด้านบนหากมีเส้นใยกั้นอยู่จะทำให้ไปสะสมรอบๆ เส้นใย [3]

#### 2.2.2 หลักการทำงานของเส้นใย

เมื่อคอนกรีตผสมเส้นใย ถูกแรงกระทำ มอร์ตาร์จะเกิดการแตกร้าว (Cracking) จะมีการถ่ายเทแรงกระทำไปยังเส้นใยผ่านทางผิวสัมผัส หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสดี เส้นใยก็จะรับแรงได้อย่างเต็มที่ซึ่งจะทำให้การแตกร้าวหยุดหรือไม่ขยายตัว แต่หากแรงกระทำภายนอกมีค่าสูงกว่ากำลังที่เส้นใยจะรับได้ก็จะทำให้เกิดการยืดตัวจนขาดออก ซึ่งโดยปกติกำลังของคอนกรีตผสมเส้นใยจะวัดเป็นค่าความเหนียว (Toughness) ซึ่งค่าจะสูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยด้วย แต่หากแรงยึดเหนี่ยวบริเวณผิวสัมผัสไม่ดีก็จะทำให้เส้นใยรับแรงไม่ได้เต็มที่ ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังที่ได้ต่ำ ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการออกแบบรูปร่างและผิวสัมผัสของเส้นใยเป็นลักษณะต่างๆ กัน ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และเส้นใยซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวขึ้นหรือดูดซับพลังงานได้ดีขึ้น [2]

### 2.2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

1) ความสามารถในการเทได้ (Workability) การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตทำให้ความสามารถในการเทของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการใส่ที่สูงขึ้น [2] การศึกษาเปรียบเทียบคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก พบว่า การใส่เส้นใยเหล็กลงในคอนกรีตมีผลทำให้ค่าการยุบตัวลดลง ตามปริมาณและขนาดของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น [4]

2) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทั่วไปการผสมเส้นใย ลงในคอนกรีตไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่อาจมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10 แต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากมีผลทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ตำการอัดแน่นจึงทำได้ยาก [2, 4]

3) กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) การผสมเส้นใยลงในคอนกรีต จะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดึงดีขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากตัวเส้นใยมีความเหนียวและรับแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา ในสภาวะที่แรงดึงกระทำเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวหน้าที่หลักของเส้นใยไฟเบอร์คือยับยั้งการขยายตัวของรอยแตก สำหรับการผสมเส้นใยเหล็กลงในคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเรียงตัวของเส้นใยมีผลมากกับกำลังรับแรงดึง หากเส้นใยเหล็กเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการรับแรงดึงพบว่ากำลังรับแรงดึงอาจสูงถึงร้อยละ 133 สำหรับการผสมเส้นใยเหล็กชนิดตรงในปริมาณร้อยละ 5 [2]

4) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) การผสมเส้นใยเหล็กลงในคอนกรีต จะมีผลทำให้กำลังดัดของคอนกรีตสูงขึ้นมาก มากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดและกำลังดึง ทั้งนี้ยังเคยพบว่าค่ากำลังดัดสามารถเพิ่มขึ้นมากถึงร้อยละ 100 และการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย (Aspect Ratio) จะทำให้ค่ากำลังดัดสูงขึ้น [2] ซึ่งความสามารถในการรับแรงดึงและแรงดัดจะดีขึ้นมากเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ เช่น การเรียงตัวของเส้นใยเหล็กแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยเหล็กกับซีเมนต์เพสต์ รวมทั้งรูปร่างของเส้นใยเหล็กเป็นต้น [3]

ความเหนียว (Toughness) และการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) จุดประสงค์หลักของการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตคือการยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีตเมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งถ้าเส้นใยมีค่ากำลังรับแรงและมีแรงยึดเหนี่ยวกับ Matrix ที่เพียงพอจะทำให้สามารถยับยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหรือทำให้คอนกรีตยังคงรับแรงอยู่ได้ในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นหรือเรียกว่ามีความเหนียว (Ductility) [5] การวัดค่าความเหนียวที่นิยมใช้คือ Flexural Toughness โดยวัดจากพื้นที่ใต้กราฟของ Complete Load-Deflection Curve in Flexure ค่าที่ได้ก็คือค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทำให้คอนกรีตแตกหักหรือเรียกว่าการดูดซับพลังงาน มาตรฐานการวัดค่าความเหนียวสามารถวัดได้มี 2 วิธี

คือ ASTM C 1018 [5] และ JSCE SF-4 [5] โดยวิธีแรกจะวัดเป็นค่าดัชนีความเหนียว คือพื้นที่ใต้กราฟที่ค่า Deflection จุดที่พิจารณาเป็นกึ่งท่าของพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดรอยร้าวแรก (First Crack) สำหรับวิธี JSCE SF-4 จะวัดค่าที่จุดๆ เดียว และเนื่องจากเส้นใยแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมภายหลังการเกิดรอยร้าวแรก (First Crack) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นวิธีที่สองนี้จะมีข้อด้อยตรงที่ไม่สามารถบอกพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กได้ครบ สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ใช้เส้นใยเหล็กชนิดไม่เรียบหรือมีการงอปลายหรือมีค่าอัตราส่วนความยาวของเส้นใย (Aspect Ratio) สูง จะให้ค่าความเหนียวและการดูดซับพลังงานที่มากกว่าเส้นใยเหล็กชนิดผิวเรียบ การเพิ่มปริมาณเส้นใยมีผลทำให้ค่าความเหนียวและค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น [5] การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ที่ส่วนผสมร้อยละ 0.5 1 และ 1.5 โดยปริมาตรของคอนกรีตและทำการวัดค่าความเหนียว (Toughness) ตามมาตรฐาน ASTM C1018 พบว่า เส้นใยเหล็กมีผลทำให้คอนกรีตมีค่าความเหนียวและการดูดซับพลังงานดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา สำหรับเส้นใยเหล็กมีการเพิ่มขึ้นของกำลังและความเหนียวตั้งแต่เริ่มมีการแอนตัว ส่วนในแง่ปริมาณสัดส่วนผสมของเส้นใยพบว่า การผสมเส้นใยเหล็กมากขึ้นมีผลทำให้กำลังและการดูดซับพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น [6]

5) ความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact Resistance) ของคอนกรีตธรรมดา มีความสามารถในการรับแรงกระแทกค่อนข้างต่ำการผสมเส้นใยเหล็กลงในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น [5]

### 2.3 การต้านทานแรงกระแทก (Impact Resistance)

การปรับปรุงการต้านทานแรงกระแทก (การดูดซับพลังงานทางพลศาสตร์) คือหนึ่งในลักษณะที่สำคัญของคอนกรีตผสมเส้นใย [7– 8] ได้มีการทดสอบต่างๆ เพื่อวัดค่าการต้านทานแรงกระแทก ตามชนิดตามจำพวกของเส้นใย ขึ้นอยู่กับอิทธิพลต่างๆ ทางกลและค่าที่เกิดขึ้นระหว่างการกระแทก โดยมีประเภทของการทดสอบต่างๆ ได้แก่ (a) Weighted Pendulum Charpy – type Impact Test (b) Drop-Weight Test (c) Constant Strain-Rate Test (d) Projectile Impact Test (e) Split-Hopkinson Bar Test (f) Explosive Test (g) Instrumented Pendulum Impact Test. [7]

การวัดค่าการต้านทานแรงกระแทก ได้แก่ (1) พลังงานการแตกร้าวของรอยบากคานขึ้นทดสอบ จากการคำนวณค่าที่เหลือจาก Pendulum (2) จากการคำนวณจำนวนครั้งของการกระแทกจากการกำหนดปริมาณแรงกระแทก (3) จากขนาดของ หลุม รู สะเก็ด หรือรอยบิ่นของผิวหน้าชั้นทดสอบที่ถูกต้อนที่ตกกระแทก ผลลัพธ์จากการทดสอบที่เป็นประโยชน์ เพื่อหาความสัมพันธ์และข้อดีของความแตกต่างของสัดส่วนผสม เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว [7]

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ต่างๆ ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของชั้นทดสอบ การยอมรับการทดสอบ ทิศทางของแรงกระทำ อัตราของแรงและการกำหนดการพิจารณาการวิบัติ ปัจจุบันเครื่องมือในการทดสอบได้พัฒนาจนเป็นที่น่าเชื่อถือสามารถตรวจสอบค่าต่างจนเป็นที่ยอมรับในระหว่างที่เกิดแรงกระทำ การโก่งตัวและเกิดความเครียด เงื่อนไขพื้นฐานของคุณสมบัติของวัสดุ อยู่ที่อัตราความเครียดสำหรับใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรงตัดค่าปริมาณการดูดซับพลังงานค่าสตีเฟนสและรูปแบบการเปลี่ยนรูปร่าง ทั้งนี้ข้อดีและข้อเสียที่กล่าวมาข้างต้นจากการวัดค่าการต้านทานแรงกระทำของคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถจะเป็นประโยชน์และสามารถใช้ในการอ้างอิงได้ [7]

## 2.4 แรงกระแทก (Impact Loading)

เป็นน้ำหนักหรือแรงที่เคลื่อนที่มาปะทะหรือกระแทกต่อส่วนของโครงสร้างใดๆ ด้วยความเร็วต่ำหรือสูงและอาจกระทำเพียงชั่วคราวหรือเป็นเวลานานก็ได้ เมื่อขนาดของน้ำหนักบรรทุกเท่ากันหน่วยแรงที่เกิดจากการกระแทกนี้ จะมีค่ามากกว่าหน่วยแรงที่เกิดจากการกระทำของน้ำหนักแบบไม่เคลื่อนที่ ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักหรือแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างด้วยความเร็วต่ำเท่านั้น เช่น การปล่อยน้ำหนักให้กระแทกลงบนคาน เป็นต้น [9]

### 2.4.1 พลังงานสะสม

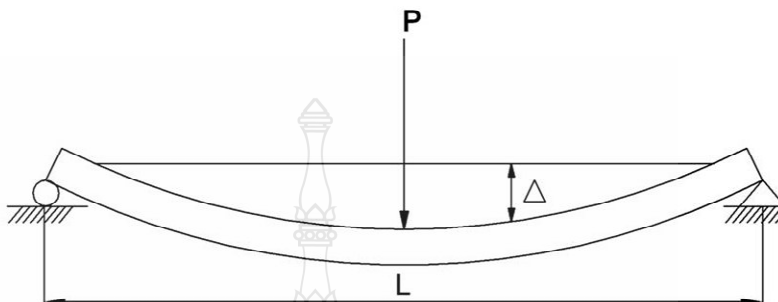
ในการคำนวณหาพลังงานสะสม (Strain Energy) หรือหาหน่วยแรงที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการกระทำของแรงหรือน้ำหนักปะทะซึ่งค่อยๆ เคลื่อนที่อย่างช้าๆ นี้ จะใช้สมมุติฐานต่อไปนี้คือ

- 1) วัสดุที่รับการกระทำของแรงหรือน้ำหนักปะทะจะมีพฤติกรรมคล้ายกับการกระทำของแรงหรือน้ำหนักที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น
- 2) หน่วยแรงที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุนั้น นั่นคือหน่วยแรงจะเป็นปฏิภาคกับหน่วยการยืดหดตัวจนถึงขีดจำกัดยืดหยุ่น

เมื่อวัสดุรับการกระทำของแรงปะทะตามแบบที่กล่าว วัสดุนั้นก็จะได้รับพลังงานซึ่งสะสมอยู่ในวัสดุ พลังงานที่สะสมนี้ใช้สัญลักษณ์ด้วยตัว  $U$  ซึ่งมีค่าต่างๆ กันขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกระทำโดยอาจจะเป็น แรงตามแนวแกน แรงดัด หรือ แรงบิด พลังงานสะสม  $U$  ตามลักษณะของแรงกระทำนี้ จะพิจารณาได้ดังนี้

### 2.4.2 เมื่อรับแรงค้ำ

พิจารณาคานช่วงเดียวยาว  $L$  รับหรือน้ำหนักประทะ  $P$  ที่กึ่งกลางคาน เกิดการโก่ง  $\Delta$  ตามภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การโก่งตัวของคานเมื่อมีแรง  $P$  มากระทำ [9]

$$\text{พลังงานสะสม} \quad U = \frac{1}{2} P\Delta \quad (2.1)$$

$$\text{แต่} \quad M = \frac{PL}{4} \quad (2.2)$$

$$\text{และ} \quad \Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (2.3)$$

$$\text{ดังนั้นพลังงานสะสม} \quad U = \frac{1}{6} \frac{M^2 L}{EI} \quad (2.4)$$

$$\text{หน่วยแรงที่เกิดขึ้น} \quad \sigma = \frac{M_c}{I} = \frac{c}{I} \sqrt{\frac{6UEI}{L}} \quad (2.5)$$

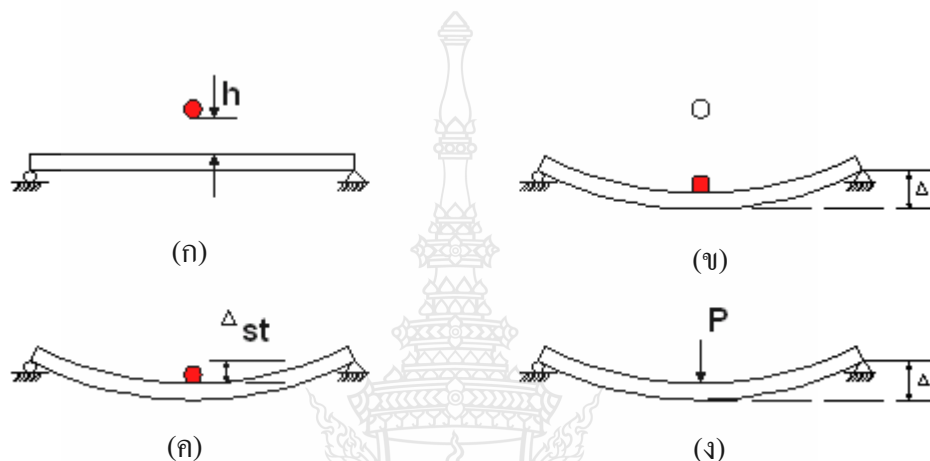
สำหรับการพิจารณาในเรื่องนี้ พลังงานสะสมและระยะโก่ง  $\Delta$  จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกระทำ [9]

### 2.4.3 ผลของการกระแทก

พิจารณาคานช่วงเดียวตามภาพที่ 2.3 ถ้าปล่อยน้ำหนักประทะ  $W$  จากที่สูงระยะ  $h$  ลงบนคาน คานจะโก่งมีค่าเป็น  $\Delta$  (ภาพที่ 2.3 ข) ถ้าให้  $P$  เป็นค่าของน้ำหนักที่ค่อยๆ กระทำต่อคาน ณ ตำแหน่งเดียวกันกับที่น้ำหนักประทะ  $W$  กระทำ และทำให้คานโก่งเป็นระยะ  $\Delta$  เท่ากันตามภาพที่ 2.3 (ง) น้ำหนัก  $P$  นี้จะเรียกว่าเป็นน้ำหนักที่เทียบเท่าน้ำหนักประทะ (Equivalent Impact Load)

เนื่องจากระยะ โกงและหน่วยแรงอันเกิดจากน้ำหนัก  $P$  นี้มีค่าเท่ากับกับค่าของระยะ โกงและหน่วยแรงอันเกิดจากน้ำหนักปะทะ  $W$  ดังนั้น พลังงานสะสมภายในคานต้องเท่ากัน และนั่นคือพลังงานภายนอกอันเกิดจากน้ำหนักกระทำก็จะต้องเท่ากันด้วย [9]

$$\therefore W(h + \Delta) = \frac{1}{2} P\Delta \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.3 การโก่งตัวลักษณะต่างๆ

ในช่วงอีลาสติกระยะ โกงของคานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักที่กระทำ จากภาพที่ (ค) และ (ง) จะได้

$$\frac{P}{\Delta} = \frac{W}{\Delta_{st}} \quad \text{หรือ} \quad P = W \frac{\Delta}{\Delta_{st}} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\Delta_{st}$  เป็นระยะ โกงที่เกิดจากการกระทำของน้ำหนัก  $W$  ที่น้อยๆ กระทำ ณ ตำแหน่งเดียวกัน แทนค่าของ  $P$  จากสมการที่ 2.7 ลงในสมการที่ 2.6 จะได้

$$W(h + \Delta) = \frac{W\Delta^2}{2\Delta_{st}} \quad \text{หรือ} \quad h + \Delta = \frac{\Delta^2}{2\Delta_{st}}$$

$$\text{หรือ} \quad \Delta^2 - 2\Delta_{st}\Delta = 2h\Delta_{st}$$



$$\text{หาค่าของ } \Delta \text{ ได้คือ} \quad = \Delta_{st} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}}\right) \quad (2.8)$$

ซึ่งเป็นระยะ โคงอันเนื่องจากน้ำหนักปะทะ  $W$  ที่อยู่สูงเป็นระยะ  $h$  จะเห็นว่าระยะ โคงอันเนื่องจากน้ำหนักปะทะ  $W$  นี้ มีค่ามากกว่าระยะ โคงอันเนื่องจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำ อัตราส่วนของระยะ โคง  $\Delta$  กับระยะ โคง  $\Delta_{st}$  เรียกว่า ตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) นั่นคือ

$$\text{ตัวคูณแรงกระแทก} = \frac{\Delta}{\Delta_{st}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} \quad (2.9)$$

เนื่องจากหน่วยแรงเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักกระทำในช่วงอีลาสติก ซึ่งจะได้

$$\frac{\sigma_{st}}{W} = \frac{\sigma}{P}$$

ในเมื่อ  $\sigma_{st}$  เป็นหน่วยแรงซึ่งเกิดจากการกระทำของน้ำหนัก  $W$  และ  $\sigma$  เป็นหน่วยแรงซึ่งเกิดจากการกระทำของน้ำหนัก  $P$  (ภาพที่ ค และ ง)

แต่จากสมการที่ 2.7

$$P = W \frac{\Delta}{\Delta_{st}} \sigma_{st}$$

ดังนั้น

$$\frac{\sigma_{st}}{W} = \frac{\sigma \Delta_{st}}{W \Delta} \quad \text{หรือ} \quad \sigma = \frac{\Delta}{\Delta_{st}} \sigma_{st}$$

จากสมการที่ 2.9 จะได้

$$\sigma = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}}\right) \sigma_{st} \quad (2.10)$$

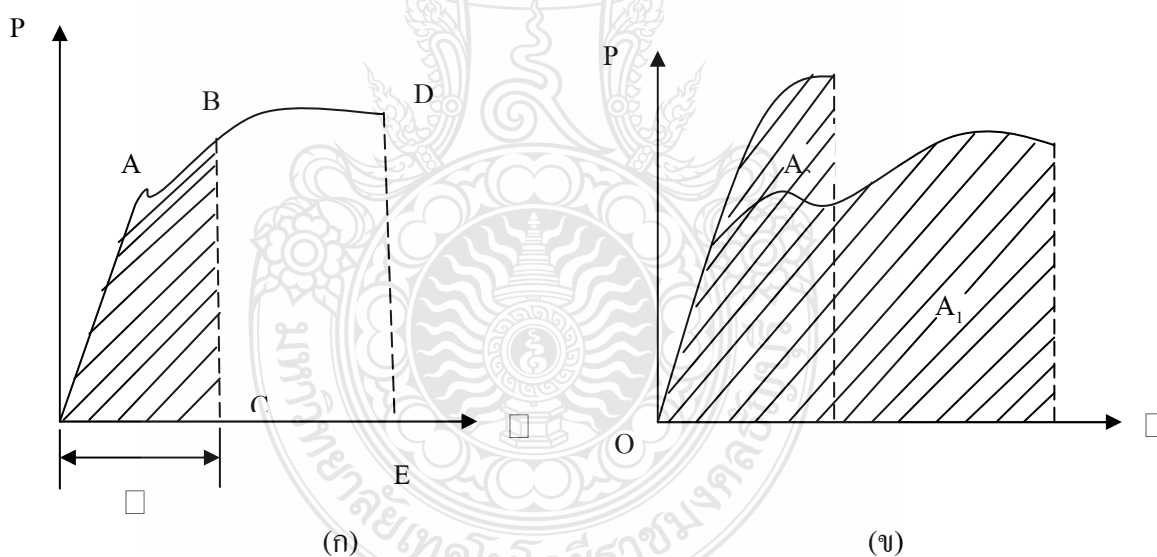
นั่นคือหน่วยแรง  $\sigma$  อันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะจะมีค่าเท่ากับตัวคูณแรงกระแทกคูณกับหน่วยแรง  $\sigma_{st}$  อันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำซึ่งอาจเป็นแบบแรงในแนวแกน แรงดัดหรือแรงบิดก็ได้

พิจารณากรณีน้ำหนักกระทำทันทีทันใด (Sudden Load) คือ  $h = 0$  จากสมการที่ 2.10 จะได้

$$\Delta = 2\Delta_{st} \text{ และ } \sigma = 2\sigma_{st} \quad (2.11)$$

นั่นคือ เมื่อมีน้ำหนักกระทำทันทีทันใด ค่าของระยะ โกงและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นสองเท่าของระยะ โกงและหน่วยแรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักเดียวกัน แต่กระทำแบบไม่เคลื่อนที่

สมมุติฐานที่ว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ไม่เกินกว่าค่าที่ขีดจำกัดยืดหยุ่น ในกรณีที่หน่วยแรงเกินกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่น วัสดุจะมีพฤติกรรมเป็นแบบอินอีลาสติกหน่วยการยืดหดตัวจะไม่เป็นปฏิภาคกับน้ำหนักหรือแรงกระทำ อย่างไรก็ตามการชำรุดเนื่องจากการรับน้ำหนักหรือแรงกระทำก็ยังสามารถหาได้ ทั้งนี้โดยการสมมุติว่าเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วซึ่งวัสดุรับแรง ดังเช่นภาพที่ 2.4 เป็นเส้นแสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดึงพื้นที่ OABC จะแสดงถึง พลังงานที่ได้จากการดึงวัสดุให้ยืดออกเป็นระยะ  $\Delta$  ซึ่งจะต้องมีค่าเท่ากับค่าของพลังงานที่ได้จากการปล่อยวัสดุซึ่งหนัก  $W$  จากที่สูง  $h$  โดยมีค่าเท่ากับ  $W(h + \Delta)$  เมื่อใดที่ค่านี้น้อยกว่าหรือเกินกว่าพื้นที่ OABE น้ำหนักนั้นก็จะทำให้วัสดุชำรุด [9]



ภาพที่ 2.4 เส้นแสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดึง [9]

ความต้านทานของวัสดุต่อแรงกระทำนี้ ยังขึ้นอยู่กับความเหนียวของวัสดุ (Ductility) อีกด้วยภาพที่ 2.4 (ข) แสดงเส้นสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดึงของเหล็กที่มีกำลังสูงแต่ทว่าเปราะ กับเหล็กที่มีกำลังต่ำกว่าแต่ทว่าเหนียวกว่า จะเห็นว่าพื้นที่  $A_1$

มีค่ามากกว่าพื้นที่  $A_2$  ซึ่งแสดงว่าก่อนการชำรุดเหล็กเส้นที่เหนียวกว่าจะสามารถรับพลังงานได้มากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้วัสดุที่เหนียว สำหรับรับแรงหรือน้ำหนักกระแทก

จากภาพที่ข้างต้น พื้นที่ทั้งหมดใต้เส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวซึ่งเป็นพลังงานที่รับไว้ได้ต่อหน่วยปริมาตร เรียกว่า โมดูลัสของความเหนียว (Modulus of Toughness) ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$$\text{โมดูลัสของความเหนียว} = \frac{\sigma_y + \sigma_n}{2} \cdot \varepsilon_n \quad (2.12)$$

โดยที่  $\sigma_y$  และ  $\sigma_n$  เป็นหน่วยแรงที่กำลังจุดลากและที่กำลังประลัยของวัสดุตามลำดับและ  $\varepsilon_n$  เป็นหน่วยการยืดหดตัวที่จุดประลัย พื้นที่ใต้เส้นสัมพันธ์นี้ในส่วนที่หน่วยแรงมีค่าเท่ากับ  $\sigma_e$  โดยอยู่ในช่วงอีลาสติก จะเรียกว่า Modulus of Resilience หมายถึง พลังงานที่วัสดุสามารถรับได้ต่อหน่วยปริมาตรโดยไม่ทำให้เกิดการยืดหดตัวอย่างถาวร (Permanent Distortion) ถ้าความสัมพันธ์นี้เป็นเส้นตรงค่า Modulus of Resilience

$$U = \frac{1}{2} \sigma_e \cdot \varepsilon = \frac{1}{2} \sigma_e \cdot \frac{\sigma_e}{E} = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (2.13)$$

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y. Mohammadi และคณะ [10] ศึกษาความต้านทานแรงกระแทก ของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในส่วนที่ต่างกัน โดยทดสอบตัวอย่างคานขนาด 100 x 100 x 500 มม. ปริมาณการใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 1 1.5 และ 2 ใช้เส้นใยเหล็กขนาด 0.6 x 2.0 x 25 มม. และ 0.6 x 2.0 x 50 มม. ทำการทดสอบแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนัก (Drop-Weight Test) ตามภาพที่ 2.5 โดยจะแขวนลูกตุ้มเหล็กสูงจากผิวบนของคาน 457 มม. ใช้ตุ้มเหล็กน้ำหนัก 4.54 กก. ทำการปล่อยตุ้มเหล็กตกกระแทกที่ผิวบนของคานบันทึกค่าจำนวนครั้งที่ปล่อยตก เมื่อตัวอย่างเริ่มแตกร้าว (First Crack) และหยุดบันทึกเมื่อตัวอย่างวิบัติ (Ultimate Failure) พร้อมทำการคำนวณค่าพลังงานกระแทก (Impact Energy) โดยใช้สูตรพลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

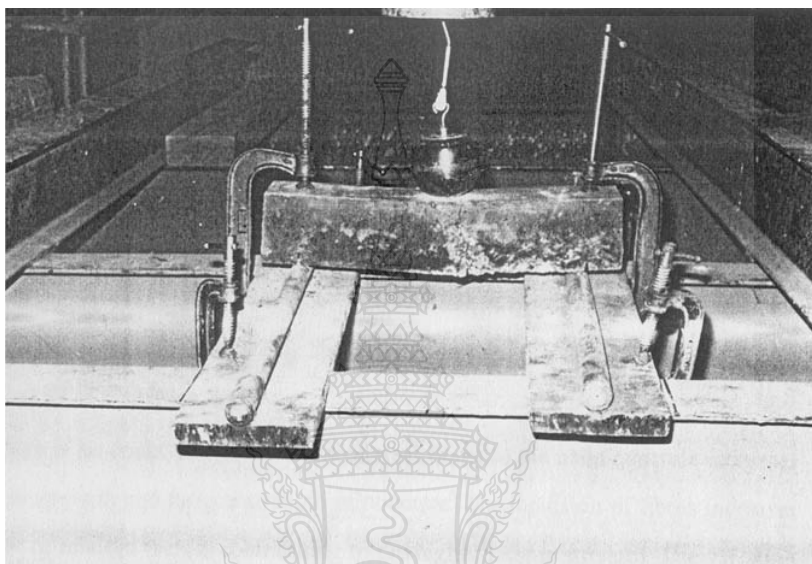
$$U = \frac{1}{2} Mv^2 \quad (2.14)$$

โดยที่

$M$  = มวลของลูกตุ้มเป็น (kg.)

$v$  = ความเร็วตกกระทกเป็น เมตรต่อวินาที (m/s.)

$U$  = พลังงานแรงกระทกเป็น นิวตันเมตร (N-m) หรือ จูล (J)



ภาพที่ 2.5 การทดสอบแรงกระทกแบบตุ้มน้ำหนัก [10]

จากการทดลองพบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณเส้นใยเหล็กแตกต่างกัน การผสมคอนกรีตก็จะแตกต่างกัน การทดสอบนี้จะใช้ผลของจำนวนครั้งลูกตุ้มที่ตกกระทกตัวอย่างจนกระทั่งคอนกรีตเริ่มแตกร้าว (First Crack) และวิบัติ (Ultimate Failure) ทำการบันทึกจำนวนครั้งของแต่ละตัวอย่างแล้วนำมาคำนวณหาค่าพลังงานแรงกระทก (Impact Energy) จากข้อมูลดังกล่าวสรุปได้ว่า คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณการใส่เส้นใยร้อยละ 2 สามารถรับแรงกระทกได้สูงที่สุด รองลงมาที่ปริมาณการใส่เส้นใยร้อยละ 1.5 และ 1 ตามลำดับ และสรุปว่าเส้นใยเหล็กที่ภาพที่ร่างงอและมีขนาดยาวสามารถรับแรงกระทกได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่มีขนาดสั้นกว่า [10]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึง รายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยซึ่งครอบคลุมไปถึงวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ เครื่องมือในการทดสอบ สัดส่วนผสมและขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.1 วัสดุ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement: Type I) มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 150 [11]


3.1.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [12]

3.1.3 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูน ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [12]

3.1.4 น้ำใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต (Water) มีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ppm. ปราศจากกรดต่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.1.5 เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) Dramix RC-60/70-BN มาตรฐาน ASTM A820 [4] ชนิดงอปลาย (Hook End) ขนาดความยาว คุณสมบัติเป็นดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) [13]

Name	Material	Specific Gravity	Shape	Length (mm.)	Section	Diameter (mm.)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm. <sup>2</sup> )
CSF	Steel	7.86		60	Circle	0.90	67	1000

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องผสมคอนกรีต (Mixer) ขนาด 0.15 ลูกบาศก์เมตร

3.2.2 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 เซนติเมตร

3.2.3 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกาน ขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร

### 3.2.4 เครื่องทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test)

3.2.5 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 200 T ทดสอบกำลังอัด กำลังดึงและกำลังคัดคอนกรีต

1) ชุดทดสอบการกระแทกแบบค้อนน้ำหนัก (Drop-Weight Impact Test) สำหรับชุดทดสอบการกระแทกแบบค้อนน้ำหนัก ผู้วิจัยได้ทำการสร้างชุดทดสอบขึ้นมาใหม่ โดยพัฒนามาจากงานวิจัยของ Y. Mohammadi และคณะ [10] โดยมีขั้นตอนในการทำและใช้โครงสร้างส่วนประกอบดังนี้

2) สร้างโครงเฟรมที่ใช้เป็นตัวยึดค้อนน้ำหนักและจตุรรองรับคานตัวอย่าง โดยใช้เหล็กรูปพรรณชนิดเหล็กทรงน้ำขนาด 100 x 50 มม.หนา 5 มม. ตั้งเป็นขาอีกระยะห่างระหว่างขาอีค 1.00 ม. สูง 1.50 ม. เชื่อมยึดติดโครงให้แข็งแรง

3) ติดตั้งจตุรรองรับคานตัวอย่าง โดยใช้เหล็กทรงน้ำขนาด 100 x 50 มม.หนา 5 มม. ตั้งเป็นขาอีคจตุรรองรับ จตุรรองรับใช้เหล็กฉากขนาด 40 x 40 มม.หนา 3 มม. และท่อนเหล็กกลมตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มม. ติดตั้งไว้สองข้างโดยมีระยะห่างระหว่างจตุรรองรับคาน 400 มม. ส่วนตัวบังคับคานตัวอย่างให้อยู่ในตำแหน่งไม่เคลื่อนตัวเวลาปล่อยค้อนน้ำหนักเหล็ก ใช้เหล็กทรงน้ำขนาด 100 x 50 มม.หนา 5 มม. เชื่อมยึดติดโครงให้แข็งแรง

4) ติดตั้งชุดปล่อยค้อนน้ำหนัก โดยใช้เหล็กทรงน้ำขนาด 100 x 50 มม.หนา 5 มม. เป็นคานอีกระหว่างโครงเฟรมตัวตั้ง ทำการเจาะรูเพื่อยึดนอตไว้เพื่อทำให้ปรับได้ 2 จุด สำหรับค้อนน้ำหนัก 4.54 กก.และ 9.09 กก. โดยกำหนดระยะจากค้อนน้ำหนักถึง ผิวตัวอย่างคาน 457 มม. ติดตั้งหูสำหรับไว้ปล่อยค้อนน้ำหนัก และสร้างรางเหล็กเพื่อทำให้ค้อนน้ำหนักที่ปล่อยมีทิศทางตรงตำแหน่งกึ่งกลางคาน รางเหล็กใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. โดยผ่าเป็นช่องเพื่อให้สามารถใส่ค้อนน้ำหนักคล้องชุดปล่อยได้ รางเหล็กเชื่อมยึดติดโครงให้แข็งแรง

5) สร้างค้อนน้ำหนักเหล็กจำนวน 2 ชุด ใช้เหล็กกลมตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มม. ติดตั้งแผ่นเหล็กเจาะรูสำหรับสลักปล่อย ส่วนด้านที่สัมผัสคานติดท่อนเหล็กกลมตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. เชื่อมยึดติดค้อนเหล็กให้แข็งแรง น้ำหนักรวมค้อนเหล็ก หูเจาะและท่อนเหล็กสัมผัสคาน ทั้งหมด 4.54 กก.และ 9.09 กก.ตามลำดับ

### 3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีต

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.46 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 2.46 : 2.90 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม. สรุปได้ดังตารางที่ 3.2

#### สัญลักษณ์

PC หมายถึง คอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.46

CSF หมายถึง คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.46

ตัวเลขต่อท้าย หมายถึง ปริมาณเส้นใยเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อปริมาณคอนกรีต 1 ลบ.ม.

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

Type of concrete	Mixing					
	Cement (kg)	Fine Aggregate (kg)	Coarse Aggregate (kg)	Water (kg)	Admixture Type F (Ltr)	Steel Fiber (kg)
PC	350	863	1016	161	-	-
CSF-0.5	350	863	1016	161	3.50	39
CSF-0.75	350	863	1016	161	3.50	59
CSF-1.0	350	863	1016	161	3.50	78.50

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

- 1) การทดสอบค่าการยุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 143 [14]

#### 3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัว

- 1) การทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [15]
- 2) การทดสอบกำลังดึง ตามมาตรฐาน ASTM C 496 (Test for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen) [16]
- 3) ทดสอบกำลังค้ำค้ำ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 78 (Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam With Third-Point Loading) [17]

4) การทดสอบการกระแทกแบบตุ้มน้ำหนัก (DROP-WEIGHT IMPACT TEST) โดยทำการเปลี่ยนน้ำหนักตุ้ม ( $W = 4.54 \text{ kg.}, 9.09 \text{ kg.}$ ) ความเร็วลูกตุ้มในการตกกระทบ ( $v = 3 \text{ m/s}$ )

### 3.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบจะถูกเตรียมตามสัดส่วนที่กำหนดตามตารางที่ 3.2 โดยในการทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร การทดสอบกำลังค้ำใช้คานทดสอบขนาด  $10 \times 10 \times 50$  เซนติเมตร และการทดสอบแรงกระแทกแบบตุ้มน้ำหนัก ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด  $10 \times 10 \times 50$  เซนติเมตร สภาวะการบ่มและจำนวนตัวอย่างทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดจำนวนตัวอย่างและการทดสอบ

Type of concrete	Number of specimen					
	Compressive Strength	Tensile Strength	Flexural Strength	Impact Strength		Total
				28 (day)		
4.54 Kg	9.09 Kg					
PC	9	3	3	3	3	21
CSF – 0.5	9	3	3	3	3	21
CSF – 0.75	9	3	3	3	3	21
CSF – 1	9	3	3	3	3	21
				Total		84

### 3.6 การทดสอบ

#### 3.6.1 การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test) ดังภาพที่ 3.1

1) เตรียมพื้นที่สำหรับวางกรวย ควรเป็นพื้นแข็ง ราบเรียบและไม่ดูดซึมน้ำเมื่อวางกรวยเรียบร้อยแล้ว ใช้เท้าทั้งสองข้างเหยียบให้แน่น

2) ตักคอนกรีตใส่กรวยแบบหล่อ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นๆ ละประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาตรแล้วใช้แท่งเหล็กกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ให้ทั่วหน้าตัดและกระทุ้งลงไปถึงชั้นถัดไปในการกระทุ้งชั้นล่างสุดให้เอียงแท่งในการกระทุ้งเล็กน้อย กระทุ้งรอบๆ ขอบของแบบหล่อประมาณ 12 -13 ครั้ง แล้วจึงกระทุ้งแนวตั้งวนเป็นวง (Spiral) วนเข้าหาจุดศูนย์กลาง



3) ในการเติมและกระทุ้งคอนกรีตชั้นบนสุดให้กองคอนกรีตสูงกว่าขอบแล้วทำการกระทุ้งถ้าคอนกรีตทรุดตัวต่ำกว่าขอบของแบบหล่อ ให้เติมคอนกรีตลงไปอีกแล้วกระทุ้งต่อจนครบ 25 ครั้ง

4) ปาดคอนกรีตเหนือขอบแบบหล่อออกแล้วแต่งให้เรียบ เสร็จแล้วยกรวบแบบหล่อขึ้นในแนวตั้งช้าๆ และระวังอย่าให้แบบหล่อกระทบคอนกรีต

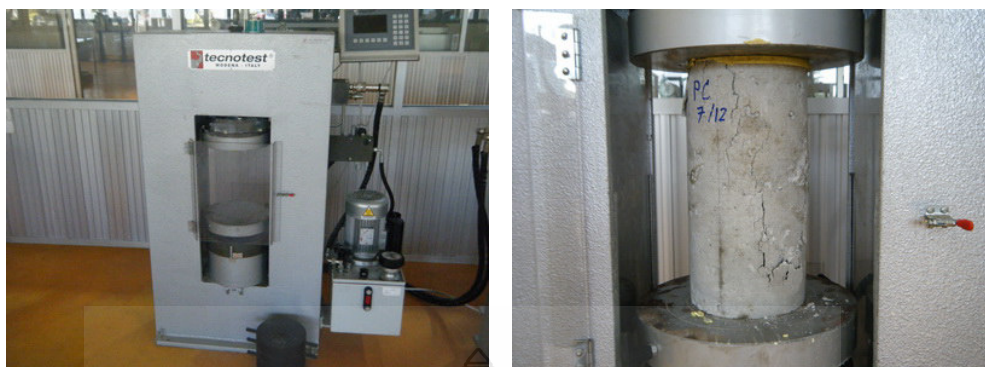
5) วัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต ซึ่งเป็นค่าการยุบตัวของคอนกรีตจากความสูงของขอบบนของแบบหล่อแล้วสังเกตลักษณะการยุบตัวของคอนกรีต บันทึกผลการทดสอบ หากเวลาในการทดสอบค่าการยุบตัวนับเริ่มจากการเติมคอนกรีตลงในกรวยแบบหล่อจนกระทั่งยกกรวยแบบหล่อขึ้นควรใช้เวลาไม่เกิน 1.5 นาที และถ้าคอนกรีตพังทลายลงหลังจากการยกกรวยแบบหล่อออกให้ทำใหม่อีกครั้ง กรณีเกิดพังทลายสองครั้งติดกัน แสดงว่าวิธีทดสอบค่าการยุบตัวอาจไม่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตนี้



ภาพที่ 3.1 การทดสอบค่ายุบตัว

### 3.6.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) ดังภาพที่ 3.2

- 1) ทำการเคลือบหัวแท่งคอนกรีต โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C 617 [18]
- 2) นำมาวางบนเครื่อง Universal Testing Machine แล้วเริ่มเดินเครื่องทดสอบด้วยความเร็ว 2.1 kN/s จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกค่าแรงกดสูงสุด
- 3) สังเกตลักษณะการชำรุดของแท่งคอนกรีตทำการบันทึก



ภาพที่ 3.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

### 3.6.3 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) ดังภาพที่ 3.3

- 1) วางตัวอย่างไว้ในแนวนอนบนฐานรองรับของเครื่องทดสอบซึ่งถูกรองรับด้วยไม้รองขนาดความหนา 1/8 นิ้ว กว้างประมาณ 1 นิ้ว ทั้งด้านบนและล่าง ให้กึ่งกลางแท่งคอนกรีต
- 2) เริ่มเดินเครื่องทดสอบด้วยความเร็ว 2.1 กิโลนิวตันต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ บันทึกค่าแรงกดสูงสุด



ภาพที่ 3.3 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก

### 3.6.4 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural Strength) ดังภาพที่ 3.4

- 1) เตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบด้วยวิธีกดคานสองจุด (Third-Point Loading)
- 2) แบ่งก้อนตัวอย่างตามยาวโดยเหล็บริเวนปลายไว้ทั้งสองส่วนละ 10 เซนติเมตร ส่วนภายในที่เหลือแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กันส่วนละ 10 เซนติเมตร

3) เริ่มเดินเครื่องทดสอบด้วยความเร็ว 0.46 กิโลนิวตันต่อวินาที จนก้อนตัวอย่างหัก บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด

4) คุณลักษณะของคานว่าเริ่มหักที่กึ่งกลางคานหรือ ถ้าวรอยหักอยู่นอกช่วงกึ่งกลางแต่ เบี่ยงเบนไม่เกินร้อยละ 5 ของกึ่งกลางคาน



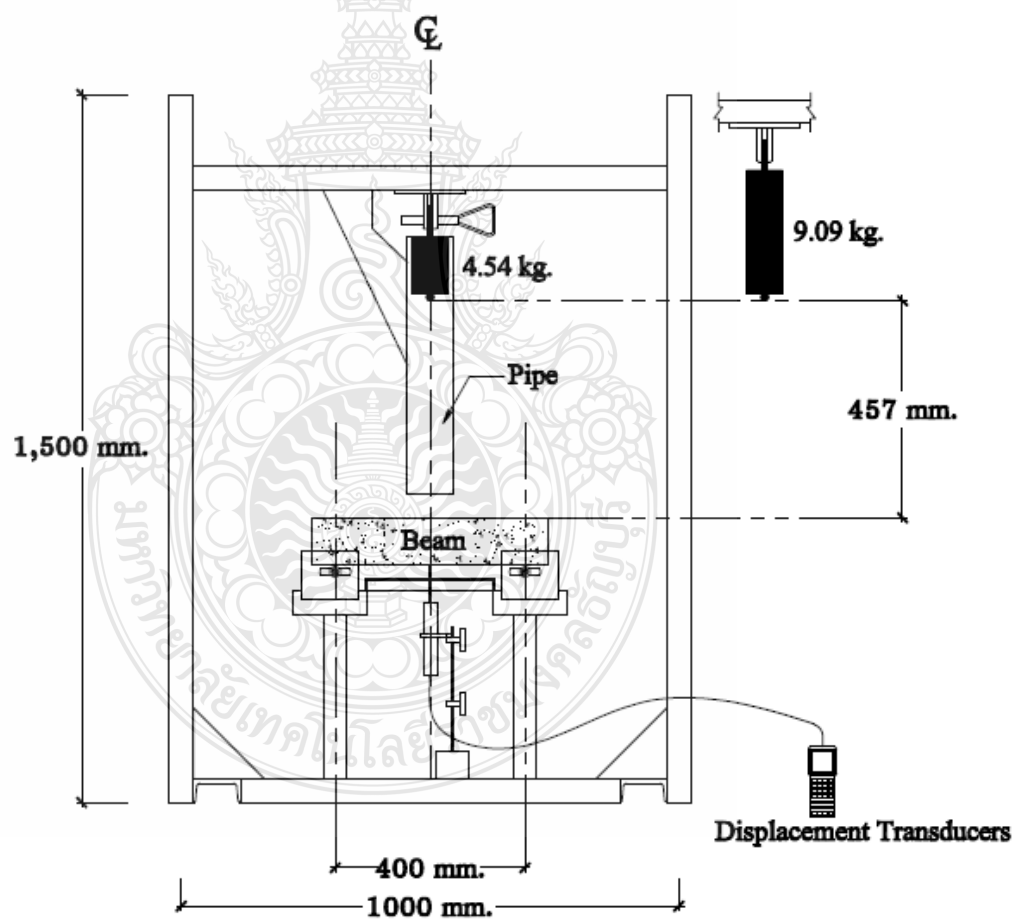
ภาพที่ 3.4 การทดสอบกำลังต้านทานแรงคัด

### 3.6.5 การทดสอบกำลังต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีต (Impact Strength)

- 1) นำคานตัวอย่างที่จะทดสอบวางบนฐานรองรับ
- 2) ตั้งระยะความสูงของลูกตุ้มและระยะการตกของลูกตุ้ม
- 3) ติดตั้งเครื่องวัดระยะ โกงตัว (Displacement Transducers) ดังภาพที่ 3.5 ไว้ใต้คานคอนกรีตเพื่อหาค่าระยะ โกงตัวเมื่อคอนกรีตเริ่มแตกร้าว หรือค่าระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะ  $\Delta$  เพื่อนำไปคำนวณหาค่าระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำ ( $\Delta_{st}$ ) จากสมการที่ (2.8) และคำนวณค่าตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) จากสมการที่ (2.9)
- 4) ทำการปล่อยลูกตุ้มตกแบบอิสระให้กระทบผิวบนคานตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.6 บันทึกค่าจำนวนครั้งที่ปล่อยตก เมื่อตัวอย่างเริ่มแตกร้าว (First Crack) และหยุดบันทึกเมื่อตัวอย่างวิบัติ (Ultimate Failure) เพื่อนำไปคำนวณหาค่า พลังงานกระแทก (Impact Energy) จากสมการที่ (2.14)
- 5) ทำการเปลี่ยนขนาดลูกตุ้มทดสอบแล้วเริ่มทำการทดสอบตามขั้นตอนเดิม



ภาพที่ 3.5 เครื่องมือวัดระยะ โกงตัว



ภาพที่ 3.6 ชุดทดสอบแรงกระแทก

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลในการต้านทานแรงกระทำ ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยเลือกใช้วิธีการทดสอบแรงกระทำแบบค้ำน้ำหนัก ทำการปล่อยลูกค้ำเหล็กตกกระทำแบบอิสระให้กระทบผิวบนคานตัวอย่าง ทำการคำนวณค่าพลังงานกระทำที่รอยร้าวเริ่มต้น (First crack) และที่การวิบัติ (Ultimate Failure) ศึกษาพลังงานสะสม (Strain Energy) ซึ่งมีการสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

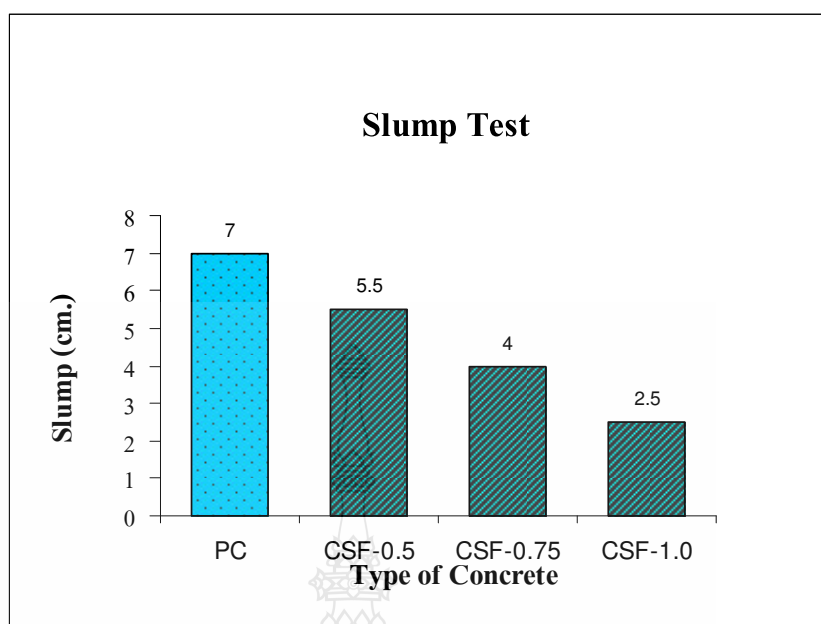
#### 4.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสด (Property of Fresh Concrete)

##### 4.1.1 ความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการควบคุมคุณภาพคอนกรีตทุกชนิด ให้มีสัดส่วนผสมเป็นไปตามการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 3.2 และใช้การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 143 [20] จากการทดสอบพบว่าที่สัดส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เดียวกัน ค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งการที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าต่ำมากนั้นเกิดจากลักษณะของเส้นใยที่เป็นแท่งยาว ประกอบกับการทดสอบ Slump Test ต้องมีการทำให้คอนกรีตแน่นด้วยการกระทุ้งแท่งเหล็กเป็นชั้นๆ เส้นใยจึงเกิดการกระจายตัวแต่ละเส้นในแนวตั้งตามลักษณะการกระทุ้ง จะมีผลทำให้เส้นใยเหล็กอัดตัวเป็นก้อน ขัดขวางการยุบตัวของมวลรวม ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กในการทดสอบ Slump Test



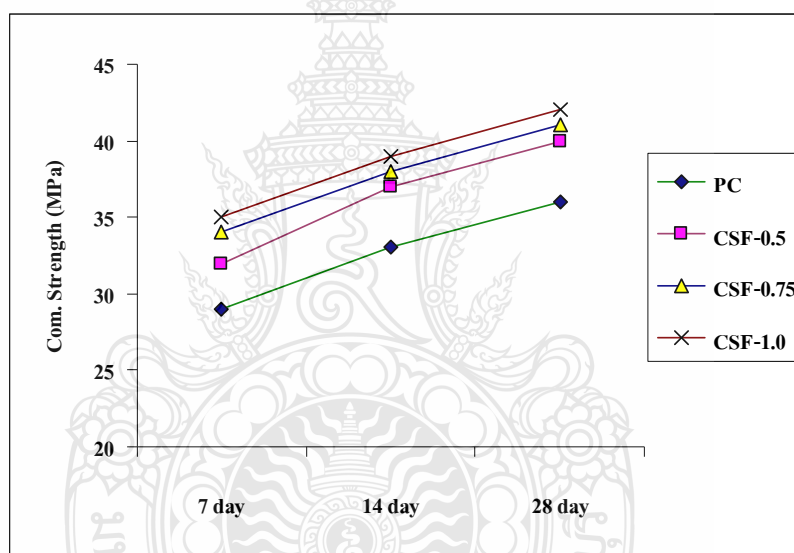
ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการยุบตัว

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการยุบตัวระหว่างคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ที่ปริมาณร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 ตามภาพที่ 4.2 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กจะลดลง สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของเส้นใยเหล็กที่ใช้ โดยปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวลดลง 2-3 เท่า และพบว่าเมื่อใส่สารผสมเพิ่มลงไปมีผลทำให้ความสามารถในการเทของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงที่ทำการออกแบบ แต่ทั้งนี้ผลของค่ายุบตัวก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณการใส่เส้นใยเหล็กและทิศทาง การเรียงตัวของเส้นใยเหล็ก สำหรับค่ายุบตัวที่ต่ำมากสามารถนำไปใช้ในงาน โครงสร้างได้เช่น โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ หรือมีความหนา มาก จะพบว่าค่ายุบตัวที่ทดสอบได้เหมือนกับงานวิจัยของ Bentur, A. and Mindess [6] ที่พบว่า การผสมเส้นใยลงในคอนกรีตทำให้ค่ายุบตัวลดลงและความสามารถในการเทของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการใส่ที่สูงขึ้น

## 4.2 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

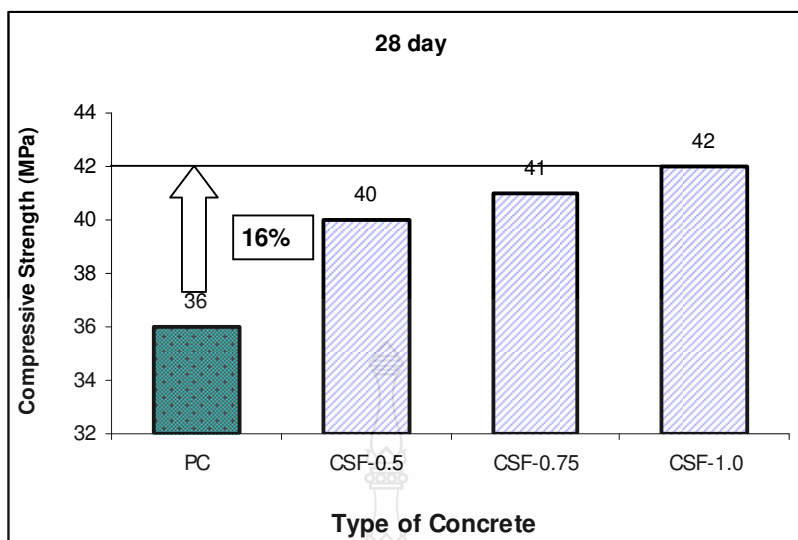
### 4.2.1 กำลังอัด (Compressive Strength)

จากกราฟเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดามีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กก็มีแนวโน้มการพัฒนาขึ้นเหมือนกับคอนกรีตธรรมดาและพบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเป็นปฏิภาคโดยตรงกัน โดยการสังเกตจากกราฟก็จะพบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 24 ของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน และค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 24 ของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน



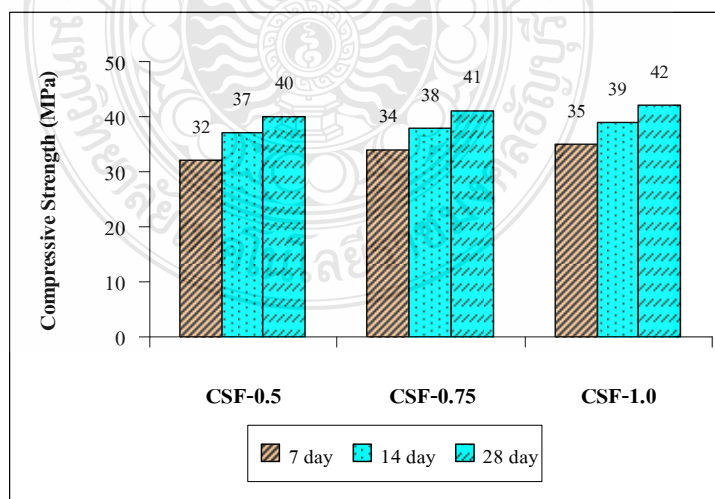
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

จากแผนภูมิเปรียบเทียบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 36 MPa กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 40 – 42 MPa ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยเหล็ก เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กพบว่า การผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตทำให้กำลังอัดสูงขึ้นประมาณร้อยละ 16 ของตัวอย่างคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.0



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

จากการพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กทุกส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าที่อายุคอนกรีตเดียวกัน กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ที่อายุคอนกรีต 28 วัน คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณร้อยละ 0.5 มีค่ากำลังอัด 40 MPa ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณร้อยละ 1.0 มีค่ากำลังอัด 42 MPa คิดเป็นอัตราที่เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 5 จะเห็นได้ว่าปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใส่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเล็กน้อย



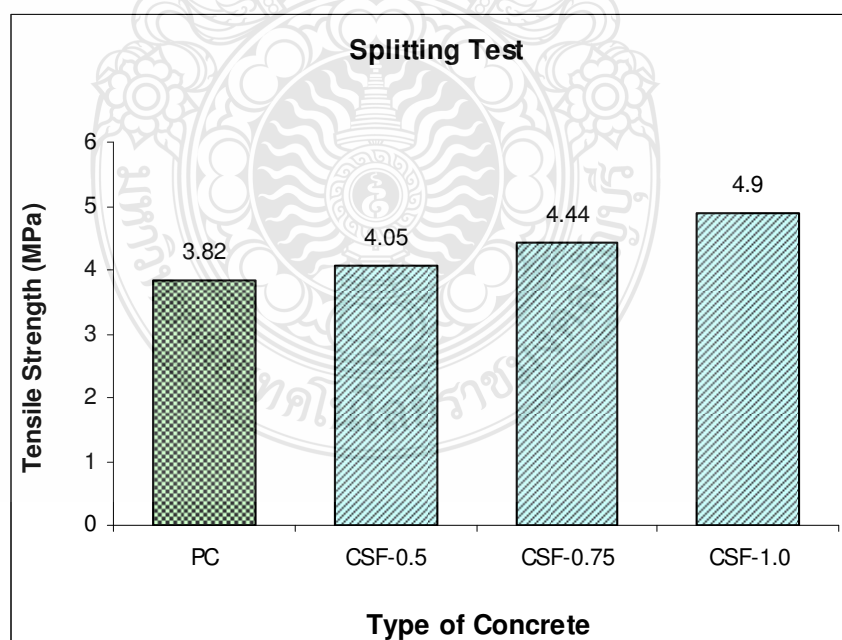
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก



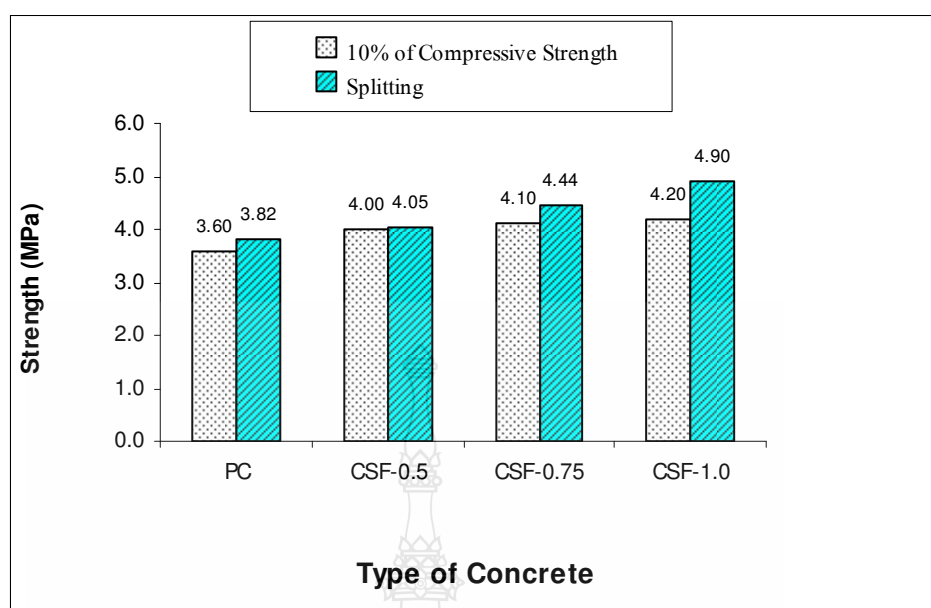
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก และงานวิจัยของ เทเวศ พรหมจาและวิรัช ศรีวงษ์กุล. [8] ให้ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกันโดยการทดสอบกำลังอัดโดยทั่วไปของการผสมเส้นใยลงในคอนกรีตไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดโดยตรง แต่อาจมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเล็กน้อยแต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากมีผลทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ต่ำและการอัดแน่นทำได้ยาก

#### 4.2.2 กำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Test)

จากภาพเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตธรรมดามีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 3.8 MPa กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.0 – 4.9 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงระหว่างกับคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณร้อยละ 0.5 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคอนกรีตธรรมดาร้อยละ 5.3 ขณะที่คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณร้อยละ 1.0 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคอนกรีตธรรมดาร้อยละ 30 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น ตามปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดึงได้สูง และผลจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับเนื้อคอนกรีต จึงมีผลทำให้เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจะมีความสามารถในการรับแรงดึงได้สูง



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าร้อยละ 10 ของกำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีก

จากภาพเปรียบเทียบค่าร้อยละ 10 ของกำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 ที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4.7 พบว่า กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าสูงกว่าค่าร้อยละ 10 ของกำลังอัด โดยการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 มีค่าเท่ากับร้อยละ 10 11 และ 12 ของกำลังอัด ตามลำดับ

#### 4.2.3 รูปแบบการวิบัติ (Failure Pattern) จากการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

คอนกรีตธรรมดามักพังด้วยการแตกแบบเปราะ (การผ่าแยก) ที่ผิวรอยต่อและในมอร์ตาร์ ลักษณะการแตกร้าวนั้นจึงมีจำนวนรอยร้าวน้อยและมีขนาดใหญ่ การวิบัติจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง ขึ้นตัวอย่างจะขาดออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 4.8 (ก)

คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีลักษณะการวิบัติจากการเลื่อนไถลด้วยแรงเฉือนเป็นแนวเฉียง รวมทั้งการมีอยู่ของเส้นใยเหล็กที่ยึดรั้งรอยร้าวไว้ การเกิดรอยร้าวเป็นไปอย่างช้าๆ ไม่รุนแรง พบรอยแตกร้าวขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ไม่พบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีความสามารถในการยึดรั้งรอยแตกร้าว ซึ่งเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่สามารถขยายตัวไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ได้ ทำให้หลังการวิบัติจะยังคงรูปและไม่แตกออกจากกัน ดังภาพที่ 4.8 (ข)



(ก) คอนกรีตธรรมดา



(ข) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

ภาพที่ 4.8 การวิบัติของก้อนตัวอย่างในการรับแรงดึงแบบผ่าซีก

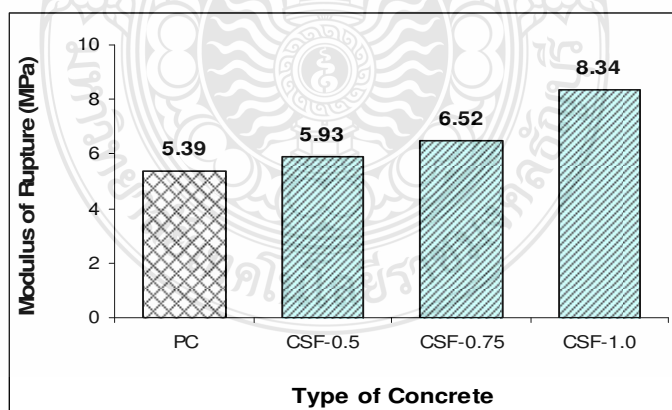
#### 4.2.4 กำลังดัด (Flexural Strength)

เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 50 ซม. ที่บ่มในน้ำ 28 วัน มาทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C 78 (Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading) ดังภาพที่ 4.9 ค่าความสามารถรับแรงกระทำสูงสุดที่กลางคานตัวอย่าง และโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.10 ตามลำดับ พบว่ากำลังดัดซึ่ง

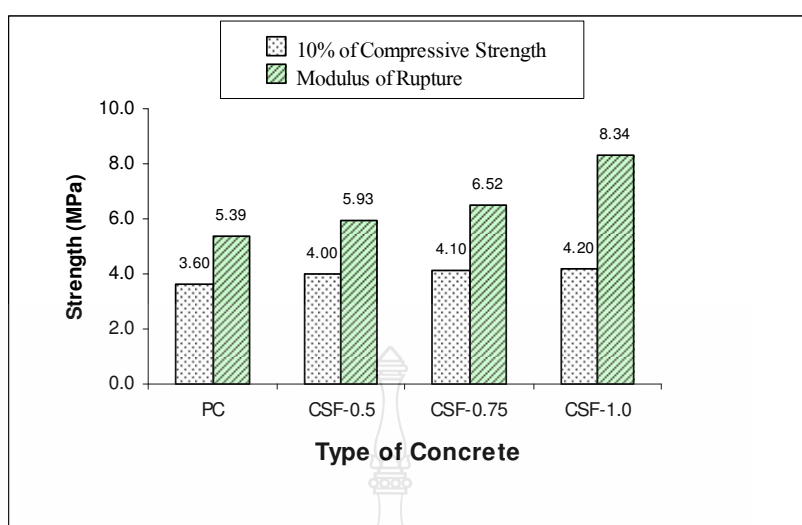
อยู่ในรูปค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตธรรมดา โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 5.4 MPa คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก มีค่าโมดูลัสแตกร้าวโดยเฉลี่ยประมาณ 5.9 ถึง 8.3 MPa สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเรียงตัวของเส้นใยเหล็ก ถ้าเส้นใยเหล็กเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับหน้าตัดทำให้คานเกิดประสิทธิภาพสูงในการรับแรง และการกระจายตัวของเส้นใยเหล็กในตำแหน่งรับแรงอัดสูงสุดบริเวณ ช่วงกึ่งกลางคาน ก็มีผลต่อกำลังรับแรงคัตของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กพบว่า การผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีต ทำให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงขึ้น และมีแนวโน้มค่าโมดูลัสแตกร้าวเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเส้นใยที่ร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0



ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังคัต (Flexural Strength)



ภาพที่ 4.10 ค่า Modulus of Rupture ของคานตัวอย่าง



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าร้อยละ 10 ของกำลังอัดและค่ากำลังดัด

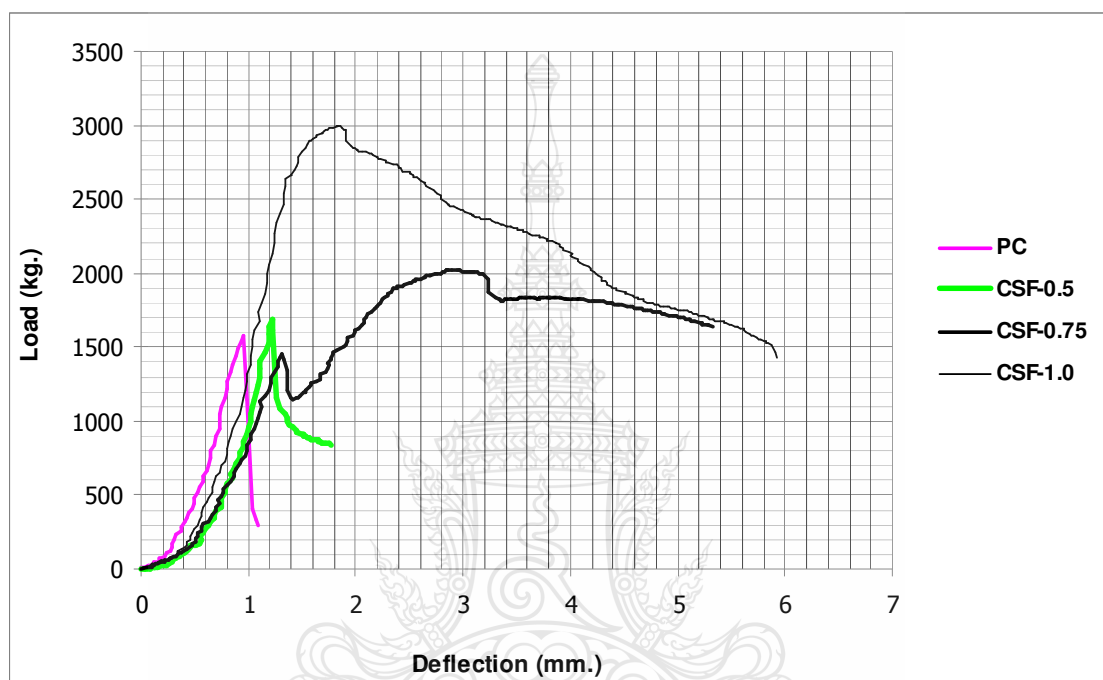
จากแผนภูมิเปรียบเทียบค่าร้อยละ 10 ของกำลังอัดและค่ากำลังดัดของคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 ที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4.11 พบว่ากำลังดัดของคอนกรีตธรรมดามีค่าสูงกว่าค่าร้อยละ 10 ของกำลังอัด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 15 ของกำลังอัด ค่ากำลังดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ปริมาณร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 16 และ 20 ของกำลังอัด ตามลำดับ

#### 4.2.5 พฤติกรรมการรับแรงดัด (Flexural Responses)

ผลการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดัด ซึ่งผลที่ได้จะแสดงได้ชัดเจนถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงกล ได้ดีกว่ากรณีของพฤติกรรมการรับแรงอัด ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติเด่นในการรับแรงดึงที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและหากมีการกระจายตัวอยู่ในตำแหน่งและทิศทางของแนวแรง ก็จะช่วยให้คอนกรีตมีพฤติกรรมการรับแรงดัดได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอธิบายในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว (Load – Deflection Response)

รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก มีลักษณะคล้ายคลึงกันในช่วงแรกมีความชันในลักษณะเดียวกันกับคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากช่วงแรกคอนกรีตจะทำหน้าที่ต้านทานแรงกระทำจนเริ่มแตกร้าวแล้วจึงถ่ายแรงสู่เส้นใยเหล็กโดยการยึดรั้งระหว่างเนื้อคอนกรีตกับพื้นที่ผิวของเส้นใยบริเวณรอยแตกร้าว โดยจะเห็นได้ชัดว่าตัวอย่างสามารถพัฒนาการรับกำลังอีกครั้งหลังจากเมื่อคอนกรีตแตกหัก ซึ่งโดยรวมแล้วเป็นอิทธิพลของเส้นใยทำให้รับกำลังดึงได้สูงกว่าคอนกรีตในช่วงแรก และสิ่งที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างคอนกรีตผสม

เส้นใยเหล็ก กับคอนกรีตธรรมดาก็คือ เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัว ของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีพฤติกรรมหลังการแตกร้าว (Post – Cracking) ที่ยาวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาสูงกว่า 6 เท่า รวมถึงมีการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการรับแรงค้ำและการโก่งตัวที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Deflection at Peak Load) ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 พฤติกรรมการรับแรงค้ำของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

### 4.3 แรงกระแทก (Impact Loading)

#### 4.3.1 การทดสอบแรงกระแทกแบบตุ้มน้ำหนัก (Drop – Weight Impact Test)

ผลจำนวนครั้งเมื่อคอนกรีตเริ่มแตกร้าว (First Crack) และวิบัติ (Ultimate Failure) ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กด้วยตุ้มน้ำหนัก 4.54 กก.และ 9.09 กก. สรุปในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก 4.54 กก.

Type of Concrete	Drop Weight 4.54 kg.	
	Avg. Number of Blows	
	First crack	Failure
PC	1	2
CSF – 0.5	2	7
CSF – 0.75	3	11
CSF – 1.0	4	18

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก 9.09 กก.

Type of Concrete	Drop Weight 9.09 kg.	
	Avg. Number of Blows	
	First crack	Failure
PC	0	1
CSF – 0.5	1	3
CSF – 0.75	2	4
CSF – 1.0	3	6

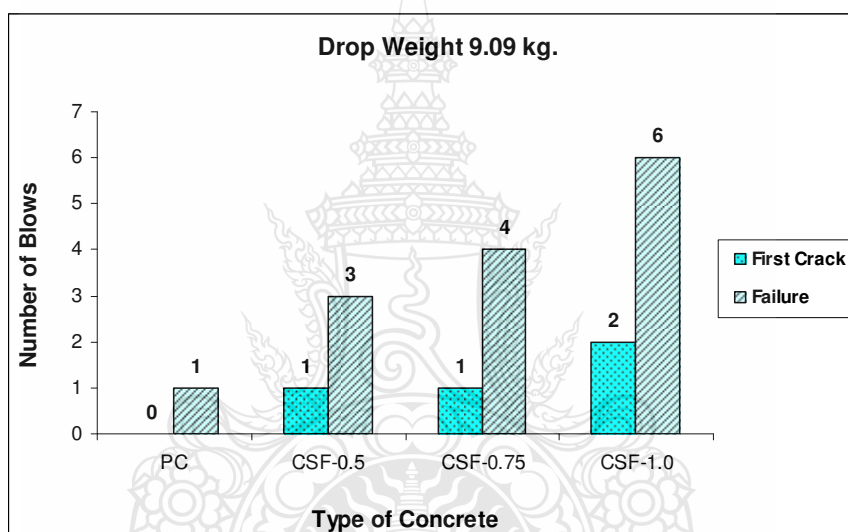


ภาพที่ 4.13 ลักษณะการทดสอบแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนัก

จากผลการทดสอบแรงกระแทกแบบตุ้มน้ำหนัก ดังตารางที่ 4.1 4.2 และภาพที่ 4.13 ด้วยชุดทดสอบแรงกระแทกพบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก สามารถรับจำนวนครั้งจากการกระแทกได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา มีค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งในการทำให้เกิดรอยร้าวครั้งแรกและที่วิบัติ สูงขึ้นตาม

สัดส่วนปริมาณการใส่เส้นใยเหล็ก โดยเพิ่มขึ้น 4-9 เท่า และเมื่อทำการเปลี่ยนตุ้มน้ำหนัก เป็น 9.09 กก. พบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ก็สามารถรับจำนวนครั้งจากการกระแทกได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

เมื่อพิจารณาตุ้มน้ำหนัก 9.09 กก. ผลการทดสอบจำนวนครั้งในการปล่อยตกดังแสดงในภาพที่ 4.13 ปรากฏว่าเมื่อทำการปล่อยตกในครั้งแรก คอนกรีตธรรมดาเกิดการวิบัติ โดยไม่สามารถหารอยร้าวครั้งแรกได้ส่วนคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กจำนวนครั้งในการกระแทกก็ลดลงประมาณร้อยละ 50 ทั้งนี้เกิดจากแรงกระแทกจากตุ้มน้ำหนักมีค่าสูงเกินกว่าขีดกำลังของคอนกรีตที่สามารถรับได้ จึงเกิดการเสียหายก่อนที่จะบันทึกค่าจำนวนครั้งและตรวจสอบรอยร้าวได้ สำหรับตัวแปรของแรงกระแทกในการทดสอบ ได้แก่ น้ำหนักลูกตุ้มและความเร็วในการตกกระทบ



ภาพที่ 4.14 ผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก 9.09 กก.

#### 4.3.2 พลังงานกระแทก (Impact Energy)

ค่าพลังงานกระแทกที่คำนวณจากสมการพลังงานจลน์ ที่ปล่อยลูกตุ้มตก พลังงานต่อครั้งจะมีค่าเท่ากันสำหรับลูกตุ้มน้ำหนักเดียวกันค่าพลังงานจลน์ของลูกตุ้มขนาด 9.09 กก. ก็จะมีค่าเป็นสองเท่าของลูกตุ้มขนาด 4.54 กก. โดยค่าพลังงานกระแทกสะสมที่คอนกรีตสามารถรับได้ก่อนที่จะวิบัติเท่ากับผลคูณของจำนวนครั้งที่นับได้คูณกับค่าพลังงานต่อครั้งที่ปล่อยตก จากตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณพลังงานกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 4.54 กก. พบว่าพลังงานกระแทกที่คอนกรีตสามารถรับได้ จะสอดคล้องกันกับจำนวนครั้งที่ทำให้คอนกรีตเกิดรอยร้าวครั้งแรกและที่วิบัติ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 1.0 สามารถรับพลังงานกระแทกสะสมที่รอยร้าวเริ่มต้น ได้สูงถึง 4



เท่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา และที่วิบัติคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ร้อยละ 1.0 สามารถรับพลังงานกระแทกสะสมได้สูงถึง 9 เท่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา และจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มขนาดลูกตุ้มเป็น 9.09 กก. คานคอนกรีตเกิดการวิบัติทันที ค่าพลังงานกระแทกสะสมที่รอยร้าวครั้งแรกของคอนกรีตธรรมดามีค่าเป็น 0 เนื่องจากเกิดการเสียหายก่อนที่จะบันทึกค่าจำนวนครั้งและตรวจสอบรอยร้าวได้

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณพลังงานกระแทก (Impact Energy)

Type of Concrete	Drop Weight 9.09 kg.			
	Avg. Number of Blows		Impact Energy (N-m) (J)	
	First crack	Failure	First crack	Failure
PC	1	2	20.43	40.86
CSF – 0.5	2	7	40.86	143.01
CSF – 0.75	3	11	61.29	224.73
CSF – 1.0	4	18	81.72	367.74
Type of Concrete	Drop Weight 9.09 kg.			
	Avg. Number of Blows		Impact Energy (N-m) (J)	
	First crack	Failure	First crack	Failure
PC	0	1	0.00	40.86
CSF – 0.5	1	3	40.86	122.58
CSF – 0.75	1	4	40.86	163.44
CSF – 1.0	2	6	81.72	245.16

#### 4.3.3 ผลของการกระแทก

จากการทดสอบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 4.54 กก.แล้วทำการวัดระยะโก่งตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะ ( $\Delta$ ) เมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนักกระแทกในครั้งแรก โดยผลการทดสอบระยะโก่งตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะ ( $\Delta$ ) ผลการคำนวณระยะโก่งตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆกระทำ ( $\Delta_{st}$ ) และค่าตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) สรุปได้ดังตารางที่ 4.4

สำหรับการทดสอบด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 9.09 กก. จะไม่วัดระยะ โกงตัวเนื่องจากเมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนัก กระแทกแล้วคอนกรีตเกิดการวิบัติทันทีจึงไม่สามารถหาระยะ โกงตัวที่แน่นอนได้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบและผลการคำนวณหาระยะ โกงตัว

Type of Concrete	Avg. $\Delta$	$\Delta_{st}$	$\Delta / \Delta_{st}$
PC	1.5	0.0025	600
CSF – 0.5	1.2	0.0015	800
CSF – 0.75	0.9	0.0009	1000
CSF – 1.0	0.8	0.0007	1143

เมื่อพิจารณาระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะ จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าระยะ โกงตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใส่เส้นใยเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา และค่าระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆกระทำก็มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ สำหรับค่าตัวคูณแรงกระแทก จะมีค่าสูงขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกันเนื่องมาจากค่าระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆกระทำที่มีค่าลดลงตามสมการค่าตัวคูณแรงกระแทก สำหรับการพิจารณาค่าการ โกงตัวและการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้น จะพิจารณาพฤติกรรมในช่วงอีลาสติก คือ เมื่อปล่อยน้ำหนักกระทำ ทำการวัดระยะ โกงตัวเมื่อคอนกรีตเริ่มแตกร้าว หรือหน่วยแรงที่เกิดขึ้นไม่เกินกว่าค่าพิคกียืดหยุ่น

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริมาณของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมีผลกระทบต่อคอนกรีตแตกต่างกันออกไปและการทดสอบแรงกระแทกแบบตู่มน้ำหนักก็เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบแรงกระแทกซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสด

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กจะลดลงสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณและขนาดของเส้นใยเหล็กที่ใช้โดยปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวลดลงถึง 3 เท่าและพบว่าเมื่อใส่สารผสมเพิ่มลงไปมีผลทำให้ความสามารถในการเทของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าอยู่ในช่วงที่ทำการออกแบบ แต่ทั้งนี้ผลของค่ายุบตัวก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณการใส่เส้นใยเหล็กและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเหล็กซึ่งการที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าต่ำมากนั้นเกิดจากลักษณะของเส้นใยที่เป็นแท่งยาวประกอบกับการทดสอบ Slump Test ต้องมีการทำให้คอนกรีตแน่นด้วยการกระทุ้งแท่งเหล็กเป็นชั้นๆ เส้นใยจึงเกิดการกระจายตัวแต่ละเส้นในแนวตั้งตามลักษณะการกระทุ้ง จะผลทำให้เส้นใยเหล็กอัดตัวเป็นก้อนขัดขวางการยุบตัวของมวลรวม

##### 5.1.2 คุณสมบัติเชิงกล

1) กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดามีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กก็มีแนวโน้มการพัฒนาขึ้นเหมือนกับคอนกรีตธรรมดาและพบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีการเพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนเดียวกัน กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 24 ของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 40 – 42 MPa ขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยเหล็กการผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตทำให้กำลังอัดสูงขึ้นเล็กน้อยค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

2) ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตธรรมดามีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 3.8 MPa กำลังดึงของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.0 – 4.9 MPa มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคอนกรีตธรรมดาสูงถึงร้อยละ 30 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดึงได้สูง จึงมีผลทำให้เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจะมีกำลังในการรับแรงดึงได้สูงขึ้น สำหรับรูปแบบการวิบัตินั้น คอนกรีตธรรมดาจะ

พังด้วยการแตกแบบเปราะ (การผ่าแยก) ที่ผิวรอยต่อและในมอร์ตาร์ สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใย เหล็กพบว่า มีลักษณะการวิบัติจากการเลื่อนไถลด้วยแรงเฉือนเป็นแนวเฉียงรวมกับการมีอยู่ของเส้นใยเหล็กที่ยึดรั้งรอยร้าวไว้ไม่พบรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่นำไปสู่การวิบัติทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยเหล็กมีความสามารถในการยึดรั้งรอยแตกร้าวซึ่งเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต

3) กำลังคัดของคอนกรีตพบว่า กำลังคัดซึ่งอยู่ในรูปค่าโมดูลัสแตกร้าวคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก ค่ากำลังคัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.0 มีค่าสูงถึงร้อยละ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งตัวของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีพฤติกรรมหลังการแตกร้าว (Post-Cracking) ที่ยาวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาสูงกว่า 6 เท่ารวมถึงมีการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการรับแรงคัดและการโก่งตัวที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด

4) การทดสอบแรงกระแทกแบบตู่มน้ำหนักคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับจำนวนครั้งจากการกระแทกได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดามีค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งในการทำให้เกิดรอยร้าวครั้งแรกและที่วิบัติ สูงขึ้นตามสัดส่วนปริมาณการใส่เส้นใยเหล็ก โดยเพิ่มขึ้นสูงถึง 9 เท่าดังนั้นเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบตู่มน้ำหนักที่ได้พัฒนาโดยสร้างขึ้นใหม่สามารถใช้ทดสอบแรงกระแทกของคอนกรีตได้ ผลที่ได้จากการทดสอบได้แก่ จำนวนครั้งในการตกกระแทกและระยะ โกงตัวสำหรับตัวแปรของแรงกระแทกในการทดสอบได้แก่น้ำหนักตู่มและความเร็วในการตกกระทบ ทั้งนี้ควรเลือกขนาดตู่มน้ำหนักให้สัมพันธ์กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของคอนกรีต

5) พลังงานกระแทกและระยะ โกงตัวเมื่อผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตพลังงานที่ทำให้คอนกรีตเกิดรอยร้าวครั้งแรกและเกิดการวิบัติมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา พลังงานกระแทกที่สะสมจะมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนครั้ง สำหรับค่าระยะ โกงตัวที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณ ในช่วงที่คอนกรีตเริ่มแตกร้าว นั่นคือช่วงที่คอนกรีตอยู่ในสภาพอีลาสติกคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีค่าระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะและน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำมีค่าลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ผลที่ได้เป็นเพียงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับแนวทางการนำเส้นใยเหล็กมาใช้ในงานคอนกรีต โดยได้ศึกษาถึงปริมาณของเส้นใยเหล็กและวิธีการทดสอบแรงกระแทกแบบตุ้มน้ำหนักเท่านั้นควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในด้านอื่นๆ อีกซึ่งผู้วิจัยขอเสนอแนวทางไว้สำหรับผู้สนใจที่จะทำการวิจัยเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 ควรมีการศึกษาถึงพฤติกรรมของแรงภายใน ของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กประกอบการพิจารณาในการรับแรงกระแทกด้วย

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเครื่องมือการทดสอบแรงกระแทกแบบตุ้มน้ำหนักขนาดตุ้มน้ำหนักให้สัมพันธ์กับความสามารถในการรับแรงกระแทกของคอนกรีต

5.2.3 ควรมีการศึกษาถึงการนำไปใช้งานในองค์อาคารหรือส่วนของโครงสร้างเช่นเสาคานพื้นและชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงกระแทกเป็นต้น



## รายงานอ้างอิง

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543.
- [2] Bentur, A. and Mindess, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. ครั้งที่พิมพ์. Northern Ireland: The Universities Press (Belfast), c1990.
- [3] Kosmatka, S. H., et al, **Design and Control of Concrete Mixtures**. 6th. Canadian ed. UnitedState of America: Engineering Bulletin of Canadian Portland Cement Association, c1995.
- [4] เทเวศ พรหมจา และวีรชัย ศรีวงษ์กุล, พฤติกรรมของซิลิกาฟูมคอนกรีตและเส้นใยเหล็ก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
- [5] Mindess, S., Young, J. F. and Darwin,, **D. Concrete**. 2nd ed. New Jersey : Pearson Education, Inc., c2002.
- [6] ปิติ สุขคนธสุขกุล, สมยศ วิวัฒน์พัฒน์พงศ์ และธรรรงค์ แสงพันธ์, “พฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีโพรพิลีน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ, ครั้งที่ 2 , สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.
- [7] ACI committee, **Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete**. ACI 554.2R – 89 Detroit: Mechigan, 1989.
- [8] ACI committee, **Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete**. ACI 554.2R – 89 Detroit: Mechigan, 1989.
- [9] วัฒนา ธรรมมงคล, อำนวย พานิชกุล และวินิต ช่อวิเชียร, กำลังวัสดุ. กรุงเทพฯ: วินิต ช่อวิเชียร , 2527.
- [10] Y. Mohammadi a, R. Carkon-Azad a, S.P. Singh b, S.K.Kaushik, “Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio,” **Construction and Building Materials**, 1839, 23, 2009. pp.189.
- [11] “Standard specification for Portland cement,” **ASTM DESIGNATION** , C150-02a
- [12] “Standard specification for concrete aggregates,” **ASTM DESIGNATION**, C33-03,
- [13] PRODUCT DATA SHEET, **DRAMIX fibers RC-80/60**. N.V. Bekaert S.A.-Bekaertstraat 2-8550 . Zwevegem–Belgium.

- [14] “Standard test method for slump of hydraulic cement concrete,” **ASTM DESIGNATION**, C143/C143M-00,
- [15] “Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” **ASTM DESIGNATION** , C39,
- [16] “Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” **ASTM DESIGNATION** , C496-71,
- [17] ชื่อผู้แต่ง, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete,” **ASTM DESIGNATION**, C78,
- [18] ชื่อผู้แต่ง, “American Society for Testing and Materials,” **Annual Book of ASTM Standards 2001** , Volume 04.02, 2001.



ภาคผนวก



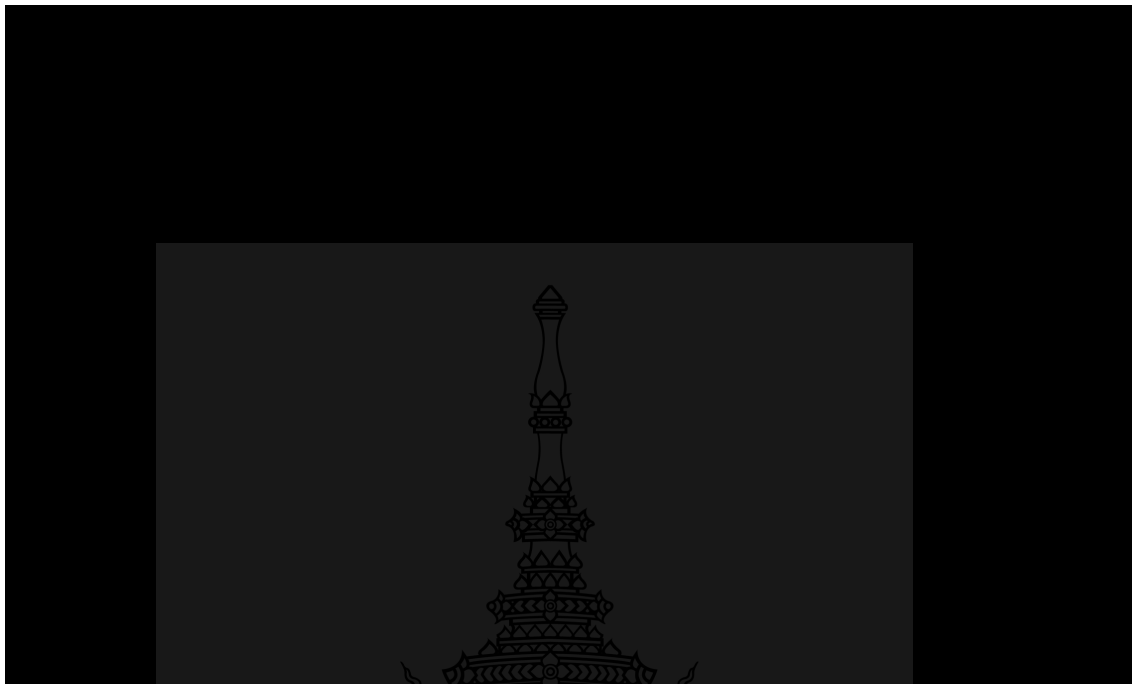




ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

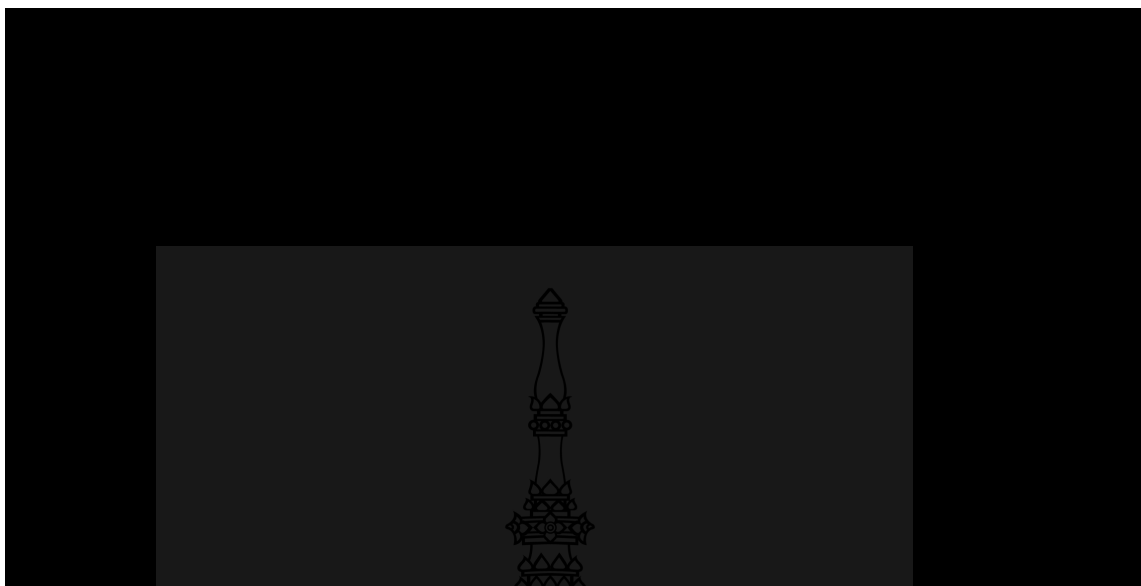
ตารางที่ ก1. โมดูลัสความละเอียด (FM.) ของมวลรวมละเอียด



ตารางที่ ก2. โมดูลัสความละเอียด (FM.) ของมวลรวมหยาบ



ตารางที่ ก3. ค่าความถ่วงจำเพาะและเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของมวลรวม



ตารางที่ ก4. ค่าความถ่วงจำเพาะ OD มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ





ตารางที่ ข 1 รายการคำนวณการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตธรรมดา



ตารางที่ ข 2 รายการคำนวณการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก





ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบและตารางคำนวณ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังอัด

Compressive Strength								
Specimen	Weight	Load kn	Volume	Unit Weight	Area	Strength ksc	Avg ksc	Avg MPa
PC 1/12	12.84	498.2	0.0053	2423.213022	176.625	287.5295873		
PC 2/12	12.76	488.3	0.0053	2408.115121	176.625	281.8159323	286.4907409	29
PC 3/12	12.62	502.7	0.0053	2381.693796	176.625	290.1267032		
PC 4/12	12.56	572.4	0.0053	2370.37037	176.625	330.3531428		
PC 5/12	12.76	553.4	0.0053	2408.115121	176.625	319.3875424	325.6783342	33
PC 6/12	12.42	567.1	0.0053	2343.949045	176.625	327.2943174		
PC 7/12	12.64	632.2	0.0053	2385.468271	176.625	364.8659275		
PC 8/12	12.68	632.3	0.0053	2393.017221	176.625	364.9236412	362.8844243	36
PC 9/12	12.60	621.8	0.0053	2377.919321	176.625	358.8637041		
CSF-0.5 1/12	12.90	544.1	0.0053	2434.536447	176.625	314.0201695		
CSF-0.5 2/12	12.92	566.3	0.0053	2370.37037	176.625	326.8326079	323.2543594	32
CSF-0.5 3/12	12.56	569.9	0.0053	2408.115121	176.625	328.9103007		
CSF-0.5 4/12	12.76	654.5	0.0053	2423.213022	176.625	377.7360796		
CSF-0.5 5/12	12.84	644.8	0.0053	2472.281198	176.625	372.137852	373.3113637	37
CSF-0.5 6/12	13.10	641.2	0.0053	2472.281198	176.625	370.0601593		
CSF-0.5 7/12	12.84	738.5	0.0053	2423.213022	176.625	426.2155765		
CSF-0.5 8/12	12.94	689.1	0.0053	2442.085397	176.625	397.7050152	404.226618	40
CSF-0.5 9/12	13.02	673.6	0.0053	2457.183298	176.625	388.7593938		
CSF-0.75 1/12	12.92	580.3	0.0053	2438.310922	176.625	334.9125241		
CSF-0.75 2/12	12.92	597.7	0.0053	2438.310922	176.625	344.9547056	339.7797117	34
CSF-0.75 3/12	13.18	588.2	0.0053	2487.379099	176.625	388.7593938		
CSF-0.75 4/12	12.98	689.3	0.0053	2449.634348	176.625	344.9125241		
CSF-0.75 5/12	12.78	620.2	0.0053	2411.889597	176.625	357.9402851	376.9665638	38
CSF-0.75 6/12	12.96	650	0.0053	2445.859873	176.625	375.1389637		
CSF-0.75 7/12	12.90	698.4	0.0053	2434.536447	176.625	403.0723881		
CSF-0.75 8/12	13.02	718.2	0.0053	2457.183298	176.625	414.4996981	407.5355799	41
CSF-0.75 9/12	13.12	701.8	0.0053	2476.055674	176.625	405.0346535		
CSF-1.0 1/12	13.08	603	0.0053	2468.506723	176.625	348.013531		
CSF-1.0 2/12	13.08	610.8	0.0053	2468.506723	176.625	352.515198	354.5331776	35
CSF-1.0 3/12	12.64	629.1	0.0053	2385.468271	176.625	363.076832		
CSF-1.0 4/12	13.00	686.5	0.0053	2453.408823	176.625	396.2044594		
CSF-1.0 5/12	13.02	680.5	0.0053	2415.664072	176.625	392.7416382	386.31661811	39
CSF-1.0 6/12	12.80	641.1	0.0053	2396.791696	176.625	370.0024456		
CSF-1.0 7/12	12.70	721.4	0.0053	2438.310922	176.625	4163465361		
CSF-1.0 8/12	12.92	711.6	0.0053	2442.085397	176.625	410.6905948	416.6351045	42
CSF-1.0 9/12	12.94	732.27	0.0053		176.625	422.8681827		



**ตารางที่ ๒** ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

Splitting Test								
Specimen	Weight Kg.	Load Kn	Volume	Unit Weight	Area	Strength ksc	Avg.ksc	Avg.MPA
PC 10/12	12.65	258.2	0.00529875	2387.355508	176.625	37.25418478		
PC 11/12	12.62	255.7	0.00529875	2381.693896	176.625	36.89347424	38.21127009	3.82
PC 12/12	12.62	280.6	0.00529875	2381.693796	176.625	40.48615124		
CSF-0.5 10/12	12.64	280.1	0.00529875	2385.468271	176.625	40.41400913		
CSF-0.5 11/12	13.06	281.5	0.00529875	2464.732248	176.625	40.616000704	40.47172282	4.05
CSF-0.5 12/12	12.09	279.9	0.00529875	2434.536447	176.625	40.38515229		
CSF-0.75 10/12	13.06	343.6	0.00529875	2464.732248	176.625	49.5760569		
CSF-0.75 11/12	12.84	273.1	0.00529875	2423.213002	176.625	39.40401961	44.3673999	4.44
CSF-0.75 12/12	13.04	305.8	0.00529875	2460.957773	176.625	44.1221135		
CSF-1.00-10/12	13.10	344.6	0.00529875	2472.281198	176.625	49.72034112		
CSF-1.00- 11/12	12.70	323.8	0.00529875	2396.791696	176.625	46.71922941	48.98449161	4.9
CSF-0.75 12/12	12.84	350.1	0.00529875	2423.213022	176.625	50.51390431		

**ตารางที่ ๓** ผลการทดสอบกำลังดัด

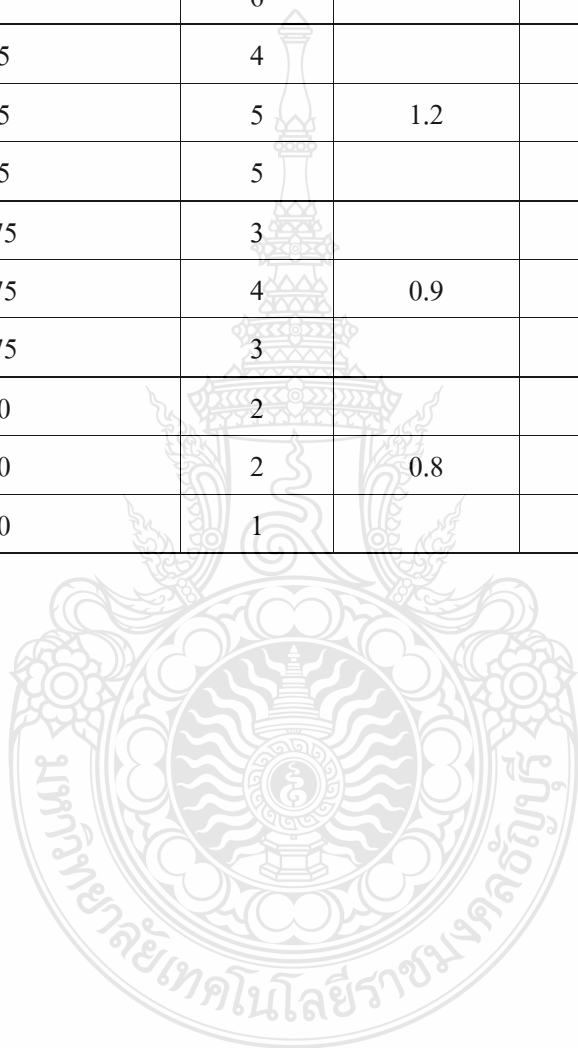
Bending								
Specimen	Weight Kg.	Load Kn	Volume	Unit Weight	Avg. load	Rupture	Avg. Rupture	Avg.MPA
PC 1/9	11.94	1581	0.005	2388		47.43		
PC 2/9	11.97	1857	0.005	2394	1796.33	55.71	5.39	
PC 3/9	11.95	1951	0.005	2390		58.53		
CSF-0.5 1/9	12.85	2021	0.005	2570		60.63		
CSF-0.5 2/9	12.62	1924	0.005	2524	1978.00	57.72	5.93	
CSF-0.5 3/9	13.04	2244	0.005	2608		59.67		
CSF-0.75 1/9	12.52	2180	0.005	2504		67.32		
CSF-0.75 2/9	12.40	2098	0.005	2480	2174.00	65.40	6.52	
CSF-0.75 2/9	12.94	2645	0.005	2588		62.94		
CSF-1.00-1/9	12.74	2834	0.005	2548		79.35		
CSF-1.00- 2/9	12.98	2834	0.005	2596	2778.33	85.02	8.34	
CSF-0.75 3/9	12.90	2856	0.005	2580		85.68		

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกระแทก

Type of Concrete	Drop Weight 4.45 Kg.			
	Number of Blows		Avg.	
	First Crack	Failure	Fist Crack	Failure
PC	1	2	1	2
PC	1	2		
PC	1	2		
CSF-0.5	2	7	2	7
CSF-0.5	3	6		
CSF-0.5	2	7		
CSF-0.75	3	9	3	11
CSF-0.75	2	12		
CSF-0.75	3	11		
CSF-1.0	5	18	4	18
CSF-1.0	3	15		
CSF-1.0	5	21		
Type of Concrete	Drop Weight 4.45 Kg.			
	Number of Blows		Avg.	
	First Crack	Failure	Fist Crack	Failure
PC	0	1	0	1
PC	0	1		
PC	0	1		
CSF-0.5	1	3	1	3
CSF-0.5	1	3		
CSF-0.5	1	2		
CSF-0.75	1	3	1	4
CSF-0.75	1	4		
CSF-0.75	1	4		
CSF-1.0	1	5	2	6
CSF-1.0	2	8		
CSF-1.0	2	6		

ตารางที่ ค5 ผลการทดสอบระยะ โกงตัวจากแรงกระแทก

Type of Concrete	$\Delta$ mm.	Avg. $\Delta$ mm.	$\Delta_{st}$ mm.	$\frac{\Delta}{\Delta_{st}}$
PC	6			
PC	7	1.5	0.0025	600
PC	6			
CSF-0.5	4			
CSF-0.5	5	1.2	0.0015	800
CSF-0.5	5			
CSF-0.75	3			
CSF-0.75	4	0.9	0.0009	1000
CSF-0.75	3			
CSF-1.0	2			
CSF-1.0	2	0.8	0.0007	1143
CSF-1.0	1			



ภาคผนวก ง  
ตัวอย่างการคำนวณ



คำนวณค่าพลังงานกระแทก (Impact Energy) โดยใช้สูตรพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จากสมการที่ (2.14)

$$U = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$v = \sqrt{2(9.81)(0.457)}$$

$$= 3m / s$$

เมื่อ

$$m = 4.54 \text{ kg.}$$

$$v = 3m / s$$

ดังนั้น ค่าพลังงานกระแทก (Impact Energy) ที่กระทำต่อครั้ง

$$U = \frac{(1)(4.54)(9.81)(3^2)}{(2)(9.81)}$$

$$= 20.43 \text{ N.m (J)}$$

(2.8) คำนวณระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักที่มีค่าเท่ากันแต่ค่อยๆ กระทำ  $\Delta_{st}$  จากสมการที่

$$\Delta = \Delta_{st} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} \right)$$

เมื่อ

$\Delta$  = ระยะ โกงตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักปะทะที่วัดได้จากการทดสอบ (มม.)

$h$  = ความสูงของค้ำน้ำหนัก (มม.)

จากการทดสอบระยะ โกงตัวของคอนกรีตธรรมดาได้

$$\Delta = 15 \text{ mm.}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.8) และทำการแก้สมการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ จะได้  $\Delta_{st} = 0.0025$

mm. ตัวคูณแรงกระแทก (Impact Factor) =  $\frac{\Delta}{\Delta_{st}}$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta}{\Delta_{st}} &= \frac{1.5}{0.0025} \\ &= 600\end{aligned}$$





**ภาคผนวก จ**  
**ภาพบรรยายประกอบงานวิจัย**



ภาพที่ จ 1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้



ภาพที่ จ 2 การเทคอนกรีตที่ผสมแล้วลงในแบบหล่อ





ภาพที่ จ 3 อุปกรณ์ในการเคลื่อนหั่วคอนกรีตรูปทรงกระบอก



ภาพที่ จ 4 แสดงการติดตั้งตุ้มน้ำหนัก



ภาพที่ จ 5 การติดตั้งเกจวัดระยะ โกงตัว

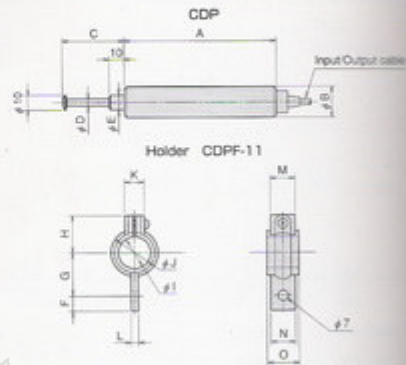


ภาพที่ จ 6 การติดตั้งเครื่องอ่านค่าระยะ โกงตัว

# DISPLACEMENT TRANSDUCERS

## CDP Displacement Transducer

5~100mm



The CDP displacement transducer is a compact, easy-to-operate strain transducer. Because it is designed to produce a large output and to deliver stable performance, highly accurate measurements can be made. It is suitable for both static and dynamic measurements.

Protection ratings : IP 40 equivalent

### Dimensions

Type	A	B	C	D	E
CDP-5	99	20.5	20	5	10
CDP-10	99	20.5	24	5	10
CDP-25	114	20.5	40	5	10
CDP-50	154	33.5	65	5	10
CDP-100	274	41	118	6	12

### Dimensions HOLDER

Type	Applicable transducer	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
CDPF-11-25	CDP-5~25	10	28	25	20.5	30	13	5	15	15	20
CDPF-11-50	CDP-50	10	35	32	33.5	43	13	5	15	15	20
CDPF-11-100	CDP-100	11	36	40	41	50	17.5	8	14	16	20

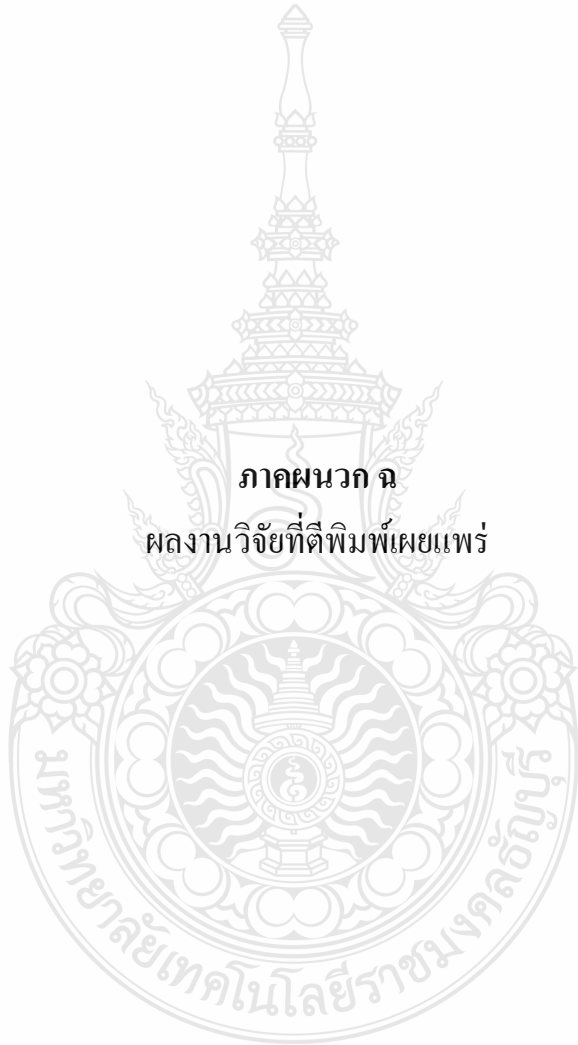
### Specifications

Type	CDP-5	CDP-10	CDP-25	CDP-50	CDP-100
Capacity	5mm	10mm	25mm	50mm	100mm
Rated output	5mV/V±0.1% (1000X10 <sup>-3</sup> strain±0.1%)	3mV/V±0.1% (1000X10 <sup>-3</sup> strain±0.1%)	6.25mV/V±0.1% (12500X10 <sup>-3</sup> strain±0.1%)	5mV/V±0.1% (10000X10 <sup>-3</sup> strain±0.1%)	5mV/V±0.1% (10000X10 <sup>-3</sup> strain±0.1%)
Sensitivity	2000X10 <sup>-3</sup> strain/mm	1000X10 <sup>-3</sup> strain/mm	500X10 <sup>-3</sup> strain/mm	200X10 <sup>-3</sup> strain/mm	100X10 <sup>-3</sup> strain/mm
Non-linearity	0.15%R/O		0.1%R/O		
Spring force	6.4N		3.4N		4.9N
Frequency response	40Hz	12Hz	8Hz	6Hz	3Hz
Temperature effect on zero		0.01%R/O/°C	0.008%R/O/°C		0.01%R/O/°C
Compensated temperature range			0~+60°C (no condensation)		
Temperature range			-10~+60°C (no condensation)		
Input/output resistance			350 Ω		
Recommended exciting voltage			Less than 2V		
Allowable exciting voltage			10V		
Holders supplied		1 pc.			2 pcs.
Weight	30g		100g	270g	580g

Supplied cable : CT6-4V10/NJ-STB (φ6mm 0.3mm<sup>2</sup> 4-core shielded vinyl cable 10%)

ภาพที่ ๗ คู่มือประกอบการใช้เครื่องอ่านค่าระยะ โกงตัว

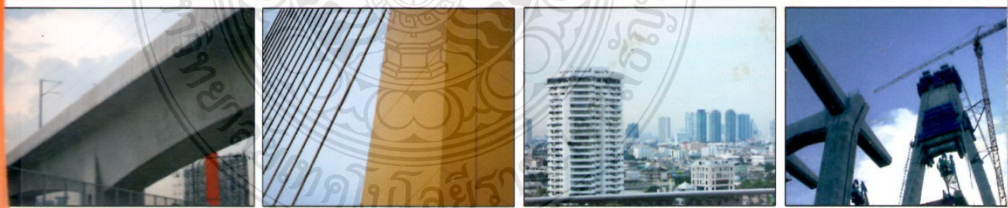
ภาคผนวก ฉ  
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ ANNUAL CONCRETE CONFERENCE (ACC6) 6

ในวาระครบรอบ 50 ปี แห่งการสถาปนา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

20 - 22 ตุลาคม 2553  
Grand Pacific Sovereign Resort & Spa  
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

- ร่วมกับ
- o ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาดาราศาสตร์โยธา และ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
  - o ACI Thailand Chapter
  - o ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ  
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6  
Annual Concrete Conference 6 (ACC6)

บทความ

- ❖ บทความโดยองค์ปาฐก (Keynote)
- ❖ บทความวิจัยรับเชิญ (IVT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (MAT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาโครงสร้างคอนกรีต (STR)
- ❖ บทความวิจัย สาขามารูรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต (REP)
- ❖ บทความวิจัย สาขาคอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน (ENV)

20-22 ตุลาคม 2553

โรงแรมแกรนด์ แปซิฟิก ซอฟเฟอริน รีสอร์ท แอนด์ สปา  
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

จัดทำโดย

- ❖ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

- ❖ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ❖ ACI Thailand Chapter
- ❖ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

สงวนลิขสิทธิ์ © 2553 ตาม พรบ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 โดยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ.2553

- MAT-24 การเชื่อมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าชานอ้อย-แกลบ-ไม้ และ ผสมร่วม  
เถ้าลอยกับเถ้าชานอ้อย-แกลบ-ไม้  
วัชรศ แก่นบุตร และ วีระ หอสกุลไ้
- MAT-25 วัสดุเฟอซีติบิซมที่มีสารเติมแต่งชนิดสารอินทรีย์  
จิระนุช สงพูล เกศรินทร์ พิมรक्षा ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี ชัยพร ตั้งทอง  
และ ปริญญา จินดาประเสริฐ
- MAT-26 การแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยวิธีการฝังเหล็กในคอนกรีต  
กิตติชาติ เผ่าพงษ์ไ้พูบลย์ และ วีระ หอสกุลไ้
- MAT-27 พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตีค้ำน้ำหนัก  
ประพนธ์ เฟื่องฟู และ จตุพล ตั้งปกาศิต
- MAT-30 ผลของอุณหภูมิปมต่อกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์  
สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ
- MAT-32 A Study of Pozzolanic Activity of Kaolinite, Dickite and Pyrophyllite Based Clays  
Somsak Boonjaeng, Kedsarin Pimraksa, Prinya Chindaprasit, Sutin Kuharuangrong,  
Arnon Chaipanich, Rattikan Kaladee, and Maturot Tulapan
- MAT-33 บั้จยัของส่วนผสมและสภาวะแวดล้อมต่อความลึกของคาร์บอนชั้นในคอนกรีตมวลเบา  
แบบเซลลูล่าสำหรับงานโครงสร้าง  
คำผล ทองสมุท และ วิวัฒน์ พัทศนันท์
- MAT-34 การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหลอ้แข็งากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย  
และซีลีกาฟูมเป็นวัสดุยึดประสาน  
วรวรรณชัย สายวาริน ชูวิทย์ นาเพี้ย และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ
- MAT-35 การศึกษาคุณสมบัติฝุ่นหินฟูเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานก่อและงานฉาบ  
ชูเกียรติ ชูสกุล
- MAT-36 การใช้เถ้าก้นเตาเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า  
พัชร อ่อนพรม และ เรืองรุชต์ ชีระโรจน์
- MAT-37 คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมวัสดุพอซโซลาน  
ปาริชาติ บุญเลิศ พิมพิสา บุญสูงเพชร คำภี จิตชัยภูมิ และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ

**พฤติกรรมของคอนกรีตผสมเส้นใยและการต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนัก**  
**BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED CONCRETE AND IMPACT RESISTANCE**  
**UNDER DROP - WEIGHT TEST**

ประพนธ์ เทื่องฟู (Prapon Fuengfu)<sup>1</sup>

จตุพล ตั้งปกาศิต (Jatuphon Tangpagasit)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (capet0wn\_2007@hotmail.com)

<sup>2</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (jtjeab@hotmail.com)

**บทคัดย่อ :** เส้นใย (Fiber) เป็นวัสดุชนิดหนึ่ง ที่นิยมนำมาผสมในคอนกรีตเพื่อเสริมคุณสมบัติให้คอนกรีตมีความเหนียว และการดูดซับพลังงานที่ดีขึ้น การทดสอบแบบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก (DROP-WEIGHT TEST) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบหาพลังงานที่เกิดการแตกร้าว ปริมาณการรับแรงกระแทกจากจำนวนครั้งที่ทดสอบ และลักษณะของการแตกร้าว และการเสียหายจากการทดสอบ วิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีที่สามารถหาพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงกระแทกของคอนกรีตได้ตามที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเส้นใย โดยการทดสอบแบบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก กำหนดตัวแปรที่ใช้ได้แก่ เส้นใยเหล็กชนิดงอปลาย (Hookend Steel Fiber) มีปริมาณส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก คือ 1% และ 1.5% โดยปริมาตร และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ชนิดความแข็งแรงสูง (High Tenacity) ผสมลงในตัวอย่างคานทดสอบขนาด 100 x 100 x 500 มิลลิเมตร จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเส้นใยเหล็ก การเรียงตัวของเส้นใยมีผลต่อกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงคด คอนกรีตผสมเส้นใยมีกำลังต้านทานแรงกระแทกที่ดีกว่า คอนกรีตธรรมดา และสามารถรับพลังงานที่เกิดการแตกร้าวและการดูดซับพลังงานได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

**ABSTRACT :** In order to increase the concrete properties, i.e. toughness and energy absorption, the corresponding fiber is an appropriate material utilized for mixing concrete. The drop-weight-test methodology is applied to determine the energy consumed to fracture, number of blows in a repeated impact and character of crack as well as the damage observed after testing. This test method is to verify the behavior and impact load of concrete. The propose of this research is to determine the concrete mixed with the corresponding fiber, and the test method is carried out by using the impact weight, and the variable rate of hookend steel fiber is stipulated. The mixing ratio of the corresponding fiber is 1% and 1.5% by volume respectively and the high tenacity with mixed in concrete beam specimens with a dimension of 100x100x500mm. The results showed that the volume and direction of fiber is effect on the compressive and bending strength. Concrete mixed with high resistance fiber is greater than the normal concrete. Furthermore, both crack resistance and absorption energy is also greater than the normal concrete.

**KEYWORDS :** Impact resistance, Drop-weight test, Fiber reinforced concrete



## 1. บทนำ

ปัจจุบันคอนกรีตผสมเส้นใยถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเหนียวและดูดซับพลังงานที่ดีขึ้น นั่นหมายถึงความสามารถในการรับแรงกระแทกของคอนกรีต [1] ซึ่ง ACI 544.2R [2] ได้กำหนดการทดสอบแรงกระแทกไว้หลายวิธี โดยการทดสอบด้วยวิธีค้อนน้ำหนัก (DROP - WEIGHT TEST) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวัดความสามารถในการรับแรงกระแทกจากจำนวนครั้งที่ทำการปล่อยตกกระแทก ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ยุ่งยาก แต่ยังไม่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย เนื่องจากที่ผ่านมามีการใช้การทดสอบแบบลูกตุ้มเหวี่ยง (Pendulum) [3] แต่ในปัจจุบันเครื่องทดสอบชนิดนี้ไม่ค่อยมีใช้กัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่มีขนาดยาว 60 มม. และเส้นใยโพลีเอสเตอร์จากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ผลจากการศึกษานี้สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมและทดสอบหาการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการทดสอบ (Drop – Weight Test) ตาม ACI 544.2R กำหนดให้ใช้ลูกตุ้มเหล็กทรงกลม ขนาด 63.5 mm มีน้ำหนัก 4.54 kg ระยะยก 457 mm ปล่อยตกกระแทกขึ้นตัวอย่างทดสอบขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm หนา 63.5 mm ผลการทดสอบดูจากจำนวนครั้งของการตกกระแทกเมื่อขึ้นทดสอบเริ่มร้าว และวิบัติ

Y. Mohammadi และคณะ [4] ได้ทำการวิจัยเรื่องความต้านทานแรงกระแทก ของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่ต่างกันโดยทดสอบตัวอย่างขนาด 100 x 100 x 500 mm บันทึกจำนวนครั้งที่ปล่อยตก เมื่อตัวอย่างเริ่มแตกร้าว (First Crack) และหยุดบันทึก เมื่อตัวอย่างวิบัติ (Failure) พร้อมทำการคำนวณค่าพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) โดยใช้สูตรพลังงานศักย์ (Kinetic Energy) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$U = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

โดยที่

$m$  = มวลของลูกตุ้มเป็น นิวตัน (N)

$v$  = ความเร็วตกกระแทกเป็น เมตรต่อวินาที (m/s.)

$U$  = พลังงานแรงกระแทกเป็น นิวตันเมตร (N-m), จูล (J)

## 3. วัตถุประสงค์

3.1 ศึกษาพลังงานกระแทกที่รอยร้าวเริ่มต้น (First crack) และที่การวิบัติ (Ultimate Failure) ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใย

3.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำหนักลูกตุ้ม ระยะตกกระแทก และความเร็วในการกระแทกของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใย

3.3 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลในการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใย

## 4. การทดสอบ

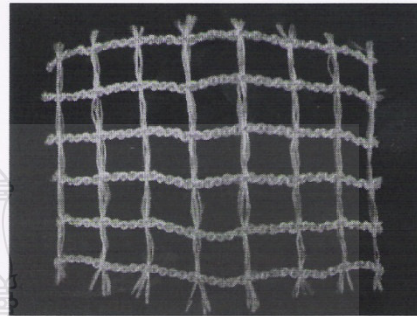
### 4.1 ตัวแปรที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมและความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเส้นใย จากการทดสอบ โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ได้แก่ คอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กจอลายขนาดยาว 60 มม. ในอัตราส่วน 1% และ 1.5% โดยปริมาตร และคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ในการศึกษาจะใช้สัญลักษณ์ PC แทนคอนกรีตธรรมดา CSF-1.0, CSF-1.5 แทนคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กชนิดจอลายอัตราส่วน 1% และ 1.5% ตามลำดับ สำหรับ CHT แทนคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ชนิดความแข็งแรงสูง (High Tenacity) ที่ได้ทำการถักเป็นผ้าโครงสร้างตาห่าง 10 มิลลิเมตร หล่อเป็นตัวอย่างทดสอบขนาด 100 x 100 x 500 มิลลิเมตร ทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงกระแทก โดยใช้ตุ้มเหล็กปล่อยตกกระแทก ที่ความเร็วตกกระแทก 3 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะใช้ตุ้มน้ำหนัก 4.54 กิโลกรัม

และขนาด 9.09 กิโลกรัม เพื่อศึกษาพลังงานที่เกิดแรงกระทำ และความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของคานตัวอย่าง

#### 4.2 วัสดุและอัตราส่วนผสม

รูปที่ 1 แสดงเส้นใยเหล็กชนิดขดปลาย รูปที่ 2 แสดง เส้นใยโพลีเอสเตอร์ชนิดความแข็งแรงสูง ส่วน คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กแสดงในตารางที่ 2 สมบัติของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ แสดงในตารางที่ 3 สัดส่วนผสมคอนกรีตแสดงตามตารางที่ 4



รูปที่ 2 เส้นใยโพลีเอสเตอร์ชนิดความแข็งแรงสูง



รูปที่ 1 เส้นใยเหล็กชนิดขดปลาย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

Name	Specific Gravity	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect Ratio (l/d)	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )
CSF	7.86	60	0.90	67	1000

ตารางที่ 3 คุณสมบัติผ้าถักเส้นใยโพลีเอสเตอร์

Name	Spacing (mm)	Strength at break(kN/m)	Elongation at break (%)
CHT	10	11.7	9.7

ตารางที่ 4 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีต

Mixing		PC	CSF-1.0	CSF-1.5	CHT
Cement	(kg)	350	350	350	350
Fine Aggregate	(kg)	796	796	796	796
Coarse Aggregate	(kg)	1112	1112	1112	1112
Water	(kg)	147	147	147	147
Admixture Type F (Ltr)		2.8	2.8	2.8	2.8
Steel Fiber	(kg)	-	78.5	118	-
Polyester	(Layer)	-	-	-	1

#### 4.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

หมายเหตุ สัดส่วน 1 % ใช้เส้นใยเหล็ก 78.50 kg/m<sup>3</sup> ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกหล่อในห้องปฏิบัติการ บ่มในสภาวะชื้น จนถึงอายุ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงกระทำการทดสอบแต่ละชนิดจะใช้ตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง

ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm สูง 300 mm ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 39

การทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้ตัวอย่างคานขนาด 100 x 100 x 500 mm ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 78 (Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam With Third-Point Loading) ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ให้แรงกระทำสองจุดที่กึ่งกลางคาน แบ่งก้นตัวอย่างตามความยาว โดยเหลือบริเวณปลายจุดรองรับคานไว้สองส่วน ส่วนละ 100 mm ส่วนภายในแบ่งเป็นสามส่วนเท่าๆกัน ส่วนละ 100 mm ตั้งน้ำหนักกดให้คงที่ อัตราที่ใช้คือ 0.14-0.20 kg/cm<sup>2</sup>/sec เปิดเครื่องกดน้ำหนักจนกระทั่งคานตัวอย่างวิบัติ ทำการวัดค่าแอนตัวที่กึ่งกลางคานและแรงต่อเนื่องกัน

การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก ทำการทดสอบแรงกระแทกด้วยวิธีค้อนน้ำหนัก (DROP - WEIGHT TEST) ทำตามการทดสอบของ Y. Mohammadi และคณะ [4] ใช้ตัวอย่างคานขนาด 100 x 100 x 500 mm ระยะจุดรองรับคาน 400 mm โดยจะแขวนลูกตุ้มเหล็กสูงจากผิวบนของคาน 457 mm ใช้ตุ้มเหล็กน้ำหนัก 4.54 kg และ 9.09 kg แล้วทำการปล่อยตุ้มเหล็กตกกระแทกที่ผิวบนของคานตัวอย่าง ตามรูปที่ 3 ทำการบันทึกค่าจำนวนครั้งที่ปล่อยตก เมื่อตัวอย่างเริ่มแตกร้าว (First Crack) และหยุดบันทึกเมื่อตัวอย่างวิบัติ (Failure) ทำการคำนวณหาค่าความเร็วตกกระแทกและพลังงานแรงกระแทก (Impact Energy) โดยใช้สูตรพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ตามสมการที่ (1)

ดังนั้นพลังงานแรงกระแทกต่อครั้งคำนวณได้ดังนี้

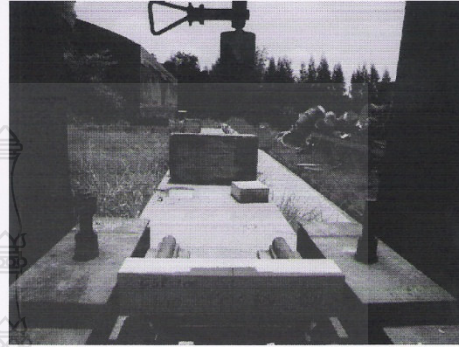
- 1) ลูกตุ้มเหล็ก 4.54 kg

$$U = \frac{4.54 \times 3^2}{2 \times 9.81} = 2.08 \text{ N-m หรือ } 2.08 \text{ J}$$

- 2) ลูกตุ้มเหล็ก 9.09 kg

$$U = \frac{9.09 \times 3^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 4.16 \text{ N-m หรือ } 4.16 \text{ J}$$



รูปที่ 3 แสดงการทดสอบแรงกระแทกแบบค้อนน้ำหนัก

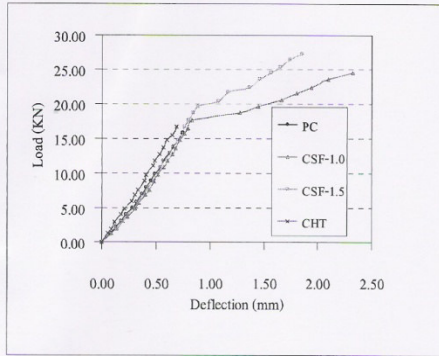
## 5. ผลการทดสอบ

### 5.1 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด

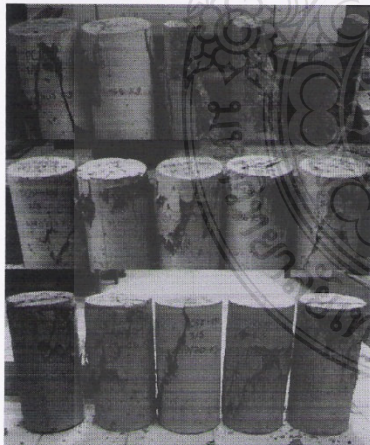
ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่สัดส่วนต่างกัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสัดส่วน 1 % สามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสัดส่วน 1.5 % และคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสัดส่วน 1.5 % กำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากการอัดแน่นของส่วนผสมทำได้ยาก จากค่ายุบตัวที่ต่ำประมาณ 1 ซม. ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตต่ำ

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน

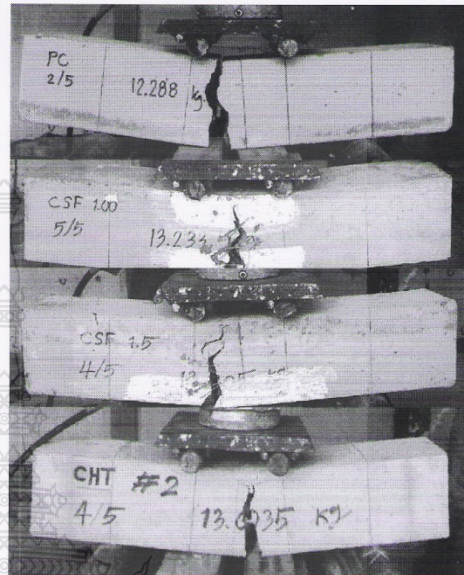
สัดส่วน	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)
PC	52.1	4.8
CSF-1.0	58.9	7.9
CSF-1.5	53.8	8.1
CHT	52.1	4.8



รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดพบว่าคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กสามารถรับแรงดัดได้สูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยเหล็ก ถ้าเส้นใยเหล็กเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับหน้าตัดทำให้การเกิดประสิทธิภาพสูงในการรับแรงและการกระจายตัวในตำแหน่งแรงดัดสูงสุดบริเวณช่วงกึ่งกลางคาน ก็มีผลต่อกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใย ขณะที่การหล่อคานตัวอย่าง สำหรับคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์รับแรงดัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากเส้นใยมีความเหนียวต่ำและการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับคอนกรีตทำได้ไม่ดีเนื่องจากเป็นเส้นใยชนิดดักคาข่าย

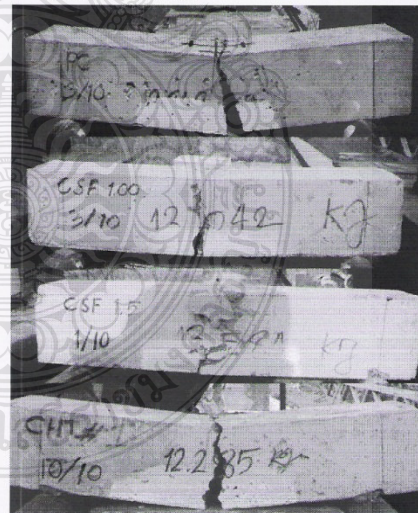


รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

5.2 ความต้านทานแรงกระแทกของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใย



รูปที่ 7 แสดงผลทดสอบแรงกระแทกและลักษณะรอยร้าว

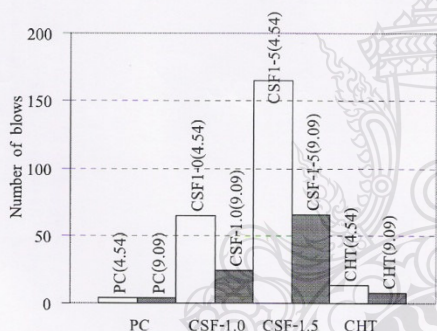
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแรงกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก 4.54 kg / 9.09 kg

Name	Specimen number	Number of blows		First Crack impact energy (N-m)	Failure impact energy (N-m)	Average failure impact energy (N-m)
		First crack	Failure			
PC	1	-/-	1/1	-/-	2.08/4.16	4.16/4.16
	2	-/-	2/1	-/-	4.16/4.16	
	3	-/-	2/1	-/-	4.16/4.16	
	4	-/-	2/1	-/-	4.16/4.16	
	5	-/-	3/1	-/-	6.24/4.16	
CSF-1.0	1	2/1	43/4	4.16/4.16	89.44/16.64	64.90/24.13
	2	2/1	39/6	4.16/4.16	81.12/24.96	
	3	2/2	27/7	4.16/8.32	56.16/29.12	
	4	2/1	30/7	4.16/4.16	62.4/29.12	
	5	1/1	17/5	2.08/4.16	35.36/20.80	
CSF-1.5	1	4/1	137/11	8.32/4.16	284.96/45.76	164.74/65.73
	2	3/1	18/16	6.24/4.16	37.44/66.56	
	3	2/1	48/35	4.16/4.16	99.84/145.6	
	4	2/1	165/14	4.16/4.16	343.2/58.24	
	5	1/1	28/3	2.08/4.16	58.24/12.48	
CHT	1	2/1	7/2	4.16/4.16	14.56/8.32	12.90/7.49
	2	1/1	4/2	2.08/4.16	8.32/8.32	
	3	2/1	5/1	4.16/4.16	10.4/4.16	
	4	1/1	10/2	2.08/4.16	20.8/8.32	
	5	1/1	5/2	2.08/4.16	10.4/8.32	

จากการทดสอบแรงกระแทกด้วยวิธีตุ้มน้ำหนักพบว่า คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กอัตราส่วน 1.5 % สามารถรับพลังงานแรงกระแทกได้สูงกว่าตัวอย่างอื่นโดยพิจารณาจาก จำนวนครั้งที่ตุ้มเหล็กตกกระแทกจนวินาทีและคอนกรีตธรรมดารับพลังงานแรงกระแทกได้ต่ำ มีค่าใกล้เคียงกับ คอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ จากการทดสอบพบว่าจำนวนครั้งที่ตุ้มเหล็กตกกระแทกจนเกิดการวิบัติ ในตัวอย่างชนิดเดียวกัน ก็จะไม่เท่ากันเนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใย ในแต่ละตัวอย่างที่ไม่เหมือนกัน สำหรับรอยร้าวเริ่มต้น (First Crack) เมื่อเพิ่มขนาดตุ้มเหล็ก เป็น 9.09 kg จำนวนครั้งที่เกิดรอยร้าวจะเกิดขึ้นครั้งแรก เนื่องจากพลังงานแรงกระแทกต่อครั้งสูงกว่า ดังที่แสดงในตารางที่ 6

ส่วนลักษณะการเกิดรอยร้าวจากการทดสอบด้วยวิธีนี้ คานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะค่อยๆเกิด เป็นลักษณะสะเก็ดที่ผิวคานคอนกรีตที่จุดกึ่งกลางคานและ เมื่อใกล้ถึงจุดวิบัติ รอยร้าวก็จะแพร่ขยายออกไปจนคาน วิบัติ สำหรับคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เมื่อค้ำเหล็กตกกระทบบนรอยร้าวจะแพร่ขยาย กว้างออกไปอย่างรวดเร็วแล้วเกิดการวิบัติ ภาพลักษณะ ของรอยร้าวแสดงในรูปที่ 7

จากรูปที่ 8 แสดงขนาดของค้ำเหล็กและจำนวนครั้งที่ ปลดออกกระทบบนทำให้คานคอนกรีตวิบัติ พบว่า น้ำหนักค้ำเหล็กที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า แต่ค่าเฉลี่ยจำนวน ครั้งและพลังงานแรงกระทบบนคอนกรีตส่วนผสมเดียวกัน ลดลงเป็นสัดส่วน ประมาณร้อยละ 40



รูปที่ 8 แสดงขนาดของค้ำเหล็กและจำนวนครั้งที่ ปลดออกกระทบบน

## 6. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ปริมาณเส้นใยเหล็กและการเรียงตัวของเส้นใยมีผล ต่อกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรง กระทบบน

- เส้นใยโพลีเอสเตอร์ชนิดความแข็งแรงสูงที่ถักเป็นตา ข่ายไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ กำลังรับแรงอัด และกำลังรับ แรงดัด

- คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กมีแนวโน้มในการต้านทาน แรงกระแทกและการดูดซับพลังงานแรงกระแทกที่สูงกว่า คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมเส้นใยโพลีเอสเตอร์

- ที่ความเร็วในการตกกระทบบน ความสัมพันธ์ของ น้ำหนักค้ำเหล็ก และค่าพลังงานแรงกระทบบนเมื่อคอนกรีตวิบัติ จะไม่เป็นไปตามสัดส่วนเดียวกัน การทดสอบแรงกระทบบน ด้วยวิธีค้ำน้ำหนัก (DROP-WEIGHT TEST) จึงต้องใช้ขนาด ค้ำน้ำหนักและขนาดชิ้นทดสอบที่เหมาะสม เพื่อหาค่าพลังงาน แรงกระทบบนที่จุดเริ่มแตกร้าว (First Crack) และจุดวิบัติ (Failure)

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท SR. Fiber จำกัด ที่สนับสนุนเส้น ใยเหล็กสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gopalratnam, V. S., and Shah, S. P., Jan.-Feb.1986. Properties of Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading. ACI JOURNAL, V. 83, : 117-126.
- [2] ACI 544.2R-89, 1988, Measurement of properties of fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, 85, : 583-593.
- [3] Gopalratnam,V.S.;Shah,S. P.; and John, R., June 1984. A Modified Instrumented Charpy Test for Cement-Based Composites. Experimental Mechanics,V. 24, : 102-111.
- [4] Y. Mohammadi a, R. Carkon-Azad a, S.P. Singh b, S.K. Kaushik, 2009, Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio. Construction and Building Materials, 23, : 183-189.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายประพนธ์ เฟื่องฟู
วัน เดือน ปีเกิด	23 เมษายน 2519
ที่อยู่	129 หมู่ 2 ตำบลห้วยขวาง อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวិชาการศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยฉะเชิงเทรา ปี พ.ศ. 2547
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2540-2543	หัวหน้าส่วนโยธา องค์การบริหารส่วนตำบลหนองงูเห่า อำเภอมือง จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2543-2545	หัวหน้าส่วนโยธา องค์การบริหารส่วนตำบลสระพัฒนา อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2545-2548	หัวหน้าส่วนโยธา องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านยาง อำเภอมือง จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2548-2550	หัวหน้าส่วนโยธา องค์การบริหารส่วนตำบลไผ่หูช้าง อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2550-ปัจจุบัน	ผู้อำนวยการกองช่าง องค์การบริหารส่วนตำบลหนองปากโลง อำเภอมือง จังหวัดนครปฐม