



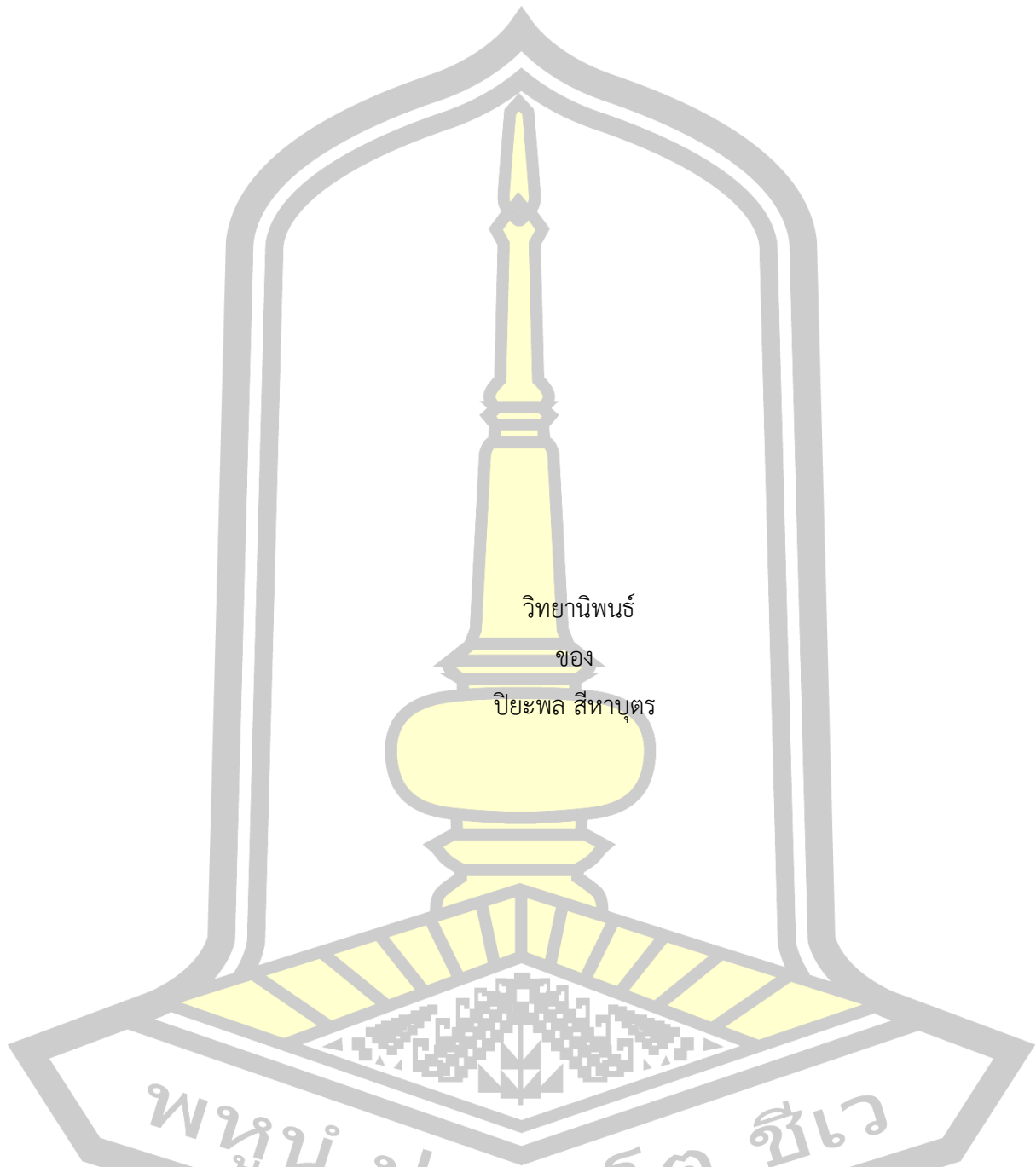
พฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กเพื่อแทนเหล็กเสริม

วิทยานิพนธ์
ของ
ปิยะพล สีหาบุตร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กเพื่อแทนเหล็กเสริม



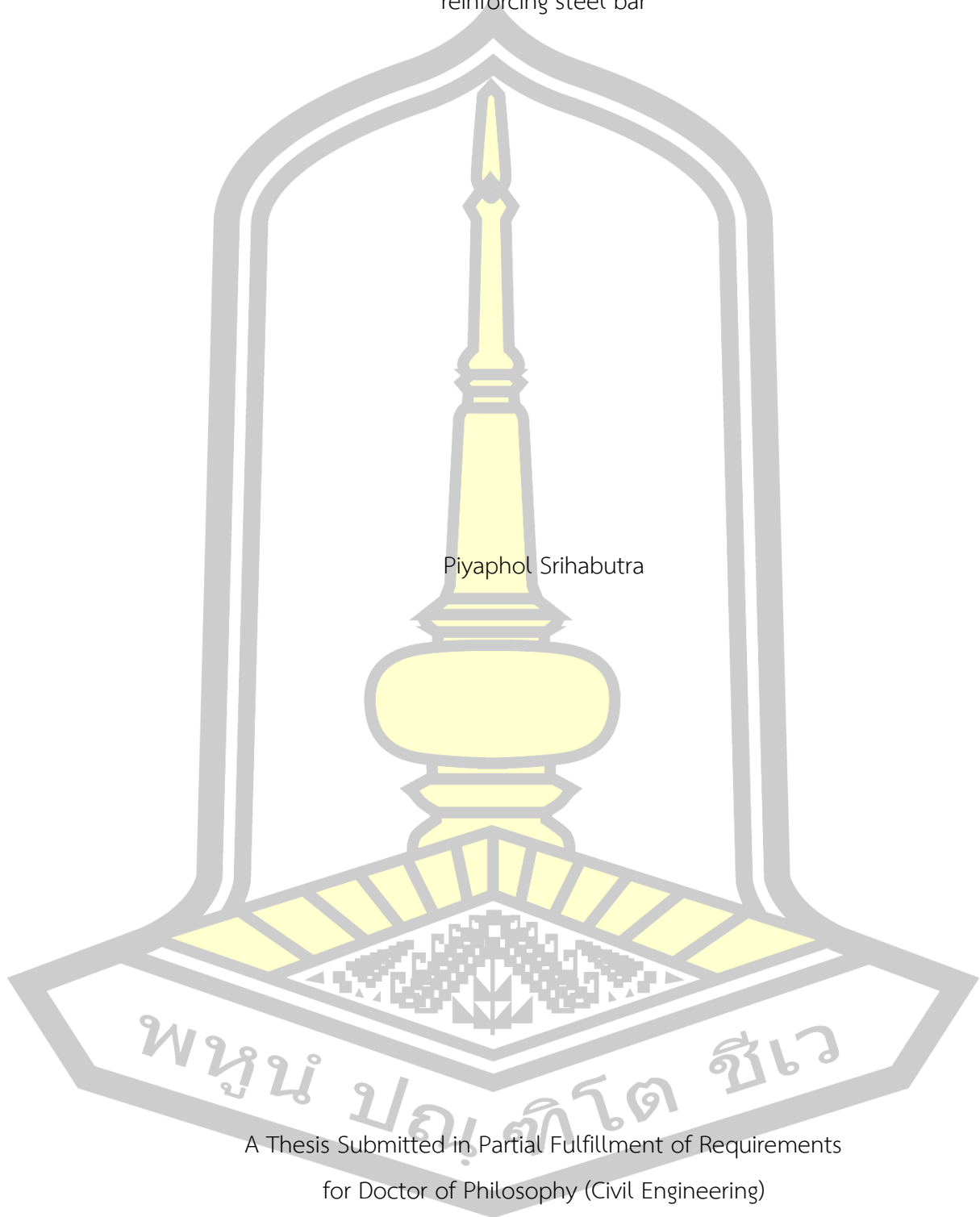
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Behavior of concrete columns using steel fiber high performance concrete to replace
reinforcing steel bar



Piyaphol Srihabutra

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Civil Engineering)

March 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปิยะพล สีหาบุตร
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. วันชัย สะตะ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์)

กรรมการ

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์)

กรรมการ

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

กรรมการ

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. จักรมาส เลาทวนิช)

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

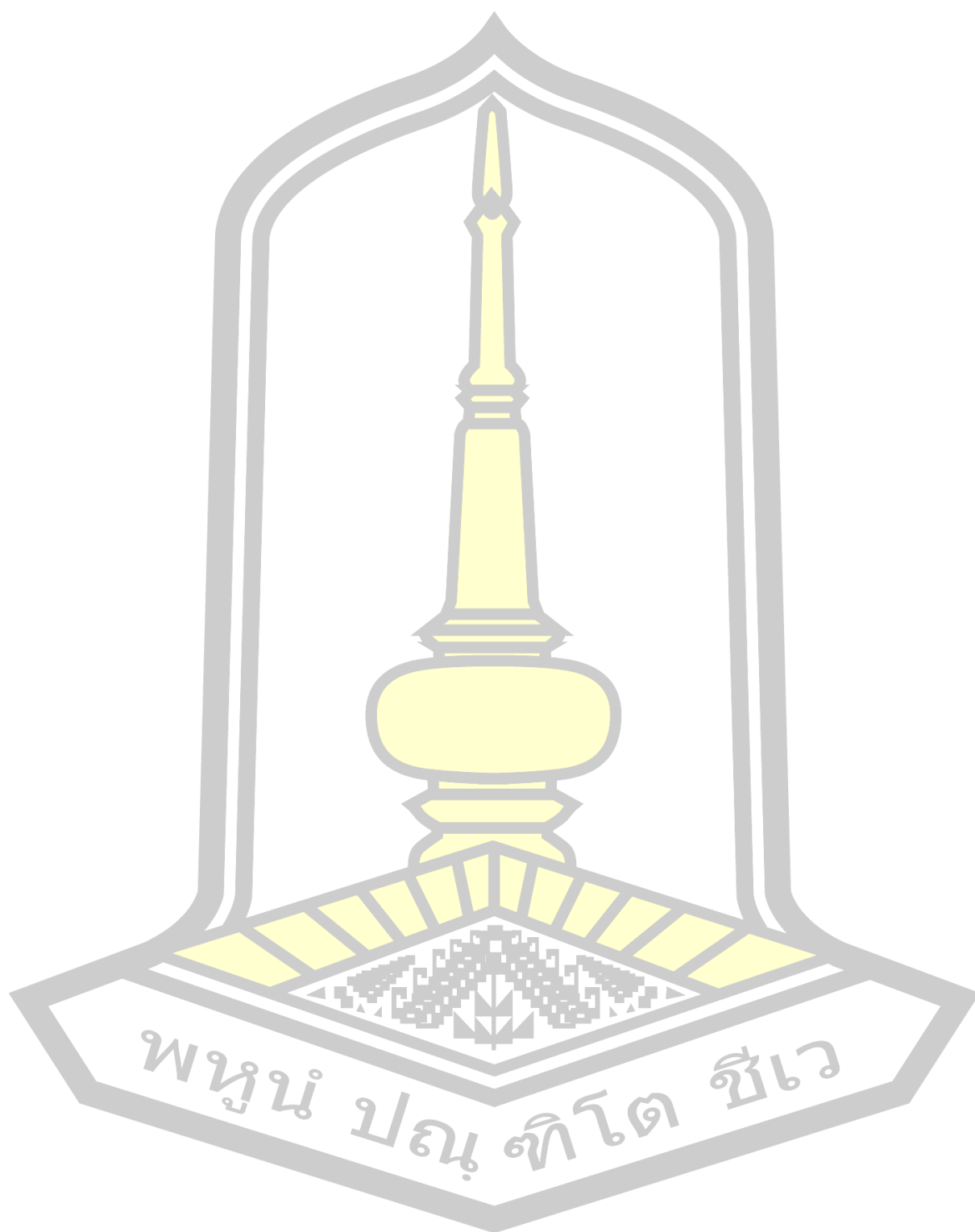
ชื่อเรื่อง	พฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กเพื่อแทนเหล็กเสริม		
ผู้วิจัย	ปิยะพล สีหาบุตร		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในท่อนเหล็กสำเร็จรูปเป็นเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยออกแบบคอนกรีตสมรรถนะสูงให้มีกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 1,500 กก./ตร.ซม. จากนั้นนำไปบรรจุในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$, 1 และ $1\frac{1}{4}$ นิ้ว นำไปทดสอบกำลังอัดและนำไปแทนที่เหล็กเสริมในเสาคอนกรีตขนาด 150x150x700 มม. โดยใช้คอนกรีตหล่อเสามีกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. เสาคอนกรีตถูกทดสอบความสามารถในการรับแรงในแนวแกนและเอียงศูนย์ ที่ระยะ 20, 40 และ 60 มม. เพื่อหาค่าความสามารถในการรับกำลังอัดสูงสุด โมเมนต์ดัด แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ และรูปแบบการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากผลการทดลอง พบว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กมีกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 1,515 กก./ตร.ซม. กำลังของท่อนเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2,900 กก./ตร.ซม. ที่ขนาดท่อ $1\frac{1}{4}$ นิ้ว ความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตควบคุม มีค่าเท่ากับ 51,086 กิโลกรัม และเมื่อเพิ่มระยะเอียงศูนย์พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าลดลง ตามระยะเอียงศูนย์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 42,131 , 31,037 และ 22,976 กิโลกรัม ที่ระยะเอียงศูนย์เท่ากับ 20, 40 และ 60 มม. ตามลำดับ สำหรับการแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อนเหล็กสำเร็จรูปขนาด $\frac{3}{4}$, 1, และ $1\frac{1}{4}$ พบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตมีค่าลดลงทุกขนาด และเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อนเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเสาคอนกรีตควบคุม โดยท่อนเหล็กที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง ขนาด $1\frac{1}{4}$ มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนมากที่สุด เท่ากับ 74,793 กิโลกรัม และมีค่าลดลงเมื่อระยะเอียงศูนย์มีค่าเพิ่มขึ้น และโมเมนต์ดัดของเสามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ : คอนกรีตสมรรถนะสูง, ท่อเหล็กสำเร็จรูป, เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



TITLE Behavior of concrete columns using steel fiber high performance concrete to replace reinforcing steel bar

AUTHOR Piyaphol Srihabutra

ADVISORS Associate Professor Raungrut Cheerarot , Ph.D.

DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Civil Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2024
University

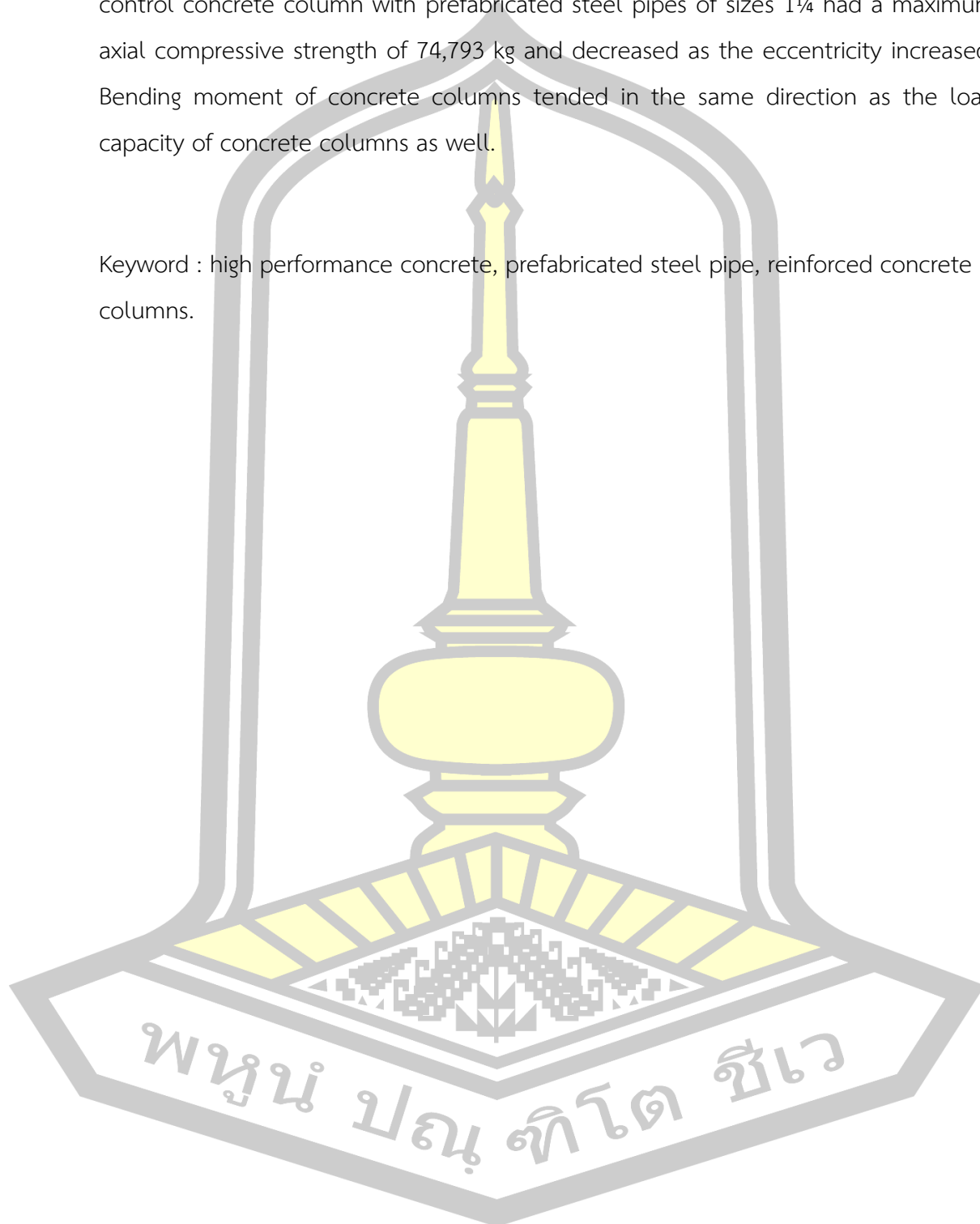
ABSTRACT

This research investigates the feasibility of using high-performance concrete in prefabricated steel pipes as reinforcement in reinforced concrete columns. High-performance concrete is designed the compressive strength at 28 days of 1,500 ksc. Then it is cast in pipes with diameter of $\frac{3}{4}$, 1, and $1\frac{1}{4}$ inches to test compressive strength and replaced the reinforcement in concrete columns 150x150x700 mm. The compressive strength of concrete columns at 28 days is 240 ksc. The concrete columns are test the ability to axial load and eccentric load at 20, 40 and 60 mm to determine the maximum compressive strength, bending moment, interaction diagram, and failure patterns of reinforced concrete columns.

From the results of the experiment, it was found that high-performance concrete with steel fibers had compressive strength at 28 days was 1,515 ksc. The maximum strength of prefabricated steel pipes containing high-performance concrete was 2,900 ksc at pipe size $1\frac{1}{4}$ inches. The axial compressive strength of the control concrete column was 51,086 kg, and when the offset from the axial distance was increased, the compressive strength decreased. As the eccentricity increases The values were 42,131, 31,037, and 22,976 kg at the eccentricity of 20, 40 and 60 mm, respectively. For replacing the reinforcement with prefabricated steel pipes of sizes $\frac{3}{4}$, 1, and $1\frac{1}{4}$, it was found that the bearing load capacity of the column concrete has decreased in value at every size. In reinforced concrete columns with prefabricated steel pipes filled with high-performance concrete, it was found that the

compressive strength ability increased more than the control concrete column. The control concrete column with prefabricated steel pipes of sizes 1¼ had a maximum axial compressive strength of 74,793 kg and decreased as the eccentricity increased. Bending moment of concrete columns tended in the same direction as the load capacity of concrete columns as well.

Keyword : high performance concrete, prefabricated steel pipe, reinforced concrete columns.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ชี้แนวทางในการศึกษาวิจัย ให้ข้อคิด คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่อง และดูแลเอาใจใส่ในทุกๆ ด้าน ตลอดงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ รองศาสตราจารย์ ดร. สหलग หอมวุฒิมวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กริสัน ชัยมูล และศาสตราจารย์ ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง คณะกรรมการสอบที่ให้ ความกรุณาและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ซึ่งจะนำไปปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณปภัศราภรณ์ นานรัมย์ คุณเพ็ญชาย เวียงใต้ คุณสิทธิศักดิ์ อ้นสนั่น และ คุณสถิตพงษ์ วงศ์สง่า นิสิตปริญญาเอกทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในด้านต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสงวน คุณแม่จ้อย สีหาบุตร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ภูพัฒน์วิบูล และพี่น้องทุก ๆ ท่านที่เสียสละ แรงกาย แรงใจ และให้การช่วยเหลือ สนับสนุนด้วยดีเสมอมา สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคามที่ได้มอบทุนการศึกษาในครั้งนี้

ปิยะพล สีหาบุตร

พูน ปณ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หลักการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	3
2.2 คุณสมบัติของคอนกรีต.....	5
2.3 คุณสมบัติของเหล็กเสริม.....	9
2.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	11
2.5 ทฤษฎีการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	12
2.6 การใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในการก่อสร้าง.....	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	27

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	28
3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	35
4.1 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษและคอนกรีตทั่วไป	35
4.2 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กสำเร็จรูป	36
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ	37
4.4 ผลและการอภิปรายผลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	39
4.5 ผลกระทบของท่อเหล็กสำเร็จรูปและคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อการรับแรงอัดของเสาคอนกรีต	47
4.6 การทรุดตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	63
4.7 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	68
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	72
ประวัติผู้เขียน	95

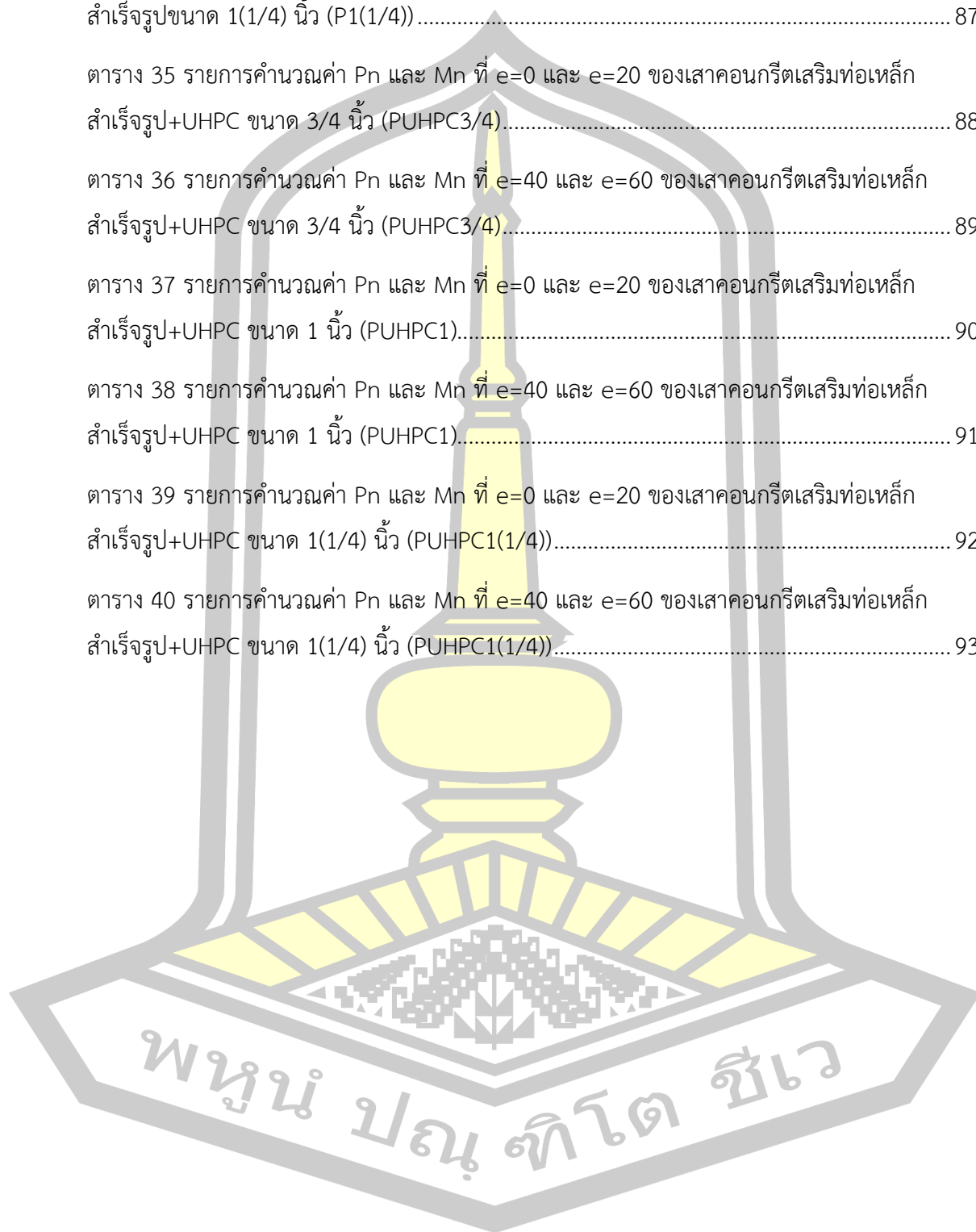


สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 อัตรากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุการบ่ม	6
ตาราง 2 ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นกลม	10
ตาราง 3 คุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย	10
ตาราง 4 ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นข้ออ้อย	10
ตาราง 5 ขนาดเหล็กเส้นตามมาตรฐานอเมริกัน	11
ตาราง 6 ส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปที่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม.	29
ตาราง 7 ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1,500 กก./ตร.ซม.	29
ตาราง 8 ขนาดและจำนวนเสาคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
ตาราง 9 รหัสตัวอย่างการทดสอบ.....	34
ตาราง 10 กำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ.....	36
ตาราง 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก	37
ตาราง 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ.....	38
ตาราง 13 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระยะเยื้องศูนย์ต่างๆ	41
ตาราง 14 ร้อยละความแตกต่างของกำลังรับแรงอัด ระหว่างท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็กสำเร็จรูป ที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	48
ตาราง 15 ต้นทุนของคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	66
ตาราง 16 พื้นที่ ปริมาตรของท่อเหล็กและปริมาตรของคอนกรีตสมรรถนะสูงในท่อเหล็ก	66
ตาราง 17 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 1 น้ำหนักก่อนการ วิเคราะห์ 500 กรัม.....	74

ตาราง 18 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 2 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 500 กรัม.....	74
ตาราง 19 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 1 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 10 กก.....	75
ตาราง 20 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 2 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 10 กก.....	75
ตาราง 21 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมหยาบ (หิน).....	76
ตาราง 22 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน.....	76
ตาราง 23 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ (หิน).....	77
ตาราง 24 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด (ทราย).....	78
ตาราง 25 กำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	78
ตาราง 26 กำลังครากของท่อเหล็ก.....	78
ตาราง 27 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC).....	80
ตาราง 28 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC).....	81
ตาราง 29 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4).....	82
ตาราง 30 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4).....	83
ตาราง 31 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1).....	84
ตาราง 32 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1).....	85
ตาราง 33 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4)).....	86

ตาราง 34 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=40 และ e=60 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4)).....	87
ตาราง 35 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=0 และ e=20 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4).....	88
ตาราง 36 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=40 และ e=60 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4).....	89
ตาราง 37 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=0 และ e=20 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1).....	90
ตาราง 38 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=40 และ e=60 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1).....	91
ตาราง 39 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=0 และ e=20 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4)).....	92
ตาราง 40 รายการคำนวณค่า Pn และ Mn ที่ e=40 และ e=60 ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4)).....	93



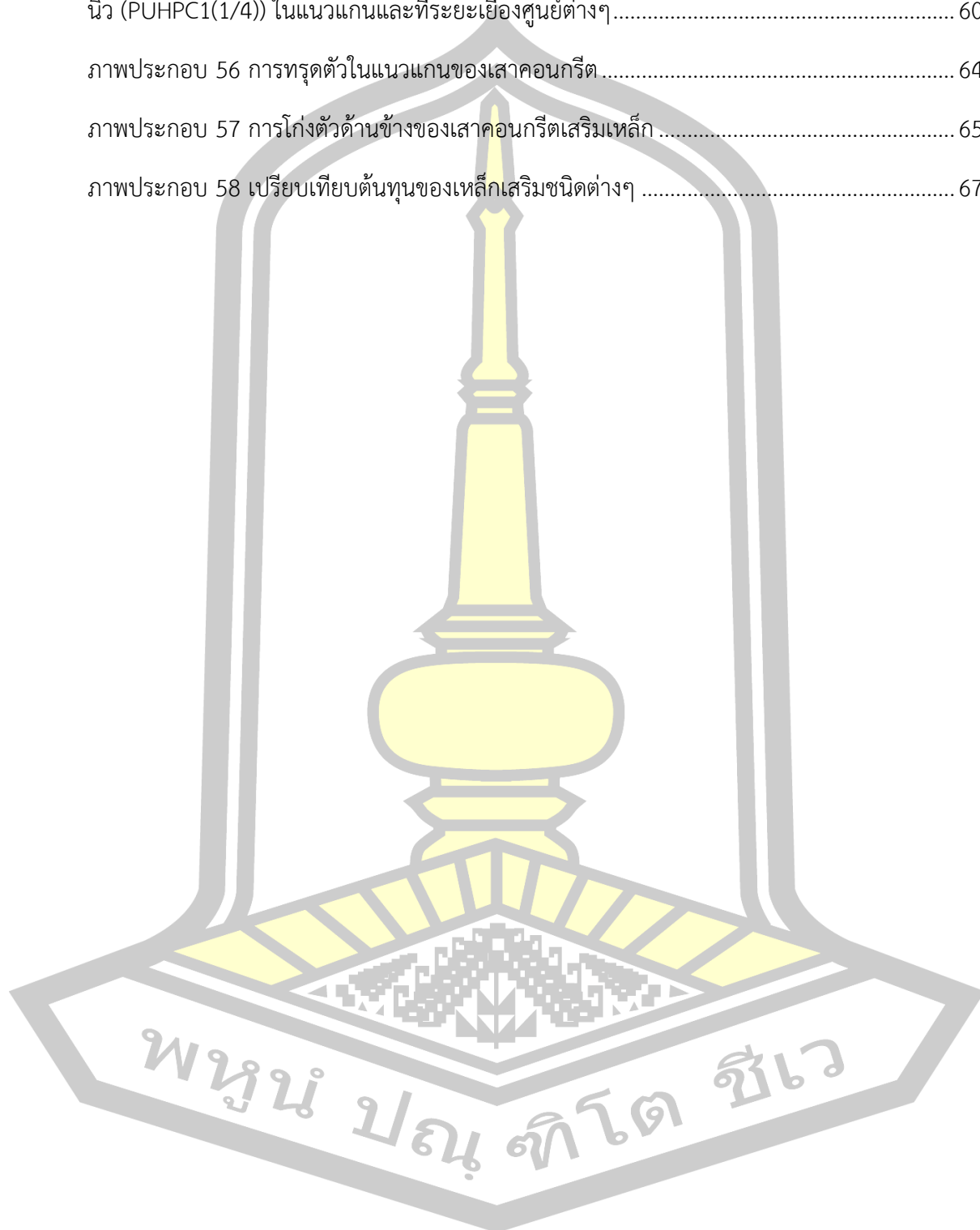
สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	3
ภาพประกอบ 2 คานคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
ภาพประกอบ 3 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและลูกบาศก์	5
ภาพประกอบ 4 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและความเครียดในคอนกรีต	6
ภาพประกอบ 5 หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต	7
ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและการยืดหดของคอนกรีตภายใต้แรงอัด	8
ภาพประกอบ 7 ชนิดของเหล็กเสริม	9
ภาพประกอบ 8 ลักษณะของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมและวงกลม	12
ภาพประกอบ 9 พฤติกรรมของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว	13
ภาพประกอบ 10 สภาพของเสาหลังเกิดการวิบัติ	14
ภาพประกอบ 11 รายละเอียดการใส่ปลอกเดี่ยว	15
ภาพประกอบ 12 หน่วยแรงในเสาปลอกเกลียว	16
ภาพประกอบ 13 หน่วยแรงที่กระทำกับคอนกรีตทรงกระบอกในแนวราบ	16
ภาพประกอบ 14 การแปลงหน้าตัดเมื่ออยู่ในช่วงการวิบัติด้วยแรงอัด	18
ภาพประกอบ 15 การแปลงหน้าตัดเมื่ออยู่ในช่วงการวิบัติด้วยแรงดัด	19
ภาพประกอบ 16 แรงที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัดของเสารับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน	20
ภาพประกอบ 17 แผนภูมิความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของเสา	23
ภาพประกอบ 18 สะพานที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในการก่อสร้าง เกาหลีใต้	25
ภาพประกอบ 19 การวัดค่าการไหลผ่านของคอนกรีตสมรรถนะสูง	30
ภาพประกอบ 20 การทดสอบกรีตสมรรถนะสูงพิเศษลงในท่อขนาดต่างๆ	31
ภาพประกอบ 21 การเข้าแบบเสาคอนกรีตสมรรถนะสูง	32

ภาพประกอบ 22 การทดสอบเสาคอนกรีต.....	32
ภาพประกอบ 23 การบ่มเสาคอนกรีตด้วยพลาสติกใส	33
ภาพประกอบ 24 การทดสอบเสาคอนกรีต.....	33
ภาพประกอบ 25 กำลังอัดกับร้อยละการแทนที่ในอายุการทดสอบต่างๆ.....	36
ภาพประกอบ 26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก.....	37
ภาพประกอบ 27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ	38
ภาพประกอบ 28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ.....	38
ภาพประกอบ 29 พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง	39
ภาพประกอบ 30 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน.....	43
ภาพประกอบ 31 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกน.....	43
ภาพประกอบ 32 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูป.....	44
ภาพประกอบ 33 ความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกน (e=0).....	45
ภาพประกอบ 34 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ระยะเยื้องศูนย์ 20 มม. (e=20).....	45
ภาพประกอบ 35 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	46
ภาพประกอบ 36 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ระยะเยื้องศูนย์ 40 มม. (e=40).....	46
ภาพประกอบ 37 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ระยะเยื้องศูนย์ 60 มม. (e=60).....	47
ภาพประกอบ 38 ร้อยละความแตกต่างของกำลังรับน้ำหนักระหว่างท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	48
ภาพประกอบ 39 กำลังอัดสูงสุดที่สภาวะการเยื้องศูนย์ต่างๆของเสาคอนกรีต.....	49
ภาพประกอบ 40 โมเมนต์ดัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาดต่างๆ	50
ภาพประกอบ 41 การหาพื้นที่เหล็กเสริมและพื้นที่ท่อเหล็กสำเร็จรูป	51

ภาพประกอบ 42 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC)	52
ภาพประกอบ 43 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ.....	52
ภาพประกอบ 44 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4).....	53
ภาพประกอบ 45 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4)ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ	53
ภาพประกอบ 46 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1).....	55
ภาพประกอบ 47 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ	56
ภาพประกอบ 48 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4)).....	56
ภาพประกอบ 49 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4)) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ	57
ภาพประกอบ 50 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4).....	58
ภาพประกอบ 51 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ	58
ภาพประกอบ 52 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1).....	59
ภาพประกอบ 53 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ	59
ภาพประกอบ 54 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4))	60

ภาพประกอบ 55 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4)) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์ต่างๆ.....	60
ภาพประกอบ 56 การทรุดตัวในแนวแกนของเสาคอนกรีต.....	64
ภาพประกอบ 57 การโก่งตัวด้านข้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	65
ภาพประกอบ 58 เปรียบเทียบต้นทุนของเหล็กเสริมชนิดต่างๆ.....	67



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นอาคารที่แพร่หลายไปทั่วโลกมานานหลายศตวรรษ ตั้งแต่ช่วงต้นของปี ค.ศ. 1900 ซึ่งอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ประกอบจาก วัสดุ 2 ส่วนหลักด้วยกัน คือ เหล็กเสริม และ คอนกรีต โดยคอนกรีตจะรับน้ำหนักหรือแรงกระทำจาก กำลังอัด ส่วนเหล็กเสริมจะรับน้ำหนักหรือแรงกระทำจากแรงดึง โดยการออกแบบขนาดหรือหน้าตัดที่เหมาะสมนั้น จะออกแบบตามคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ประกอบกัน (คอนกรีต และเหล็กเสริม) ซึ่งมาตรฐานการออกแบบจะมีแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น มาตรฐานการออกแบบ ของ American Concrete Institute (ACI) British Standard (Structural use of concrete : BS 8110) และในประเทศไทย ใช้มาตรฐานการออกแบบของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

เสาคอนกรีต เป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของอาคาร มีหน้าที่รับแรงอัดเป็นหลัก โดยส่วนใหญ่รับการถ่ายน้ำหนักมาจากคานและถ่ายไปยังฐานรากต่อไป ในหลายปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อให้มีคุณภาพและสมรรถนะที่ดีขึ้น เช่นงานวิจัยของ AlAjarmeh และคณะ (2019) ได้นำเอา โพลีเมอร์เสริมใยแก้ว มาเป็นเหล็กเสริมและเหล็กปลอกเกลียวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น

คอนกรีตสมรรถนะสูง ปัจจุบันได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2543 (The Federal Highway Administration 2013) และเป็นวัสดุใหม่ในการก่อสร้างตั้งแต่นั้นมา โดยใช้ในประเทศแคนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส ทั้งในทวีป ออสเตรเลีย และเอเชีย โดยส่วนใหญ่แล้วใช้ในการก่อสร้างสะพานเนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ช่วยลดการทำลายจากสภาวะภายนอก (Graybeal, 2010) นอกจากนี้การใช้เส้นใยในคอนกรีตเริ่มเป็นที่นิยมในงานก่อสร้างเนื่องจากเส้นใยในสามารถเพิ่มคุณสมบัติให้คอนกรีตได้ (Sata, 2010) เช่น คอนกรีตมีกำลังดึงมากขึ้น และลดการแตกร้าวเพิ่มกำลังตัดให้กับองค์อาคาร นอกจากเส้นใยเหล็กแล้วยังมีเส้นใยชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยโพลีเมอร์ เป็นต้น ทั้งนี้การเลือกใช้เส้นใยนั้นจะเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ เช่น การเลือกใช้โพลีเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อต้านทานการกัดกร่อน เป็นต้น (Chaimoon, 2010)

ในปัจจุบันนี้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มขีดจำกัดและสมรรถนะให้มากขึ้น ทั้งการพัฒนาในด้านของคอนกรีต และรูปแบบการเหล็กเสริม เช่น จากงานวิจัยที่ผ่านมา ของ Hyun-Oh Shin และคณะ (2017) ได้มีการนำเอา คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษผสมเส้นใย และใช้เหล็กปลอกเกลียว เพื่อเพิ่มกำลังให้กับเสาคอนกรีต เป็นต้น และเพื่อเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการพัฒนาในการเสริมเหล็ก ในงานวิจัยนี้จะใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงที่ผสมเส้นใยเหล็กในท่อเหล็กสำเร็จรูป เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาและคานคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กในท่อเหล็กสำเร็จรูปทดแทนเหล็กเสริม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กในท่อเหล็กสำเร็จรูปเพื่อเป็นเหล็กเสริมในเสาคอนกรีต

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กในท่อเหล็กสำเร็จรูปเป็นเหล็กเสริม

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป กับเสาคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยในท่อเหล็กสำเร็จรูปเป็นเหล็กเสริม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 กำลังของคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใย ที่อายุ 28 เท่ากับ 1,500 กก./ตร.ซม.

1.3.2 กำลังของคอนกรีตทั่วไปเพื่อให้หล่อเสาคอนกรีต ที่อายุ ที่อายุ 28 เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม.

1.3.3 เลือกใช้ท่อเหล็กกลม ขนาด $3/4$ 1 และ $1(1/4)$ นิ้ว หนา 1.2 มม.

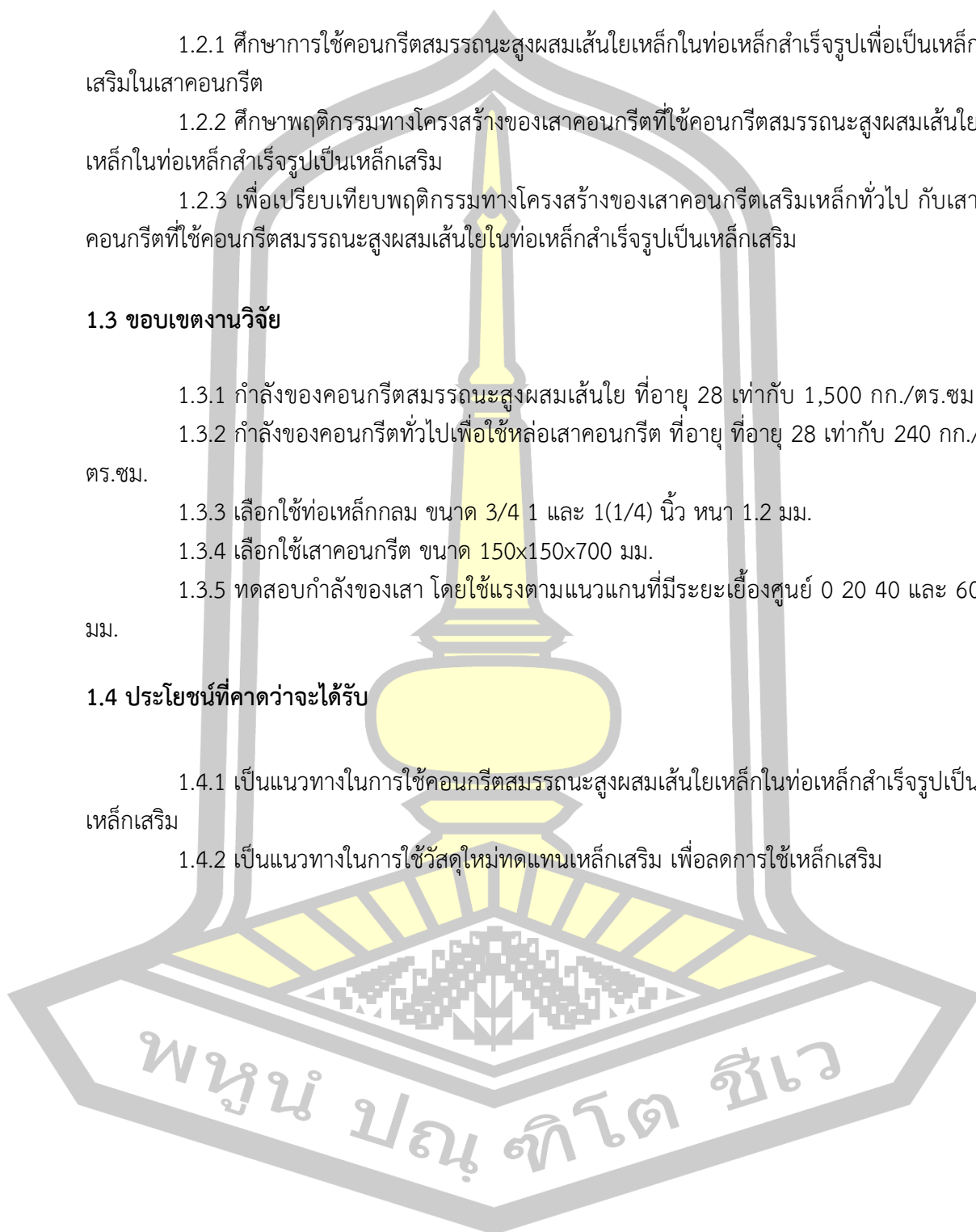
1.3.4 เลือกใช้เสาคอนกรีต ขนาด 150x150x700 มม.

1.3.5 ทดสอบกำลังของเสา โดยใช้แรงตามแนวแกนที่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง 0 20 40 และ 60 มม.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กในท่อเหล็กสำเร็จรูปเป็นเหล็กเสริม

1.4.2 เป็นแนวทางในการใช้วัสดุใหม่ทดแทนเหล็กเสริม เพื่อลดการใช้เหล็กเสริม



บทที่ 2

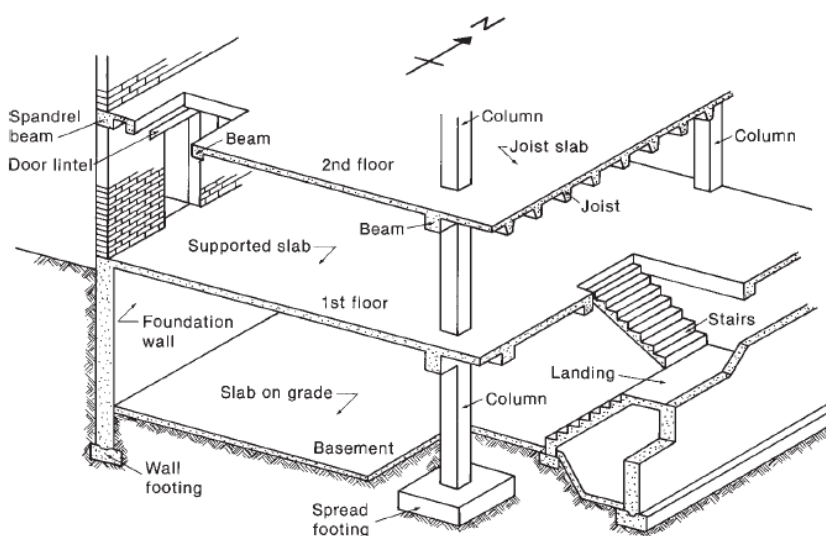
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม ทฤษฎีการออกแบบเสา คอนกรีตสมรรถนะสูง และการใช้ไฟเบอร์ในคอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในบทนี้ประกอบด้วย

- 2.1 หลักการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2.2 คุณสมบัติของคอนกรีต
- 2.3 คุณสมบัติของเหล็กเสริม
- 2.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2.5 ทฤษฎีการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2.6 การใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในการก่อสร้าง
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วย “องค์อาคาร” หลายส่วนทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อรองรับ น้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำต่อโครงสร้าง ชั้นที่สองของอาคาร ในภาพประกอบที่ 1 เป็นพื้นคอนกรีตระบบตงประกอบด้วยคานอยู่ขนานกันเพื่อรองรับพื้นด้านบน โดยมีคานหลักรองรับแรงปฏิกิริยาจากคานอยู่เพื่อถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกลงสู่เสา ชั้นแรกของอาคารในภาพประกอบที่ 1 เป็นระบบพื้นคานมีพื้นพาดอยู่ระหว่างคานรองรับโดยเสาที่ปลายคาน น้ำหนักบรรทุกในเสาสะสมลงมายังฐานรากหน้าที่กระจายน้ำหนักบรรทุกลงสู่พื้นดิน

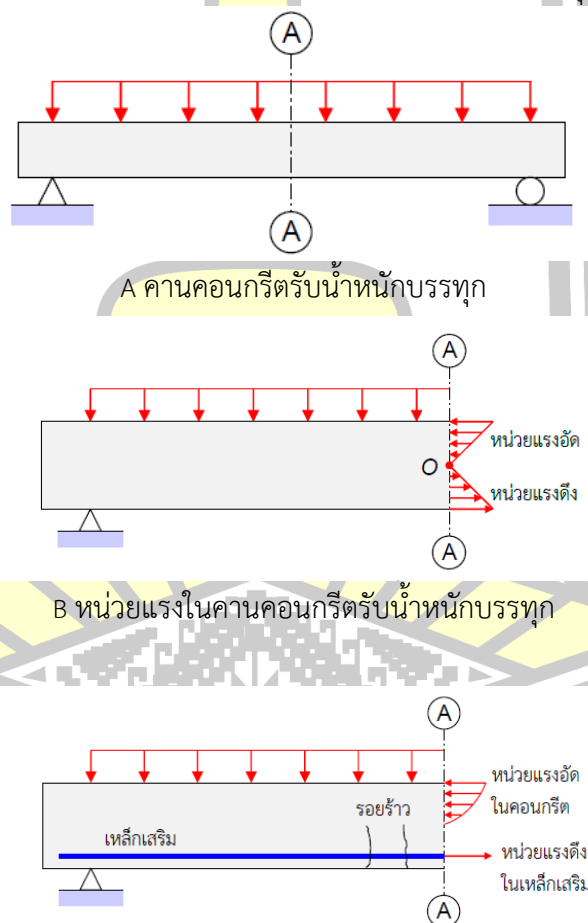


ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

(Wight & MacGregor, 2012)

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุก่อสร้างมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในทุกประเทศ เหล็กเส้น และ ส่วนประกอบคอนกรีต (หิน,ทราย,น้ำ และ ปูน) เป็นวัสดุที่มีใช้ได้อย่างเพียงพอ การออกแบบ โครงสร้างประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือ (1) พิจารณาแรงต่างๆที่มากระทำต่อโครงสร้างโดยใช้ วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสม และ (2) ออกแบบองค์อาคารทั้งหมดโดยคำนึงถึง เสถียรภาพ ความปลอดภัย ความสามารถในการใช้งาน และความประหยัดของโครงสร้าง

กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังคือ คอนกรีตรับแรงอัดและเหล็กเสริมรับแรงดึง ทั้งนี้ เนื่องจาก คอนกรีตมีความแข็งแรงในการรับแรงอัดได้ดี แต่มีความอ่อนแอในการรับแรงดึง ดังนั้น เมื่อรับ น้ำหนักจะเกิดการแตกร้าว จากการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เกิดหน่วยแรง ดึงเกิน กว่าที่คอนกรีตจะรับได้ ในคานคอนกรีตที่แสดงในภาพประกอบที่ 2 (B) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้า ตัดจะถูกต้านทานโดยคู่ควบแรงอัด-แรงดึงในคอนกรีต คานดังกล่าวจะวิบัติอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดรอย ร้าวครั้งแรก ในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ภาพประกอบที่ 2 (C)) เหล็กเส้นจะถูกเสริมเข้าไปใน คอนกรีตเพื่อรับแรง ดึงทำหน้าที่แทนคอนกรีตหลังเกิดการแตกร้าว เพื่อทำหน้าที่เป็นแรงคู่ควบ ร่วมกับแรงอัดใน คอนกรีตในการต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก



ภาพประกอบ 2 คานคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

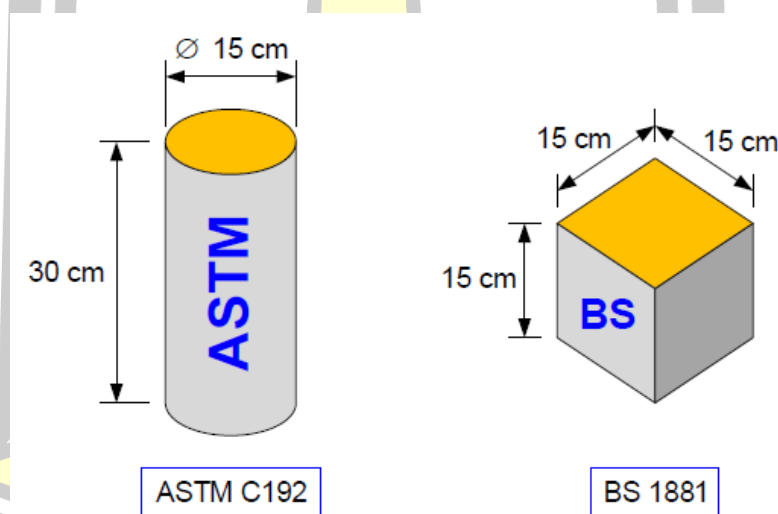
(Jirawacharadet, 2014)

เหล็กและคอนกรีตทำงานร่วมกันอย่างดีเนื่องมาจากเหตุผลหลายประการคือ (1) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตมีเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเลื่อนไถลของเหล็กเสริม (2) ส่วนผสมคอนกรีตที่พอเหมาะจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านมาทำให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริม และ (3) อัตราการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้กันของเหล็กและคอนกรีตทำให้เกิดแรง น้อยมากระหว่างคอนกรีตและเหล็กภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.2 คุณสมบัติของคอนกรีต

2.2.1 กำลังอัดคอนกรีต

กำลังอัดคอนกรีตจะใช้สัญลักษณ์ f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ก้อนตัวอย่างทดสอบที่ใช้มีสองแบบคือ แท่งทรงกระบอก (Cylinder) และก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cube) ก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดด้านละ 15 ซม. ตามมาตรฐาน BS 1881 มักใช้ในประเทศแถบเอเชีย, รัสเซีย และยุโรป ในขณะที่แท่งทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ยาว 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C192 จะใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย โดยเฉลี่ยแล้วกำลังของทรงกระบอก 15x30 ซม. จะประมาณ 85% ของลูกบาศก์ 15x15x15 ซม.



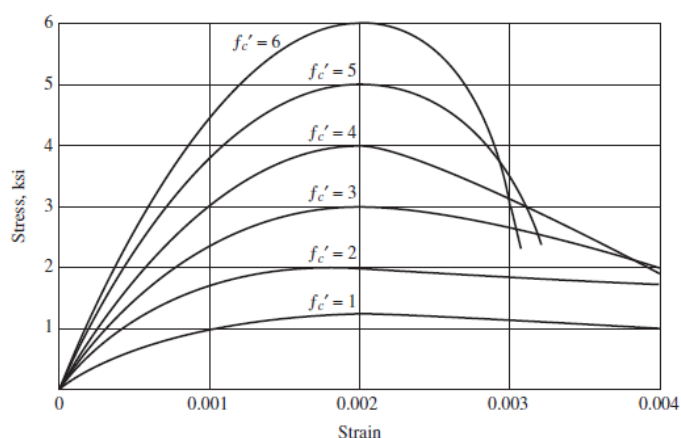
ภาพประกอบ 3 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกและลูกบาศก์
(Jirawacharadet, 2014)

กำลังคอนกรีตนั้นขึ้นหลายปัจจัยตั้งแต่คุณภาพของวัสดุที่นำมาผสมได้แก่ซีเมนต์ หินทราย น้ำ และสารผสมเพิ่มอื่นๆ สัดส่วนและวิธีการผสม การลำเลียงขนส่ง การเทลงแบบ จนถึง การบ่มคอนกรีต สภาพการบ่มก็ส่งผลกระทบต่อกำลังเช่นกัน ทั้งความชื้นและอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของซีเมนต์ กำลังคอนกรีตจะพัฒนาขึ้นตามอายุของการบ่ม โดยกำลังที่ใช้ เป็นมาตรฐานในการคำนวณออกแบบคือกำลังที่อายุ 28 วัน

ตาราง 1 อัตรากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุการบ่ม

Age	7 days	14 days	28 days	3 months	6 months	1 year	1 years	5 years
Rate	0.67	0.86	1.0	1.17	1.23	1.27	1.31	1.35

เมื่อนำทรงกระบอกที่อายุ 28 วันมาทดสอบกำลังอัดแล้วบันทึกค่าหน่วยแรงอัดและความเครียด (Stress-strain curve) จะได้ดังภาพประกอบ 4 โดยในช่วงต้นจะค่อนข้างตรงเป็นแบบอิลาสติก หน่วยแรงอัดจะขึ้นถึงค่า f'_c คือค่าหน่วยแรงอัดที่มากที่สุดที่ความเครียดประมาณ 0.002 แล้วตกลงจนแตกหักที่ความเครียดประลัย (Ultimate strain, ϵ_{cu}) ประมาณ 0.003 คอนกรีตที่มีกำลังสูงขึ้นจะมีความยืดหยุ่นน้อยลงคือความเครียดประลัยมีค่าน้อยลง



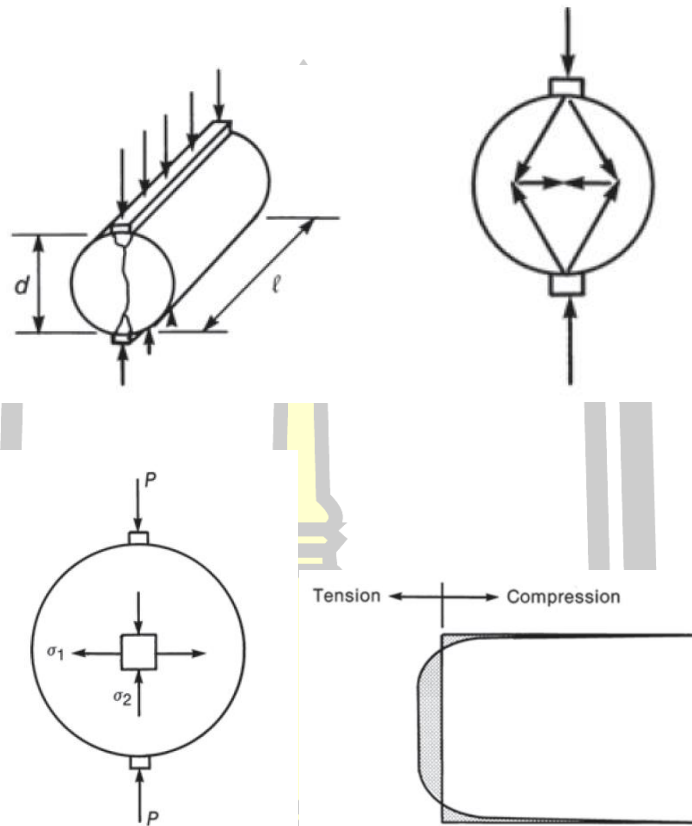
ภาพประกอบ 4 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและความเครียดในคอนกรีต

(Wight & MacGregor, 2012)

2.2.2 กำลังดึงของคอนกรีต

กำลังของคอนกรีตในการรับแรงดึงมีผลอย่างมากต่อการแตกร้าวในโครงสร้าง กำลังรับแรงดึง โดยปกติจะได้จากการทดสอบ Splitting tensile strength ของทรงกระบอก 15x30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C496 โดยวางขึ้นทดสอบลงด้านข้างในเครื่องทดสอบดังในภาพประกอบ 5 จากนั้นใช้แท่งเหล็กหารองเพื่อให้แรงกด P กดแผ่กระจายเท่าๆกัน ตลอดความยาวของทรงกระบอก ทรงกระบอกจะแตกออกเป็นสองส่วนเมื่อถึงกำลังรับแรงดึง หน่วยแรงดึงจะมีค่าดังสมการที่

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld} \quad (2.1)$$



ภาพประกอบ 5 หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต
(Wight & MacGregor, 2012)

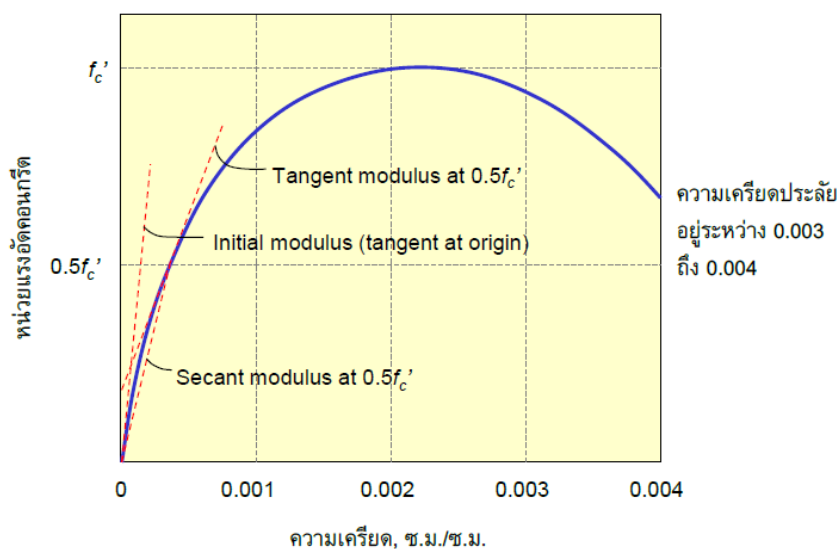
กำลังรับแรงดึงเป็นคุณสมบัติที่แปรเปลี่ยนได้ง่ายกว่ากำลังรับแรงอัดและมีค่าประมาณ 10 ถึง 15% ของกำลังรับแรงอัด และพบว่า Splitting tensile strength ของทรงกระบอก f_{ct} เป็นสัดส่วนกับ $\sqrt{f'_c}$ โดยมาตรฐาน ACI ได้ใช้ $f_{ct} = 1.76\sqrt{f'_c}$ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา และ สำหรับ Sand light weight $f_{ct} = 1.51\sqrt{f'_c}$ และ $f_{ct} = 1.33\sqrt{f'_c}$ สำหรับ All-light weight คอนกรีต

กำลังรับแรงดึงอีกประเภทหนึ่งจะหาจากการตัดคานเรียกว่า โมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture) ตามมาตรฐานของ ASTM C78 จะใช้ในการพิจารณาการแตกร้าวและ การแอ่นตัวของคาน โมดูลัสของการแตกหัก f_r คำนวณได้จากสูตรการตัด จะให้ค่า $f_r = mc/L$ กำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าการทดสอบ Splitting tensile เนื่องจากหน่วยแรงอัดกระจายตัวไม่เป็น เส้นตรงขณะเกิดการวิบัติ ACI กำหนดให้ใช้ค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ $f_{ct} = 1.33\sqrt{f'_c}$

2.2.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น

โมดูลัสความยืดหยุ่นเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตหาได้จากการทดสอบการอัด ทรงกระบอกคอนกรีต ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น E_c คืออัตราการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงต่อความเครียดในช่วงอีลาสติก

$$E_c = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.2)$$



ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและการยืดหดของคอนกรีตภายใต้แรงอัด
(Jirawacharadet, 2014)

โมดูลัสความยืดหยุ่นจะใช้วัดค่าสติเฟเนส หรือความต้านทานของวัสดุต่อการเสียรูปทรง ภาพประกอบ 6 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและการยืดหด สำหรับคอนกรีตภายใต้แรงอัด ซึ่งแสดงถึง โมดูลัสเริ่มต้น (Initial modulus) โมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus) และ ซีแคนท์โมดูลัส (Secant modulus) โดยปกติ ซีแคนท์โมดูลัส จะประมาณร้อยละ 25 ถึง 50 ของกำลังรับแรงอัดประลัย โดยในปัจจุบัน ACI แนะนำให้ใช้โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับสมการที่ 2.3

$$E_c = 4270w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (2.3)$$

สำหรับค่าของ w_c มีค่าระหว่าง 1.45 และ 2.48 ตัน/ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติหน่วยน้ำหนัก 2.32 ตัน/ลบ.ม. ACI แนะนำให้ใช้โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับสมการที่ 2.4

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c} \quad (2.4)$$

2.2.4 อัตราส่วนปัวส์ซอง

อัตราส่วนปัวส์ซอง เป็นอัตราส่วนความเครียดทางขวางต่อความเครียดทางยาวภายใต้หน่วยแรงตามแนวแกนภายในช่วงอิลาสติก อัตราส่วนนี้ จะอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.20 สำหรับทั้งคอนกรีตน้ำหนักปกติและคอนกรีตมวลเบา อัตราส่วนปัวส์ซอง ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่น พื้น

ไร้คาน, อุโมงค์, ถังน้ำ, เขื่อนโค้ง และโครงสร้างอินตีเทอร์มินิต สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก อัตราส่วนปัวส์ซองจะเท่ากับ 0.25 สำหรับคอนกรีตอาจใช้ค่าเฉลี่ยคือ 0.18

2.3.5 โมดูลัสการเฉือน

โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตต่อการรับแรงเฉือนจะอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 ของค่าโมดูลัส ยืดหยุ่นรับแรงอัด ตามทฤษฎีความยืดหยุ่นโมดูลัสการเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu)} \quad (2.5)$$

เมื่อ μ คือ อัตราส่วนปัวส์ซองของคอนกรีต ถ้าใช้ $\mu = 1/6$ จะได้ $G_c = 0.43E_c = 6493\sqrt{f'_c}$

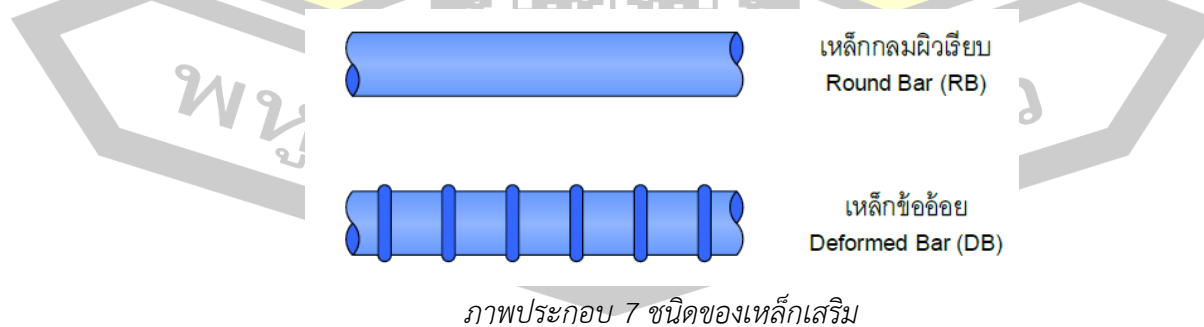
2.3.6 อัตราส่วนโมดูลาร์

อัตราส่วนโมดูลาร์ n เป็นอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กต่อโมดูลัสความยืดหยุ่น ของคอนกรีต $n = E_s/E_c$ ค่า $E_s = 2.04 \times 10^6$ กก./ซม.² ส่วน $E_c = 15100\sqrt{f'_c}$ ดังนั้นค่า n จะเท่ากับสมการที่ 2.6 โดยอัตราส่วนโมดูลาร์จะใช้ในการออกแบบวิธีหน่วยแรงใช้งาน และการคำนวณระยะแอนตัวของคาน

$$n = \frac{2.04 \times 10^6}{15100\sqrt{f'_c}} = \frac{135}{\sqrt{f'_c}} \quad (2.6)$$

2.3 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

เหล็กเส้น (Rebar) เสริมคอนกรีตในบริเวณที่รับแรงดึงหรือต้านทานการแตกร้าวในคอนกรีต แบ่ง ออกเป็นสองประเภทคือ เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (Round Bar, RB) และ เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar, DB) ดังภาพประกอบ 7



เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (Round Bar, RB) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2543 กำหนดไว้เพียงชั้นคุณภาพเดียว โดยใช้สัญลักษณ์ SR 24 มีคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงคือ

- ความต้านแรงดึง (สูงสุด) f_u ต้องไม่น้อยกว่า 385 Mpa. (3,900 ksc.)
- ความต้านแรงดึงที่จุดคราก f_y ต้องไม่น้อยกว่า 235 Mpa. (2,400 ksc.)
- ความยืด ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 21

ตาราง 2 ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นกลม

Size	Dia. (mm)	Cross-sections (mm ²)	Weight/m (kg/m)
RB 6	6	28.3	0.222
RB 9	9	50.3	0.395

เหล็กเส้นข้ออ้อย (Deformed Bar, DB) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 27-2548 กำหนดไว้ 3 ชั้นคุณภาพคือ SD 30, SD 40 และ SD 50

ตาราง 3 คุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย

Class	tensile strength Mpa. (ksc.)	yield point Mpa. (ksc.)	Elongation %
SD 30	480 (4,900)	295 (3,000)	17
SD 40	560 (5,700)	390 (4,000)	15
SD 50	620 (6,300)	490 (5,000)	13

ตาราง 4 ชื่อขนาด ขนาดระบุ และมวลระบุของเหล็กเส้นข้ออ้อย

Size	Dia. (mm)	Cross-sections (mm ²)	Weight/m (kg/m)
DB 10	10	78.5	0.616
DB 12	12	113.1	0.888
DB 16	16	201.1	1.578
DB 20	20	314.2	2.466
DB 22	22	380.1	2.984
DB 25	25	490.9	3.853
DB 28	28	615.8	4.834
DB 32	32	804.2	6.313
DB 36	36	1017.9	7.990
DB 40	40	1256.6	9.865

ขนาดเหล็กเส้นตามมาตรฐานอเมริกัน (U.S. Imperial sizes) จะแสดงเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นจำนวนเท่าของ 1/8 นิ้ว (ทูน) เช่น #8 = 8/8 = 1 นิ้ว (8 ทูน) และ พื้นที่ = (ขนาดเส้น/9)² เช่น พื้นที่ของเหล็ก #8 = (8/9)² = 0.79 นิ้ว² สูตรนี้ ใช้ได้กับเหล็กขนาดไม่เกิน #8 เหล็กเบอร์สูงกว่าจะมีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณตามสูตร 1/8 นิ้ว

ตาราง 5 ขนาดเหล็กเส้นตามมาตรฐานอเมริกัน

Imperial Bar Size	“Soft” Metric Size	Weight		Diameter		Area	
		(lb/ft)	(kg/m)	(in)	(mm)	(in ²)	mm ²
#3	#10	0.376	0.561	3/8	9.525	0.11	71
#4	#13	0.668	0.996	4/8	12.7	0.20	129
#5	#16	1.043	1.556	5/8	15.875	0.31	200
#6	#19	1.502	2.24	6/8	19.05	0.44	284
#7	#22	2.044	3.049	7/8	22.225	0.60	387
#8	#25	2.670	3.982	8/8	25.4	0.79	509
#9	#29	3.400	5.071	1.128	28.65	1.00	645
#10	#32	4.303	6.418	1.270	32.26	1.27	819
#11	#36	5.313	7.924	1.410	35.86	1.56	1006

2.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

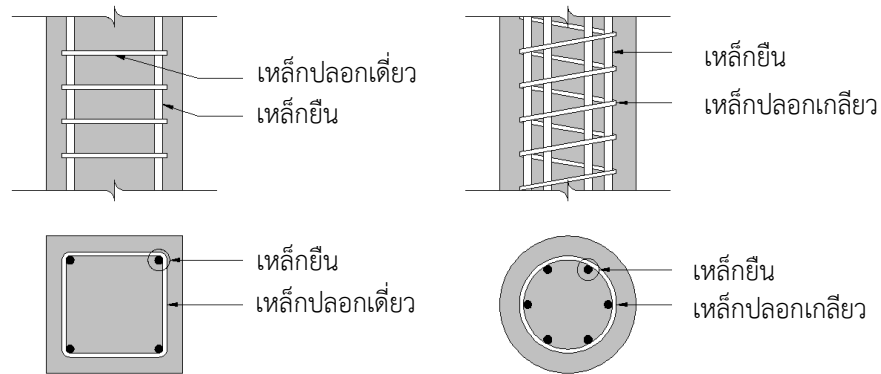
เสาคือองค์อาคารที่ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นหลัก โดยจะรับน้ำหนักที่ถ่ายเทจากระบบพื้นในแต่ละชั้น สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เริ่มจากชั้นบนสุดลงสู่ชั้นต่ำลงมาจนถึงชั้นตอม่อเพื่อถ่ายน้ำหนักลงฐานรากต่อไป เสาคงนับเป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญมากเพราะหากเสาต้นหนึ่งต้นใดเกิดการวิบัติ อาจทำให้เสถียรภาพโดยรวมของอาคารเสียไปและจะนำมาซึ่งความวิบัติของโครงสร้างทั้งหมดได้ เนื่องจากพื้น, คาน, และเสา ถูกหล่อเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้เกิดโมเมนต์ในเสาขึ้นจากการยึดรั้งที่ปลายคาน

นอกจากนั้นในอาคารหลายชั้นการวางตำแหน่งศูนย์กลางเสาให้ตรงกันในแนวนิ่งจะเกิดการเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity, e) ขึ้นเสมอ ซึ่งก็จะทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นในเสา ดังนั้นเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกนโดยสมบูรณ์จึงไม่เกิดขึ้นในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามเราอาจสมมุติให้การเยื้องศูนย์กลางที่เกิด e ซึ่งมีค่าน้อยประมาณ 0.1h เมื่อ h คือความลึกของหน้าตัดเสา สมการที่ใช้อยู่ยังเป็นสำหรับเสารับแรงตามแนวแกนแต่มีการลดกำลังลงบ้าง

แต่ในบางกรณีเสาก็รับทั้งแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดเนื่องจากลักษณะโครงสร้างเองหรือจากแรงภายนอกที่มากกระทำทางด้านข้างเช่นแรงลมหรือแผ่นดินไหว ในกรณีนี้จะต้องพิจารณาผลรวมกระทำของทั้งแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่จะมีรูปแบบของหน้าตัดด้วยกันสองรูปแบบคือ หน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีการ

เสริมเหล็กไว้ในภายในโดยมีคอนกรีตหุ้มโดยรอบ เสริมเหล็กในเสาคอนกรีตประกอบด้วยกันสองแบบ คือเหล็กยื่นและเหล็กเสริมด้านข้าง โดยที่เหล็กยื่นมีหน้าที่รับแรงอัดและแรงดัดส่วนเหล็กเหล็กด้านข้าง มีหน้าที่รับแรงเฉือนและป้องกันการแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ลักษณะของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมและวงกลม

(อัศนัย ทาภา, 2560)

2.5 ทฤษฎีการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.5.1 การออกแบบเสาสี่เหลี่ยมรับน้ำหนักตามแนวแกน

เมื่อน้ำหนักเสาคอนกรีตเสริมเหล็กน้ำหนักบรรทุกทุก P_0 เสาจะหดสั้นลงเล็กน้อย เท่ากับ อัตราการการหดสั้นในเหล็กและคอนกรีตมีค่าเท่ากัน การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยการยืดหด (Strain) มีค่าประมาณ 0.002 หน่วยแรงในเหล็กจะเท่ากับ f_y และในคอนกรีตจะเท่ากับ f'_c จากสมดุลในแนวตั้ง แรงกระทำ P_0 จะเท่ากับผลรวมของแรงต้านทานรวมของคอนกรีตและเหล็กเสริมดังสมการที่ 2.7

$$P_0 = f_y A_{st} + f'_c (A_g - A_{st}) \quad (2.7)$$

เมื่อ A_g คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด A_{st} คือพื้นที่เหล็กเสริม

เมื่อคอนกรีตและเหล็กได้รับแรงอัดพร้อมกันสัดส่วนของการรับน้ำหนักของคอนกรีตและเหล็ก จะเปลี่ยนไปตามเวลาในช่วงต้นหน่วยแรงในเหล็กจะมีค่าเป็น E_s/E_c เท่าของหน่วยแรงในคอนกรีตซึ่ง เป็นไปตามทฤษฎีอิลาสติก ต่อมาเมื่อผลของความคืบ (Creep) และการหดตัว (Shrinkage) มีมาก ขึ้นเหล็กจะค่อยๆรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังประลัยของเสามีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการ 2.8 เพื่อให้กำลังที่ได้ใกล้เคียงกับการทดสอบจึงลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตลง 15%

$$P_0 = f_y A_{st} + 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) \quad (2.8)$$

กำลังที่ได้จากสมการ 2.8 ถูกใช้เป็นพื้นฐานในมาตรฐาน ACI ประกอบกับตัวคูณลดกำลัง ซึ่งในกรณีของเสาจะมีค่าต่ำกว่าของคานเนื่องจากเสาเป็นองค์อาคารมีความสำคัญมากกว่านั่นเอง การวิบัติของคานโดยทั่วไปจะมีผลเฉพาะที่ในขณะที่การวิบัติของเสาอาจทำให้เกิดการพังทลายของทั้งโครงสร้างได้ นอกจากนี้ตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียวก็แตกต่างกันอันเนื่องมาจากพฤติกรรมการรับน้ำหนักซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป นั่นคือน้ำหนักบรรทุกประลัย (P_u) ต้องมีค่าไม่เกิน ϕP_n เมื่อ ϕ คือตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.75 สำหรับเสาปลอกเกลียว และเท่ากับ 0.70 สำหรับเสาปลอกเดี่ยว

$$\text{เสาปลอกเกลียว} \quad P_n = 0.85[0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (2.9)$$

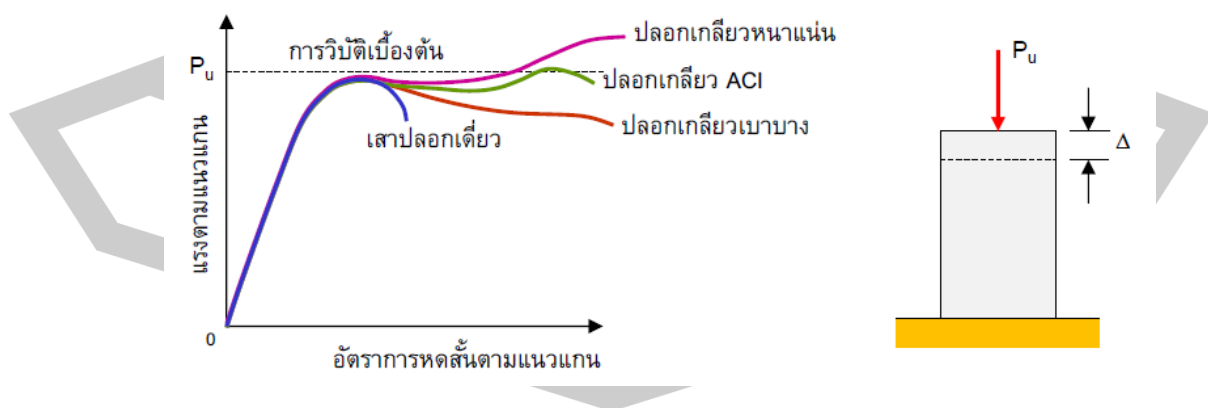
$$\text{เสาปลอกเดี่ยว} \quad P_n = 0.80[0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (2.10)$$

เมื่อ P_n = กำลังระบุ (Nominal strength) ในการแรงอัดตามแนวแกน

กำลังของเสาสั้นที่ได้จากสมการ (2.9) และ (2.10) นี้ คือกำลังที่ใช้ในการออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนโดยวิธีกำลังตามมาตรฐาน ACI

2.5.2 ปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว

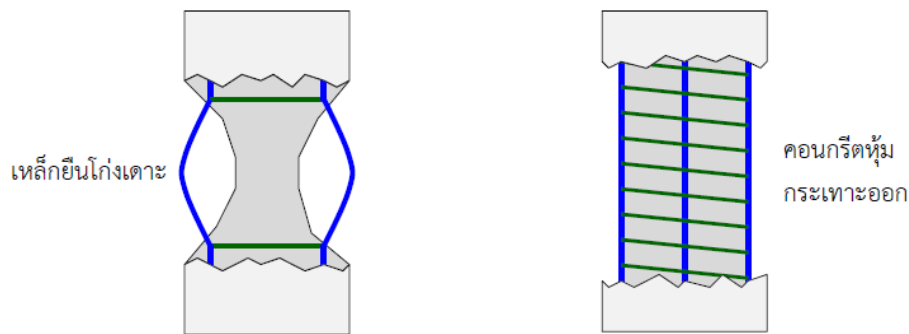
การใช้เหล็กปลอกทั้งที่เป็นแบบปลอกเดี่ยวแยกกันหรือแบบปลอกเกลียวนั้นก็เพื่อยึดเหล็กยื่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ และเพื่อป้องกันเหล็กยื่นจากการโค้งเดาะ ภาพประกอบที่ 9 แสดงให้เห็นพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว ซึ่งจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน การวิบัติของเสาปลอกเดี่ยวจะเกิดขึ้นจากการโค้งเดาะของเหล็กยื่นดังในภาพประกอบ 10 (ก)



ภาพประกอบ 9 พฤติกรรมของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว

(Jirawacharadet, 2014)

ส่วนในเสาปลอกเกลีวนั้นคอนกรีตหุ้มจะกะเทาะออกแล้วปลอกเกลียวจะเริ่มโอบอัดคอนกรีตภายในแกนกลางดังในภาพประกอบ 10 (ข) ทำให้ได้กำลังเพิ่มขึ้นมาชดเชยที่เสียไปจากการกะเทาะของคอนกรีตหุ้ม ดังนั้นแม่เสาทั้งสองประเภทจะมีกำลังรับแรงอัดเท่ากัน แต่ในการ ออกแบบเสาปลอกเดี่ยวจะต้องเผื่อส่วนปลอดภัยมากกว่าเสาปลอกเกลียวเนื่องจากการพังทลาย อย่างกะทันหัน และการขาดความเหนียว



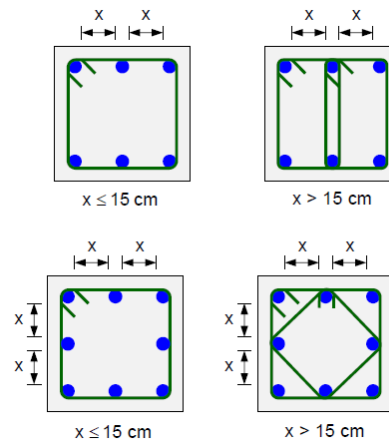
ภาพประกอบ 10 สภาพของเสาหลังเกิดการวิบัติ

(Jirawacharadet, 2014)

2.5.3 การออกแบบเหล็กปลอกเดี่ยว

เหล็กปลอกถูกใช้เพื่อยึดเหล็กยื่นให้อยู่ในตำแหน่งทำให้เกิดการรองรับด้านข้างเพื่อว่าเหล็กยื่น แต่ละเส้นจะโค้งเดาะได้เฉพาะระหว่างปลอกเท่านั้น ผลของปลอกต่อพฤติกรรมของเสานั้น ค่อนข้างจะ ซับซ้อน เมื่อเสาปลอกเดี่ยวรับน้ำหนักบรรทุกจนเกิดการวิบัติ เปลือกหุ้มด้านนอกจะกะเทาะ ออกเป็นอย่างแรกซึ่งทำให้มีการถ่ายเทน้ำหนักไปสู่แกนกลางของเสาและเหล็กยาว การสูญเสียสติเฟนสของเหล็กยื่นซึ่งเริ่มครากหรือโค้งเดาะออกมาทำให้แกนกลางคอนกรีตรับน้ำหนักมากขึ้น และเมื่อ แกนกลางรับน้ำหนักจนถึงค่ากำลังแตกหัก (Crushing strength) เสาจะเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว การจัดวางปลอกที่ถี่เกินไปเพียงพอจะช่วยทำให้เกิดการบีบรัดและเพิ่มหน่วยการยึดหดที่จะเกิดการแตกหักให้สูงกว่าค่ามากที่สุด 0.003 ได้มาก ซึ่งรายละเอียดการใส่ปลอกเดี่ยวแสดงดังภาพประกอบ 11

พหุ ประถม โท ชีวะ



ภาพประกอบ 11 รายละเอียดการใส่ปลอกเดี่ยว

(Jirawacharadet, 2014)

ข้อกำหนดในการใช้เหล็กปลอกเดี่ยวโดย ACI

1. เหล็กยื่นทุกเส้นจะต้องถูกห่อหุ้มโดยปลอกเดี่ยว
2. ใช้เหล็กปลอก 9 ม.ม. สำหรับเหล็กยื่นขนาด DB32 และใช้เหล็กปลอก 12 ม.ม.

สำหรับเหล็กยื่นขนาด DB36 และ DB40

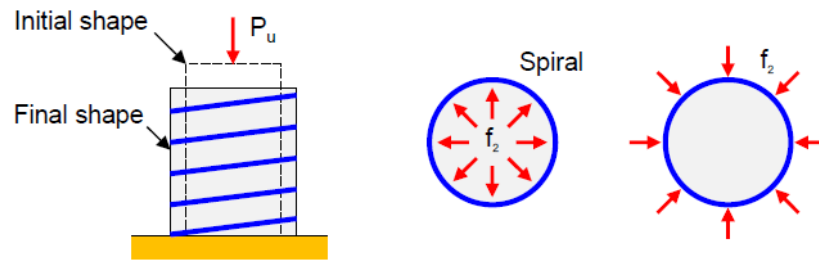
3. ระยะห่างระหว่างปลอกต้องไม่เกิน 16 เท่าเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กยื่น 48 เท่าเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอก หรือความกว้างหน้าเสาที่เล็กที่สุด
4. ทุกมุมของปลอกและที่เหล็กยื่นถูกรองรับต้องไม่เกิน 135° และไม่มีเหล็กยื่นทางด้านมีระยะห่างเกิน 15 ซม.

2.5.4 การออกแบบปลอกเกลียว

ความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเกลียวนั้นมาจากแรงดันด้านข้างที่กระทำกับแกนกลางจากปลอกเกลียวดังภาพประกอบ 12 ซึ่งจากการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อทรงกระบอกทดสอบถูกแรงดันกระทำด้านข้างเท่ากับสมการที่ 2.11

$$f_f = f'_c + 4.1f_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ f_f คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ถูกแรงกระทำด้านข้างและ f_2 คือแรงดันด้านข้าง



ภาพประกอบ 12 หน่วยแรงในเสาปลอกเกลียว

(Jirawacharadet, 2014)

ในการออกแบบปลอกเกลียวจะพยายามให้กำลังอัดสูญเสียไปจากการกะเทาะของเปลือกหุ้มถูก ชดเชยด้วยกำลังที่จะได้เพิ่มเติมจากแรงดันด้านข้างที่มาจากปลอกเกลียวถูกดึงจนคราก ดังสมการที่ 2.12

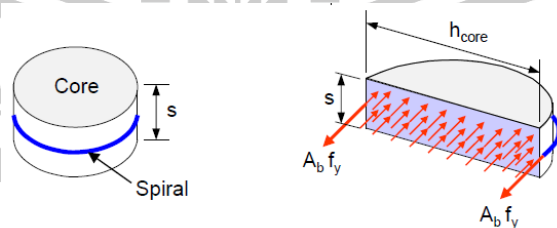
$$0.85f'_c(A_g - A_{core}) = 4.1f_2A_{core} \quad (2.12)$$

เมื่อ A_{core} คือพื้นที่แกนกลาง เพื่อที่จะหา f_2 ในเทอมของพื้นที่และกำลังครากของปลอกเกลียว ให้ลองพิจารณาทรงกระบอกคอนกรีตหนาเท่ากับระยะเกลียว จากนั้นตัดแบ่งครึ่งทรงกระบอกตามเส้นผ่านศูนย์กลางจะได้แผนภูมิสมดุลงดังในภาพประกอบที่ 13 เมื่อรวมแรงในแนวราบจะได้เท่ากับสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$h_{core} = Sf_2 = 2A_b f_y \quad (2.13)$$

$$f_2 = \frac{2A_b f_y}{h_{core} S} \quad (2.14)$$

เมื่อ S คือระยะเกลียวและ A_b คือพื้นที่ของปลอกเกลียว



ภาพประกอบ 13 หน่วยแรงที่กระทำกับคอนกรีตทรงกระบอกในแนวราบ

(Jirawacharadet, 2014)

แทนค่าสมการ 2.14 ลงในสมการ 2.13 แล้วหารทั้งสองข้างของสมการด้วย A_{core} จะได้สมการที่ 2.15

$$0.85f'_c \left(\frac{A_g}{A_{core}} - 1 \right) = \frac{4.1(2A_b f_y)}{h_{core} S} \quad (2.15)$$

กำหนดให้ s เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของปลอกเกลียวต่อปริมาตรทั้งหมดของแกนเสา

$$\rho_s = \frac{A_b \pi h_{core}}{(\pi h_{core}^2 / 4) s} = \frac{4A_b}{h_{core} S} \quad (2.16)$$

แทนค่า A_b จากสมการ 2.16 ลงในสมการ 2.15 จะได้เท่ากับสมการที่ 2.17

$$\rho_s = \frac{0.42f'_c}{f_y} \left(\frac{A_g}{A_{core}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

ปัดค่าตัวเลขจาก 0.42 เป็น 0.45 จะได้

$$\rho_s = \frac{0.45f'_c}{f_y} \left(\frac{A_g}{A_{core}} - 1 \right) \quad (2.18)$$

ซึ่งก็คือข้อกำหนดของ ACI สำหรับ f_y ไม่เกิน 4,000 กก./ตร.ซม.

ACI ยังได้กำหนดรายละเอียดในการออกแบบเสากลมปลอกเกลียวดังนี้

1. หน้ากว้างเสาน้อยที่สุด กำหนดให้ใช้ $h_{min} = 20$ ซม.
2. ปริมาณเหล็กยื่น กำหนดให้ใช้เหล็กอย่างน้อย 6 เส้น $\rho_s = 0.01 - 0.08$
3. ระยะช่องว่างระหว่างเหล็กปลอกไม่น้อยกว่า 2.5 ซม. และไม่เกิน 8 ซม.
4. เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กปลอกไม่น้อยกว่า 9 มม.

2.5.5 เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด

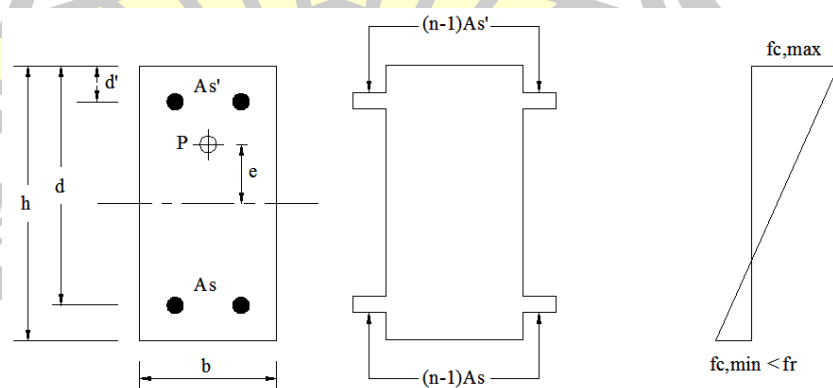
ในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป โครงสร้างจะเป็นโครงสร้างเฟรมแบบต่อเนื่อง (Continuous Frames) และจุดต่อทุกจุดจะมีสภาพยึดรั้งอย่างสมบูรณ์ (Rigid Joint) ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโครงสร้าง จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดในทุกส่วนของโครงสร้างนั้น ซึ่งโมเมนต์ดัดจะมีค่ามากที่สุด ณ ตำแหน่งที่แรงกระทำและจะลดน้อยลงในส่วนของโครงสร้าง

ที่ไหลออกไป ดังนั้นส่วนของโครงสร้างที่รับแรงอัดหรือเสาในอาคารจึงต้องรับโมเมนต์ดัดด้วย นอกเหนือจากแรงอัดที่กระทำตามแนวแกน

2.5.6 พฤติกรรมของเสาสั้นรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง

ในขณะที่เสารับแรงอัดตามแนวแกน P และมีโมเมนต์ดัดกระทำเท่ากับ M ซึ่งเปรียบเสมือนว่าเสานั้นต้องรับแรงอัดเท่ากับ P แต่กระทำที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง $e = M/P$ พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาจะอยู่ในช่วงอีลาสติกเมื่อแรงอัดที่กระทำมีค่าน้อยประมาณครึ่งหนึ่งของแรงอัดสูงสุดที่เสานั้นจะรับได้ ซึ่งถ้าระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าน้อยจะไม่มีรอยร้าวปรากฏที่ด้านรับแรงดึง เว้นแต่ระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากหรือเสาต้องรับโมเมนต์ดัดมากจึงจะมีรอยร้าวปรากฏที่ด้านรับแรงดึง การวิเคราะห์ในช่วงอีลาสติกเพื่อหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนรูปตัดเสาหรือกำลังต้านทานของเสา อาจหาได้จากหลักการสมดุลของแรงและจากรูปการกระจายของหน่วยการยึดหดตัวบนหน้าตัดเสา หรือหาจากหน้าตัดแปลงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอาจแปลงให้เป็นหน้าตัดเสาของคอนกรีตล้วนดังภาพประกอบ 14 หรือภาพประกอบ 15 ซึ่งขึ้นกับระยะเยื้องศูนย์กลางหรือโมเมนต์ดัดที่กระทำ

เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าน้อย หน้าตัดของเสาจะรับแต่หน่วยแรงอัด หรืออาจมีหน่วยแรงดึงบ้างแต่มีค่าสูงสุดไม่เกินค่าโมดูลัสของการแตกร้าว ดังนั้นจึงไม่มีรอยร้าวปรากฏที่ด้านรับแรงดึง จากหน้าตัดแปลงดังแสดงในภาพประกอบ 14 (ข) ถ้าสมมติว่า $A_s = A_s'$ จะได้เนื้อที่ของหน้าตัดแปลง $A_t = A_g(1 + (n-1)\rho_t)$ ในเมื่อ $\rho_t = A_{st}/A_g$ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลง $I_t = I_{\text{concrete}} + (n-1)I_{\text{Reinforcement}}$ ดังนั้น หน่วยแรง $f_c \max$ หรือ $\min = \frac{P}{A_t} \pm \frac{M(h/2)}{I_t}$ นั่นคือ เมื่อมีแรงอัดกระทำบนหน้าตัดค่าหนึ่ง จะสามารถหาค่าของระยะเยื้องศูนย์กลาง e ที่ทำให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับโมดูลัสของการแตกร้าว f_r ได้โดยที่หน้าตัดนั้นยังไม่มีรอยร้าวปรากฏ และจากสมดุลแบบสถิตจะหาค่ากำลังต้านทานของเสานั้นได้ แต่หากพิจารณาผลรวมความล้าของคอนกรีตจะต้องใช้อัตราส่วนโมดูลัส (Modular Ratio) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2n$ แทนในส่วนที่รับแรงอัด

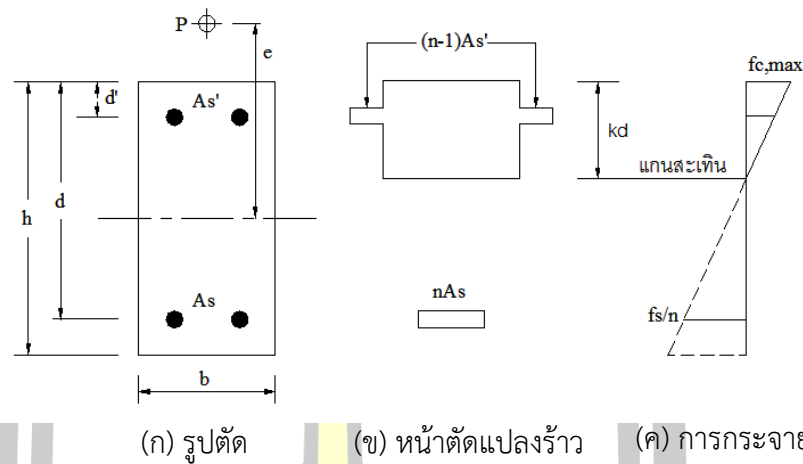


(ก) รูปตัด

(ข) หน้าตัดแปลง (ไม่ร้าว)

(ค) การกระจายหน่วยแรง

ภาพประกอบ 14 การแปลงหน้าตัดเมื่ออยู่ในช่วงการวิบัติด้วยแรงอัด



ภาพประกอบ 15 การเปลี่ยนหน้าตัดเมื่ออยู่ในช่วงการวิบัติด้วยแรงดัด

(อัศนัย ทาภา, 2560)

เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลาง e มีค่ามาก หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าค่าของโมดูลัสแตกร้าว นั่นคือ พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของเสาจะแตกร้าว ทำให้การวิเคราะห์หาหน่วยแรงในคอนกรีตหรือในเหล็กยื่นที่รับแรงดัดหรือรับแรงอัดมีความยุ่งยากมากขึ้น ซึ่งอาจพิจารณาจากการกระจายของหน่วยการยืด-หดตัวและการกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัด หรือพิจารณาจากหน้าตัดแปลงร้าว ดังภาพประกอบ 15 (ข) ซึ่งคล้ายกับกรณีของคานเมื่อรับโมเมนต์ในสภาวะใช้งานและมีเหล็กเสริมรับแรงอัดด้วยนั่นเอง

เมื่อแรงอัดเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากยิ่งขึ้น พฤติกรรมของเสาจะเปลี่ยนไปอยู่ในช่วงอินอีลาสติก การวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังต้านทานของเสาเมื่อต้องรับแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางในช่วงนี้จะนำหลักการเกี่ยวกับการกระจายของหน่วยการยืด-หดตัวและการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคานมาใช้ ซึ่งจะสมมติให้การกระจายของหน่วยแรงอัดในเสาคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่าตามสมมติฐานของ Whitney เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดสูงสุดของรูปตัดเสานั้น

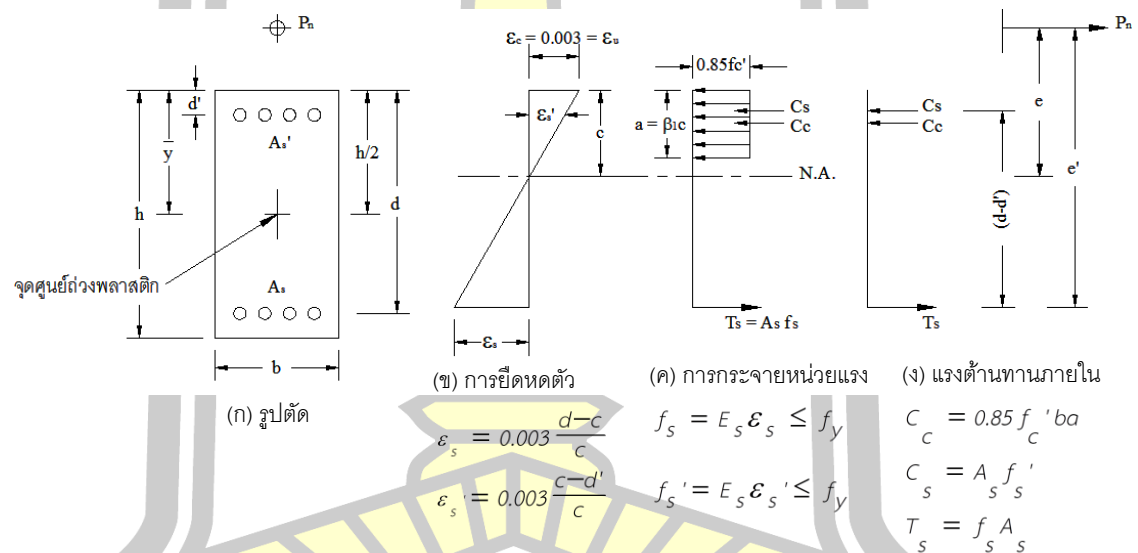
จุดศูนย์กลาง่วงพลาสติก คือตำแหน่งกระทำของแรงอัดตามแนวแกนที่สภาวะก่อนการวิบัติที่ทำให้หน่วยแรงการหดตัวของคอนกรีตตลอดทั้งหน้าตัดมีค่าคงที่เท่ากับพิกัดสูงสุดที่กำหนด ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.003 จุดศูนย์กลาง่วงพลาสติกจะมีตำแหน่งอยู่อยู่ที่จุดรวมของแรงต้านทานภายใน ซึ่งได้จากคอนกรีต เหล็กเสริมรับแรงดัด และเหล็กเสริมรับแรงอัด ดังนั้นเมื่อให้หน่วยการหดตัวของคอนกรีตตลอดทั้งหน้าตัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ทั้งเหล็กเสริมรับแรงดัดและเหล็กเสริมรับแรงอัดจะมีกำลังถึงจุดคราก ตำแหน่งของแนวศูนย์กลาง่วงพลาสติกที่วัดจากแนวศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดัด จะหาได้จากสมการ 2.80

$$x = \frac{0.85f_c'bh(d-d')/2 + A_s'f_y'(d-d')}{0.85f_c'bh + A_s'f_y' + A_s f_y} \tag{2.19}$$

หากเหล็กเสริมที่ด้านรับแรงดึงและด้านรับแรงอัดเท่ากัน $A_s = A_s'$ และใช้เหล็กเสริมชนิดเดียวกัน ดังนั้น หน้าตัดเสามีความสมมาตรกับแนวศูนย์กลางของรูปตัด ซึ่งแนวศูนย์กลางของรูปตัดจะเป็นแนวศูนย์กลางมวลพลาสติก

2.5.7 กำลังต้านทานสูงสุดของเสาสั้นรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง

เมื่อพิจารณาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $b \times h$ ที่มีเหล็กยื่นเรียงขนานกับแกนตัด และรับแรงอัดสูงสุด P_n กระทำที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง e เมื่อเทียบกับแนวศูนย์กลางมวลพลาสติก (Plastic Centroid) หรือกระทำที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง e' เมื่อเทียบกับแนวศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังภาพประกอบ 16 (ก) หากสมมติให้การกระจาย ของหน่วยการยืด-หดตัว และหน่วยของแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเสาเป็นไปตามภาพประกอบ 16 (ข) และ 16 (ค)



ภาพประกอบ 16 แรงที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัดของเสารับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน (อัศนัย ทาเถา, 2560)

จากภาพประกอบ 16 การกระจายของหน่วยแรงในหน้าตัดเสามีค่าดังสมการที่ 2.20

$$P_n = 0.85f_c'ba + A_s'f_s' - A_s f_s \tag{2.20}$$

และเมื่อพิจารณาหาโมเมนต์ดัดรอบแกนศูนย์กลางมวลพลาสติกจะได้กำลังต้านทานแรงดัดสูงสุดดังสมการที่ 2.21

$$M_n = P_n e = 0.85 f_c' b a \left(\bar{y} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_s' (\bar{y} - d') - A_s f_s (d - \bar{y}) \quad (2.21)$$

ถ้าหากพิจารณาหาโมเมนต์ดัดรอบแกนศูนย์ถ่วงของเหล็กรับแรงดึงจะทำให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น นั่นคือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด

$$M_n' = P_n e' = 0.85 f_c' b a \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s f_s' (d - d') \quad (2.22)$$

เมื่อ f_s คือ หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึง ซึ่งวิเคราะห์จากรูปการกระจายของหน่วยการยืดหดตัวซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$f_s = E_s \epsilon_s = E_s \frac{0.003(d - c)}{c} = E_s \frac{0.003(\beta_1 d - a)}{a} \leq f_y \quad (2.23)$$

เมื่อ f_s' คือ หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัด ซึ่งวิเคราะห์จากรูปการกระจายของหน่วยการยืดหดตัวซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$f_s' = E_s \epsilon_s' = E_s \frac{0.003(c - d')}{c} = E_s \frac{0.003(a - \beta_1 d')}{a} \leq f_y \quad (2.24)$$

เมื่อ \bar{y} คือ ระยะที่วัดจากขอบรับแรงอัดถึงแนวศูนย์ถ่วงพลาสติก

2.5.8 กำลังต้านทานของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สภาวะสมดุล

การวิบัติที่สภาวะสมดุล คอนกรีตจะถูกอัดจนกระทั่งมีค่าหน่วยการยืดหดตัวสูงสุด ϵ_u เท่ากับ 0.003 พร้อมกับที่หน่วยของการยืดหดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าเท่าหน่วยการยืดหดตัว ที่จุดคราก ϵ_y ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติของคานที่อยู่ในสภาวะสมดุล และจากหลักการสามเหลี่ยมคล้ายในภาพประกอบ 16 จะได้ระยะจากขอบบนของส่วนรับแรงอัดถึงแนวแกนสะเทินมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.25

$$c_b = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u + \epsilon_y} d = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{E_s}} d \quad (2.25)$$

เมื่อระยะ $a_b = \beta_1 c_b$ ดังนั้น $a_b = \beta_1 d \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{E_s}}$ (2.26)

กำลังรับแรงอัดที่สภาวะสมดุล P_{nb} และระยะเยื้องศูนย์กลาง e_b หาได้โดยแทนค่าระยะ a_b จากสมการ 2.24 ลงในสมการ 2.21 และสมการ 2.25 จะได้

$$P_{nb} = 0.85f_c'ba_b + A_s'f_s' - A_s f_s \quad (2.27)$$

$$M_{nb} = P_{nb}e_b = 0.85f_c'ba_b \left(y - \frac{a_b}{2}\right) + A_s'f_s'(\bar{y} - d') - A_s f_s (d - \bar{y}) \quad (2.28)$$

เมื่อ $f_s' = E_s \epsilon_s' = E_s \frac{0.003(c_b - d')}{c_b} \leq f_y$ (2.29)

2.5.9 ลักษณะของการวิบัติของเสารับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง

การวิบัติของเสาที่รับแรงอัดและแรงดัดรวมกันจะขึ้นอยู่กับหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่สภาวะการวิบัตินั้น ซึ่งจะมีการวิบัติด้วยกันสองช่วงคือ การวิบัติในช่วงแรงอัดเป็นหลัก (Compression Failure) หรือการวิบัติในช่วงแรงดัดเป็นหลัก (Tension Failure)

การวิบัติในช่วงแรงดัดเป็นหลักจะเกิดหลังจากเหล็กเสริมรับแรงดัดถูกดึงจนถึงจุดครากและต่อมาคอนกรีตก็จะถูกอัดแตก ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีของเสาที่รับแรงเยื้องศูนย์กลางหรือโมเมนต์ดัดตามส่วนการวิบัติในช่วงแรงอัดเป็นหลักจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อคอนกรีตถูกอัดแตกก่อนที่เหล็กเสริมจะถูกดึงจนถึงจุดคราก ซึ่งจะเกิดในกรณีที่เสารับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางหรือโมเมนต์ดัดน้อย

การวิบัติของเสาลักษณะที่เหล็กเสริมถูกดึงจนถึงจุดครากและคอนกรีตถูกอัดแตกโดยคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003 เรียกว่าการวิบัติแบบสมดุล (Balance Failure) ดังนั้น ถ้าให้ P_n เป็นกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของหน้าตัดเสาและให้ P_{nb} เป็นกำลังต้านทานแรงอัดที่สภาวะสมดุลของหน้าตัดนั้น จะพบว่า

เมื่อ $P_n < P_{nb}$ จะเกิดการวิบัติในช่วงรับแรงดัดเป็นหลัก

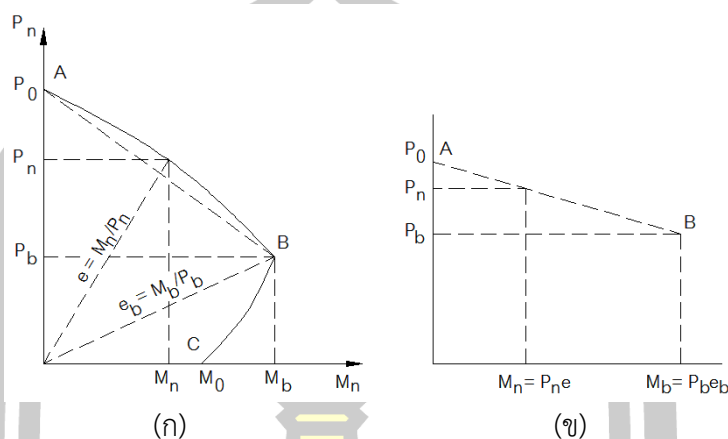
เมื่อ $P_n = P_{nb}$ จะเกิดการวิบัติในช่วงสภาวะสมดุล

เมื่อ $P_n > P_{nb}$ จะเกิดการวิบัติในช่วงรับแรงอัดเป็นหลัก

2.5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด

จากพฤติกรรมและกำลังต้านทานของเสาเมื่อรับแรงอัดเยื้องศูนย์กลางพบว่า การวิบัติของเสา มีสองช่วงคือ วิบัติในช่วงรับแรงอัดเป็นหลักซึ่งคอนกรีตจะถูกอัดแตกก่อนจนถึงจุดวิบัติสมดุลช่วงหนึ่ง และวิบัติในช่วงรับแรงดัดเป็นหลักโดยเหล็กเสริมรับแรงดัดจนถึงจุดครากก่อนที่

คอนกรีต จะถูกอัดแตก เมื่อนำความสัมพันธ์ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดในแต่ละช่วงมาเขียนกราฟ จะได้แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 แผนภูมิความสัมพันธ์ของแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของเสา
(อัศนัย ทาภา, 2560)

แผนภูมิปฏิสัมพันธ์จะแสดงค่าระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดัดของหน้าตัดเสาที่มีปริมาณการเสริมเหล็กจำนวนหนึ่ง โดยกำหนดให้แกน y เป็นกำลังต้านทานแรงอัดส่วนแกน x เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด

ที่จุด A ในแผนภูมิคือ กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด (P_0) เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีโมเมนต์

ที่จุด B ในแผนภูมิคือ กำลังต้านทานสูงสุดเมื่อเกิดการวิบัติแบบสมดุล (Balance failure) ค่าของ P_n และ M_n ทุกคู่ที่อยู่ระหว่างจุด A และ B คือกำลังต้านทานสูงสุดในช่วงแรงอัดเป็นหลัก ส่วนค่าของ P_n และ M_n ทุกคู่ที่อยู่ระหว่างจุด B และ C คือกำลังต้านทานสูงสุดในช่วงแรงดัดเป็นหลัก

ที่จุด C ในแผนภูมิคือ กำลังต้านทานโมเมนต์สูงสุดเมื่อมีแต่โมเมนต์ดัดที่กระทำ ในช่วงของการวิบัติด้วยแรงอัดเป็นหลักในแผนภูมิปฏิสัมพันธ์พบว่า เมื่อค่า P_n มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าของ M_n มีค่าลดน้อยลงเนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงอัดมากขึ้นจะทำให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ดังนั้นคอนกรีตจึงรับหน่วยการหดตัวที่เกิดขึ้นจากแรงดัดได้น้อยลง เนื่องจากการกำหนดให้หน่วยการหดตัวสูงสุดในคอนกรีตเท่ากับ 0.003 เท่านั้น

2.5.11 ข้อกำหนดทั่วไปของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐาน ACI ให้ข้อกำหนดต่างๆเกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังนี้

1) ตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาปลอกเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากำหนดใช้เท่ากับ 0.65

2) พื้นที่หน้าตัดเหล็กยื่นทั้งหมดในเสา (A_{st}) ต้องไม่น้อยกว่า 0.01 และต้องไม่เกินกว่า 0.08 ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา (A_g) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กยื่น ต้องไม่เล็กกว่า 12 มม. เสาปลอกเดี่ยวต้องมีเหล็กยื่นอย่างน้อย 4 เส้น และเสาปลอกเกลียว ต้องมีเหล็กยื่นอย่างน้อย 6 เส้น

3) ระยะช่องว่างระหว่างเหล็กยื่นของเสาต้องไม่น้อยกว่า 1.5 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กนั้น หรือ 1.34 เท่า ของขนาดโตสุดของหินหรือ 4 ซม.

4) คอนกรีตหุ้มเหล็กที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับแกนคอนกรีตของเสาปลอกเกลียวและปลอกเดี่ยวต้องมีความหนาอย่างน้อย 3.5 ซม. หรือ 1.34 เท่า ของขนาดโตสุดของหิน

5) เสาปลอกเดี่ยวต้องใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เล็ก 6 มม. สำหรับเหล็กยื่นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 20 มม. และใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มม. สำหรับเหล็กยื่นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 25 ถึง 32 มม. โดยมีระยะห่างไม่เกิน 16 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กยื่นหรือ 48 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอก หรือไม่เกินกว่าด้านแคบของเสา

6) เสาปลอกเดี่ยวที่มีเนื้อที่หน้าตัดใหญ่กว่าที่ต้องการในการรับน้ำหนักมากๆ การหาปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด และกำลังที่ใช้ออกแบบยอมให้ใช้ค่า A_g เพียงครั้งเดียว

2.6 การใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในการก่อสร้าง

คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (HPC) ในรูปแบบปัจจุบันมีการใช้ทั่วไปทั่วประเทศอเมริกา ในประมาณปี พ.ศ. 2543 Federal Highway Administration (FHWA) เริ่มขึ้นตรวจสอบการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูง สำหรับโครงสร้างพื้นฐานทางหลวงในปี 2544 ในการติดตั้งสะพานหลายตัว รวมถึงคานสำเร็จรูป เป็นต้น มีการสร้างสะพานหลายแห่งในฝรั่งเศสโดยใช้ คอนกรีตสมรรถนะสูง ในปี 2552 นอกจากฝรั่งเศสแล้ว ออสเตรเลีย โครเอเชีย อิตาลีญี่ปุ่น มาเลเซีย เนเธอร์แลนด์ นิวซีแลนด์ สวิตเซอร์แลนด์และ เกาหลีใต้ ดังแสดงในภาพประกอบ 18 และได้มีการสร้างสะพานที่สร้างเสร็จแล้วมากกว่า 90 แห่ง (Federal Highway Administration 2011)

พหุ อนุ ทิ โด ชี เว



ภาพประกอบ 18 สะพานที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในการก่อสร้าง เกาหลีใต้
(Federal Highway Administration 2011)

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงและพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มสมรรถนะของคอนกรีต รวมถึงการใช้วัสดุร่วมในคอนกรีตสมรรถนะสูง เช่น เส้นใย ทั้งจากธรรมชาติและการสังเคราะห์ เช่น เส้นใย โพลีเมอร์ เส้นใยแก้ว และเส้นใยเหล็ก เป็นต้น เช่น จากงานวิจัยของ Yoo Doo-Yeol และ คณะ (2017) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงผสม เส้นใยเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ ตะขอ (hooked), เกี้ยว (twisted), และ แบบตรง (straight) พบว่า เส้นใยแบบตรง ให้ประสิทธิภาพการดัดของคานที่ดีที่สุด ได้แก่ ความแข็งแรงความสามารถในการโก่งตัวการดูดซึมพลังงาน และพฤติกรรมการแตกเมื่อเทียบกับเส้นใยแบบตะขอและแบบเกี้ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเส้นใยจำนวนมากถึง (2% โดยปริมาตร)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Koosha Khorramian and Pedram Sadeghian (2017) ศึกษาเชิงทดลองและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว-โพลีเมอร์ (GFRP) โดยเสามีขนาด 150x150 มม. และยาว 500 มม. ทดสอบภายใต้แรงอัดในแนวแกนและเยื้องศูนย์ 3 ระดับที่อัตราส่วนต่อความกว้าง 0.1 0.2 และ 0.3 จากผลการทดลองพบว่าไม่มีการโก่งหรือแตกร้าวของแท่ง GFRP ในแรงอัด สังเกตในระหว่างการทดสอบก่อนที่ชิ้นงานจะวิบัติ ค่าเฉลี่ยของความเครียดอัดแท่งทดลองของแท่ง GFRP อานจากมาตรวัดความเครียดหลังจากการวิบัติของชิ้นงานพบว่า 22% และ 16% ของการรับสูงสุดของแท่ง GFRP ในการรับแรงอัด ในการศึกษาชิ้นนี้การมีส่วนร่วมของแท่ง GFRP ในการรับกำลังอัดสามารถพิจารณาได้ในการออกแบบเสริม GFRP ใน เสาคอนกรีตสั้น

Ahmed Hassan และคณะ (2019) ได้ศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กและเส้นใยแก้ว-โพลีเมอร์ (GFRP) ภายใต้แรงเยื้องศูนย์ พบว่า เสาเสริม GFRP มีความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำกว่าเสาเสริมเหล็กโดยมีค่า เท่ากับ 24% นอกจากนี้เหล็กปลอกทั้งสอง (ของท่อและเกี้ยว) ยังช่วยปรับปรุงการลดนี้

Butje Alfonsius Louk Fanggi and Togay Ozbakkaloglu (2014) ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเสาเหล็กที่เติมคอนกรีตกำลังสูงไว้ด้านใน โดยตัวอย่างเสามีขนาด หน้าตัด 150x150 มม. เสาแบ่งออกเป็น เสาที่เติมคอนกรีตด้านใน และเสาที่ไม่เติมคอนกรีต ในท่อกลมและท่อเหลี่ยมภายในและมีชั้นคอนกรีตภายนอกโดยหุ้มด้วยท่อที่ทำจาก และเส้นใยโพลีเมอร์ (FRP) เป็น double-skin tubular columns (DSTCs) ซึ่งผลการทดลองพบว่า การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเหล็กส่งผลให้ ความเครียดตามแนวแกนสูงสุด คอนกรีตใน DSTC แบบกลวงที่มีท่อเหล็กด้านในแบบวงกลมจะพัฒนาความเครียดตามแนวแกนที่มากขึ้น

Milad Mohammadi Hosinieh (2014) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็กภายใต้แรงอัดในแนวแกน โดยตัวอย่างเสามีขนาดหน้าตัด 250x250 มม. สูง 1,000 มม. ผลการศึกษาพบว่า การเสริมแรงตามขวางที่เว้นระยะห่างอย่างใกล้ชิดและมีรายละเอียดช่วยให้สามารถพัฒนาได้อย่างยอดเยี่ยมของค่าความเหนียวในเสาคอนกรีตสมรรถนะสูงเสริมเส้นใยเหล็ก นอกจากนี้ ระยะห่างของเหล็กปลอก เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงตามแนวแกนและความเหนียวของเสา



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ได้กล่าวถึง วัสดุ เครื่องมือ และวิธีในการดำเนินงานวิจัย โดยสรุปดังนี้

- 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้
- 3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 15-2547 ซึ่งเก็บและบรรจุไว้โดยไม่มี ความชื้น

จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (1997 G : 149-150) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการใช้ตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง โดย ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.14 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก. 15-2547)

3.1.2 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำ โดยแยกออกเป็น 2 ประเภท ประเภทที่ 1 ใช้ในคอนกรีตทั่วไป มีการกระจายขนาดคละของทรายตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 136 จากผลการวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมละเอียดโดยใช้ตะแกรง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย ที่ได้มาจาก 2 ตัวอย่าง ดังตาราง 17-18 ในภาคผนวก ก พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย มีค่าเท่ากับ 2.76 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย ดังตาราง 24 ในภาคผนวก ก ซึ่งประกอบด้วยค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งเท่ากับ 2.61 ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 2.62 ความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.68 และร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของทรายเท่ากับร้อยละ 1.37 และประเภทที่ 2 ใช้ในคอนกรีตสมรรถนะสูง มีขนาดของทรายผ่านตะแกรง เบอร์ 150-600 ไมโครเมตร

3.1.3 หิน ใช้หินขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 33-85 จากผลการวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมหยาบ โดยใช้ตะแกรง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจาก 2 ตัวอย่าง ดังตาราง 19-20 ในภาคผนวก ก พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.32 มีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของหิน ดังตาราง 21 ในภาคผนวก ก ซึ่งประกอบด้วยค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งเท่ากับ 2.64 ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวแห้งเท่ากับ 2.65 ความถ่วงจำเพาะแท้จริงเท่ากับ 2.69 และร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของหินเท่ากับ 0.79

3.1.4 ซิลิกาฟุ่ม ชนิด micro silica 940 U

3.1.5 น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดในการผสมคอนกรีต

3.1.6 สารผสมเพิ่ม ใช้น้ำยาลดน้ำพิเศษและสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว ชนิด F ตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 494

3.1.7 เส้นใยเหล็ก เป็นเส้นใยเหล็ก ชนิด Hook end ตามมาตรฐาน UNI EN 10016 หรือ UNI EN 10088-3

3.1.8 เหล็กเสริม ใช้เหล็ก DB 12 มม. และ RB 6 มม. ตามมาตรฐาน มอก. SD30 และ SR24 ซึ่งจากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม พบว่ากำลังครากของเหล็ก DB12 มีค่าเท่ากับ 3743 กก./ตร.ซม.

3.1.9 ท่อเหล็กดำขนาด 3/4, 1, และ 1 1/4 นิ้ว หนา 1.2 มม. ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงดังตาราง 26 ในภาคผนวก ก โดยพบว่ากำลังครากเฉลี่ยของท่อเหล็กทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 2444 กก./ตร.ซม.

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

3.2.1 เครื่องผสมคอนกรีต

3.2.2 ชุดทดสอบการไหลแผ่คอนกรีต

3.2.3 ชุดแบบหล่อคอนกรีต

3.2.4 ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน

3.2.5 ชุดทดสอบกำลังอัด (Universal test machine)

3.2.6 ชุดทดสอบ Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

3.2.7 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)

3.2.8 กล้องบันทึกภาพและวิดีโอ

3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.3.1.1 การออกแบบส่วนผสม

คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย ออกแบบให้มีกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1,500 กก./ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูง และเท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. สำหรับคอนกรีตทั่วไป โดยส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ หิน และทราย โดยปริมาณของส่วนผสมแสดงดังตาราง 6 และสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงประกอบด้วยวัสดุเหมือนกับคอนกรีตทั่วไปแต่ได้มีการเพิ่ม ซิลิกาฟูม เส้นใยเหล็ก และสารลดน้ำพิเศษเพื่อให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น ซึ่งปริมาณของส่วนผสมแสดงดังตาราง 7

ตาราง 6 ส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปที่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 กก./ตร.ซม.

Mix No.	Mix proportion (kg/m ³)			
	Water	Cement	Stone	Sand
1	205	285	1120	840

ตาราง 7 ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1,500 กก./ตร.ซม.

Mix No.	Mix proportion (kg/m ³)					
	Water (Kg)	Cement (Kg)	Silica Fume (Kg)	Sand (Kg)	Steel fiber (Kg)	SP (Kg)
1	155.33	862.00	100.67	1168.67	45.33	76.67
2	215.33	862.00	100.67	1168.67	45.33	46.67
3	215.33	862.00	100.67	1168.67	45.33	33.33

3.3.2 การผสมและหล่อคอนกรีต

การผสมคอนกรีตใช้เครื่องผสมแบบกระทะ ตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 192 และหล่อคอนกรีตโดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. บรรจุคอนกรีตลงในแบบ 3 ชั้น ในปริมาณชั้นละเท่าๆ กัน แต่ละชั้น กระทุ้งด้วยเหล็กปลายกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ชั้นละ 25 ครั้ง

3.3.3 การทดสอบค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต (Slump Flow Test)

การไหลแผ่ของคอนกรีตทำตามมาตรฐาน BS EN 12350-5 โดยให้มีค่าการไหลแผ่ทั้งสองแนวไม่น้อยกว่า 550 มม. ทำการทดสอบโดยใช้โต๊ะเขย่าขนาด 700x700 มม. บรรจุคอนกรีตใส่แบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 130 มม. และด้านล่าง 200 มม. สองชั้นเท่าๆ กัน กระทุ้งด้วยไม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40x40 มม. ชั้นละ 10 ครั้ง ปาดผิวบนให้เรียบ จากนั้นยกแบบแล้วยกโต๊ะเขย่า 15 ครั้ง ดังภาพประกอบ 19

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 19 การวัดค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสมรรถนะสูง

3.3.4 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

หลังจากถอดแบบคอนกรีตที่มีอายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 °C โดยทำตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 192 เมื่อครบอายุการทดสอบ ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 39 โดยหล่อผิวหน้าให้สม่ำเสมอด้วยกัมมะถัน ตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 617 ก่อนการทดสอบ

3.3.5 การหล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยในท่อเหล็กสำเร็จรูป

หลังจากผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงแล้ว นำไปบรรจุในท่อเหล็กสำเร็จรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ 1 และ $1\frac{1}{4}$ นิ้ว ความยาว 10 ซม. จากนั้นกระทั่ง เมื่อคอนกรีตเต็มแล้ว นำพลาสติกใสหุ้มท่อเหล็กสำเร็จรูป เมื่อครบ 28 วัน นำมาทดสอบกำลังอัด และบรรจุในท่อเหล็กสำเร็จรูป เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำไปบรรจุเป็นเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตต่อไป ดังแสดงในภาพประกอบ 20

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 20 การเทคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษลงในท่อขนาดต่างๆ

3.3.6 ขนาดและชนิดของเหล็กเสริมเสาคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เสาคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 70 ซม. จำนวน 28 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น เสาคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มม. ท่อเหล็กขนาด 1 3/4 และ 1(1/4) นิ้ว จำนวน 4 เส้น และเสริมด้วยท่อเหล็กกรอกด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใย ตัวอย่างละ 4 ต้น โดยใช้เหล็กกลมขนาด 6 มม. ระยะเรียงเท่ากับ 150 มม. เป็นเหล็กปลอก ซึ่งแสดงดังตาราง 8

ตาราง 8 ขนาดและจำนวนเสาคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

No.	Column size	เหล็กเสริม		เหล็กปลอก		Volume (column)
		size (mm.)	Volume (piece)	size (mm)	spacing (cm)	
1	15 x 15 x 70	DB 12	4	RB6	150	4
2	15 x 15 x 70	Pipe 3/4"	4	RB6	150	4
3	15 x 15 x 70	Pipe 1"	4	RB6	150	4
4	15 x 15 x 70	Pipe 1(1/4)"	4	RB6	150	4
5	15 x 15 x 70	UHPC+Pipe 3/4"	4	RB6	150	4
6	15 x 15 x 70	UHPC+Pipe 1"	4	RB6	150	4
7	15 x 15 x 70	UHPC+Pipe 1(1/4)"	4	RB6	150	4

3.3.7 การหล่อเสาคอนกรีต

การหล่อตัวอย่างเพื่อทดสอบ โดยเสาคอนกรีต มีขนาด 15x15x70 ซม. และ นำเอาเหล็กเส้นทั่วไป คือ DB 12 มาเป็นเหล็กเสริม และ RB 6 เป็นเหล็กปลอก รวมถึงท่อเหล็ก และ ท่อ

เหล็กที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใย มาเป็นเหล็กเสริม หลังจากหล่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วทำการถอดแบบและนำไปป้อนโดยใช้พลาสติก และป้องกันไม่ให้ความชื้นออกสู่ภายนอก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21-23 และเมื่อครบอายุ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบต่อไป



ภาพประกอบ 21 การเข้าแบบเสาคอนกรีตสมรรถนะสูง



ภาพประกอบ 22 การเทเสาคอนกรีต

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบ 23 การบ่มเสาคอนกรีตด้วยพลาสติกใส

3.3.8 การทดสอบเสาคอนกรีต

หลังจากหล่อเสาคอนกรีตขนาด 15x15x70 ซม. และเสริมด้วยเหล็กเสริมทั่วไปและเสริมด้วยท่อเหล็กรูปพรรณที่บรรจุและไม่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง และบ่มจนครบอายุ 28 วันแล้ว นำมาทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง UTM โดยใช้แรงอัดในแนวแกนที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0 20 40 60 มม. และติดตั้งชุดทดสอบ Linear Variable Differential Transformer เพื่อวัดค่าการเสียรูปในแนวตั้งและเสียรูปด้านข้างดังภาพประกอบ 24 รหัสของตัวอย่างการทดสอบ ดังแสดงในตาราง 9

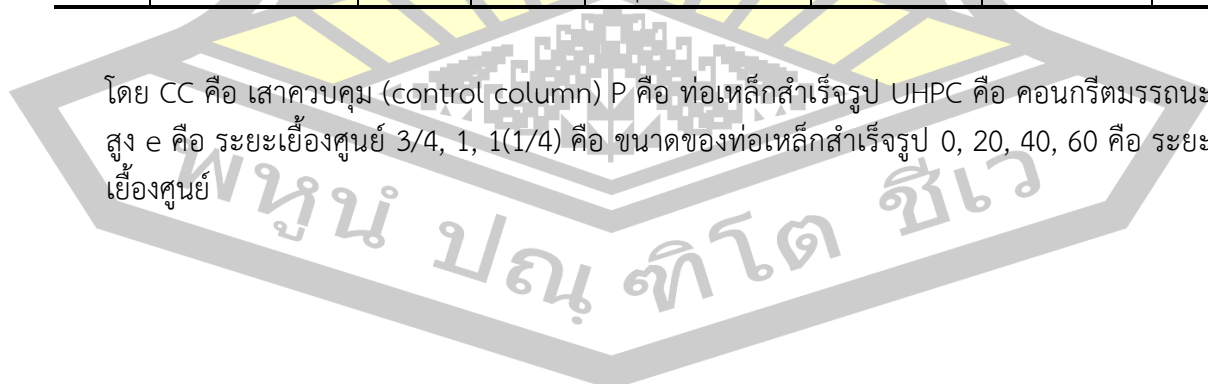


ภาพประกอบ 24 การทดสอบเสาคอนกรีต

ตาราง 9 รหัสตัวอย่างการทดสอบ

ID	Specimen ID	Section		Longitudinal	Transversal	Eccentricity (mm)	e/h
		B (mm)	H (mm)				
1	CC-e0	150	150	4-DB12	RB6 @ 150	0	0
2	CC-e20			4-DB12		20	0.13
3	CC-e40			4-DB12		40	0.27
4	CC-e60			4-DB12		60	0.40
5	P3/4-e0			4-Pipe 3/4"		0	0
6	P3/4-e20			4-Pipe 3/4"		20	0.13
7	P3/4-e40			4-Pipe 3/4"		40	0.27
8	P3/4-e60			4-Pipe 3/4"		60	0.40
9	P1-e0			4-Pipe 1"		0	0
10	P1-e20			4-Pipe 1"		20	0.13
11	P1-e40			4-Pipe 1"		40	0.27
12	P1-e60			4-Pipe 1"		60	0.40
13	P1(1/4)-e0			4-Pipe 1(1/4)"		0	0
14	P1(1/4)-e20			4-Pipe 1(1/4)"		20	0.13
15	P1(1/4)-e40			4-Pipe 1(1/4)"		40	0.27
16	P1(1/4)-e60			4-Pipe 1(1/4)"		60	0.40
17	PUHPC3/4-e0			4-Pipe 3/4"+UHPC		0	0
18	PUHPC3/4-e20			4-Pipe 3/4"+UHPC		20	0.13
19	PUHPC3/4-e40			4-Pipe 3/4"+UHPC		40	0.27
20	PUHPC3/4-e60			4-Pipe 3/4"+UHPC		60	0.40
21	PUHPC1-e0			4-Pipe 1"+UHPC		0	0
22	PUHPC1-e20			4-Pipe 1"+UHPC		20	0.13
23	PUHPC1-e40			4-Pipe 1"+UHPC		40	0.27
24	PUHPC1-e60			4-Pipe 1"+UHPC		60	0.40
25	PUHPC1(1/4)-e0			4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		0	0
26	PUHPC1(1/4)-e20			4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		20	0.13
27	PUHPC1(1/4)-e40			4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		40	0.27
28	PUHPC1(1/4)-e60			4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		60	0.40

โดย CC คือ เสาควบคุม (control column) P คือ ท่อเหล็กสำเร็จรูป UHPC คือ คอนกรีตมรณะสูง e คือ ระยะเยื้องศูนย์ 3/4, 1, 1(1/4) คือ ขนาดของท่อเหล็กสำเร็จรูป 0, 20, 40, 60 คือ ระยะเยื้องศูนย์



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วย

- 4.1 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ
- 4.2 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก
- 4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ
- 4.4 ผลและการอภิปรายผลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 4.5 ผลกระทบของท่อเหล็กสำเร็จรูปและคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อการรับแรงอัดของเสา
คอนกรีต
- 4.6 การทรุดตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 4.7 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

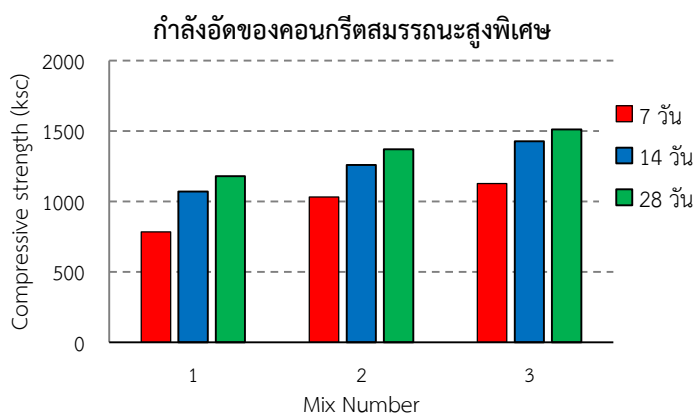
4.1 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษและคอนกรีตทั่วไป

ผลจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษโดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร มีส่วนผสมจำนวน 3 ส่วนผสม รวมทั้งหมด 27 ก้อน บ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งกำลังอัดของแต่ละช่วงอายุ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงที่อายุ 7 วัน พบว่า ส่วนผสมที่ 1 มีกำลังอัดอยู่ที่ 784 กก./ตร.ซม. ส่วนผสมที่ 2 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1070 กก./ตร.ซม. และ ส่วนผสมที่ 3 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1180 กก./ตร.ซม. ในช่วงที่อายุ 14 วัน พบว่าส่วนผสมที่ 1 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1031 กก./ตร.ซม. ส่วนผสมที่ 2 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1260 กก./ตร.ซม. และส่วนผสมที่ 3 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1370 กก./ตร.ซม. ในช่วงที่อายุ 28 วัน พบว่าส่วนผสมที่ 1 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1128 กก./ตร.ซม. ส่วนผสมที่ 2 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1428 กก./ตร.ซม. และส่วนผสมที่ 3 มีกำลังอัดอยู่ที่ 1515 กก./ตร.ซม. จะพบได้ว่าค่ากำลังอัดสูงสุดประเภทที่ 3 มีกำลังอัดที่ 1515 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีอายุที่ 28 วัน แสดงดังตาราง 10 และภาพประกอบ 25

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั่วไป โดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง บ่มที่อุณหภูมิห้องในช่วงที่อายุ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตาราง 25 ในภาคผนวก ก โดยพบว่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตทั้งสามตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 257 กก./ตร.ซม.

ตาราง 10 กำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ

Mix	Compressive strength UHPC (ksc)			Slump (cm)
	7 Days	14 Days	28 Days	
1	784	1031	1128	52
2	1070	1260	1428	54
3	1180	1370	1515	55



ภาพประกอบ 25 กำลังอัดกับร้อยละการแทนที่ในอายุการทดสอบต่างๆ

4.2 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กสำเร็จรูป

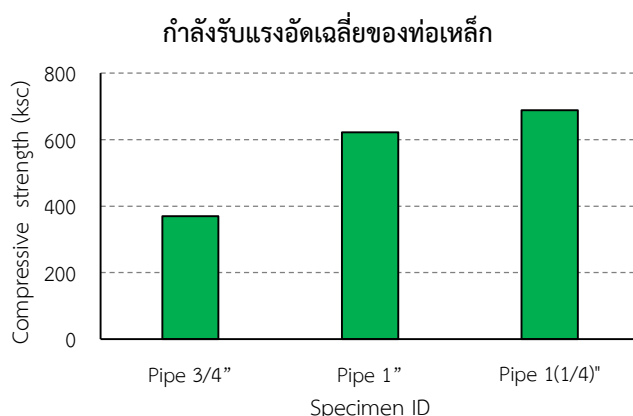
ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก โดยใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว 1 นิ้ว และ 1-1/4 นิ้ว ความยาว 10 เซนติเมตร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ จำนวน 6 ตัวอย่าง

4.3.1 การทดสอบกำลังอัดของท่อเหล็กสำเร็จรูป

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กเปล่า ซึ่งพบว่าตัวอย่างของ ท่อเหล็กขนาด 3/4 นิ้ว มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 370 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็กขนาด 1 นิ้ว มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 662 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็ก ขนาด 1-1/4 นิ้ว มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 689 กก./ตร.ซม. แสดงดังตาราง 11 และภาพประกอบ 26

ตาราง 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก

ตัวอย่าง	Compressive strength Pipe (ksc)			
	1	2	3	Average
Pipe 3/4"	365	375	369	370
Pipe 1"	647	596	624	622
Pipe 1-1/4"	687	690	691	689



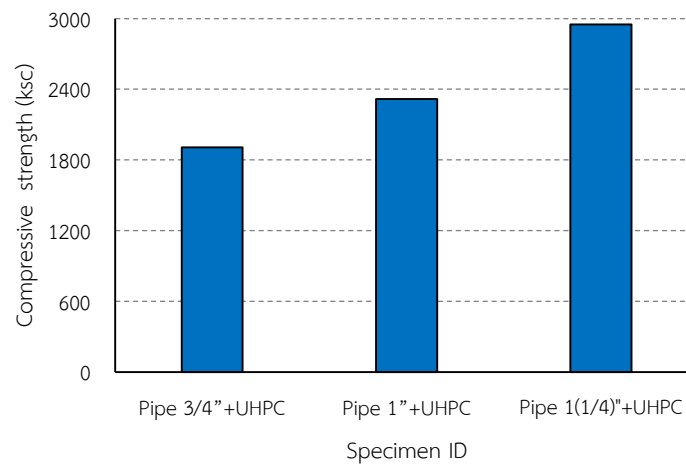
ภาพประกอบ 26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็ก

4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ

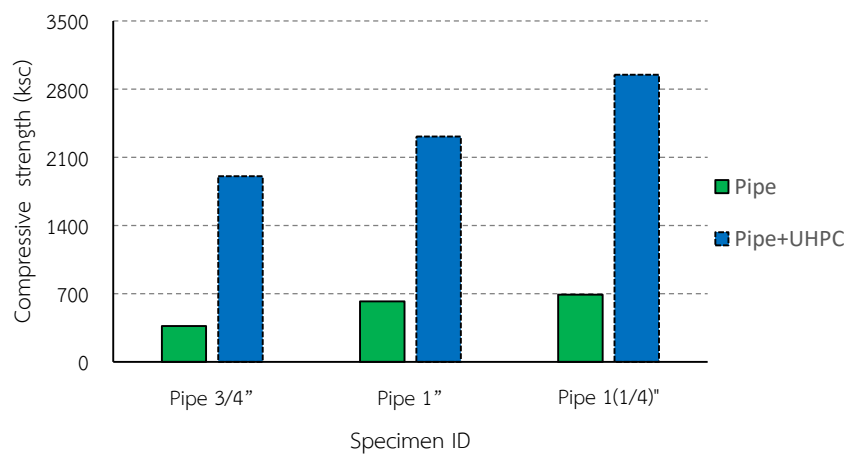
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่กรอกคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ซึ่งพบว่าท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ขนาด 1(1/4) นิ้ว ทั้งสองตัวอย่างรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 2900 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ขนาด 1 นิ้ว ทั้ง 3 ตัวอย่างรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 2316 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ขนาด 3/4 นิ้ว ทั้ง 3 ตัวอย่างรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 1907 กก./ตร.ซม. แสดงดังตาราง 12 และภาพประกอบ 27 และภาพประกอบที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบ ระหว่าง ท่อเหล็กสำเร็จรูป และ ท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง เห็นได้ว่าเมื่อบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงแล้วกำลังอัดของท่อเหล็กสำเร็จรูป เพิ่มขึ้น สูงสุดถึง 2950 กก./ตร.ซม. ที่ขนาดท่อ 1 ¼ นิ้ว

ตาราง 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ

Example	Day	Compressive strength Pipe+ UHPC (ksc)			
		1	2	3	Average
Pipe 3/4"	28	1,826	1,987	1909	1907
Pipe 1"	28	2,295	2,336	2318	2316
Pipe 1-1/4"	28	3,016	2,883	2951	2950



ภาพประกอบ 27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ



ภาพประกอบ 28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ

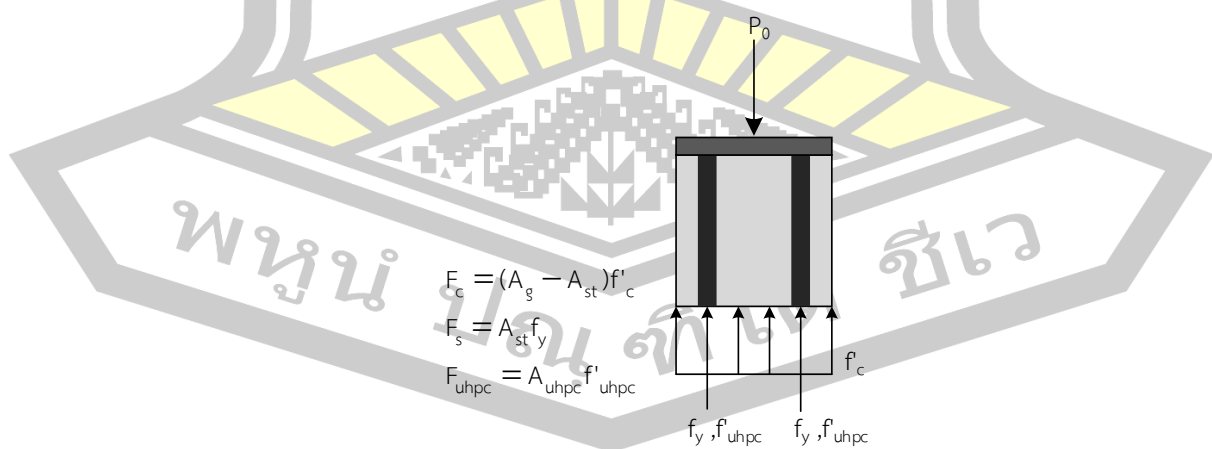
4.4 ผลและการอภิปรายผลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.5.1 ความสามารถในการรับกำลังในแนวแกนและแรงเยื้องศูนย์

จากผลการทดลองในตาราง 13 พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตควบคุม (CC) ($e=0$) มีค่าเท่ากับ 51086 กก. เมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูป ขนาด $\frac{3}{4}$, 1, และ $1\frac{1}{4}$ พบว่า มีค่าเท่ากับ 36721 36709 และ 43051 กก. ตามลำดับ มีค่าลดลง ซึ่งผลกระทบที่ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปลดลง มีผลมาจาก ค่า A_g ที่ลดลงเมื่อขนาดท่อมีขนาดเพิ่มขึ้น ค่า f_y และ A_{st} ของเหล็กลดลง โดยค่า f_y จาก 3,743 กก./ตร.ซม. เป็น 2,444 กก./ตร.ซม. และจากปริมาณหน้าตัดเดิมเป็น เหล็กเสริม DB12 มม. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.52 ตร.ซม. เป็น 3.92 4.95 และ 6.26 ตร.ซม. ที่ขนาดท่อเหล็กสำเร็จรูป ขนาด $\frac{3}{4}$, 1, และ $1\frac{1}{4}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็กชนิดเสาปลอกเดี่ยว ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (4.1)$$

และเมื่อพิจารณาการแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ พบว่า ค่าความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 52977 61264 และ 74794 กก. ที่ขนาดท่อเหล็กสำเร็จรูป ขนาด $\frac{3}{4}$, 1, และ $1\frac{1}{4}$ ตามลำดับ มากกว่าเสา คอนกรีตควบคุม (CC) ทั้งนี้เนื่องจากเสาคอนกรีตได้รับกำลังจากพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต สมรรถนะสูงในท่อ พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเปลี่ยนไป โดยเปลี่ยนจาก f'_c เป็น f'_{uhpc} และ A_{st} เป็น A_{UHPC} ดังแสดงในภาพประกอบ 29 และสมการที่ 4.2 ซึ่งตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาในสมการนี้ คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง (f'_{uhpc}) และปริมาณหน้าตัดจึงทำให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 29 พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง

$$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{\text{pipe}}) + f_y A_{\text{pipe}} + 0.85f'_{\text{uhpc}} A_{\text{uhpc}} \quad (4.2)$$

เมื่อ f'_{uhpc} คือ กำลังคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ A_{uhpc} คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษในท่อเหล็กสำเร็จรูป และ A_{pipe} คือ พื้นที่หน้าตัดท่อเหล็กสำเร็จรูป

โดยพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ในท่อเหล็กสำเร็จรูป (A_{uhpc}) ขนาด 1 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 31.37 ตร.ซม. ที่กำลังอัด (f'_{uhpc}) 1,515 กก./ตร.ซม. จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเพิ่มขึ้น มากกว่าเสาคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในตัวอย่างการคำนวณของเสาที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (UHPC)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad P_n &= 0.85f'_c (A_g - A_{\text{pipe}}) + f_y A_{\text{pipe}} + 0.85f'_{\text{uhpc}} A_{\text{uhpc}} \\ &= 0.85(257)(225 - 36.32) + (2444.34)(4.95) + 0.85(1515)(31.37) \\ &= 93705 \text{ กก.} \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ} \quad f'_c = 257 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$f'_{\text{uhpc}} = 1,515 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$f_y = 2,444 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{pipe+uhpc}} = 4 \left(\frac{\pi(3.4)^2}{4} \right) = 36.32 \text{ ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{uhpc}} = 31.37$$

จะเห็นได้ว่า จากพื้นที่หน้าตัดและ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.2 แล้ว ส่งผลให้ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักในแนวแกนจากการคำนวณมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 13 และ ภาพประกอบที่ 33

เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางจากแนวแกน พบว่าเสาคอนกรีตควบคุม (CC) กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ตามระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 42131 31038 และ 22976 กก. ที่ค่าการเยื้องศูนย์กลาง 20, 40 และ 60 มม. ($e=20, 40, 60$) ตามลำดับ จากนั้นเมื่อแทนเหล็กเสริมตามยาวด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว (P3/4) พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงและลดลงตามระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 32178, 23318, และ 14480 ค่าการเยื้องศูนย์กลาง 20, 40 และ 60 มม. ($e=20, 40, 60$) ตามลำดับ

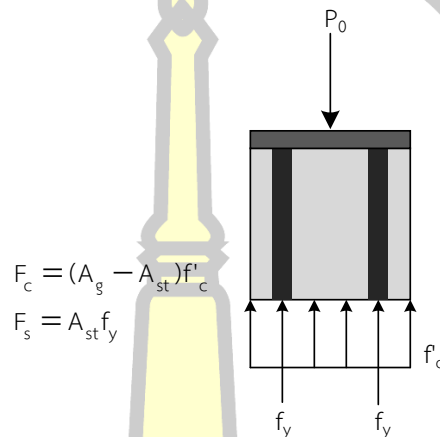
ตาราง 13 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

Specimen ID	Longitudinal	Transversal	Eccentricity (mm)	e/h	Peak load Calculate (kg)	Peak load Experiment (kg)	Moment Calculate (kg-m)	Moment Experiment (kg-m)	Vertical Deflection (mm)	Lateral Deflection (mm)
CC-e0	4-DB12		0	0	65095.94	51086.97	0.00	0.00	1.38	0
CC-e20	4-DB12		20	0.13	45133.58	42131.24	904.78	842.62	0.94	0.74
CC-e40	4-DB12		40	0.27	30221.20	31037.93	1209.70	1241.52	0.75	1.34
CC-e60	4-DB12		60	0.40	21019.74	22976.13	1261.56	1378.57	0.63	1.92
P3/4-e0	4-Pipe 3/4"		0	0	53657.41	36720.99	0.00	0.00	1.04	0
P3/4-e20	4-Pipe 3/4"		20	0.13	36611.52	32178.41	732.61	643.57	0.65	0.57
P3/4-e40	4-Pipe 3/4"		40	0.27	24514.01	23317.59	980.74	932.70	0.56	1.08
P3/4-e60	4-Pipe 3/4"		60	0.40	16428.95	14479.74	985.36	868.78	0.5	1.75
P1-e0	4-Pipe 1"	RB6 @ 150	0	0	53307.85	36709.20	0.00	0.00	1.17	0
P1-e20	4-Pipe 1"		20	0.13	35068.65	32467.66	702.01	649.35	0.78	0.63
P1-e40	4-Pipe 1"		40	0.27	23200.64	23118.39	926.90	924.74	0.58	1.24
P1-e60	4-Pipe 1"		60	0.40	15671.60	14887.62	939.63	893.26	0.55	1.92
P1(1/4)-e0	4-Pipe 1(1/4)"		0	0	51935.17	43051.11	0.00	0.00	1.29	0
P1(1/4)-e20	4-Pipe 1(1/4)"		20	0.13	31922.57	32982.62	639.20	659.65	0.83	0.85
P1(1/4)-e40	4-Pipe 1(1/4)"		40	0.27	20844.63	22348.80	833.80	893.95	0.62	1.37
P1(1/4)-e60	4-Pipe 1(1/4)"		60	0.40	14501.92	15573.18	870.24	934.39	0.59	2.15

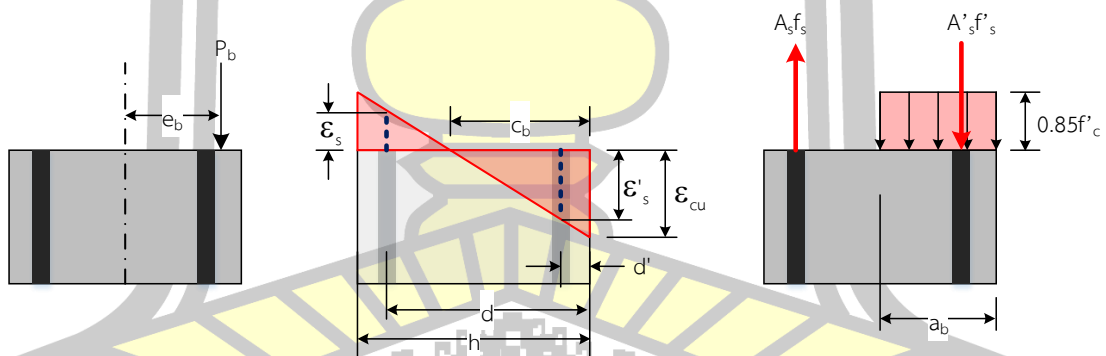
ตาราง 13 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ (ต่อ)

Specimen ID	Longitudinal	Transversal	Eccentricity (mm)	e/h	Peak load Calculate (kg)	Peak load Experiment (kg)	Moment Calculate (kg-m)	Moment Experiment (kg-m)	Vertical Deflection (mm)	Lateral Deflection (mm)
PUHPC3/4-e0	4-Pipe 3/4"+UHPC		0	0	78539.98	52977.45	0.00	0.00	1.48	0
PUHPC3/4-e20	4-Pipe 3/4"+UHPC		20	0.13	44325.72	47273.81	888.50	945.48	0.97	1.43
PUHPC3/4-e40	4-Pipe 3/4"+UHPC		40	0.27	27795.23	33212.56	1112.17	1328.50	0.83	1.78
PUHPC3/4-e60	4-Pipe 3/4"+UHPC		60	0.40	17189.13	19029.32	1031.96	1141.76	0.65	2.97
PUHPC1-e0	4-Pipe 1"+UHPC		0	0	93705.45	61263.58	0.00	0.00	1.61	0
PUHPC1-e20	4-Pipe 1"+UHPC		20	0.13	46157.28	38826.16	924.18	776.52	1.12	2.13
PUHPC1-e40	4-Pipe 1"+UHPC		40	0.27	26710.01	31987.34	1069.36	1279.49	0.93	2.63
PUHPC1-e60	4-Pipe 1"+UHPC		60	0.40	17284.49	19236.09	1037.53	1154.1654	0.77	3.14
PUHPC1(1/4)-e0	4-Pipe 1(1/4)" +UHPC	RB6 @ 150	0	0	117639.12	74793.82	0.00	0.00	1.98	0
PUHPC1(1/4)-e20	4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		20	0.13	46132.41	49149.54	924.78	982.99	1.44	1.83
PUHPC1(1/4)-e40	4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		40	0.27	24887.41	31328.21	994.34	1253.13	1.12	2.96
PUHPC1(1/4)-e60	4-Pipe 1(1/4)" +UHPC		60	0.40	16239.91	21176.52	974.93	1270.59	0.98	3.38

และเมื่อพิจารณาการเสริมเหล็กด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูป ที่ขนาด 1 และ 1 ¼ นิ้ว พบว่าแนวโน้มของความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนและเยื้องศูนย์ที่ระยะต่างๆ มีค่าลดลงในลักษณะเดียวกันกับการเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด ¾ นิ้ว ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกนเกิดขึ้น การกระจายความเครียดที่เกิดจากแรงกระทำได้เปลี่ยนไปจากเดิมในภาพประกอบ 30 และสมการของกำลังรับแรงอัด P_n เปลี่ยนจาก สมการที่ 4.3 เป็นสมการที่ 4.5



ภาพประกอบ 30 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน



ภาพประกอบ 31 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกน

$$P_n = 0.85f'_c ab + A'_s f'_s - A_s f_s \quad (4.3)$$

เมื่อ a คือ ความลึกของบล็อกหน่วยแรง และ b คือ ความลึกของหน้าตัดเสา

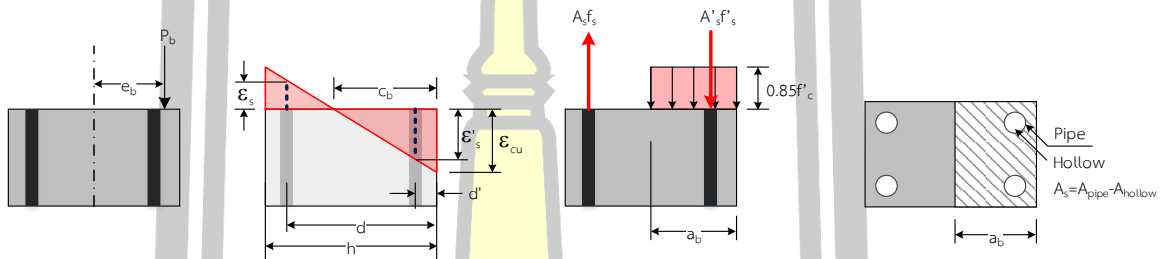
และเพื่อเป็นการกำหนดสมการในการคำนวณให้อยู่ในเงื่อนไขเดียวกัน เพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับผลการทดลอง จากผลกระทบที่แทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูป และท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง จึงเปลี่ยนจากสมการ ที่ 4.3 เป็นสมการที่ 4.4

สำหรับเหล็กเสริมทั่วไป และ สมการที่ 4.5 สำหรับเหล็กเสริมที่เป็นท่อสำเร็จรูป ดังแสดงใน ภาพประกอบ 32

$$P_n = 0.85f_c (ab - A_{st}) + A'_s f'_s - A_s f_s \quad (4.4)$$

$$P_n = 0.85f_c (ab - (A_{\text{pipe}} + A_{\text{hollow}})) + A'_{\text{pipe}} f'_s - A_s f_s \quad (4.5)$$

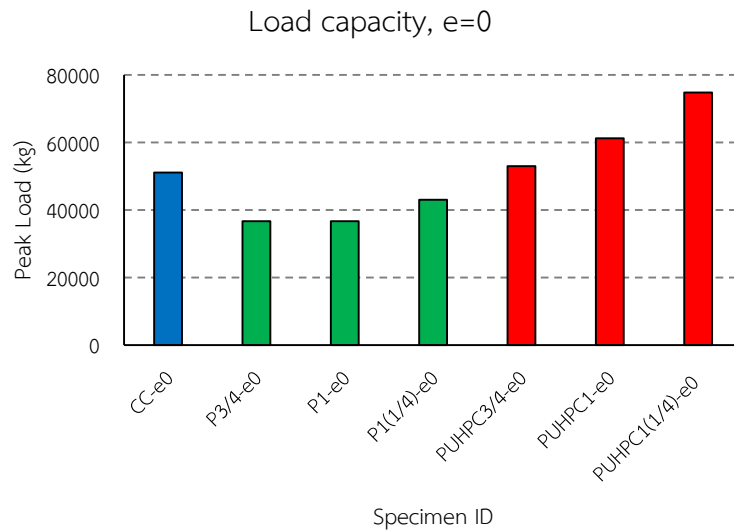
โดย A_{pipe} คือ พื้นที่หน้าตัดท่อเหล็กสำเร็จรูป และ A_{hollow} = พื้นที่หน้าตัดที่ว่างภายในท่อ



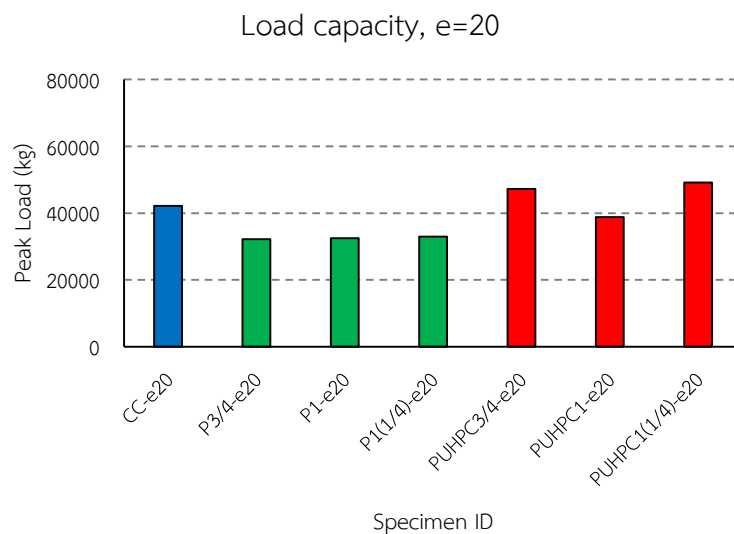
ภาพประกอบ 32 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูป

จากสมการที่ 4.5 เห็นได้ว่า เมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูป พื้นที่หน้าตัด ความลึกของบล็อกหน่วยแรงกับความลึกของเสา (ab) ลดลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่ว่างภายในท่อ (A_{hollow}) เพิ่มขึ้น จากขนาดที่เพิ่มขึ้น และค่า f_y ของท่อเหล็กสำเร็จรูปลดลงจาก 3,743 กก./ตร.ซม. เป็น 2,444 กก./ตร.ซม. จึงทำให้ค่าความสามารถในการรับกำลังของเสาคอนกรีตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 13

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาว่าการเสริมเหล็กด้วยท่อสำเร็จรูปทั้ง 3 ขนาด พบว่าเสา คอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาดใหญ่กว่า มีความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนและ เยื้องศูนย์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณพื้นที่หน้าตัดท่อเหล็กสำเร็จรูป (A_{pipe}) เพิ่มขึ้น ซึ่ง สอดคล้องกับสมการที่ 4.5 และ ภาพประกอบที่ 33 ถึง 34



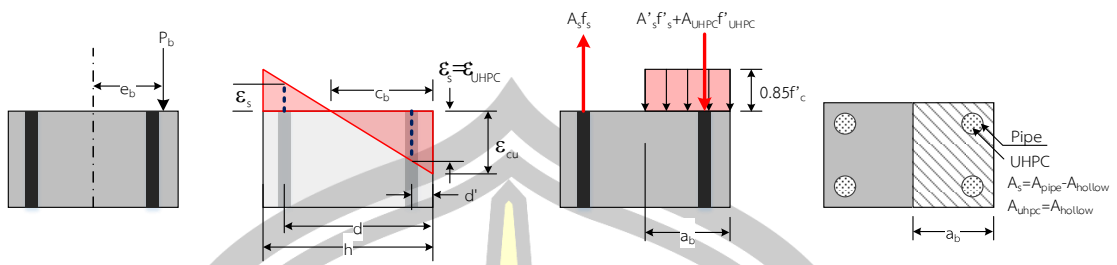
ภาพประกอบ 33 ความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกน (e=0)



ภาพประกอบ 34 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 20 มม. (e=20)

เมื่อพิจารณาการแทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง จากสมการการคำนวณการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตที่ 4.5 จึงเป็นสมการที่ 4.6

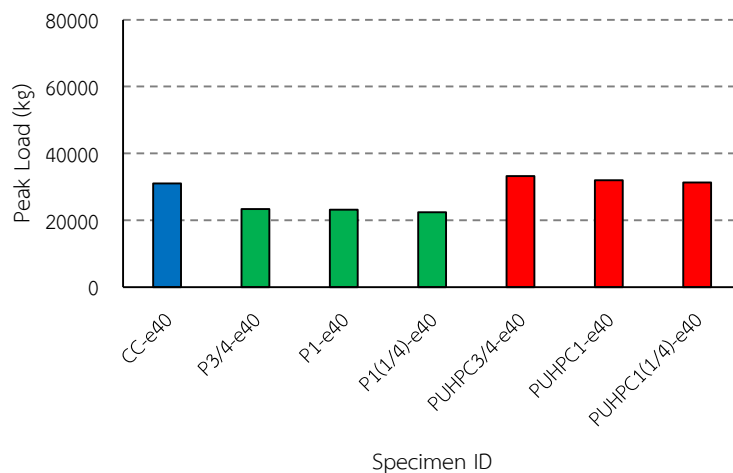
$$P_n = 0.85f'_c (ab - (A_{\text{pipe}} + A_{\text{uhpc}})) + A'_s f'_s + A'_{\text{uhpc}} 0.85f'_{\text{uhpc}} - A_s f_s \quad (4.6)$$



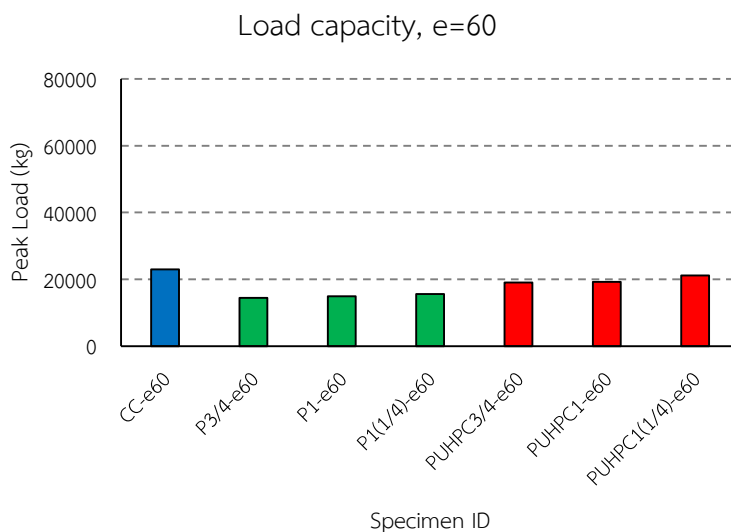
ภาพประกอบ 35 พฤติกรรมและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีระยะเยื้องจากแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง

โดยเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว ที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็ก (PUHPC3/4) พบว่า เมื่อระยะเยื้องศูนย์จากแนวแกนเพิ่มขึ้น การรับแรงอัดมีค่าลดลง ตามระยะเยื้องศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4.6 โดยมีค่าเท่ากับ 47274 33213 และ 19029 กก. ที่ค่าการเยื้องศูนย์ 20, 40 และ 60 มม. (e=20, 40, 60) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่การเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 และ 1 1/4 นิ้ว ที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็ก (PUHPC1 และ PUHPC1(1/4)) พบว่า มีค่าเท่ากับ 38826 31987 และ 19236 กก. และ PUHPC1(1/4) มีค่าเท่ากับ 49150 31328 และ 21177 กก. ที่ค่าการเยื้องศูนย์ 20, 40 และ 60 มม. (e=20, 40, 60) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4.6 ดังแสดงในตาราง 13 และภาพประกอบ 36 ถึง 37

Load capacity, e=40



ภาพประกอบ 36 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ระยะเยื้องศูนย์ 40 มม. (e=40)



ภาพประกอบ 37 ความสามารถในการรับแรงอัดที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 60 มม. ($e=60$)

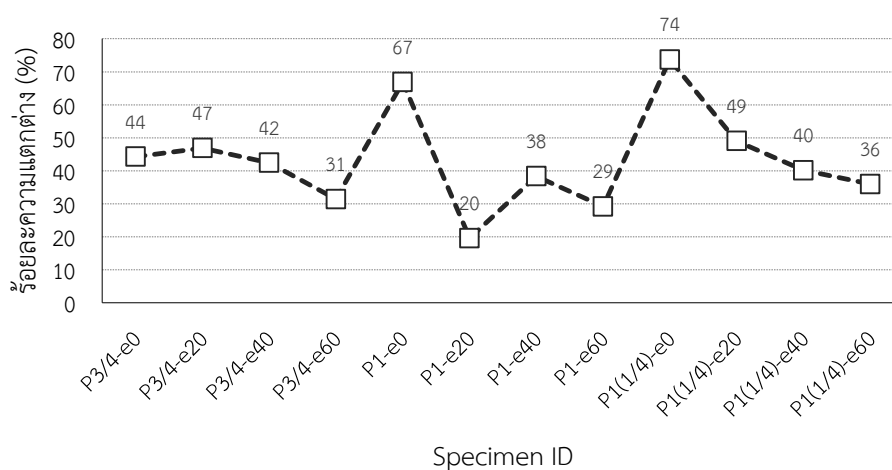
4.5 ผลกระทบของท่อเหล็กสำเร็จรูปและคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อการรับแรงอัดของเสาคอนกรีต

จากผลการทดลองในตาราง 13 พบว่าเมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปค่ากำลังการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากค่าพื้นที่ของคอนกรีตในเสา (A_g) ลดลงถูกแทนที่ด้วยพื้นที่ว่างในท่อ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในเสาคอนกรีตลดลง และ ค่า f_y ของท่อเหล็กสำเร็จรูป มีค่าน้อยกว่า ค่า f_y ของเหล็กเสริม ส่งผลให้ ค่ากำลังรับแรงอัดของเหล็กเสริม ($f's$) มีค่าน้อยลงตามไปด้วย นอกจากนี้พื้นที่หน้าตัดของเหล็ก ในท่อเหล็กสำเร็จรูป มีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริมทั่วไป (CC) จึงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีผลต่อค่าการรับกำลังอัดของเสา พบว่า เมื่อแทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง ส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดของเสาคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ากำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง f'_{uhpc} ในท่อเหล็กสำเร็จรูป และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยพิจารณาประสิทธิภาพของท่อเหล็กสำเร็จรูปกับท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า มีค่าการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตมากที่สุด ร้อยละ 73.73 และลดลงเมื่อมีระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น ดังแสดงในตาราง 14 และภาพประกอบ 38

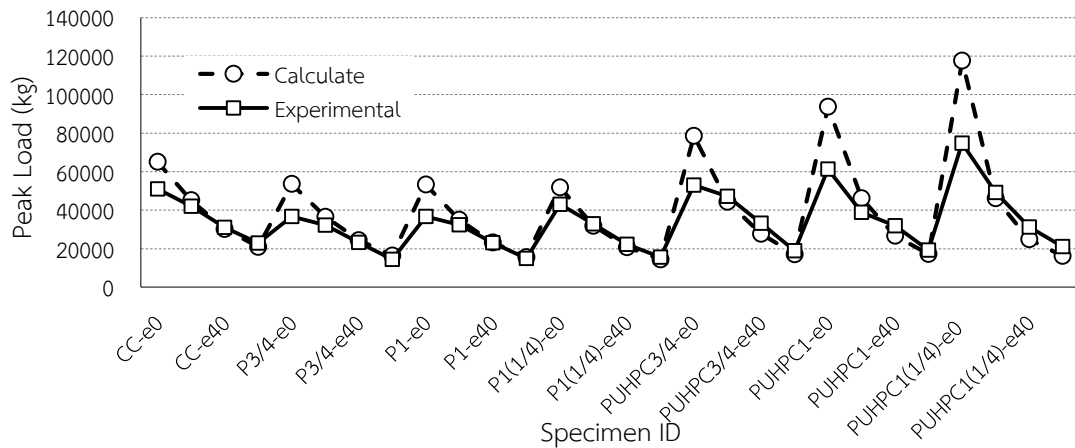
ตาราง 14 ร้อยละความแตกต่างของกำลังรับแรงอัด ระหว่างท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็กสำเร็จรูป
ที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง

Specimen ID	Peak load (Exp)	Specimen ID	Peak load (Exp)	Different (%)
P3/4-e0	36720.99	PUHPC3/4-e0	52977.45	44.270
P3/4-e20	32178.41	PUHPC3/4-e20	47273.81	46.912
P3/4-e40	23317.59	PUHPC3/4-e40	33212.56	42.436
P3/4-e60	14479.74	PUHPC3/4-e60	19029.32	31.420
P1-e0	36709.20	PUHPC1-e0	61263.58	66.889
P1-e20	32467.66	PUHPC1-e20	38826.16	19.584
P1-e40	23118.39	PUHPC1-e40	31987.34	38.363
P1-e60	14887.62	PUHPC1-e60	19236.09	29.209
P1(1/4)-e0	43051.11	PUHPC1(1/4)-e0	74793.82	73.733
P1(1/4)-e20	32982.62	PUHPC1(1/4)-e20	49149.54	49.016
P1(1/4)-e40	22348.80	PUHPC1(1/4)-e40	31328.21	40.178
P1(1/4)-e60	15573.18	PUHPC1(1/4)-e60	21176.52	35.981



ภาพประกอบ 38 ร้อยละความแตกต่างของกำลังรับน้ำหนักระหว่างท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็ก
สำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการรับกำลังอัดของเสาคอนกรีตระหว่างผลการทดลองกับค่ากำลังอัดจากกาคำนวณ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 39

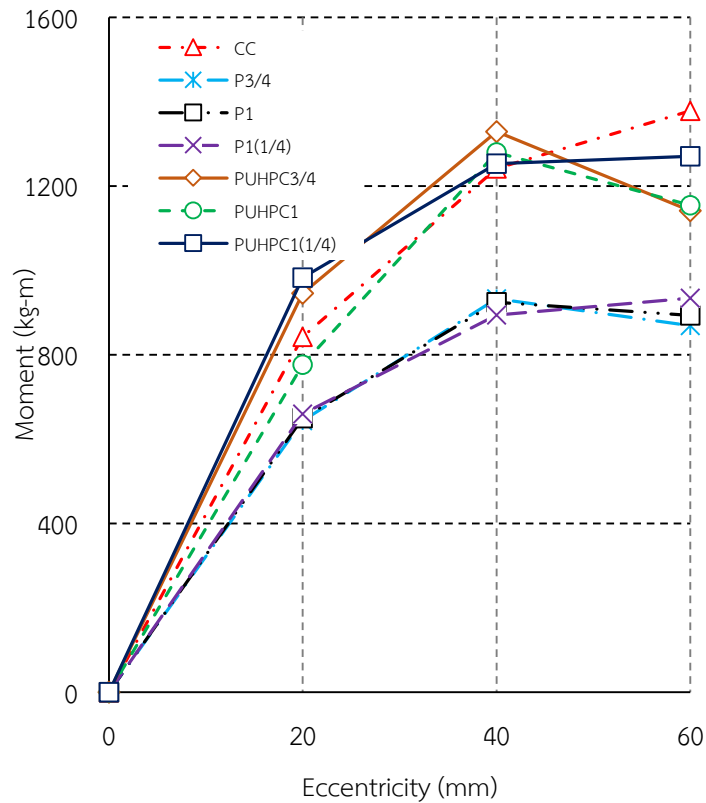


ภาพประกอบ 39 กำลังอัดสูงสุดที่สภาวะการเยื้องศูนย์ต่างๆของเสาคอนกรีต

4.5.1 โมเมนต์ดัดในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อแรงกดกระทำที่ระยะเยื้องศูนย์จากแนวแกนที่ 20, 40, และ 60 มม. ($e=20, 40, 60$) และจากสมการ $M_n = P_n e$ ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดดังแสดงในตารางที่ 133 โดย ค่าโมเมนต์ดัดของเสาคอนกรีตควบคุม (CC) ที่ระยะเยื้องศูนย์ 20 มม. ($e=20$) มีค่าเท่ากับ 843 กก.-ม. ที่ ($e=40$) มีค่าเท่ากับ 1242 กก.-ม. ที่ ($e=60$) มีค่าเท่ากับ 1379 กก.-ม. และเมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ที่ ($e=20$) พบว่าโมเมนต์ดัดมีค่าน้อยกว่าเสาคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ 644 กก.-ม. ที่ ($e=40$) มีค่าเท่ากับ 933 กก.-ม. ที่ ($e=60$) มีค่าเท่ากับ 869 กก.-ม. และเมื่อพิจารณาการแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปและเหล็กสำเร็จรูปที่เติมด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่าโมเมนต์ดัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีต โดยเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง PUHPC มีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดของเสาคอนกรีตควบคุม (CC) ดังแสดงในตาราง 13 และภาพประกอบ 40

พูน ปณ ทิโต ชิว



ภาพประกอบ 40 โมเมนต์ดัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาดต่างๆ

4.5.2 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) และรูปแบบการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากสมการที่ 4.7

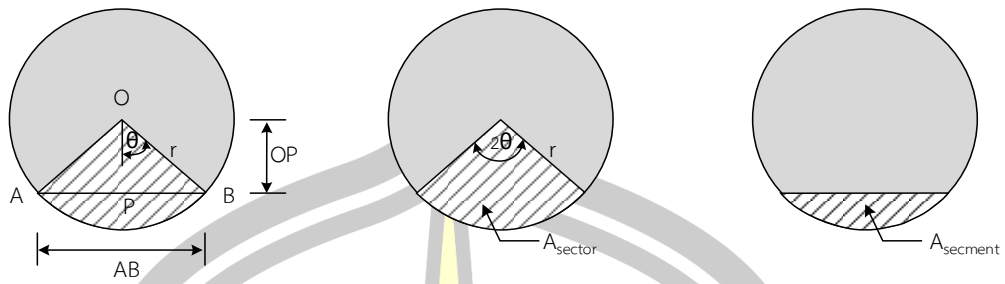
$$P_{nb} = C_c + C_s - T \quad (4.7)$$

และเพื่อให้ค่า พื้นที่หน่วยแรงอัดอยู่ในเงื่อนไขเดียวกัน เมื่อแทนที่เหล็กเสริมเป็นท่อเหล็กสำเร็จรูป สมการจึงแทนที่ จากสมการที่ 4.8 เป็นสมการที่ 4.9

$$C_c = 0.85f_c a_b b \quad (4.8)$$

$$C_c = 0.85f_c (a_b b - A'_s) \quad (4.9)$$

และเพื่อให้ได้ พื้นที่ A'_s และนำไปหักล้างจากพื้นที่ หน่วยแรงอัด ab ดังนั้น การหาพื้นที่เหล็กเสริม และพื้นที่ท่อเหล็กสำเร็จรูปจึงหาได้จาก สมการที่ 4.11 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 41



ภาพประกอบ 41 การหาพื้นที่เหล็กเสริมและพื้นที่ท่อเหล็กสำเร็จรูป

$$A_{\text{triangle}} = \frac{1}{2}(AB)(OP) \quad (4.10)$$

$$A_{\text{segment}} = A_{\text{sector}} - A_{\text{triangle}} \quad (4.11)$$

เมื่อ

$$A_{\text{sector}} = \pi r^2 \left(\frac{2\theta^\circ}{360^\circ} \right) \quad (4.12)$$

$$AB = 2AP \quad (4.13)$$

$$AP = r \sin \theta \quad (4.14)$$

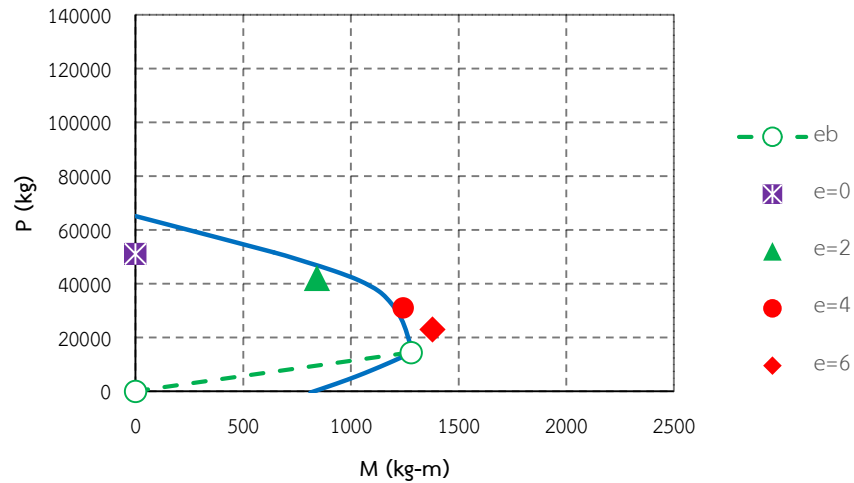
$$\theta = \arccos\left(\frac{OP}{r}\right) \quad (4.15)$$

เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) $P_n - M_n$ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC) และจากสมการที่ 4.16

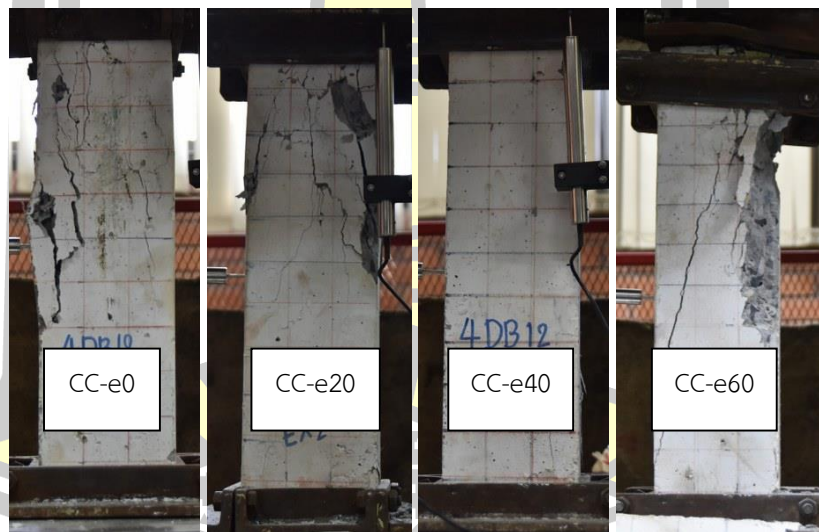
$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} \quad (4.16)$$

พบว่าสถานะสมดุลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 89.0$ มม. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลาง เป็น 20 40 และ 60 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures ดังแสดงใน ภาพประกอบ 42 และ 43

Interaction Diagram



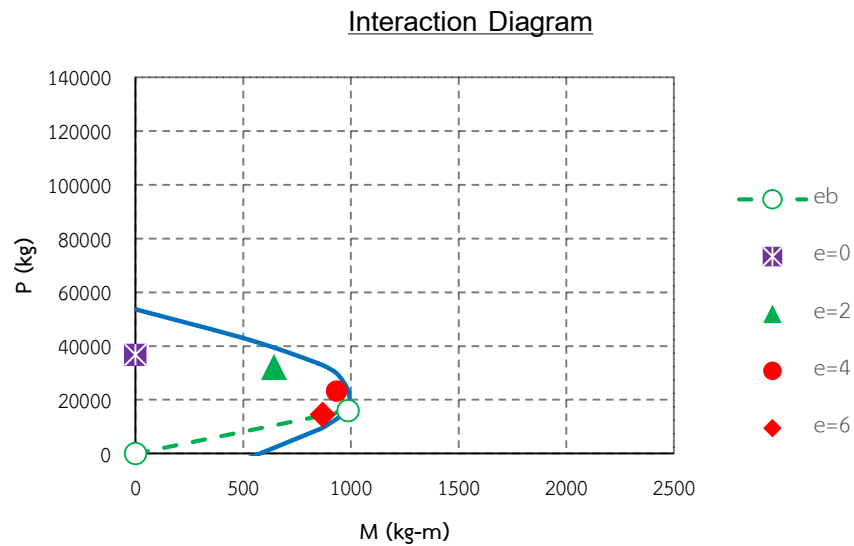
ภาพประกอบ 42 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC)



ภาพประกอบ 43 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) P_n - M_n ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว (P3/4) พบว่า พบว่าสถานะสมดุลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 61.5$ มม. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์ เป็น 20 40 และ 60 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่

ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกับกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 44 และ 45



ภาพประกอบ 44 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4)



ภาพประกอบ 45 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) P_n - M_n ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1) พบว่า พบว่าสถานะสมมูลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 70.6$ มม. เมื่อ เพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลาง เป็น 20 40 และ 60 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม ดังแสดงในตัวอย่างรายการคำนวณ และภาพประกอบที่ 46 และ 47

ตัวอย่างการคำนวณที่สถานะสมมูลการวิบัติ

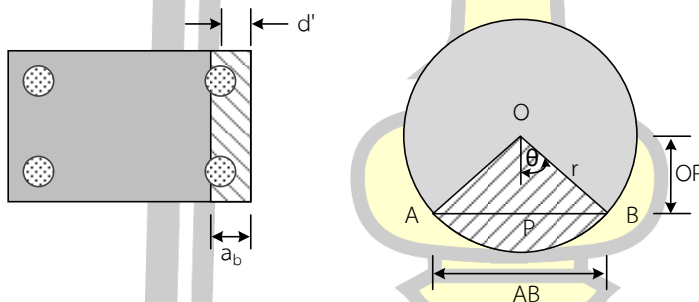
$$\epsilon_{cu} = 0.003$$

$$c_b = \frac{6120d}{f_y + 6120} = \frac{6120(9.7)}{2444 + 6120} = 6.93 \text{ ซม.}$$

$$a_b = \beta_1 c_b = (0.85)(6.93) = 5.89 \text{ ซม.}$$

$$f_s = f_y = 2444 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$f'_s = \frac{6120(c_b - d')}{c_b} = \frac{6120(6.93 - 5.3)}{6.93} = 1440.52 \text{ กก./ตร.ซม.}$$



$$OP = a_b - d' = 5.89 - 5.3 = 0.59 \text{ ซม.}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{OP}{r}\right) = \arccos\left(\frac{0.59}{1.7}\right) = 69.63 \text{ องศา}$$

$$AP = r \sin \theta = 1.7 \sin(69.63) = 1.59 \text{ ซม.}$$

$$AB = 2AP = 2(1.59) = 3.19 \text{ ซม.}$$

$$A_{\text{sector}} = \pi r^2 \left(\frac{2\theta^\circ}{360^\circ} \right) = 3.14(1.7)^2 \left(\frac{2(69.63)}{360} \right) = 3.51 \text{ ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{triangle}} = \frac{1}{2}(AB)(OP) = \frac{1}{2}(3.19)(0.59) = 0.94 \text{ ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{segment}} = A_{\text{sector}} - A_{\text{triangle}} = 3.51 - 0.94 = 2.57 \text{ ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{pipe,c}} = A_{\text{stg}} - A_{\text{segment}} = 9.08 - 2.57 = 6.51 \text{ ตร.ซม.}$$

$$C_c = 0.85f_c (a_b b - A_{\text{pipe}}) = 0.85(257) ((5.89)(15) - 2(6.51)) = 16461.61 \text{ กก.}$$

$$T = A_s f_s = 2(1.237)(2444) = 6045.00 \text{ กก.}$$

$$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f_c) = 2(1.237)(1440.52 - 0.85(257)) = 3022.24 \text{ กก.}$$

$$P_{nb} = C_c + C_s - T = 16461.61 + 3022.24 - 6045.00 = 13438.85 \text{ กก.}$$

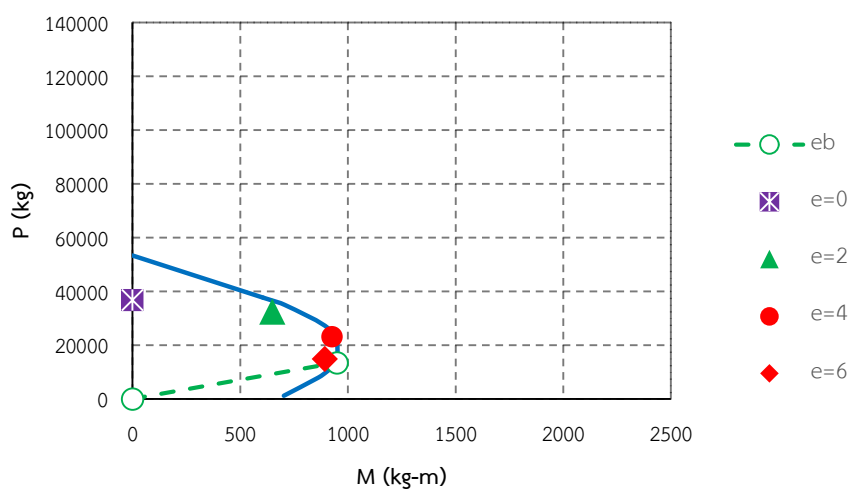
$$M_{nb} = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

$$= \left[16461.61 \left(\frac{15}{2} - \frac{5.89}{2} \right) + 3022.24 \left(\frac{15}{2} - 5.3 \right) - 6045.00 \left(9.7 - \frac{15}{2} \right) \right] (0.01)$$

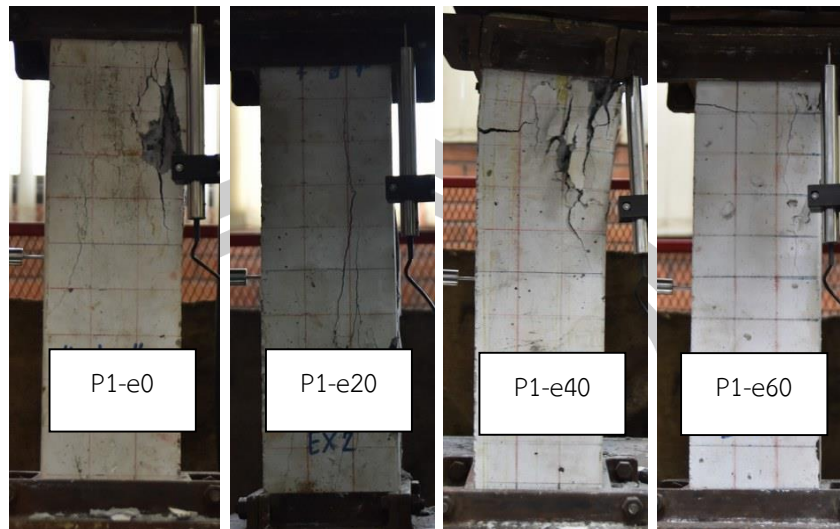
$$= 949.16 \text{ กก.}\cdot\text{ม.}$$

$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} = \frac{949.16}{13438.85} (100) = 7.06 \text{ ซม.}$$

Interaction Diagram



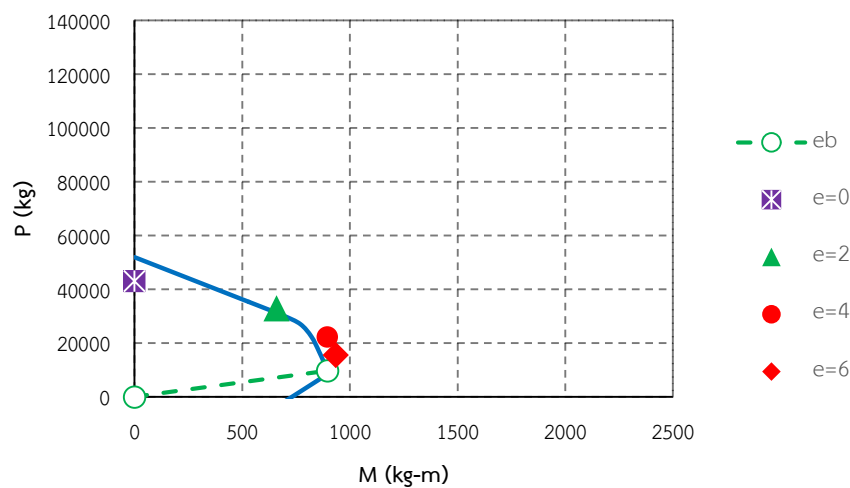
ภาพประกอบ 46 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1)



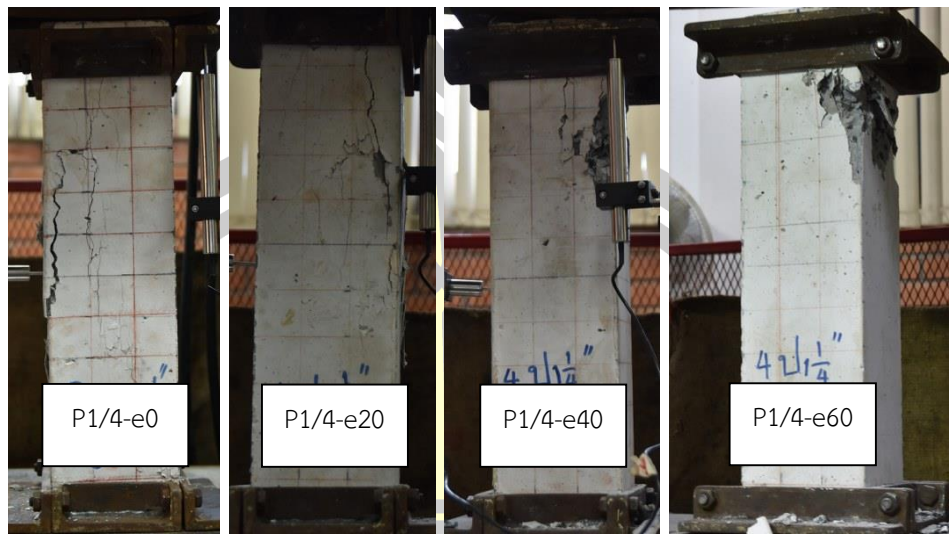
ภาพประกอบ 47 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1) ในแนวแกน และที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) P_n-M_n ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 ¼ นิ้ว (P1(1/4)) พบว่าสถานะสมดุลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 91.9$ มม. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลาง เป็น 20 40 และ 60 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 48 และ 49

Interaction Diagram

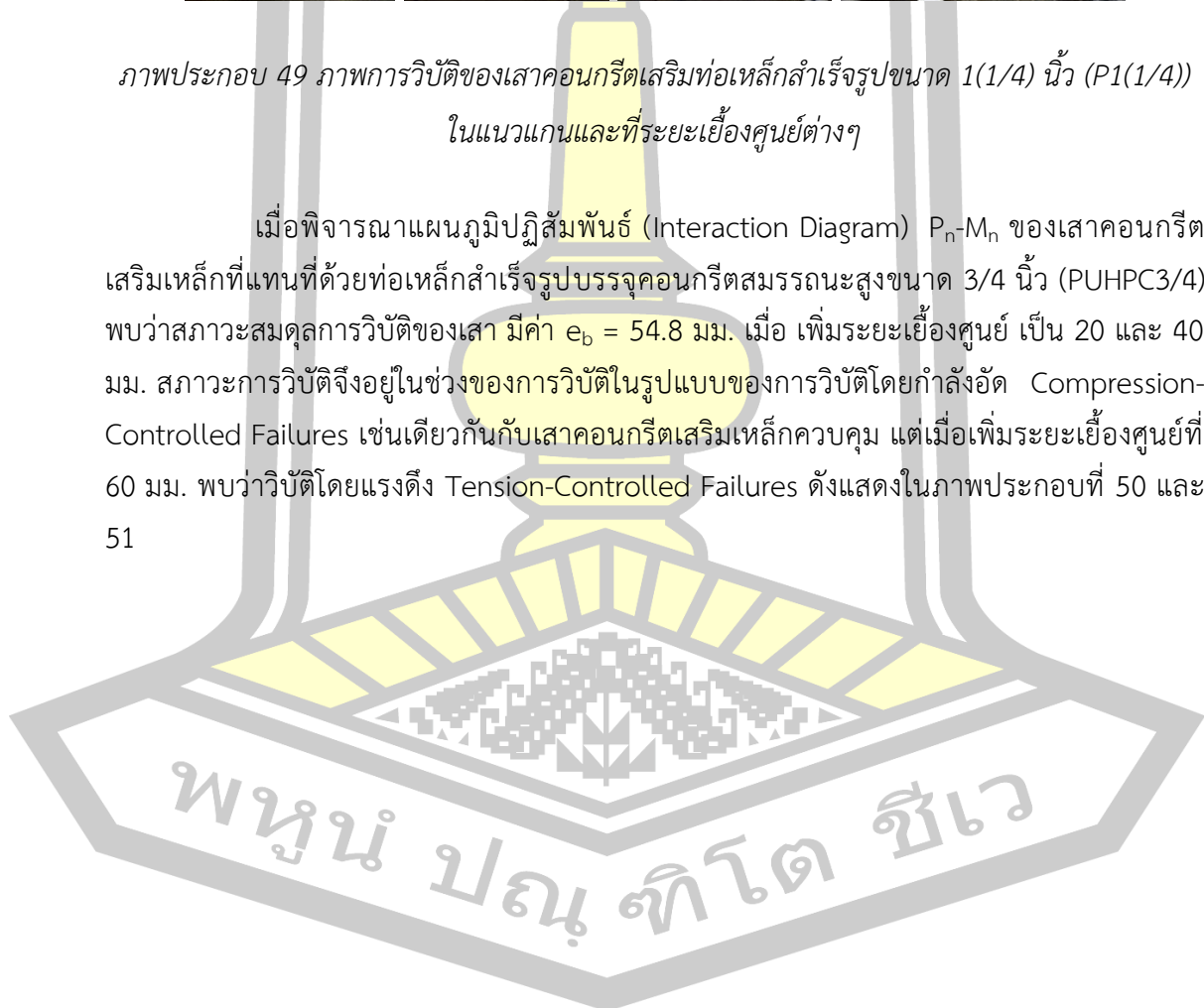


ภาพประกอบ 48 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4))

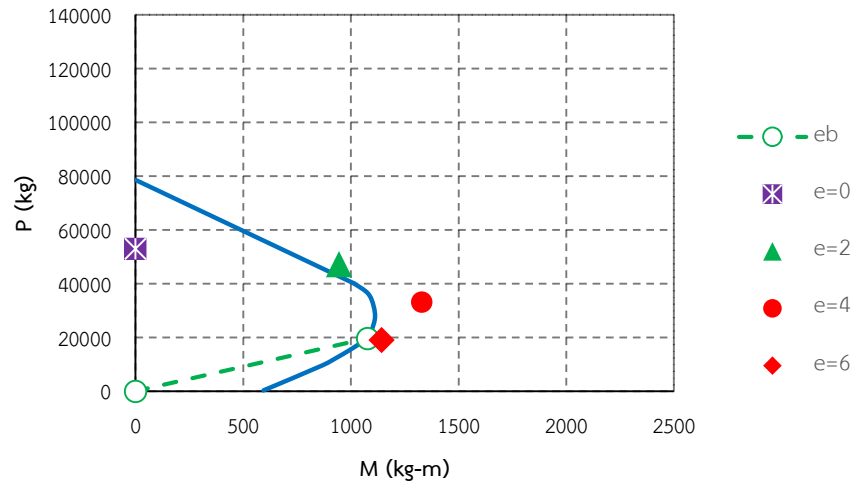


ภาพประกอบ 49 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4))
ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) P_n - M_n ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4) พบว่าสถานะสมดุลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 54.8$ มม. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลาง เป็น 20 และ 40 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกับกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม แต่เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางที่ 60 มม. พบว่าวิบัติโดยแรงดึง Tension-Controlled Failures ดังแสดงในภาพประกอบที่ 50 และ 51



Interaction Diagram



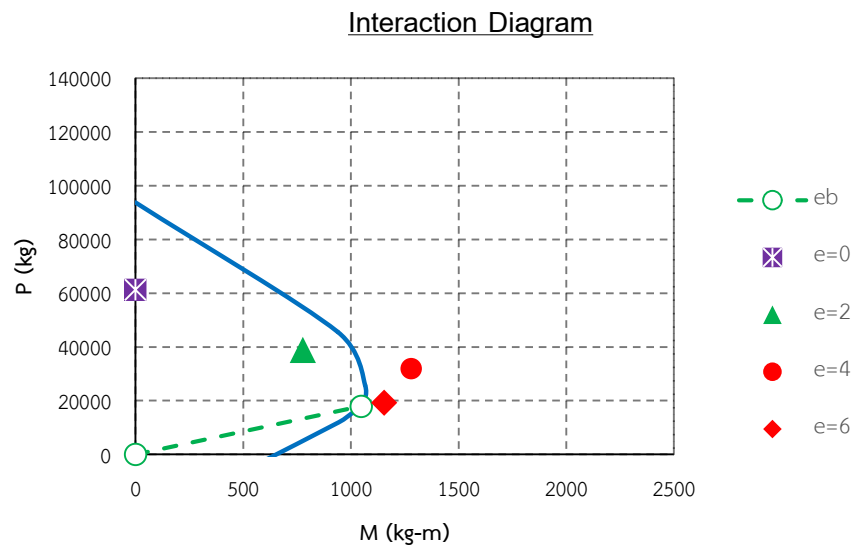
ภาพประกอบ 50 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4)



ภาพประกอบ 51 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) P_n - M_n ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1) พบว่าสถานะสมดุลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 58.5$ มม. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลาง เป็น 20 และ 40 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกับกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม แต่เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางที่

60 มม. พบว่าวิบัติโดยแรงดึง Tension-Controlled Failures ดังแสดงในภาพประกอบที่ 52 และ 53



ภาพประกอบ 52 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1)

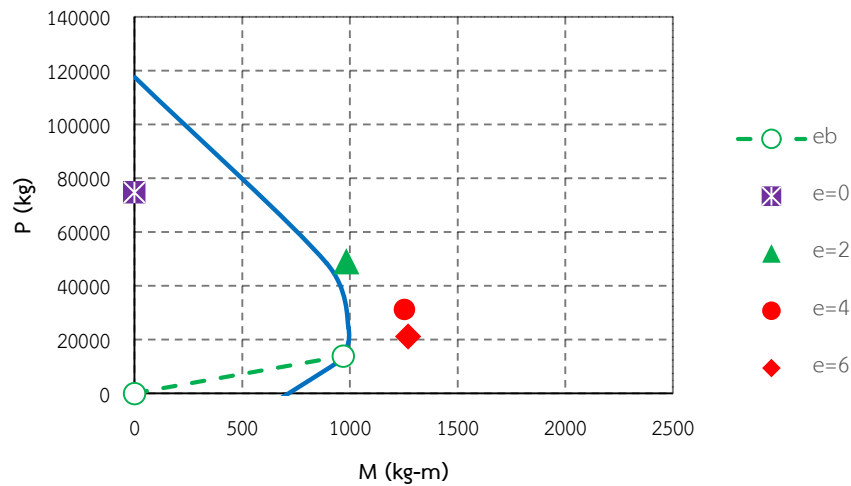


ภาพประกอบ 53 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

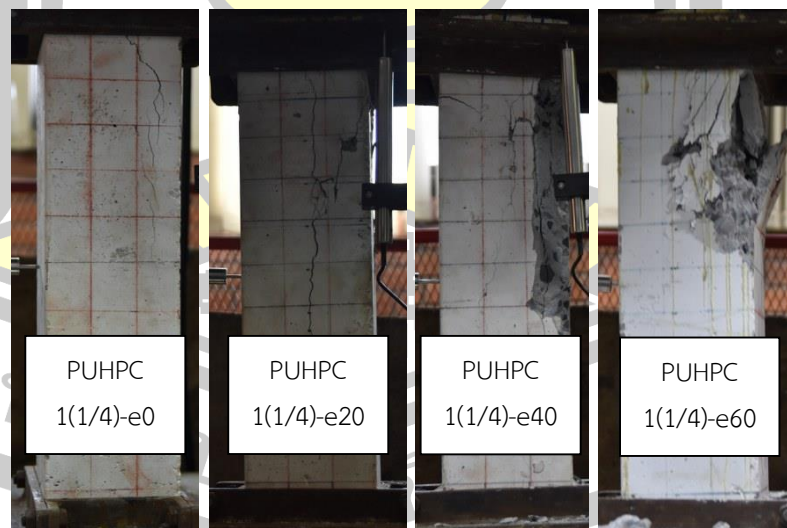
เมื่อพิจารณาแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) P_n - M_n ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงขนาด 1(1/4) นิ้ว

(PUHPC1(1/4)) พบว่าสถานะสมมูลการวิบัติของเสา มีค่า $e_b = 69.7$ มม. เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 20 40 และ 60 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกันกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 54 และ 55

Interaction Diagram



ภาพประกอบ 54 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4))



ภาพประกอบ 55 ภาพการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุ UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4)) ในแนวแกนและที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

จากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาคอนกรีตทั้งหมด เห็นได้ว่า ที่การแทนที่ด้วยท่อเหล็ก สำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 60 มม. ทั้ง 2 ขนาด เป็นการวิบัติโดย Tension control failure

ปัจจัยที่ทำให้รูปแบบการวิบัตินั้นเปลี่ยนจาก การวิบัติจากกำลังอัด Compression control failure เป็น การวิบัติจากแรงดึง Tension control failure มาจาก ค่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด (P_{nb}) จากสมการที่ 4.17 เป็นสมการที่ 4.18

$$P_{nb} = C_c + C_s - T \quad (4.17)$$

$$P_{nb} = C_c + (C_s + C_{uhpc}) - T \quad (4.18)$$

และจากโมเมนต์ดัด (M_{nb}) ที่เปลี่ยนไป จากสมการที่ 4.19 เป็นสมการที่ 4.20

$$M_{nb} = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (4.19)$$

$$M_{nb} = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{uhpc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (4.20)$$

จากสมการที่ 4.18 และ 4.20 ปัจจัยที่ทำให้ ค่ากำลังรับแรงอัด และ โมเมนต์ดัด (M_{nb}) คือ ค่ากำลังจาก C_{uhpc} ถึงแม้ว่าค่าดังกล่าวจะทำให้เพิ่มขึ้นทั้ง P_n และ M_n อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของ P_n เพิ่มขึ้น มากกว่าค่า M_n ดังจะเห็นได้จาก ตัวอย่างการคำนวณของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง 1 นิ้ว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ P_n จาก C_{uhpc} มีค่าเท่ากับ 4564 กก. คิดเป็นร้อยละ 36.2 และการเพิ่มขึ้นของ M_n เพิ่มขึ้นจากปัจจัยของ C_{uhpc} มีค่าเท่ากับ 100 กก.-ม. คิดเป็นร้อยละ 11.2 และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.21 พบว่า เมื่ออัตราส่วน P_n มากขึ้น ส่งผลให้ ค่า e_b ลดลง เมื่อระยะเยื้องของแรงกระทำมากขึ้น ถึง 60 มม. การวิบัติจึงอยู่ในช่วง Tension control failure

$$e_b = \frac{M_n}{P_n} \quad (4.21)$$

ตัวอย่างการคำนวณที่สถานะสมดุลการวิบัติ

$$f'_{uhpc} = 1515 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{uhpc}} = \frac{\pi(3.4 - 2(0.12))^2}{4} = 7.843$$

$$\epsilon_{\text{cu}} = 0.003$$

$$c_b = \frac{6120d}{f_y + 6120} = \frac{6120(9.7)}{2444 + 6120} = 6.93 \text{ ซม.}$$

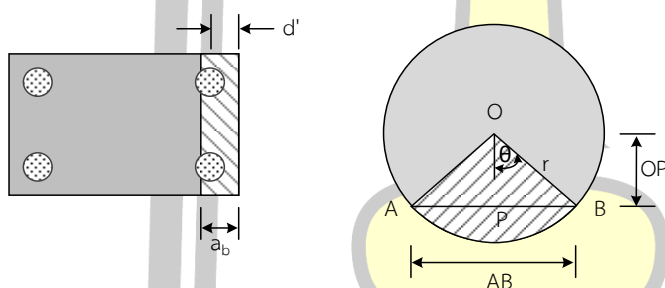
$$a_b = \beta_1 c_b = (0.85)(6.93) = 5.89 \text{ ซม.}$$

$$f_s = f_y = 2444 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$f'_s = \frac{6120(c_b - d')}{c_b} = \frac{6120(6.93 - 5.3)}{6.93} = 1440.52 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$E_{\text{uhpc}} = 476812.30 \text{ กก./ตร.ซม.}$$

$$f'_{\text{uhpc}} = 0.003 E_{\text{hc}} \frac{(c_b - d')}{c_b} = 0.003(476812.30) \frac{(6.93 - 5.3)}{6.93} = 336.69 \text{ กก./ตร.ซม.}$$



$$OP = a_b - d' = 5.89 - 5.3 = 0.59 \text{ ซม.}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{OP}{r}\right) = \arccos\left(\frac{0.59}{1.7}\right) = 69.63 \text{ องศา}$$

$$AP = r \sin \theta = 1.7 \sin(69.63) = 1.59 \text{ ซม.}$$

$$AB = 2AP = 2(1.59) = 3.19 \text{ ซม.}$$

$$A_{\text{sector}} = \pi r^2 \left(\frac{2\theta}{360^\circ}\right) = 3.14(1.7)^2 \left(\frac{2(69.63)}{360}\right) = 3.51 \text{ ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{triangle}} = \frac{1}{2}(AB)(OP) = \frac{1}{2}(3.19)(0.59) = 0.94 \text{ ตร.ซม.}$$

$$A_{\text{segment}} = A_{\text{sector}} - A_{\text{triangle}} = 3.51 - 0.94 = 2.57 \text{ ตร.ซม.}$$

$$C_c = 0.85 f'_c (a_b b - A_{\text{pipe}}) = 0.85(257) ((5.89)(15) - 2(6.51)) = 16461.61 \text{ กก.}$$

$$T = A_s f_s = 2(1.237)(2444) = 6045.00 \text{ กก.}$$

$$C_s = A'_s (f'_s - 0.85 f'_c) = 2(1.237)(1440.52 - 0.85(257)) = 3022.24 \text{ กก.}$$

$$C_{\text{uhpc}} = A_{\text{uhpc}} (0.85) f'_{\text{uhpc}} = 2(7.843)(0.85)(336.69) = 4488.98 \text{ กก.}$$

$$P_{nb} = C_c + (C_s + C_{uhpc}) - T = 16461.61 + (3022.24 + 4488.98) - 6045.00$$

$$= 17927.83 \text{ กก.}$$

$$M_{nb} = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{uhpc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

$$= \left[16461.61 \left(\frac{15}{2} - \frac{5.89}{2} \right) + (3022.24 + 4488.98) \left(\frac{15}{2} - 5.3 \right) - 6045.00 \left(9.7 - \frac{15}{2} \right) \right] (0.01)$$

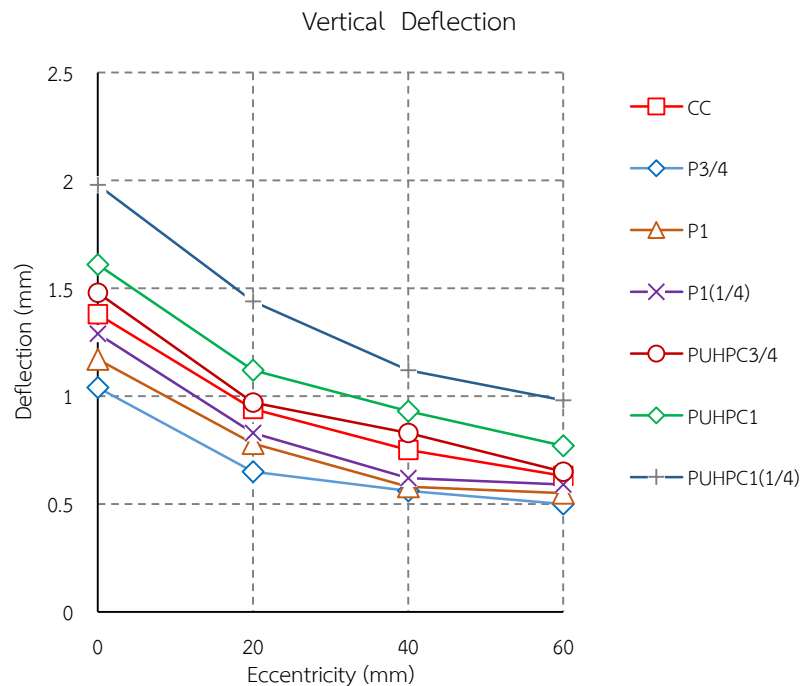
$$= 1047.91 \text{ กก.-ม.}$$

$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} = \frac{1047.91}{17927.83} (100) = 5.85 \text{ ซม.}$$

4.6 การทรุดตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากผลการทดลองในตาราง 13 ค่าการทรุดตัวของเสาคอนกรีตหลังจากรับแรงอัด ที่ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Peak Load) โดยวัดด้วยเครื่อง LVDT แยกออกเป็น การทรุดตัวในแนวแกน (vertical Deflection) และการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral Deflection) พบว่าการทรุดตัวในแนวแกน (vertical Deflection) ของเสาคอนกรีตควบคุม (CC) มีค่าเท่ากับ 1.38 0.94 0.75 และ 0.63 มม. ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0 20 40 และ 60 (e0 e20 e40 e60) ตามลำดับ และเมื่อแทนค่าด้วย ท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.04, 0.65, 0.56 และ 0.50 มม. ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0, 20, 40 และ 60 (e0, e20, e40,e60) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวในแนวแกน (vertical Deflection) น้อยกว่าเสาคอนกรีตควบคุม (CC) และเมื่อพิจารณาการแทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 และ 1 1/4 นิ้วพบว่ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว

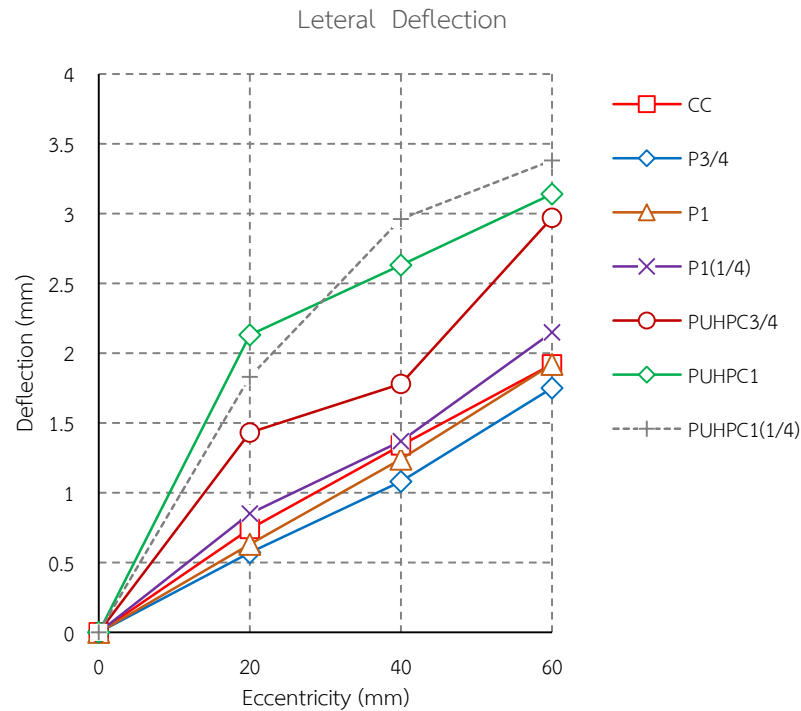
เมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า ที่ขนาดท่อเหล็กสำเร็จรูป 3/4 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 1.48, 0.97, 0.83, และ 0.65 มม. ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0, 20, 40 และ 60 (e0, e20, e40,e60) ตามลำดับ มีค่ามากกว่า เสาคอนกรีตควบคุม (CC) เมื่อเพิ่มขนาดของท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า ค่าการทรุดตัวของเสาในแนวแกน (vertical Deflection) มีค่ามากขึ้น ตามขนาดที่เพิ่มขึ้น และมากกว่าเสาคอนกรีตควบคุม โดยแนวโน้ม ของค่าการทรุดตัวของเสาในแนวแกน (vertical Deflection) ทั้งหมดของตัวอย่างทดสอบ พบว่า มีค่าลดลง เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 56 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nouran และ คณะ (2021) ซึ่งได้ศึกษาการใช้แท่งพอลิเมอร์เส้นใยหินบะซอลท์ (basalt fiber-reinforced polymer bars) เป็นเหล็กเสริมและเหล็กปลอก ในเสาคอนกรีต ทดสอบการเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0 40 และ 80 เวนต์ริเมตร ซึ่งพบว่า มีค่าการทรุดตัวในแนวแกน อยู่ระหว่าง 0.68 – 3.30 มม.



ภาพประกอบ 56 การทรุดตัวในแนวแกนของเสาคอนกรีต

เมื่อพิจารณาการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral Deflection) ของเสาคอนกรีตควบคุม (CC) มีค่าเท่ากับ 0, 0.74, 1.34 และ 1.92 มม. ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0, 20, 40 และ 60 (e0, e20, e40, e60) ตามลำดับ และเมื่อแทนค่าด้วย ท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว พบว่ามีค่าเท่ากับ 0, 0.57, 1.08 และ 1.78 มม. ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0, 20, 40 และ 60 (e0, e20, e40, e60) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวในแนวแกน (Lateral Deflection) น้อยกว่าเสาคอนกรีตควบคุม (CC) และเมื่อพิจารณาการแทนที่ด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด 1 และ $1\frac{1}{4}$ นิ้วพบว่ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับ ท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

เมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า ที่ขนาดท่อเหล็กสำเร็จรูป $\frac{3}{4}$ นิ้ว มีค่าเท่ากับ 0, 1.43, 1.78, และ 2.97 มม. ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0, 20, 40 และ 60 (e0, e20, e40, e60) ตามลำดับ มีค่ามากกว่า เสาคอนกรีตควบคุม (CC) เมื่อเพิ่มขนาดของท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า ค่าการทรุดตัวของเสาในแนวแกน (Lateral Deflection) มีค่ามากขึ้น ตามขนาดที่เพิ่มขึ้น และมากกว่าเสาคอนกรีตควบคุม โดยแนวโน้มของค่าการทรุดตัวของเสาในแนวแกน (Lateral Deflection) ทั้งหมดของตัวอย่างทดสอบ พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 57 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Koosha Khorramian และ Pedram Sadeghian (2017) ซึ่งได้ศึกษาการใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) เป็นเหล็กเสริม ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ทดสอบที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง ที่ 0 15 30 และ 45 มม. โดยได้พบว่า ค่าการโก่งตัวด้านข้างของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.92 - 2.03 มม.



ภาพประกอบ 57 การโก่งตัวด้านข้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.7 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากตาราง 15 แสดงต้นทุนของคอนกรีตสมรรถนะสูงต่อลูกบาศก์เมตร โดยส่วนผสม ซีเมนต์ อยู่ที่ 862 กก. คิดราคา ณ เดือนมิถุนายน 2564 มีราคาเฉลี่ย 0.51 บาท/กก. คิดเป็นเงิน 440 บาท/ลบ.ม. น้ำสะอาด 215.33 กก.ราคาเฉลี่ย 0.017 บาท/กก. คิดเป็นเงิน 4 บาท/ลบ.ม. ซีลีกาฟุ่ม ราคาเฉลี่ย 14 บาท/กก. คิดเป็นเงิน 1409 บาท/ลบ.ม. ทราयीมีราคาเฉลี่ย 0.33 บาท/กก. คิดเป็นเงิน 386 บาท/ลบ.ม. เส้นใยเหล็ก ราคาเฉลี่ย 75 บาท/กก. คิดเป็นเงิน 3400 บาท/ลบ.ม. และ สารลดน้ำพิเศษ ราคาเฉลี่ย 70 บาท/กก. คิดเป็นเงิน 2333 บาท/ลบ.ม. รวมทั้งหมด 7971 บาท/ลบ.ม.

พหุ ประ โท ชี เว

ตาราง 15 ต้นทุนของคอนกรีตสมรรถนะสูง

	UHPC mix proportion (kg/m ³)					
	Water (kg)	Cement (kg)	Silica Fume (kg)	Sand (kg)	Steel fiber (kg)	SP (kg)
Volume	215.33	862	100.67	1168.67	45.33	33.33
Price/Kg.	0.017	0.51	14	0.33	75	70
Price/m3	4	440	1409	386	3400	2333
Total Price/m3 (THB)	7971					

เมื่อพิจารณาปริมาตรของคอนกรีตสมรรถนะสูงในท่อเหล็กยาว 1 เมตร พบว่า ท่อเหล็กขนาด ¾ นิ้ว เท่ากับ 0.00048 ลบ.ม. เมื่อเทียบราคาต้นทุนตามตาราง 15 พบว่ามีต้นทุนที่ 3.85 บาท ต่อเมตร ท่อเหล็กขนาด 1 นิ้ว เท่ากับ 0.00078 ลบ.ม. พบว่ามีต้นทุนที่ 6.25 บาท ต่อเมตร ท่อเหล็กขนาด 1 ¼ นิ้ว เท่ากับ 0.00128 ลบ.ม. พบว่ามีต้นทุนที่ 10.17 บาท ต่อเมตร ดังแสดงในตาราง 16

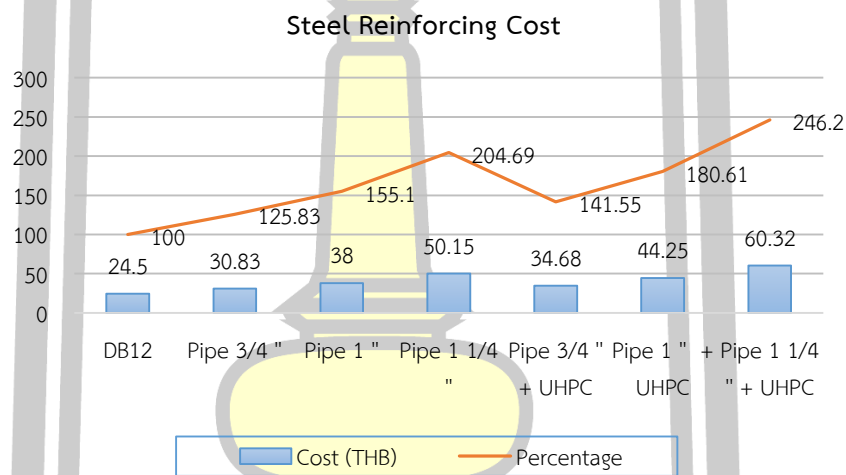
ตาราง 16 พื้นที่ ปริมาตรของท่อเหล็กและปริมาตรของคอนกรีตสมรรถนะสูงในท่อเหล็ก

Size		Price/ Pipe ¾ "	Price/ Pipe 1 "	Price/ Pipe 1 ¼ "
Diameter		27.2	34	42.7
thickness		1.2	1.2	1.2
Area (cm ²) / m	total	5.8107	9.0792	14.3201
	Hollow	4.8305	7.8427	12.7556
	Steel	0.9802	1.2365	1.5645
Volume (m ³ /m)	total	0.00058	0.00091	0.00143
	Hollow	0.00048	0.00078	0.00128
	Steel	9.8E-05	0.00012	0.00016
UHPC cost in hollow pipe (THB)		3.85	6.25	10.17

และเมื่อพิจารณา ต้นทุนของเหล็กเสริมชนิดต่างๆ ที่ ความยาว 1 เมตร พบว่า เหล็กเสริมทั่วไป DB12 มีราคาต่อเมตร ณ เดือน มิถุนายน 2564 มีราคา 24.50 บาท/ม. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 100 ท่อเหล็ก ¾ นิ้ว ราคา 30.83 บาท/ม. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 125.83 ท่อเหล็ก ขนาด 1 และ 1 ¼ นิ้ว มีราคาอยู่ที่ 38 และ 50.15 บาท/ม. และคิดเป็นร้อยละ 155.1 และ 204.69 ตามลำดับ

ท่อเหล็ก ขนาด $\frac{3}{4}$ 1 และ 1 $\frac{1}{4}$ นิ้วที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง มีราคาต่อเมตร ที่ 34.68 44.25 และ 60.32 บาท และคิดเป็นร้อยละ 141.55 180.61 และ 246.20 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 58

เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนต่อเมตรของท่อเหล็กสำเร็จรูปและท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า มีราคาที่สูงกว่าเหล็กเสริมทั่วไป แต่เมื่อพิจารณาถึงการรับกำลังของท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงพบว่ามีค่ากำลังที่มากกว่าเหล็กเสริมทั่วไป ดังในผลการทดลองที่ผ่านมาข้างต้น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะของวัสดุผสม ระหว่างคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็ก และท่อเหล็กสำเร็จรูป สามารถเป็นทางเลือกในการออกแบบและนำไปพัฒนาในการใช้เป็นเหล็กเสริมต่อไป



ภาพประกอบ 58 เปรียบเทียบต้นทุนของเหล็กเสริมชนิดต่างๆ

พหุ ประ โท ชี เว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาทดลองพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในท่อเหล็กสำเร็จรูปเป็นเหล็กเสริมสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเส้นใยเหล็ก มีกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 1,515 กก./ตร.ซม. มีค่ายุบตัวไหลแผ่ที่ 55 เซนติเมตร

กำลังอัดของท่อเหล็กเปล่า โดยพบว่าตัวอย่างของ ท่อเหล็ก ขนาด 3/4 นิ้ว มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 370 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็กขนาด 1 นิ้ว มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 662 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็ก ขนาด 1-1/4 นิ้ว มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 689 กก./ตร.ซม.

ท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ขนาด 3/4 นิ้ว ทั้งสองตัวอย่างรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 2900 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ขนาด 1 นิ้ว ทั้งสองตัวอย่างรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 2316 กก./ตร.ซม. ท่อเหล็กที่หล่อคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ขนาด 1-1/4 นิ้ว ทั้งสองตัวอย่างรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดได้ที่ 1907 กก./ตร.ซม.

2. ความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตควบคุม (CC-e0) มีค่าเท่ากับ 51,086 กก. และเมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางจากแนวแกน พบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าลดลง ตามระยะเยื้องศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 42131 31038 และ 22976 กก. ที่ค่าการเยื้องศูนย์กลาง 20, 40 และ 60 มม. (e=20, 40, 60) ตามลำดับ เมื่อแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด ต่างๆ (pipe 3/4, 1, 1 1/4) พบว่า ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตมีค่าลดลงทุกขนาด และเมื่อพิจารณาการแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปที่เติมคอนกรีตสมรรถนะสูง คอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเสาคอนกรีตควบคุม โดย PUHPC1(1/4)-e0 มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกน (e=0) มากสุด เท่ากับ 74794 กก. และมีค่าลดลงเมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้น

3. โมเมนต์ดัด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสา คอนกรีต โดย เสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปเติมด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูง pipe + UHPC มีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดของเสาคอนกรีตควบคุม (CC)

4. จากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) Pn-Mn ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ควบคุม (CC) พบว่า สภาวะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures และเมื่อพิจารณาการแทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปขนาด ต่างๆ (pipe 3/4, 1, 1 1/4) พบว่า สภาวะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-Controlled Failures เช่นเดียวกันกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ควบคุม และเมื่อพิจารณา แทนที่เหล็กเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงขนาด ต่างๆ (PUHPC3/4 PUHPC1 และ PUHPC1(1/4)) พบว่า ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 20 มม. และ 40 มม. สภาวะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบของการวิบัติโดยกำลังอัด Compression-

Controlled Failures ที่ระยะเยื้องศูนย์กลาง 60 มม. สถานะการวิบัติจึงอยู่ในช่วงของการวิบัติในรูปแบบการวิบัติโดยแรงดึง Tension-Controlled Failures

5. เสาคอนกรีตที่เสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปมีค่าการทรุดตัวในแนวแกน (vertical Deflection) และการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral Deflection) ต่ำกว่าเสาคอนกรีตควบคุม (CC) และเมื่อเสริมด้วยท่อเหล็กสำเร็จรูปบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่า มีค่ามากกว่าเสาคอนกรีตควบคุม ซึ่งเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทุกตัวอย่างมีค่าการทรุดตัวในแนวแกน (vertical Deflection) ลดลง เมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางมากขึ้น ในขณะที่การโก่งตัวด้านข้าง (Lateral Deflection) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

6. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ท่อเหล็กบรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูง มีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริมทั่วไป แต่เมื่อพิจารณาถึงการรับกำลังของท่อเหล็กสำเร็จรูปที่บรรจุคอนกรีตสมรรถนะสูงพบว่ามีความกำลังที่มากกว่าเหล็กเสริมทั่วไป ซึ่งสามารถนำไปเป็นทางเลือกในการออกแบบและนำไปพัฒนาในการใช้เป็นเหล็กเสริมต่อไป

ข้อเสนอแนะจากการทดลอง

ท่อเหล็กสำเร็จรูปมีค่าการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตที่ต่ำกว่าเหล็กเสริมทั่วไป (DB12) มีค่าเท่ากับ 68.42 กก./ตร.ซม. ท่อขนาด 1 ¼ นิ้ว มีค่าเท่ากับ 41.23 กก./ตร.ซม. ท่อขนาด 1 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 34.74 กก./ตร.ซม. และ ท่อขนาด ¾ นิ้ว มีค่าเท่ากับ 30.54 กก./ตร.ซม. ส่งผลให้มีผลต่อการรับกำลัง หากมีการปรับปรุงค่าการยึดเหนี่ยวให้ดีขึ้น จะส่งผลให้การใช้ท่อเหล็กสำเร็จรูปเป็นเหล็กเสริมได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

พูน ปณ ทิโต ชีเว

บรรณานุกรม

- AlAjarmeh, O., Manalo, A., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P., & Nguyen, K. (2019). Compressive behavior of axially loaded circular hollow concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals. *Construction and Building Materials*, 194, 12-23.
- Cao, Q., Jia, J., Zhang, L., & Ye, H. Steel reinforced post-filling coarse aggregate concrete columns under eccentric compression. *Construction and Building Materials*, 270, 121420.
- Chaimoon, K. (2010). Concrete Reinforced with FRP Bars: Alternative for Noncorrosive Structures. *Engineering and Applied Science Research*, 37(3), 237-245.
- Graybeal, B. A. (2010). Behavior of Ultra-High Performance Concrete connections between precast bridge deck elements. Proceedings of the 2010 Concrete Bridge Conference: Achieving Safe, Smart & Sustainable Bridges, Phoenix, AZ, USA,
- Hassan, A., Khairallah, F., Mamdouh, H., & Kamal, M. (2019). Structural behaviour of self-compacting concrete columns reinforced by steel and glass fibre-reinforced polymer rebars under eccentric loads. *Engineering Structures*, 188, 717-728.
- Jirawacharadet, M. (2014). *Reinforced Concrete Design*.
- Khorramian, K., & Sadeghian, P. (2017). Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading. *Engineering Structures*, 151, 761-773.
- Louk Fanggi, B. A., & Ozbakkaloglu, T. (2014). Influence of concrete-filling inner steel tube on compressive behavior of double-skin tubular columns. *Advanced Materials Research*,
- Mohammadi Hosinie, M. (2014). *Behaviour of High Performance Fibre Reinforced Concrete Columns under Axial Loading* [Université d'Ottawa/University of Ottawa].
- Sata, V. (2010). The Use of local pozzolan in fiber reinforced concrete. *Engineering and Applied Science Research*, 37(1), 29-37.

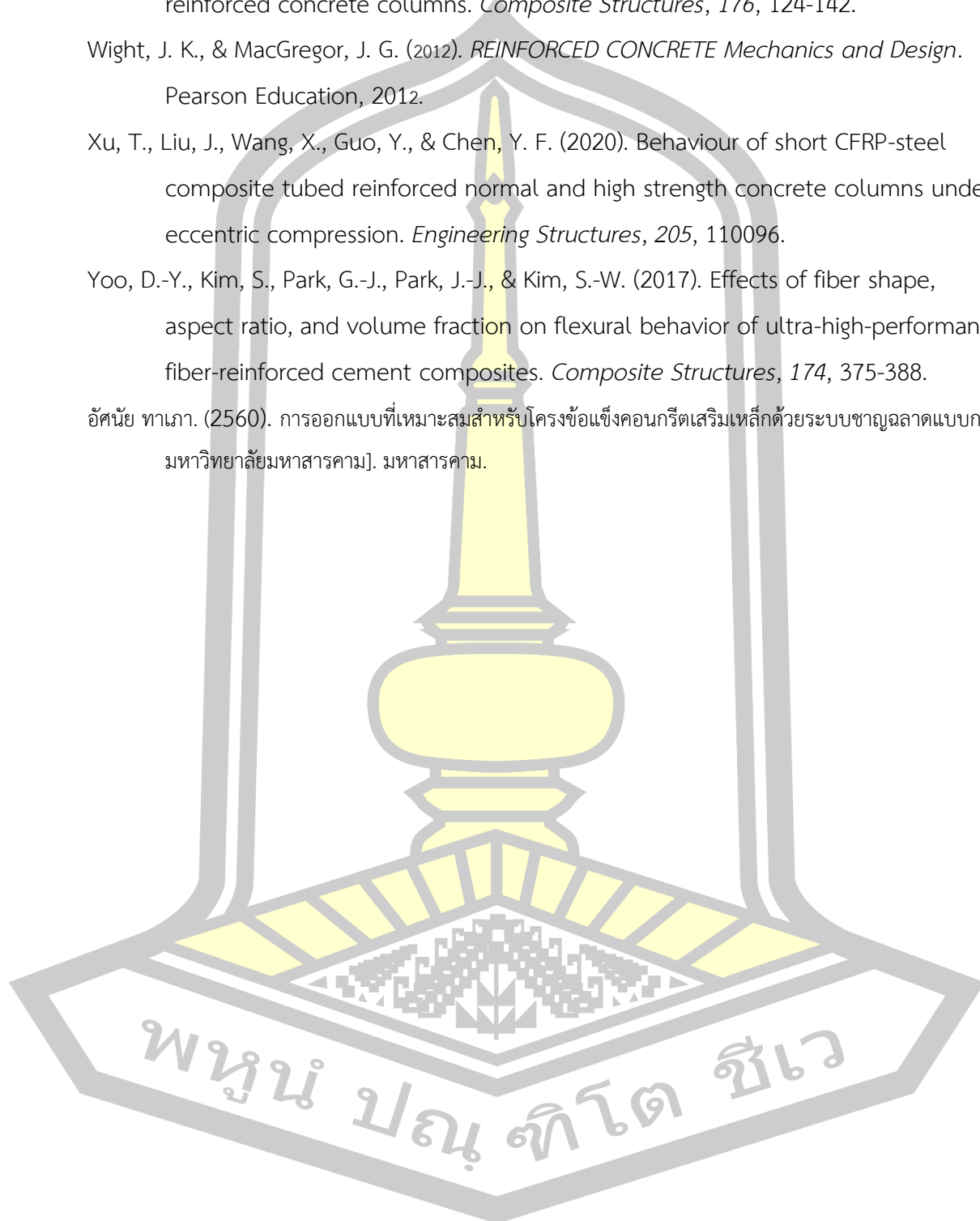
Shin, H.-O., Min, K.-H., & Mitchell, D. (2017). Confinement of ultra-high-performance fiber reinforced concrete columns. *Composite Structures*, 176, 124-142.

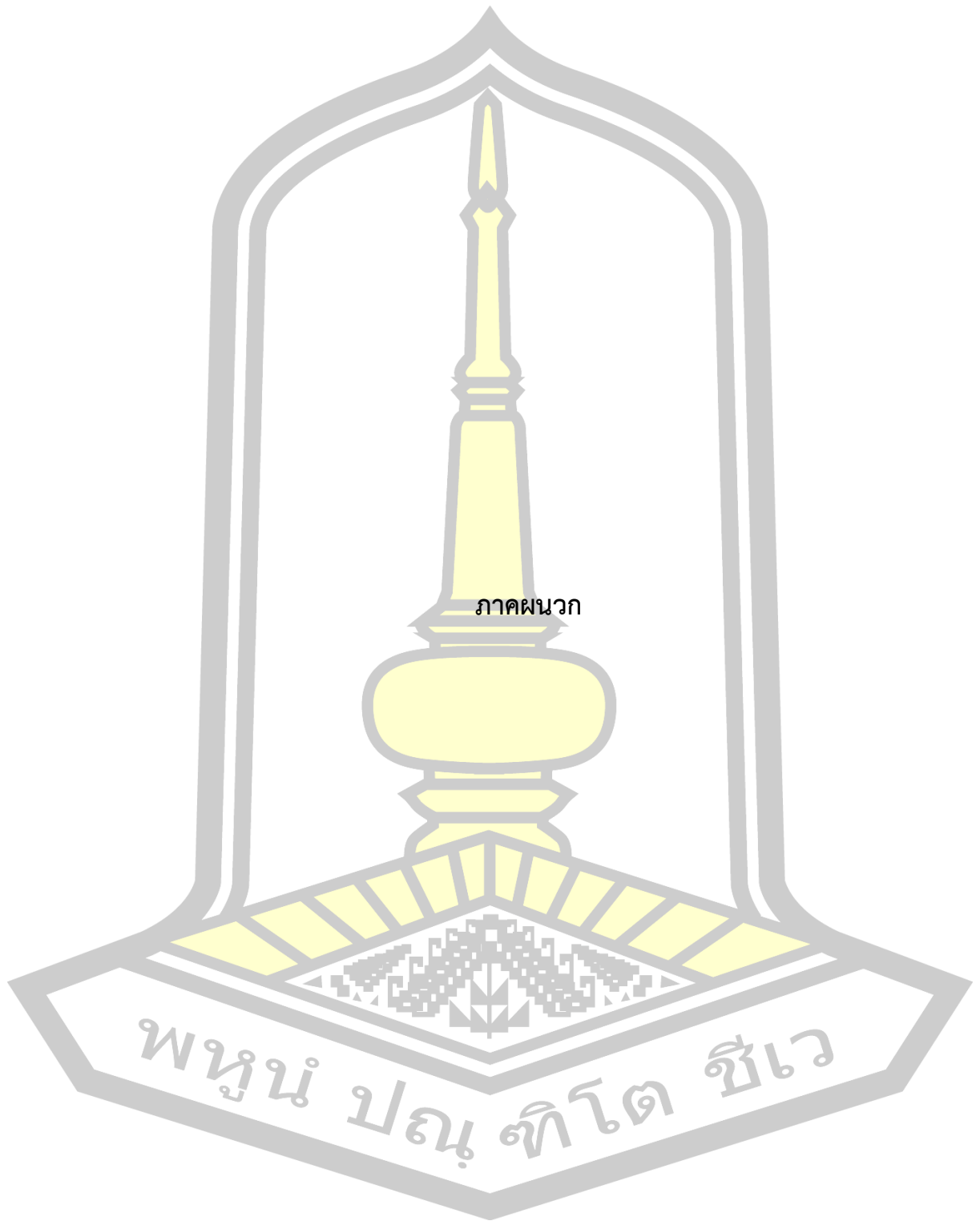
Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2012). *REINFORCED CONCRETE Mechanics and Design*. Pearson Education, 2012.

Xu, T., Liu, J., Wang, X., Guo, Y., & Chen, Y. F. (2020). Behaviour of short CFRP-steel composite tubed reinforced normal and high strength concrete columns under eccentric compression. *Engineering Structures*, 205, 110096.

Yoo, D.-Y., Kim, S., Park, G.-J., Park, J.-J., & Kim, S.-W. (2017). Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*, 174, 375-388.

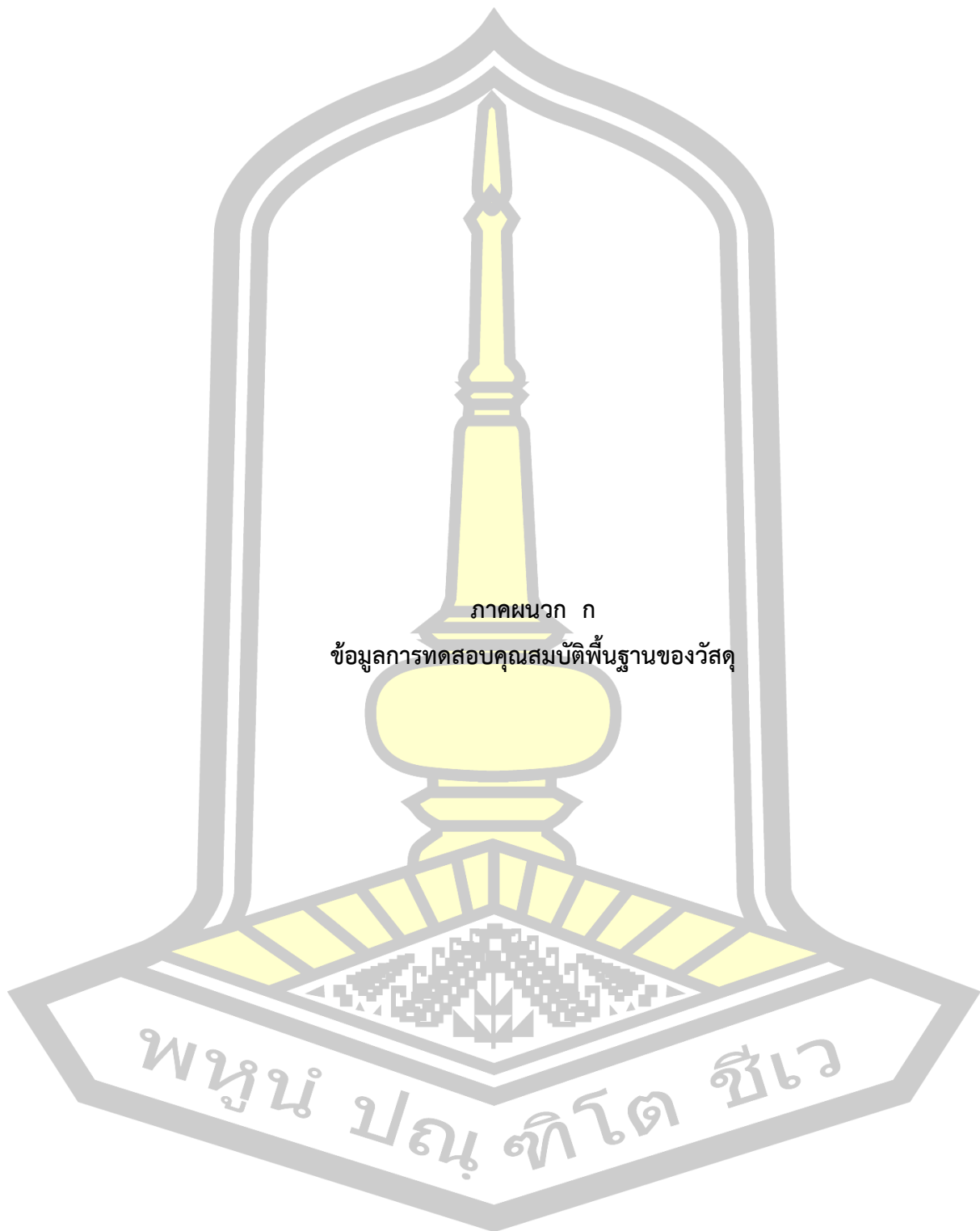
อัศนัย ทาเถา. (2560). การออกแบบที่เหมาะสมสำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระบบชาญฉลวดแบบกลุ่ม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม]. มหาสารคาม.





ภาคผนวก

พหุบัน ปณฺ ทิโต ชีเว



ตาราง 17 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 1 น้ำหนักก่อนการ
วิเคราะห์ 500 กรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กรัม)	น้ำหนัก ตะแกรง+ น้ำหนักค้ำ (กรัม)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
4	528.26	532.52	4.26	0.85	0.85	99.15
8	467.93	493.29	25.36	5.07	5.92	94.08
16	447.20	540.33	93.13	18.63	24.55	75.45
30	410.01	598.19	188.18	37.64	62.19	37.81
50	400.22	496.69	96.47	19.29	81.48	18.52
100	394.31	476.48	82.17	16.43	97.91	2.09
ถาดรอง	378.89	389.32	10.43	2.086	100.00	0.00
รวม			500	โมดูลัสความละเอียด = 2.73		

ตาราง 18 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 2 น้ำหนักก่อนการ
วิเคราะห์ 500 กรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กรัม)	น้ำหนัก ตะแกรง+ น้ำหนักค้ำ (กรัม)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
4	528.27	535.91	7.64	1.53	1.53	98.47
8	467.93	497.2	29.27	5.85	7.38	92.62
16	447.23	543.97	96.74	19.35	26.73	73.27
30	409.93	594.82	184.89	36.98	63.71	36.29
50	400.02	490.65	90.63	18.13	81.83	18.17
100	394.03	474.11	80.08	16.02	97.85	2.15
ถาดรอง	378.86	389.61	10.75	2.15	100.00	0.00
รวม			500	โมดูลัสความละเอียด = 2.79		

ตาราง 19 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 1 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์
10 กก.

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กก.)	น้ำหนัก ตะแกรง+ ค้ำ (กก.)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
1 1/2"	5.58	5.58	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	5.34	5.34	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	5.65	5.65	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	5.71	5.71	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	5.82	10.05	4.23	42.30	42.30	57.70
# 4	5.67	10.94	5.27	52.70	95.00	5.00
# 8	5.75	6.10	0.35	3.50	98.50	1.50
ถาดรอง	5.13	5.28	0.15	1.50	100.00	0.00
รวม			10.00	โมดูลัสความละเอียด = 6.30		

ตาราง 20 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรงมาตรฐาน ตัวอย่าง 2 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์
10 กก.

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กก.)	น้ำหนัก ตะแกรง+ ค้ำ (กก.)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
1 1/2"	5.58	5.58	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	5.34	5.34	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	5.65	5.65	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	5.71	5.71	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	5.82	10.10	4.28	42.30	42.30	57.20
# 4	5.67	10.97	5.30	52.70	95.00	4.20
# 8	5.75	6.05	0.30	3.50	98.50	1.20
ถาดรอง	5.13	5.25	0.12	1.50	100.00	0.00
รวม			10.00	โมดูลัสความละเอียด = 6.34		

ตาราง 21 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (หิน)

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	3,895	3,806
น้ำหนักตะกร้าชั่งในน้ำ (กรัม)	624	624
น้ำหนักตะกร้า+น้ำหนักตัวอย่าง ชั่งในน้ำ (กรัม)	3,040	3,002
น้ำหนักตัวอย่างชั่งในน้ำ (กรัม)	2,416	2,378
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)	3,860	3,780
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง)	2.63	2.65
ความถ่วงจำเพาะ(อิ่มตัวผิวแห้ง)	2.63	2.67
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.67	2.70
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.91	0.69
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง) เฉลี่ย		2.64
ความถ่วงจำเพาะ(อิ่มตัวผิวแห้ง) เฉลี่ย		2.65
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ เฉลี่ย		2.68
ร้อยละการดูดซึมน้ำ เฉลี่ย		0.79

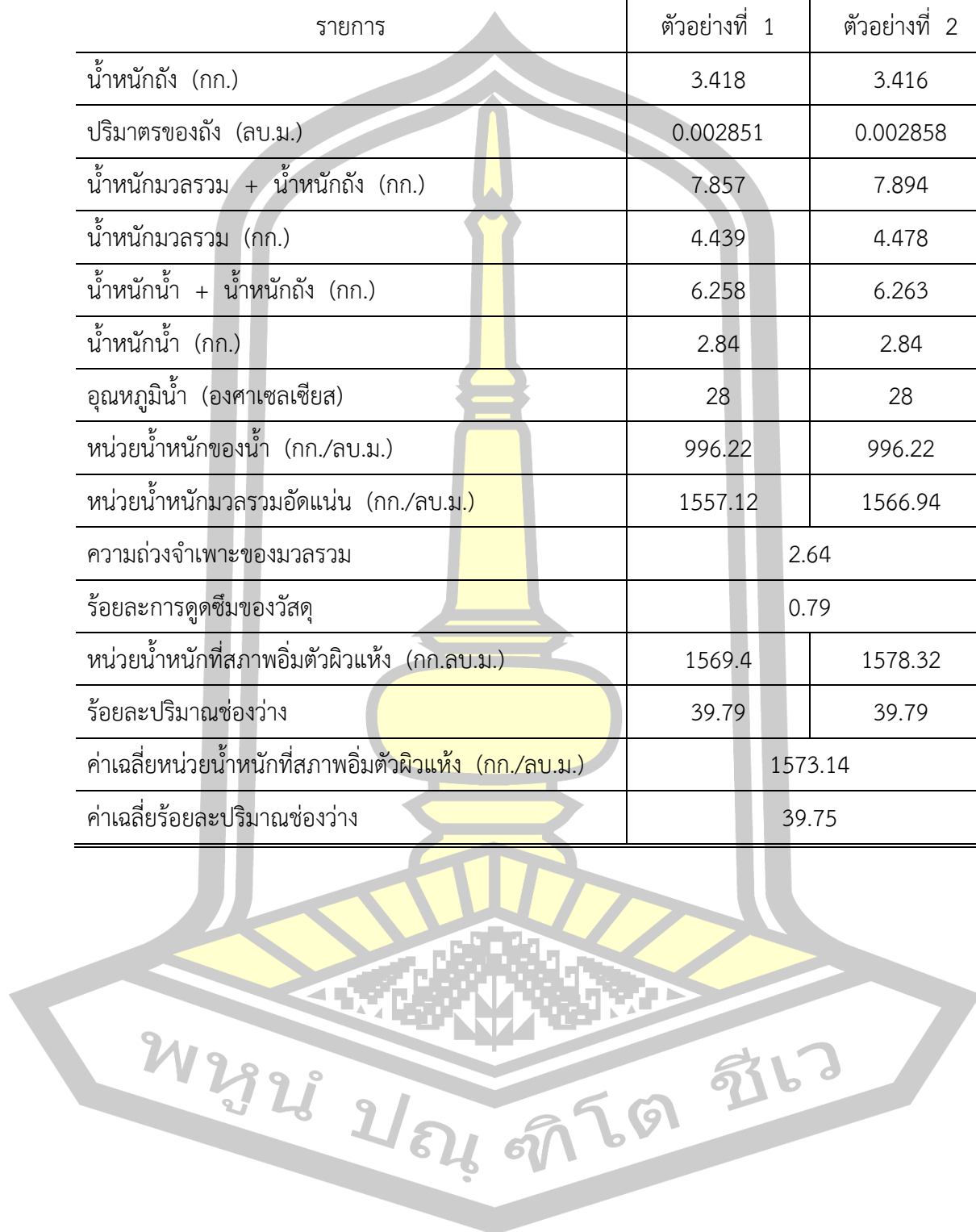
ตาราง 22 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

ชนิดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	ปริมาตร (ก่อน) กรัม	ปริมาตร (หลัง) กรัม	น้ำหนัก (ก่อน) กรัม	น้ำหนัก (หลัง)	ถ.พ.
ปูนซีเมนต์พอร์ต แลนด์ Type I	1	0.60	20.20	321.99	384.07	3.14
	2	0.80	21.20	318.45	382.78	3.15
เถ้ากั้นเตาบละเอียด	1	0.90	19.30	317.74	369.94	2.82
	2	0.60	20.50	321.30	378.00	2.83

พหุบัณฑิต ชีวะ

ตาราง 23 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ (หิน)

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักถัง (กก.)	3.418	3.416
ปริมาตรของถัง (ลบ.ม.)	0.002851	0.002858
น้ำหนักมวลรวม + น้ำหนักถัง (กก.)	7.857	7.894
น้ำหนักมวลรวม (กก.)	4.439	4.478
น้ำหนักน้ำ + น้ำหนักถัง (กก.)	6.258	6.263
น้ำหนักน้ำ (กก.)	2.84	2.84
อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)	28	28
หน่วยน้ำหนักของน้ำ (กก./ลบ.ม.)	996.22	996.22
หน่วยน้ำหนักมวลรวมอัดแน่น (กก./ลบ.ม.)	1557.12	1566.94
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม		2.64
ร้อยละการดูดซึมของวัสดุ		0.79
หน่วยน้ำหนักที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (กก./ลบ.ม.)	1569.4	1578.32
ร้อยละปริมาณช่องว่าง	39.79	39.79
ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (กก./ลบ.ม.)		1573.14
ค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณช่องว่าง		39.75



ตาราง 24 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด (ทราย)

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักขวด (กรัม)	162.89	160.49
น้ำหนักขวด + น้ำหนักน้ำ (กรัม)	655.25	657.53
น้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	500.00	500.00
น้ำหนักน้ำ+น้ำหนักตัวอย่าง+น้ำหนักขวด (กรัม)	965.74	967.11
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)	493.58	492.98
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง)	2.61	2.60
ความถ่วงจำเพาะ(อิ่มตัวผิวแห้ง)	2.63	2.62
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.70	2.69
ร้อยละการดูดซึ่ม	1.30	1.42
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง) เฉลี่ย		2.61
ความถ่วงจำเพาะ(อิ่มตัวผิวแห้ง) เฉลี่ย		2.62
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ เฉลี่ย		2.69
ร้อยละการดูดซึ่ม เฉลี่ย		1.37

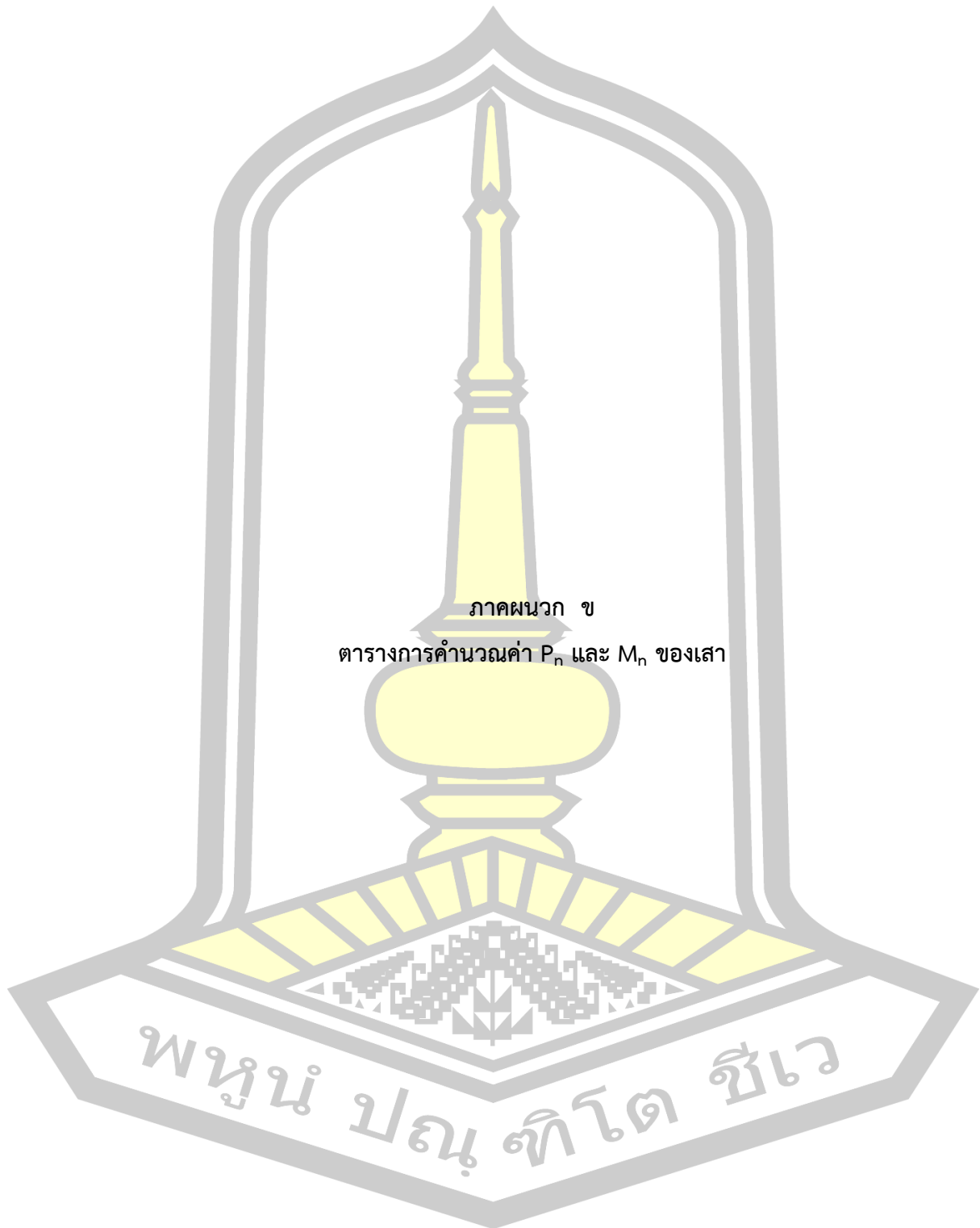
ตาราง 25 กำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	กำลังอัดเฉลี่ย
กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	248	269	253	257

ตาราง 26 กำลังครากของท่อเหล็ก

	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	กำลังครากเฉลี่ย
กำลังคราก (กก./ตร.ซม.)	2488	2412	2432	2444

พหุ ประถมศึกษา



ตาราง 27 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC)

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	3743	3743	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Steel	12	12	มม.
พื้นที่หน้าตัดเหล็ก (A_{st})	1.31	1.31	ตร.ซม.
d	10.8	10.8	ซม.
d'	4.2	4.2	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$	65095.94	-	กก.
Assum c	-	12.84	ซม.
$a = \beta_1 c$	-	10.91	ซม.
$f'_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	-	-972.34	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	-	3743.00	กก./ตร.ซม.
$A_{\text{steel in stress block}}$	-	3.66	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{\text{steel in stress block}})$	-	34961.86	กก.
$T = A_s f_s$	-	-2199.37	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	7972.34	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	-	45133.58	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	904.78	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ซม.

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 28 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม (CC)

สมการ	e=40	e=60	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	3743	3743	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Steel	12	12	มม.
พื้นที่หน้าตัดเหล็ก (A_{st})	1.31	1.31	ตร.ซม.
d	10.8	10.8	ซม.
d'	4.2	4.2	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$	-	-	กก.
Assum c	9.29	7.68	ซม.
$a = \beta_1 c$	7.90	6.52	ซม.
$f'_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	994.75	2491.86	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	3353.15	2770.94	กก./ตร.ซม.
$A_{\text{steel in stress block}}$	2.26	2.26	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{\text{steel in stress block}})$	25380.73	20882.58	กก.
$T = A_s f_s$	2250.06	5636.45	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	7090.53	5773.61	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	30221.20	21019.74	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	1209.70	1261.56	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 29 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4)

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ชม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ชม.
A_g	225	225	ตร.ชม.
Diameter of Pipe	27.2	27.2	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) A_{stg}	23.24 5.81	23.24 5.81	ตร.ชม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) A_{st}	0.98	0.98	ตร.ชม.
d	10.04	10.04	ชม.
d'	4.96	4.96	ชม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{pipe}) + f_y A_{st}$	53657.41	-	กก.
Assum c	-	12.33	ชม.
$a = \beta_1 c$	-	10.48	ชม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	-	-1136.64	กก./ตร.ชม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	-	2444.34	กก./ตร.ชม.
$A_{pipe \text{ in stress block}}$	-	19.79	ตร.ชม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe \text{ in stress block}})$	-	30019.77	กก.
$T = A_s f_s$	-	-2228.22	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	4363.53	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	-	36611.52	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	732.61	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ชม.

ตาราง 30 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 3/4 นิ้ว (P3/4)

สมการ	e=40	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	27.2	27.2	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) A_{stg}	5.81	5.81	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) A_{st}	0.98	0.98	ตร.ซม.
d	10.04	10.04	ซม.
d'	4.96	4.96	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{pipe}) + f_y A_{st}$	-	-	กก.
Assum c	8.77	7.25	ซม.
$a = \beta_1 c$	7.45	6.16	ซม.
$f_s = \frac{6120(d - c)}{c}$	886.25	2360.99	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c - d')}{c}$	2444.34	1930.19	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe \text{ in stress block}}$	11.62	11.34	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe \text{ in stress block}})$	21887.84	17701.73	กก.
$T = A_s f_s$	1737.36	4628.38	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	4363.53	3355.61	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	24514.01	16428.95	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	980.74	985.36	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.

ตาราง 31 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1)

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	34	34	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) A_{stg}	9.08	9.08	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) A_{st}	1.237	1.237	ตร.ซม.
d	9.7	9.7	ซม.
d'	5.3	5.3	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{pipe}) + f_y A_{st}$	53307.85	-	กก.
Assum c	-	11.97	ซม.
$a = \beta_1 c$	-	10.17	ซม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	-	-1160.60	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	-	2444.34	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe \text{ in stress block}}$	-	30.42	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe \text{ in stress block}})$	-	26693.65	กก.
$T = A_s f_s$	-	-2870.24	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	5504.76	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	-	35068.65	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	702.01	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ซม.

ตาราง 32 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 1 นิ้ว (P1)

สมการ	e=40	e=60	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	34	34	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) A_{stg}	9.08	9.08	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) A_{st}	1.237	1.237	ตร.ซม.
d	9.7	9.7	ซม.
d'	5.3	5.3	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{pipe}) + f_y A_{st}$	-	-	กก.
Assum c	8.58	7.30	ซม.
$a = \beta_1 c$	7.29	6.20	ซม.
$f_s = \frac{6120(d - c)}{c}$	798.88	2017.63	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c - d')}{c}$	2339.58	1673.67	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe \text{ in stress block}}$	18.16	14.90	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe \text{ in stress block}})$	19930.63	17062.48	กก.
$T = A_s f_s$	1975.68	4989.72	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	5245.69	3598.84	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	23200.64	15671.60	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	926.90	939.63	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.

ตาราง 33 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4))

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	42.7	42.7	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) A_{stg}	14.32	14.32	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) A_{st}	1.565	1.565	ตร.ซม.
d	9.265	9.265	ซม.
d'	5.735	5.735	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{pipe}) + f_y A_{st}$	51935.17	-	กก.
Assum c	-	11.32	ซม.
$a = \beta_1 c$	-	9.62	ซม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	-	-1111.01	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	-	2444.34	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe \text{ in stress block}}$	-	45.99	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe \text{ in stress block}})$	-	21481.33	กก.
$T = A_s f_s$	-	-3476.37	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	6964.87	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	-	31922.57	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	639.20	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ซม.

ตาราง 34 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูปขนาด 1(1/4) นิ้ว (P1(1/4))

สมการ	e=40	e=60	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	42.7	42.7	มม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) A_{stg}	14.32	14.32	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) A_{st}	1.565	1.565	ตร.ซม.
d	9.265	9.265	ซม.
d'	5.735	5.735	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{pipe}) + f_y A_{st}$	-	-	กก.
Assum c	8.33	7.29	ซม.
$a = \beta_1 c$	7.08	6.19	ซม.
$f_s = \frac{6120(d - c)}{c}$	691.03	1663.36	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c - d')}{c}$	1904.00	1302.13	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe \text{ in stress block}}$	24.97	18.19	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe \text{ in stress block}})$	17732.74	16315.77	กก.
$T = A_s f_s$	2162.24	5204.71	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	5274.13	3390.86	กก.
$P_n = C_c + C_s - T$	20844.63	14501.92	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	833.80	870.24	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.

ตาราง 35 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4)

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f'_{uhpc}	1515	1515	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	27.2	27.2	ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) (A_{stg})	5.81	5.81	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) (A_{st})	0.98	0.98	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัด UHPC (A_{uhpc})	4.83	4.83	ตร.ซม.
d	10.04	10.04	ซม.
d'	4.96	4.96	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{stg}) + f_y A_{st} + f'_{uhpc} A_{uhpc}$	78539.38	-	กก.
Assum c	-	12.56	ซม.
$a = \beta_1 c$	-	10.68	ซม.
$f'_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	-	-1227.90	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	-	2444.34	กก./ตร.ซม.
E_{uhpc}	-	476812	กก./ตร.ซม.
$f'_{uhpc} = 0.003E_{hc} \frac{(c_b - d')}{c_b}$	-	865.55	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe\ in\ stress\ block}$	-	20.76	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe\ in\ stress\ block})$	-	28433.25	กก.
$T = A_s f_s$	-	-2407.11	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	4391.86	กก.
$C_{uhpc} = A_{uhpc} f'_{uhpc}$	-	7107.79	กก.
$P_n = C_c + (C_s + C_{hc}) - T$	-	42340.02	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{hc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	845.68	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ซม.

ตาราง 36 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 3/4 นิ้ว (PUHPC3/4)

สมการ	e=40	e=60	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f'_{uhpc}	1515	1515	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	27.2	27.2	ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) (A_{stg})	5.81	5.81	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) (A_{st})	0.98	0.98	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัด UHPC (A_{uhpc})	4.83	4.83	ตร.ซม.
d	10.04	10.04	ซม.
d'	4.96	4.96	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{stg}) + f_y A_{st} + f'_{uhpc} A_{uhpc}$	-	-	กก.
Assum c	8.42	6.63	ซม.
$a = \beta_1 c$	7.16	5.64	ซม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	1177.48	2444.34	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	2444.34	1541.54	กก./ตร.ซม.
E_{uhpc}	476812	476812	กก./ตร.ซม.
$f'_{uhpc} = 0.003E_{hc} \frac{(c_b - d')}{c_b}$	587.80	360.31	กก./ตร.ซม.
$A_{\text{pipe in stress block}}$	11.62	9.33	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{\text{pipe in stress block}})$	20913	16428	กก.
$T = A_s f_s$	2308.28	4791.77	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	4363.53	2593.72	กก.
$C_{uhpc} = A_{uhpc} f'_{uhpc}$	4826.97	2958.79	กก.
$P_n = C_c + (C_s + C_{hc}) - T$	27795.2	17189.1	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{hc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	1112.17	1031.96	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.

ตาราง 37 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1)

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f'_{uhpc}	1515	1515	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	34	34	ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) (A_{stg})	9.08	9.08	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) (A_{st})	1.237	1.237	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัด UHPC (A_{uhpc})	7.843	7.843	ตร.ซม.
d	9.7	9.7	ซม.
d'	5.3	5.3	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{stg}) + f_y A_{st} + f'_{uhpc} A_{uhpc}$	93705	-	กก.
Assum c	-	12.11	ซม.
$a = \beta_1 c$	-	10.29	ซม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	-	-1217.94	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	-	2444.34	กก./ตร.ซม.
E_{uhpc}	-	476812.30	กก./ตร.ซม.
$f'_{uhpc} = 0.003E_{hc} \frac{(c_b - d')}{c_b}$	-	804.40	กก./ตร.ซม.
$A_{\text{pipe in stress block}}$	-	31.19	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{\text{pipe in stress block}})$	-	26915.80	กก.
$T = A_s f_s$	-	-3012.03	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	5504.76	กก.
$C_{uhpc} = A_{uhpc} f'_{uhpc}$	-	10724.69	กก.
$P_n = C_c + (C_s + C_{hc}) - T$	-	46157.28	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{hc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	924.18	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ซม.

ตาราง 38 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1 นิ้ว (PUHPC1)

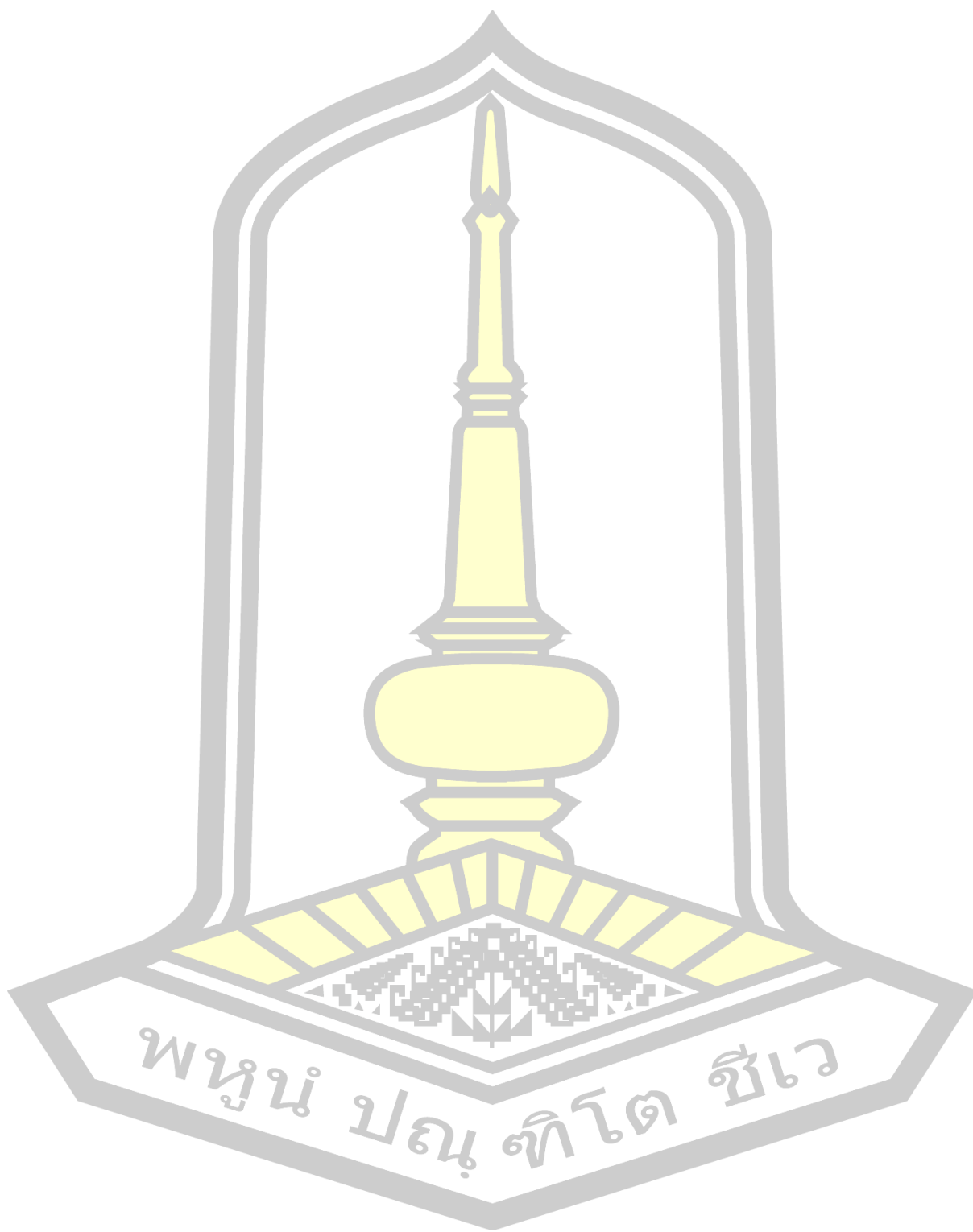
สมการ	e=40	e=60	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f'_{uhpc}	1515	1515	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	34	34	ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) (A_{stg})	9.08	9.08	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) (A_{st})	1.237	1.237	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัด UHPC (A_{uhpc})	7.843	7.843	ตร.ซม.
d	9.7	9.7	ซม.
d'	5.3	5.3	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{stg}) + f_y A_{st} + f'_{uhpc} A_{uhpc}$	-	-	กก.
Assum c	8.07	6.81	ซม.
$a = \beta_1 c$	6.86	5.79	ซม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	1236.13	2444.34	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	2100.67	1359.10	กก./ตร.ซม.
E_{uhpc}	476812	476812	กก./ตร.ซม.
$f'_{uhpc} = 0.003E_{hc} \frac{(c_b - d')}{c_b}$	490.99	317.66	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe\ in\ stress\ block}$	17.90	12.37	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe\ in\ stress\ block})$	18566.02	16273.31	กก.
$T = A_s f_s$	3057.04	6045.00	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	4654.84	2820.90	กก.
$C_{uhpc} = A_{uhpc} f'_{uhpc}$	6546.18	4235.28	กก.
$P_n = C_c + (C_s + C_{hc}) - T$	26710.01	17284.49	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{hc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	1069.36	1037.53	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.

ตาราง 39 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=0$ และ $e=20$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4))

สมการ	e=0	e=20	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f'_{uhpc}	1515	1515	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	42.7	42.7	ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) (A_{stg})	14.32	14.32	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) (A_{st})	1.565	1.565	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัด UHPC (A_{uhpc})	12.756	12.756	ตร.ซม.
d	9.265	9.265	ซม.
d'	5.735	5.735	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{stg}) + f_y A_{st} + f'_{uhpc} A_{uhpc}$	117639.12	-	กก.
Assum c	-	11.05	ซม.
$a = \beta_1 c$	-	9.39	ซม.
$f'_s = \frac{6120(d - c)}{c}$	-	-988.62	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c - d')}{c}$	-	2444.34	กก./ตร.ซม.
E_{uhpc}	-	476812	กก./ตร.ซม.
$f'_{uhpc} = 0.003E_{hc} \frac{(c_b - d')}{c_b}$	-	688.03	กก./ตร.ซม.
$A_{pipe\ in\ stress\ block}$	-	44.05	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{pipe\ in\ stress\ block})$	-	21154.49	กก.
$T = A_s f_s$	-	-3093.40	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	-	6964.87	กก.
$C_{uhpc} = A_{uhpc} f'_{uhpc}$	-	14919.65	กก.
$P_n = C_c + (C_s + C_{hc}) - T$	-	46132.41	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{hc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	-	924.78	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	-	2.00	ซม.

ตาราง 40 รายการคำนวณค่า P_n และ M_n ที่ $e=40$ และ $e=60$ ของเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็ก
สำเร็จรูป+UHPC ขนาด 1(1/4) นิ้ว (PUHPC1(1/4))

สมการ	e=40	e=60	หน่วย
f'_c	257	257	กก./ตร.ซม.
f'_{uhpc}	1515	1515	กก./ตร.ซม.
f_y	2444	2444	กก./ตร.ซม.
A_g	225	225	ตร.ซม.
Diameter of Pipe	42.7	42.7	ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(ทั้งหมด) (A_{stg})	14.32	14.32	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัดท่อ(เฉพาะเหล็ก) (A_{st})	1.565	1.565	ตร.ซม.
พื้นที่หน้าตัด UHPC (A_{uhpc})	12.756	12.756	ตร.ซม.
d	9.265	9.265	ซม.
d'	5.735	5.735	ซม.
$P_n = 0.85f'_c (A_g - A_{stg}) + f_y A_{st} + f'_{uhpc} A_{uhpc}$	-	-	กก.
Assum c	7.68	6.83	ซม.
$a = \beta_1 c$	6.53	5.80	ซม.
$f_s = \frac{6120(d-c)}{c}$	1263.05	2187.96	กก./ตร.ซม.
$f'_s = \frac{6120(c-d')}{c}$	1549.92	977.41	กก./ตร.ซม.
E_{uhpc}	476812	476812	กก./ตร.ซม.
$f'_{uhpc} = 0.003E_{hc} \frac{(c_b - d')}{c_b}$	362.27	228.45	กก./ตร.ซม.
$A_{\text{pipe in stress block}}$	20.93	14.89	ตร.ซม.
$C_c = 0.85f'_c (ab - A_{\text{pipe in stress block}})$	16817.77	15757.45	กก.
$T = A_s f_s$	3952.11	6846.17	กก.
$C_s = A'_s (f'_s - 0.85f'_c)$	4166.21	2374.80	กก.
$C_{uhpc} = A_{uhpc} f'_{uhpc}$	7855.54	4953.83	กก.
$P_n = C_c + (C_s + C_{hc}) - T$	24887.41	16239.91	กก.
$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + (C_s + C_{hc}) \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T \left(d - \frac{h}{2} \right)$	994.34	974.93	กก.-ม.
ตรวจสอบ $e = \frac{M_n}{P_n}$	4.00	6.00	ซม.



พหุ ประยูร ทิต สีวะ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายปิยะพล สีหาบุตร
วันเกิด	16 กุมภาพันธ์ 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	711/59 กัลปพฤกษ์คอนโด หมู่ที่ 1 ถนน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลท่าขอนยาง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2552 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2567 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนัน ปณุกิตโต ชีวะ