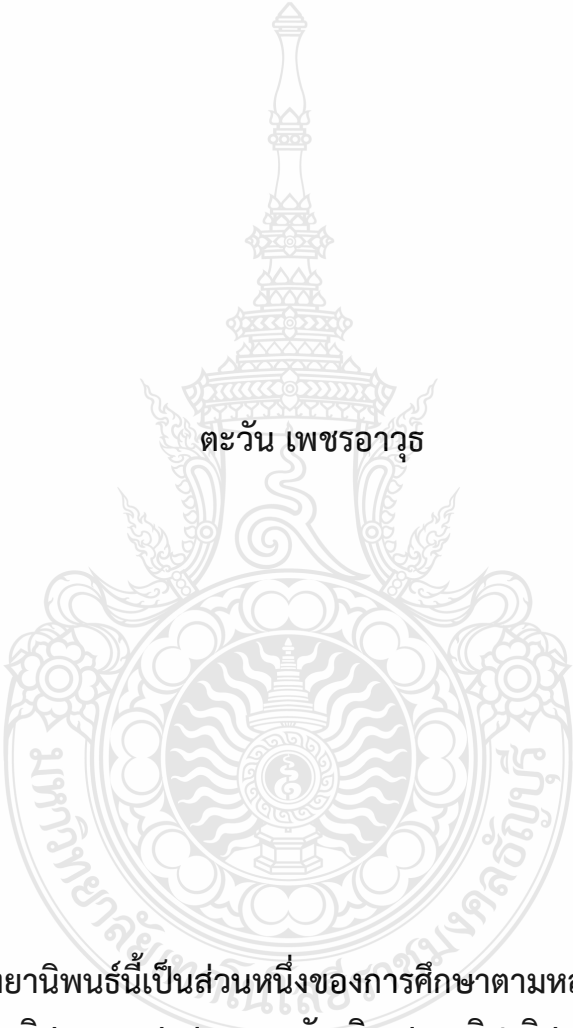


การใช้ตะกอนประปา ในมอร์ตาร์เกร้าท์รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป  
USE OF WATER SUPPLY TREATMENT SLUDGE IN MORTAR GROUT  
FOR JOINT OF PRECAST CONCRETE PAVEMENT GROUTING



ตะวัน เพชรอาวุธ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การใช้ตะกอนประปา ในมอร์ตาร์เกร้าท์รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป



ตะวัน เพชรอาวุธ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ตะกอนประปาในมอร์ตาร์เกร้าท์รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป  
Use of Water Supply Treatment Sludge in Mortar Grout for Joint  
of Precast Concrete Pavement Grouting

ชื่อ - นามสกุล

นายตะวัน เพชรอาวุธ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.

ปีการศึกษา

2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ปิติศักดิ์ กร้ามาตร, ปร.ด.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์วิทิต พูลเงิน, Ph.D.)

นิรชร นกแก้ว  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, จศ.ม.)

จตุพล ตั้งปกาศิต  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่ 12 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ตะกอนประปาในมอร์ตาร์เกร้าที่รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป
ชื่อ-นามสกุล	นายตะวัน เพชรอาวุธ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด
ปีการศึกษา	2564

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้ตะกอนน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในมอร์ตาร์เกร้าที่ รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป ที่มีผลต่อสมบัติของมอร์ตาร์เกร้าที่ แรงอัด แรงดึงโดยตรง แรงดัด แรงยึดเหนี่ยว และการหดตัวโดยรวม

โดยใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในมอร์ตาร์เกร้าที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.37 ทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์เกร้าที่ อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ทดสอบความเค้นดัด แรงดึงโดยตรง และแรงยึดเหนี่ยว โดยเปรียบเทียบระหว่างการฝั่งเหล็กขณะหล่อคอนกรีตและการเจาะรูใช้มอร์ตาร์เกร้าที่ยึดเหล็ก ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ทดสอบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์เกร้าที่อายุ 1, 3, 5, 7, 14 และ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่า มอร์ตาร์เกร้าที่ตะกอนประปามีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างจากมอร์ตาร์เกร้าที่ปูนซีเมนต์ทุกอายุทดสอบ แรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าที่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า การฝั่งเหล็กไปพร้อมขณะหล่อและแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์เกร้าที่เพิ่มขึ้น ความเค้นดัดและแรงดึงโดยตรงของมอร์ตาร์เกร้าที่มีค่าสูงกว่าความเค้นดัดของคอนกรีตล้วน อายุของมอร์ตาร์เกร้าที่ไม่มีผลต่อความเค้นดัดและแรงดึงโดยตรง การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์เกร้าที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์เกร้าที่ตะกอนประปาสามารถนำมาใช้ในงานรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปได้

**คำสำคัญ:** ตะกอนประปา เกร้าที่ รอยต่อผิวทาง แรงยึดเหนี่ยว การหดตัว

<b>Thesis Title</b>	Use of Water Supply Treatment Sludge in Mortar Grout for Joint of Precast Concrete Pavement Grouting
<b>Name-Surname</b>	Mr. Tawan Petarwut
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Jatuphon Tangpagasit, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2021

## ABSTRACT

This thesis aimed to study the effectiveness of using water supply treatment sludge from Bang Khen Water Treatment Plant as replacement of Portland cement in mortar grout for grouting precast concrete affecting the characteristics of compressive strength, direct tensile, bending, bonding and total shrinkage.

Water supply treatment sludge was replaced in Portland cement for 5% in mortar grout with the water to binder ratio of 0.37. The compressive strength of mortar grout was examined at the age of 1, 3, 7, 14 and 28 days. Bending, direct tensile and bonding were examined by comparing between steel bar placement while casting in concrete and bonding strength of mortar grout at the age of 1, 3, 7, 14 and 28 days. Total shrinkage was determined at 1, 3, 5, 7, 14 and 28 days.

The study results showed that the value of compressive strength of water supply treatment sludge in mortar grout was not different from Portland cement mortar grout at all ages. Bonding strength of mortar grout was lower than steel bar placement while casting in concrete and bonding strength increased when the age increased. Bending stress and direct tensile of mortar grout was higher than the bending stress of pure concrete. The age of mortar grout did not affect the bending stress and direct tensile. Total shrinkage of mortar grout with waterworks sludge replacement for 5% by weight in Portland cement was less than in Portland cement mortar. It can be concluded that waterworks sludge mortar grout can be used in precast concrete pavement.

**Keywords:** water supply treatment sludge, grouting, joint of pavement, bonding strength, shrinkage

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยในการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาแขนงวิศวกรรมโครงสร้างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีในช่วงปี พุทธศักราช 2562-2564 โดยทำงานวิจัยเรื่องการใช้ตะกอนประปาในมอร์ตาร์เกร้าท์รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป ผู้วิจัยต้องกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้การแนะนำตลอดระยะเวลาการศึกษาและการวิจัยเป็นอย่างดีและขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปิติ ศานต์ გრამাত্র รศ.นิรชร นกแก้ว รศ.ดร. ทวิช พูลเงิน ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่คอยช่วยเหลืองานวิจัยเสร็จจุล่งด้วยดี

ความดีของงานวิจัยนี้ขออุทิศแด่ครอบครัวของผู้เขียนที่เข้าใจและเป็นกำลังใจอย่างเต็มที่ในการทำงานวิจัยการใช้ประโยชน์ของตะกอนประปาในปูนซีเมนต์เกร้าท์รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป

ตะวัน เพชรอาวุธ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	11
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	12
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	12
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา.....	13
2.2 ถนนคอนกรีต (Portland Cement Concrete Pavements).....	16
2.3 รอยต่อของถนนคอนกรีต.....	19
2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	20
2.5 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength).....	22
2.6 การเปลี่ยนแปลงสภาพของคอนกรีต.....	23
2.7 กลไกการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบยัดรี้ง.....	25
2.8 การผสมเพิ่ม.....	26
2.9 การทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัว.....	28
2.10 กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (Direct Tensile Test).....	29
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	39
3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	39
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	45
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์.....	56
4.1 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ.....	56
4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัว.....	56
4.3 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์การทดสอบกำลังอัด.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดสอบกำลังของคอนกรีตควมที่ 28 วัน .....	58
4.5 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้ความเค้นดัดแก่คาน ขนาด 10 X 10 X 60 เซนติเมตร .....	58
4.6 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์โดยให้แรงดึงเหล็ก .....	59
4.7 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้แรงดึงโดยตรงใน ตัวอย่างรูปตัวไอ ขนาด 10 X 20 X 60 เซนติเมตร .....	61
4.8 ผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 X 10 X 60 เซนติเมตร .....	62
บทที่ 5 บทสรุป .....	63
บรรณานุกรม .....	64
ภาคผนวก .....	68
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการรับกำลังของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร .....	69
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม แบบธรรมดาใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ .....	71
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแบบที่ใช้ มอร์ตาร์เกร้าท์ใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ .....	76
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้ ความเค้นดัดแก่คาน ขนาด 10 X 10 X 60 เซนติเมตร ใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ .....	72
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้แรงดึง โดยตรงในตัวอย่างรูปตัวไอ ขนาด 10 X 20 X 60 เซนติเมตร ใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ .....	76
ภาคผนวก ฉ ตารางค่าการหดตัวโดยรวม .....	80
ภาคผนวก ช ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	82
ประวัติผู้เขียน .....	91



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงาน บางเขน .....	15
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดของสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตไหลได้ตาม ASTM C 1017.....	27
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา.....	33
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษากำลังอัด แรงยึดเหนี่ยว และการหดตัว.....	46
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด แรงยึดเหนี่ยว แรงดึงโดยตรง และกำลังคัต.....	46
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐานต่าง ๆ.....	56
ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัว.....	56
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังอัด มาตรฐาน ASTM C109/C109M .....	57



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	กระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง..... 15
รูปที่ 2.2	ลักษณะของตะกอนน้ำประปาก่อนการปรับปรุงคุณภาพ ..... 16
รูปที่ 2.3	การเกิด Bond และ Adhesion ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ..... 22
รูปที่ 2.4	ลักษณะการวางการทดสอบกำลังอัด ..... 29
รูปที่ 2.5	เครื่องทดสอบกำลังแรงดึงโดยตรง ตัวอย่างรูป Dog Bone ..... 30
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างรูป Dog Bone ที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง ..... 30
รูปที่ 2.7	เครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรง ตัวอย่างรูปตัวโอ ..... 31
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างรูปตัวโอที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง ..... 31
รูปที่ 2.9	ลักษณะของตะกอนน้ำประปา..... 33
รูปที่ 2.10	โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปา ..... 34
รูปที่ 2.11	โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปาเมื่อมีการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส... 34
รูปที่ 2.12	ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์..... 36
รูปที่ 3.1	รูปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ..... 39
รูปที่ 3.2	มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลองผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ..... 39
รูปที่ 3.3	มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดลอง..... 40
รูปที่ 3.4	ตะกอนประปา ..... 40
รูปที่ 3.5	เหล็กข้ออ้อย DB 12 มิลลิเมตร ..... 40
รูปที่ 3.6	แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ..... 41
รูปที่ 3.7	ชุดหล่อตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 x 30 เซนติเมตร... 41
รูปที่ 3.8	แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร..... 42
รูปที่ 3.9	แบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร..... 42
รูปที่ 3.10	แบบรูปตัวโอ ขนาด 20 x 10 x 30 เซนติเมตร ..... 43
รูปที่ 3.11	เครื่องทดสอบ (Compression Machines) ..... 43
รูปที่ 3.12	เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine)..... 44
รูปที่ 3.13	เครื่องบดวัสดุ..... 44
รูปที่ 3.14	เครื่องวัดความยาวแท่งคอนกรีต..... 45
รูปที่ 3.15	การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร..... 47
รูปที่ 3.16	การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร ..... 47
รูปที่ 3.17	แบบทรงกระบอก 15 x 30 เซนติเมตร..... 49
รูปที่ 3.18	แบบทรงกระบอก 15 x 15 x 15 เซนติเมตร..... 49
รูปที่ 3.19	การทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 x 30 เซนติเมตร แบบใส่เหล็กต่อนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบเจาะที่หลัง แล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร..... 50

## สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.20	การทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ มาตรฐาน โดยใช้ตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบเจาะที่หลังแล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร.....	50
รูปที่ 3.21	แบบคาน 10 X 10 X 60 เซนติเมตร.....	51
รูปที่ 3.22	การทดสอบกำลังดัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน โดยใช้ตัวอย่างขนาด 10 x 10 x 60 แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต ผึ่งเดียวแล้วเจาะฝังเหล็กที่หลังแล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร .....	51
รูปที่ 3.23	แบบตัวไอ 20 X 10 X 60 เซนติเมตร .....	52
รูปที่ 3.24	การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับหัวยึด.....	53
รูปที่ 3.25	รูปแบบและขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
รูปที่ 3.26	หัวยึดตัวอย่างคอนกรีต.....	54
รูปที่ 3.27	การทดสอบแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength).....	54
รูปที่ 3.28	การทดสอบกำลังดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอ โดยใช้ตัวอย่างขนาด 20 x 10 x 60 แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตรกับแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตผึ่งเดียวแล้วเจาะฝังเหล็กที่หลังแล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร.....	55
รูปที่ 4.1	ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์การทดสอบกำลังอัด .....	58
รูปที่ 4.2	โมเมนต์ดัดคานคอนกรีต ขนาด 10 X 10 X 60 เซนติเมตร เจาะฝังเหล็กใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ข้างหนึ่ง อีกข้างฝังในขณะหล่อคอนกรีต.....	58
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเทียบกับวัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ ขนาด 15 x 15 X 15 เซนติเมตร.....	59
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเทียบกับเหล็กที่ใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร.....	60
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมคอนกรีตตัวอย่างตัวไอ ขนาด 10 X 20 X 60 เซนติเมตรที่ใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์กับอายุ.....	61
รูปที่ 4.6	ผลการทดสอบการหดตัวโดยรวม .....	62

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันตะกอนน้ำประปาที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำประปายังคงเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปา จากข้อมูลของการประปานครหลวง พบว่าโรงงานผลิตน้ำบางเขนของการประปานครหลวงที่มีการผลิตน้ำประปาประมาณวันละ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันมีปริมาณตะกอนที่เกิดจากขบวนการผลิตเท่ากับ 300 ตันแห้งในฤดูแล้ง และ 700 ตัน แห้งในฤดูฝนและมีแนวโน้มที่จะมากขึ้นทุกๆ ปี โดยในปัจจุบันยังไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมได้ ซึ่งปริมาณตะกอนดังกล่าวที่มีอยู่ และสะสมเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากขึ้นในแต่ละปี ทำให้การประปาต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด โดยการขนไปทิ้งปีละประมาณ 11 ล้านบาทและเพื่อหาวิธีที่จะลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ ทางการประปาลงพยายามหาวิธีที่จะนำตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด เช่น ใช้ถมที่ ใช้เป็นวัสดุในการทำอิฐ และเครื่องปั้นดินเผา ฯลฯ แต่ก็ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ อีกทั้งงานวิจัยยังมีน้อย จึงยังไม่มีกรรมนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งเห็นได้ว่าการนำตะกอนประปาไปใช้ให้เกิดประโยชน์นั้นยังมีปริมาณที่น้อย และยังมีแนวโน้มที่จะมีการใช้งานที่มากขึ้น ถ้าสามารถที่จะพัฒนาเพื่อให้มีการนำมาตะกอนประปามาใช้ในปริมาณที่มากที่สุด เช่นอุตสาหกรรมก่อสร้าง ก็จะเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาให้กับโรงงานผลิตน้ำประปาได้อีกทางหนึ่ง โดยวิธีที่จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีการใช้วัสดุในปริมาณที่มากที่สุด ทำให้มีความน่าจะเป็นที่จะสามารถนำตะกอนน้ำประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์ซึ่งจะเป็นการลดปัญหาในการทิ้งและลดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายให้กับโรงงานผลิตน้ำประปาได้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดมลภาวะทางอากาศได้จากการที่ใช้ตะกอนน้ำประปามาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ มีผลทำให้การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ซึ่งก็จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกเช่นเดียวกับการผลิตที่ลดลงจากงานวิจัยของจตุพล และคณะ [1] พบว่าวัสดุที่มีความละเอียดสูงจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้นจากการที่อนุภาคขนาดเล็กๆ เข้าไปแทรกตัวระหว่างช่องว่างในคอนกรีตทำให้มีความแน่นมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าวัสดุที่ใช้นั้นไม่ได้เป็นวัสดุพอซโซลานก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นแต่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมและยังพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น คือ 1 ถึง 3 วัน จะพบว่าการกำลังจะสูงขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้ามีการนำตะกอนน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุที่เข้าไปทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ก็เป็นแนวทางหนึ่งที่จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

จากเทคโนโลยีการก่อสร้างที่มีการใช้ระบบการก่อสร้างสำเร็จรูปมากขึ้น เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนของแรงงานและต้นทุนของวัสดุก่อสร้างที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สามารถที่จะก่อสร้างได้เร็วและลดการใช้แรงงานลง ซึ่งจากที่กล่าวมานอกจากการก่อสร้างอาคารด้วยระบบสำเร็จรูปแล้ว ในหลาย ๆ ประเทศเริ่มมีการใช้ผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปมากขึ้น ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวทำให้เห็นว่าการใช้ผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปในประเทศจะมีการใช้มากขึ้น จากแนวโน้มดังกล่าวมาจะเห็นว่าผิวทาง

สำเร็จรูปจะเป็นวัสดุที่จะถูกใช้มากขึ้นในอนาคต จากข้อดีของผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปที่สามารถควบคุมคุณภาพได้ ทำงานได้เร็ว ลดปัญหาจากการทำงานต่าง ๆ ลง โดยรอยต่อของแผ่นผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปจะต้องใช้มอร์ตาร์เกร้าท์สำหรับรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีต เช่น อีพอกซี (Epoxy) แต่เนื่องจาก อีพอกซีมีราคาค่อนข้างค่อนข้างสูง การนำวัสดุอื่นมาแทนที่ก็จะเป็นการประหยัดทั้งราคาและมีคุณภาพใช้งานได้ อีกทั้งถ้าสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย ซึ่งก็จะเป็นการนำสิ่งที่ไม่มีความทำให้เกิดมูลค่าได้ และยังเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำตะกอนประปามาใช้ในซีเมนต์เกร้าท์รอยต่อและรองพื้นของถนนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Pavement) โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและทำให้วัสดุมีราคาที่ไม่สูงเกินไป อีกทั้งยังเป็นการแก้ปัญหาการทิ้งตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปาอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของตะกอนประปาจากระบบการผลิตน้ำประปา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการใช้ตะกอนประปาในงานซีเมนต์เกร้าท์สำหรับรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการหดตัวของซีเมนต์เกร้าท์สำหรับการนำตะกอนประปามาใช้ในงานรอยต่อผิวทางคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษานี้ นำตะกอนที่ได้จากระบบผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำประปาตั้งอยู่ที่ 400 ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร โดยเก็บตะกอนจากลานทิ้งตะกอนเพื่อนำมาศึกษาหาคุณสมบัติของตะกอนประปา เช่น หาความถ่วงจำเพาะ ระยะเวลาการก่อตัวใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ทำการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เกร้าท์ที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กกับคอนกรีต แรงดัด และแรงดึงโดยตรงเมื่อใช้วัสดุเชื่อมประสานที่แทนที่ด้วยตะกอนประปาที่ได้ ที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนประปา ที่อายุ 1 3 5 7 14 และ 28 วัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของตะกอนน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน
- 1.4.2 ทราบสัดส่วนของการใช้ตะกอนน้ำประปาในการแทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับการใช้เป็นวัสดุซีเมนต์เกร้าท์
- 1.4.3 เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาของการประปาในการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยการนำตะกอนประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์และทราบถึงอัตราส่วนผสมของตะกอนประปากับปูนซีเมนต์สำหรับการทำวัสดุเชื่อมประสาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการนำตะกอนประปาจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีต กำลังปานกลางที่อายุต้นจนถึงอายุมาตรฐานสำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา [2]

การผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวงใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นส่วนใหญ่โดยมีสถานีสูบน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่ตำบลบางลำไย จังหวัดปทุมธานี และชุดคลองเปิดลำเลียงเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำที่บางเขน สามเสน และธนบุรี โดยอัตราการใช้น้ำดิบประมาณวันละ 3.5 ล้านลูกบาศก์เมตร

##### 2.1.1 การสูบน้ำดิบ

การนำเข้าสู่กระบวนการผลิตจะต้องใช้เครื่องสูบน้ำตามกำลังผลิตของแต่ละโรงงานผลิตน้ำและแยกวัสดุที่ปนมากับน้ำและจะแยกวัสดุที่ปนมากับน้ำโดยผ่านตะแกรงเหล็กอย่างหยาบและละเอียดเพื่อแยกวัสดุที่ไม่ต้องการขั้นตอนออกจากกระบวนการผลิต

##### 2.1.2 การตกตะกอน

การประปานครหลวงมีชนิดของถังตกตะกอนหลายชนิดทั้งชนิดเก่าถึงสี่เหลี่ยมและแบบทันสมัยและมีขนาดใหญ่ที่สุดในเอเชียที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนทุกชนิดของถังตกตะกอนมีจุดประสงค์ในการทำงานอย่างเดียวกันคือเป็นการผสมสารเคมีกับน้ำดิบและจับตะกอนให้ตกลงและระบายแยกตะกอนออกจากน้ำทำให้น้ำสะอาดใสขึ้นระดับหนึ่งปัจจุบันความขุ่นของน้ำดิบมีความแปรเปลี่ยนสูงมากระหว่าง 50-200 NTU. (หน่วยความขุ่น) หลังจากน้ำผ่านกรรมวิธีการตกตะกอนแล้วจะได้น้ำที่มีความใส 4-5 NTU. (ความขุ่นของน้ำดื่ม)

##### 2.1.3 การกรอง

น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลเข้าสู่บ่อกรองหรือบางโรงงานก็อาจใช้เครื่องสูบน้ำยกระดับช่วยอีกครั้งหนึ่งเพื่อสามารถควบคุมระดับน้ำในการกรองได้ดีขึ้นในบ่อกรองจะประกอบด้วยประตูระบายน้ำเข้าออกและระบบล้างบ่อกรองหัวกรองและสารกรอง ซึ่งประกอบด้วย หินหยาบ ทรายละเอียด และแอนทราไซต์ (ถ่านหินชนิดหนึ่ง) ความละเอียดและการเรียงตัวของสารกรองจะสามารถกรองน้ำที่ได้จากถังตกตะกอนให้มีความขุ่นที่หลงเหลืออยู่หมดไปหรือสะอาดได้มาตรฐานกำหนด 2 NTU. (หน่วยความขุ่นของน้ำดื่ม)

##### 2.1.4 การเติมสารเคมี

การประปานครหลวงใช้สารเคมีหลักในการผลิตน้ำประปาอยู่ 3 ชนิด คือ

- 1) สารส้ม (Alum) ใช้เติมในถังตกตะกอนและแยกตะกอนออก

2) ปูนขาว (Lime) ใช้ปรับปรุงคุณภาพความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำให้อยู่ในสถานะเป็นกลางที่ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ประมาณ 7

3) คลอรีน (Chlorine) เป็นสารที่เติมในน้ำดิบร่วมกับสารส้มเพื่อช่วยในการตกตะกอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การใช้สารเคมีเหล่านี้จะได้รับการตรวจสอบคุณภาพและกำหนดมาตรฐานในการใช้โดยนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรควบคุมอย่างใกล้ชิดและต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อให้การผลิตน้ำประปาได้มาตรฐานที่สุด

#### 2.1.5 ตะกอนและน้ำทิ้ง

เดิมการผลิตน้ำประปาจำนวนน้อยปัญหาการกำจัดตะกอนและน้ำทิ้งไม่ได้เป็นสิ่งที่กระทบกระเทือนต่อสิ่งแวดล้อมมากนักแต่ปัจจุบันการผลิตน้ำที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนในปริมาณมากกว่า 2 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันจะเกิดตะกอนที่ต้องกำจัดประมาณวันละ 200 ตัน จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ผลิตเพิ่มและค่าความขุ่นของน้ำที่เพิ่มขึ้นในอนาคตการประปานครหลวงต้องมีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มขึ้นพร้อมทั้งหาวิธีการที่มีคุณภาพและรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดี

ปัจจุบันที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนได้ใช้วิธีกำจัดตะกอนโดยการสูบน้ำเข้าบ่อพักขนาดใหญ่เพื่อตกตะกอนระบายน้ำใส่ออกให้ตะกอนเข้มข้นและสูบขึ้นตากแห้งโดยแสงแดดและนำออกนอกโรงงานผลิตน้ำส่วนน้ำทิ้งจากขบวนการผลิตปัจจุบันได้ใช้เครื่องสูบน้ำคุณภาพดีส่วนหนึ่งกลับมาใช้ใหม่ประมาณวันละ 80,000 ลูกบาศก์เมตร

#### 2.1.6 การควบคุมคุณภาพน้ำ

การผลิตน้ำประปาไม่เพียงแต่จะต้องให้มีปริมาณที่เพียงพอเท่านั้นจะต้องมีคุณภาพที่ได้มาตรฐานน้ำดื่มด้วยการตรวจสอบคุณภาพน้ำจึงถือว่าเป็นงานที่สำคัญอย่างยิ่งการประปานครหลวงจึงได้วางแผนในการตรวจสอบคุณภาพน้ำในทุกขั้นตอนตั้งแต่คุณภาพน้ำในระบบน้ำดิบโดยทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาตั้งแต่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาถึงกรุงเทพมหานครและในคลองประปาเป็นประจำเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำสำรวจสภาพแวดล้อมและหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขโดยประสานงานกับหน่วยงานของ รัฐบาลและเอกชนเพื่อติดตามมิให้น้ำมีคุณภาพต่ำลง

#### 2.1.7 การตรวจคุณภาพน้ำ

ในระบบผลิตมีการตรวจสอบการใช้สารเคมีอย่างเหมาะสมและวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุก 4 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำประปามีคุณภาพได้มาตรฐานน้ำดื่มตลอดเวลาในระบบจ่ายน้ำมีการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อการวิเคราะห์ตามเกณฑ์กำหนดขององค์การอนามัยโลก (WHO) โดยวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากทุกโรงงานผลิตน้ำประปาและสถานีสูบน้ำเป็นประจำวันมีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากบ้านผู้ใช้น้ำโดยการสุ่มตัวอย่างจากจำนวนประชากรในปีงบประมาณ 2536 ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจำนวน 7,709 ตัวอย่าง พบว่าได้มาตรฐานน้ำดื่มทางแบคทีเรียร้อยละ 98.7 ของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์สูงเกินเกณฑ์กำหนดขององค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งกำหนดคุณภาพทางด้านแบคทีเรียในรอบ 1 ปี ต้องได้มาตรฐานไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำประปาแสดงใน

รูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำประปาที่ผลิต -  
 จ่ายจากโรงงานบางเขน



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำประปาที่ผลิตจากโรงงาน  
 บางเขน

คุณสมบัติในด้านต่าง ๆ	มาตรฐานน้ำดื่ม		คุณสมบัติของ น้ำประปาผลิตจาก โรงงานบางเขน (เฉลี่ย)
	ของ WHO	ของการประปา นครหลวง	
1. ปริมาณไนเตรท	45 mg/l	45 mg/l	0.5 - 1.0 mg/l
2. ปริมาณสารแคลเซียม	75 mg/l	75 mg/l	25 - 27 mg/l
3. ปริมาณสารคลอไรด์	200 mg/l	250 mg/l	13 - 15 mg/l
4. ปริมาณสารฟลูออไรด์	1.5 mg/l	0.7 mg/l	0.2 - 0.3 mg/l
5. ความกระด้างในรูป CaCO <sub>3</sub>	100 mg/l	300 mg/l	75 - 86 mg/l
6. ปริมาณสารเหล็ก	0.3 mg/l	0.3 mg/l	0.01 - 0.03 mg/l
7. ปริมาณสารแมงกานีส	0.1 mg/l	0.5 mg/l	0.01 - 0.03 mg/l
8. ปริมาณสารแมกนีเซียม	50 mg/l	50 mg/l	5.2 - 6.5 mg/l
9. ปริมาณซัลเฟตในรูป SO <sub>4</sub>	200 mg/l	200 mg/l	10.0 - 12.5 mg/l
10. ปริมาณสารละลายได้ทั้งหมด	500 mg/l	500 mg/l	125 - 160 mg/l
11. ความขุ่น	5 หน่วย *	5 หน่วย *	2 หน่วย
12. สี	5 หน่วย **	10 หน่วย **	ไม่มีสี
13. กลิ่น	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ	ไม่มีกลิ่น
14. pH	7.0 - 8.5	6.5 - 8.5	7.0 - 8.0

หมายเหตุ 1) หน่วยความขุ่นการประปานครหลวงใช้หน่วย Jackson Turbidity Unit

2) หน่วยของสีการประปานครหลวงใช้หน่วย Platinum - Cobalt Scale



### 2.1.8 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนประปา

ลักษณะทั่วไปของตะกอนประปามีลักษณะคล้ายกับตะกอนดินเหนียวเปียกชื้นเมื่อตากให้แห้งมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับตะกอนดินนั่นเอง ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานต้องมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการนำไปตากให้แห้งและบดให้มีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับวัสดุ ก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุประสานต่อไป



รูปที่ 2.2 ลักษณะของตะกอนน้ำประปาก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

## 2.2 ถนนคอนกรีต (Portland Cement Concrete Pavements)

โดยทั่วไปแล้วประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกจะใช้ถนนคอนกรีตสำหรับรองรับปริมาณการจราจรที่ค่อนข้างสูงถนนคอนกรีตมักจะพบมากในเขตอุตสาหกรรมหนักของโลกโดยเฉพาะอย่างยิ่งยุโรปและอเมริกาเหนือ เนื่องจากเชื่อว่าถนนคอนกรีตมีความแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้มาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ถูกต้องหากว่าถนนคอนกรีตได้รับการออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้องกล่าวคือ ถนนคอนกรีตจะใช้งานได้ดีหากก่อสร้างในที่ที่มีโครงสร้างฐานรากที่แข็งแรงไม่มีการแอ่นตัวหรือทรุดตัวที่แตกต่างกันเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีลักษณะแข็งแต่เปราะ ดังนั้นจะแตกร้าวเสียหายได้ง่ายหากนำไปก่อสร้างบนพื้นที่ที่มีฐานรากไม่แข็งแรงเกิดการแอ่นตัวหรือทรุดตัวไม่เท่ากัน เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะผ่านและ เมื่อถนนคอนกรีตเกิดแตกร้าวจะทำให้อายุการใช้งานของถนนสิ้นสุดลงอย่างรวดเร็ว ในประเทศไทยมีส่วนการใช้ถนนคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นในระบบทางหลวงของประเทศโดยที่ผิวทางคอนกรีตมักวางอยู่บนชั้นทางที่ก่อสร้างจากวัสดุประเภทกรวดหรือหินหรือชั้นทางที่เสริมความแข็งแรงชั้นของวัสดุที่อยู่ใต้ผิวทางคอนกรีตและอยู่เหนือชั้นดินเดิมเรียกว่า ชั้นรองพื้นทาง ซึ่งชั้นนี้จะทำหน้าที่หลักในการระบายน้ำที่อาจมีขึ้นให้ระบายออกจากได้แผ่นพื้นคอนกรีตถนนคอนกรีตในระบบทางหลวงของประเทศไทยก่อสร้างโดยใช้รูปตัดที่เป็นมาตรฐานซึ่งมีความหนาของผิวทางคอนกรีตเท่ากับ 230 มิลลิเมตร หรือ 250 มิลลิเมตร โดยมีชั้นรองพื้นทางมีความหนาเท่ากับ 250 มิลลิเมตร

ถนนคอนกรีตส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ธรรมดาทั่ว ๆ ไปอย่างไรก็ตามบางกรณีการใช้ซีเมนต์ประเภทอื่นก็มีข้อดีเหมือนกัน เช่น ปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวเร็วเหมาะสำหรับถนนบางช่วงที่ต้องการใช้งานเร็วกว่าปกติหรือซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็มีการนำมาใช้เพื่อลดปริมาณน้ำและทำให้คอนกรีตสามารถใช้งานได้ดีและสม่ำเสมอ คอนกรีตสำหรับใช้ทำผิวทางจึงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านหน่วยแรงดึงซึ่งเกิดจากการจราจรและการหดตัวเนื่องปัจจัยทางสภาพแวดล้อมได้ดีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับถนนคอนกรีตโดยปกติมีค่าระหว่าง 20,000 เมกะปาสคาล ถึง 40,000 เมกะปาสคาล ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

การเลือกใช้ชนิดของชั้นรองพื้นทางจะขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจร สำหรับถนนคอนกรีตที่รองรับปริมาณการจราจรหนาแน่นโดยปกติจะใช้ชั้นรองพื้นทางที่ทำการปรับปรุงด้วยซีเมนต์หรือแอสฟัลต์อย่างไรก็ตามทางหลวงที่เลือกมาทำการตรวจสอบในการศึกษาคั้งนี้เป็นชั้นรองพื้นทางที่ทำจากวัสดุประเภทกรวดหรือหินซึ่งมีค่า CBR อยู่ระหว่างร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 80 (100 เมกะปาสคาลถึง 300 เมกะปาสคาล)

ชั้นดินเดิมเป็นดินบริเวณที่ทำการก่อสร้างหรือวัสดุคัดเลือกที่ได้รับการบดอัดกระทั้งมีความหนาแน่นตามต้องการในประเทศไทยชั้นดินเดิมมักจะเป็นทรายที่ได้รับการบดอัดให้มีความแน่นตามที่กำหนดและมีค่า CBR ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 10 (75 เมกะปาสคาล)

ไหล่ทางอาจเป็นไหล่ทางแอสฟัลต์หรือคอนกรีตโดยไหล่ทางทั้งสองชนิดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไปแต่จุดประสงค์หลักของไหล่ทางก็เพื่อเป็นฐานรองรับทางด้านข้างของชั้นรองพื้นทาง

#### 2.2.1 ประเภทของถนนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ถนนที่มีผิวเป็นวัสดุพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตหรือที่มักเป็นที่ยอมรับเรียกกันว่า ถนนคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

- 1) Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)
- 2) Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP)
- 3) Continuous Reinforced Concrete Pavement (CRCP)
- 4) Prestressed Concrete Pavement (PCP)

ถนนคอนกรีตแต่ละชนิดแตกต่างกันที่ลักษณะการเสริมเหล็กและรอยต่อเพื่อจำกัดหน่วยแรง แค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่ออุณหภูมิภายในถนนเปลี่ยนแปลงถนน JPCP เป็นถนนคอนกรีตที่ออกแบบโดยปราศจากเหล็กเสริมแต่หลีกเลี่ยงการแตกร้าวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอนกรีตโดยการสร้างรอยต่อของแผ่นคอนกรีตให้ถี่ ๆ อยู่ใกล้ ๆ กัน จึงทำให้มีระยะห่างระหว่างรอยต่อสั้นมากเพียง 5-6 เมตร ซึ่งการยึดประสานกันของเหล็กเดือยหรือวัสดุมวลรวมใช้ในการถ่ายน้ำหนักระหว่างรอยต่อ

ถนน JRCP เป็นถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างด้วยการเสริมเหล็กในลักษณะตะแกรงการเสริมเหล็กไม่ได้เพิ่มความแข็งแรงทางด้านโครงสร้างของถนนแต่ทำให้ระยะห่างระหว่างรอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น 10-15 เมตรได้ สำหรับถนน CRCP จะไม่มีรอยต่อในแนวขวางของถนน ดังนั้นมักจะเกิดการแตกตามรอยขวางเป็นช่วง ๆ ใกล้ ๆ กันซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของถนนประเภทนี้แต่การเสริมเหล็กที่ออกแบบไว้จะช่วยทำให้รอยแตกร้าวนั้นปิดอยู่ตลอดด้วยแรงดึงของเหล็กเสริม เนื่องจากคอนกรีตมี

ความสามารถรับแรงดึงน้อยแต่มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดีมากกว่าการสร้างแรงอัดให้เกิดขึ้นก่อนภายในถนนคอนกรีตจะช่วยลดแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกของการจราจรได้อย่างมากและส่งผลช่วยลดความหนาของถนนคอนกรีตที่ต้องการลงด้วย ถนน JRPC CRCP และ PCP จะก่อสร้างด้วยการเสริมเหล็กตามแนวยาวของถนนและอาจจะเพิ่มการเสริมเหล็ก ตามแนวขวางของถนนด้วย

ในประเทศไทยนั้นหากกล่าวถึงถนนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และคอนกรีตแล้วถนน JRPC เป็นถนนคอนกรีตชนิดที่มีใช้งานอยู่มากที่สุดโดยการเสริมเหล็กจะจัดวางเหล็กลักษณะเป็นตะแกรงตามแนวยาวและแนวขวางของถนนซึ่งวิธีการก่อสร้างถนนประเภทนี้ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างทางหลวงขนาด 4 ถึง 6 ช่องจราจรในภาคกลางของประเทศไทยส่วนการก่อสร้างถนนชนิด JRPC ในประเทศไทยมักจะใช้เฉพาะในการก่อสร้างถนนขนาดเล็กในชนบทและในเขตเมืองหรือหมู่บ้านจัดสรรการก่อสร้างถนน CRCP และ PCP ในประเทศไทยจะไม่มีมากนักเนื่องจากการก่อสร้างมีต้นทุนสูงส่วนถนน PCP มีต้นทุนในการก่อสร้างสูง

### 2.2.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อสมรรถนะของถนนคอนกรีต

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมจะมีอิทธิพลต่อการตอบสนองของถนนโดยถนนคอนกรีตจะมีขนาดบางจึงมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นแผ่นคอนกรีตจึงเกิดการยืดหรือหดตัวทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นภายในแผ่นคอนกรีตประกอบกับหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักของยานพาหนะกระทำกับแผ่นคอนกรีตจากเหตุหลักดังกล่าวทำให้การประเมินสภาพของถนนคอนกรีตต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีต่อแผ่นคอนกรีตด้วย

ผลกระทบอื่น ๆ เช่น การหดตัวเมื่อก่อสร้างเสร็จในการก่อสร้างเมื่อคอนกรีตแห้งตัวจะหดตัวมีปริมาตรลดลงและเกิดการบิดงอตัวขึ้นทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นภายในแผ่นคอนกรีต โดยการบิดงอของแผ่นคอนกรีตเกิดจากผิวด้านบนจะเป็นส่วนที่สัมผัสอากาศจึงมีการหดตัวมากกว่าและเร็วกว่าผิวด้านล่าง เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นในระหว่างการบ่มคอนกรีตจึงสมมติว่าหน่วยแรงที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของช่วงอายุการใช้งานของคอนกรีตและยังไม่ทราบแน่ชัดว่าหน่วยแรงที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตนี้มีผลต่อถนนคอนกรีตมากน้อยแค่ไหน

ในประเทศไทยไม่มีการแข็งตัวเป็นน้ำแข็งของน้ำใต้ผิวทาง (Frost action) ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อสมรรถนะของถนนคอนกรีตมากนักเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศในประเทศไทยไม่เคยลดลงต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส

### 2.2.3 ความเสียหายที่เกิดต่อถนนคอนกรีต

การประเมินสภาพทางโครงสร้างของถนนคอนกรีตจำเป็นต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับร่องรอยต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนถนนซึ่งจะแสดงถึงความเสียหายของถนนคอนกรีตได้

การเกิดโพรงใต้แผ่นคอนกรีต (Purmping)

การเกิดโพรงใต้แผ่นคอนกรีตคือการที่น้ำและวัสดุดินละเอียดใต้ถนนคอนกรีตไหลซึมผ่านรอยต่อ รอยแตก และตามแนวขอบของแผ่นคอนกรีตที่เกิดการโก่งตัวเมื่อถูกล้อรถย้ำการเกิดโพรงใต้ถนนคอนกรีตเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การโก่งงอของแผ่นคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิและการยุบตัวของดินเดิมทำให้เกิดช่องว่างใต้ถนนคอนกรีตการซึมเข้าไปของน้ำการขยายตัวของช่องว่างการต่างระดับกันตรงรอยต่อและการแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตที่ถูกล้อรถซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนเป็น

สาเหตุที่ทำให้เกิดโพรงใต้ถนนคอนกรีตการเกิดโพรงใต้ถนนคอนกรีตจะเกิดขึ้นที่ข้างใต้แผ่นคอนกรีตแผ่นหน้าเมื่อแผ่นคอนกรีตแผ่นหลังเกิดการติดตัวกลับ ซึ่งทำให้เกิดสูญญากาศและการดูดวัสดุที่มีอนุภาคละเอียดจากข้างใต้แผ่นคอนกรีตแผ่นหน้าออกมาข้างบน

#### การแตกร้าวของถนนคอนกรีต (Cracks)

รอยแตกตามแนวยาวและแนวขวางของถนนคอนกรีต แสดงถึงความเสียหายที่เกิดจากการที่ยานพาหนะที่มีน้ำหนักเกินกว่ากำหนดวิ่งผ่านประกอบกับการเสียหายของชั้นฐานรากที่รองรับแผ่นคอนกรีตและจากหน่วยแรงที่เกิดจากการโก่งตัวหรือการบิดตัวของแผ่นคอนกรีต จากเหตุผลดังกล่าว การแตกร้าวของถนนคอนกรีตจึงไม่ได้มีสาเหตุโดยตรงมาจากความเสียหายซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการรองรับน้ำหนักของแผ่นคอนกรีต

### 2.3 รอยต่อของถนนคอนกรีต

รอยต่อของถนนคอนกรีตต้องมีไว้เพื่อช่วยลดหน่วยแรงที่เกิดจากการขยายตัวของแผ่นคอนกรีตเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงซึ่งหากไม่ทำการควบคุมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้แผ่นคอนกรีตเกิดการแตกร้าวโดยการแตกร้าวนี้จะเกิดได้ทุกตำแหน่งของแผ่นคอนกรีต มีขนาดและแนวการแตกที่แตกต่างกันไปซึ่งผลจากการแตกร้าวดังกล่าวทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของถนนคอนกรีตต่ำลงอย่างไรก็ตามบริเวณรอยต่อแผ่นพื้นคอนกรีตมักจะเป็นจุดที่อ่อนแอของถนนคอนกรีตเสมอเนื่องจากรอยต่อเป็นตำแหน่งที่เกิดการเสียหายมากที่สุดของถนนคอนกรีตจึงเป็นหลักเกณฑ์สำคัญอันหนึ่งในการประเมินความแข็งแรงของถนนคอนกรีตจะต้องประเมินสภาพจากรอยต่อซึ่งในที่นี้พอจะอธิบายถึงประเภทและหน้าที่ของรอยต่อโดยสังเขปได้ดังนี้

#### 2.3.1 รอยต่อตามแนวยาว

รอยต่อตามแนวยาวมักได้รับการนำมาใช้ในถนนคอนกรีตเพื่อลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการงอและการบิดของแผ่นคอนกรีตประเภทของรอยต่อตามแนวยาวจะขึ้นกับการก่อสร้างถนนคอนกรีตว่าจะแบบ Full Width หรือ Lane Width เหล็กยึดจะถูกวางในแนวรอยต่อตามแนวยาวของถนนเพื่อยึดแผ่นคอนกรีต 2 แผ่นเข้าด้วยกันดังนั้นรอยต่อจะต้องแนบชิดกันและสามารถถ่ายน้ำหนักระหว่างรอยต่อได้ปริมาณเหล็กและขนาดของเหล็กยึดขึ้นอยู่กับความยาวและความกว้างของแผ่นคอนกรีตเนื่องจากขนาดของหน่วยแรงดึงซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของแผ่นคอนกรีต

ในประเทศไทยถนน JRPC ได้รับการออกแบบให้มีรอยต่อเพื่อการหดตัวตามแนวยาวระหว่างช่องทางจราจรโดยใช้เหล็กยึดขนาดความยาว 500 มิลลิเมตร ที่ทุก ๆ ระยะ 600 มิลลิเมตร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายน้ำหนักและกลไกการทำงาน

โดยพื้นฐานของการถ่ายน้ำหนักในถนนคอนกรีตทำได้โดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในสามวิธีต่อไปนี้ประกอบกันคือ

1) การถ่ายน้ำหนักโดยใช้อุปกรณ์ทางกลทำได้โดยใช้เหล็กเดียวเหล็กยี่ดียว ฯลฯ ซึ่งจะถ่ายน้ำหนักโดยแรงเฉือนและตรงตำแหน่งรอยต่อตามแนวขวางเป็นจุดที่สำคัญมากซึ่งต้องทำให้ปลายของเหล็กเดียวไม่ถูกยึดแน่นเพื่อให้แผ่นคอนกรีตสามารถเคลื่อนตัวในแนวราบได้

2) การถ่ายน้ำหนักโดยใช้การขัดเหลี่ยมประสานกันของวัสดุมวลรวมจะเกิดขึ้นที่รอยต่อซึ่งการขัดเหลี่ยมประสานกันของวัสดุมวลรวมจะต้านทานการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและน้ำหนักจะถูกถ่ายผ่านรอยต่อโดยแรงเฉือน

3) การรองรับแผ่นคอนกรีตด้วยพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ (Cement Treated Base) สามารถช่วยในการถ่ายน้ำหนักได้เนื่องจากพื้นทางที่เสริมความแข็งแรงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับถนนคอนกรีตและช่วยให้การถ่ายน้ำหนักผ่านรอยต่อเพิ่มมากขึ้น

การถ่ายน้ำหนักจะเกิดจากกลไกทั้งสามดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นอย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายปัจจัยทั้งทางตรงและทางอ้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนักและสันนิษฐานว่าการถ่ายน้ำหนักจะขึ้นโดยตรงกับขนาดช่องของรอยต่อขนาดของน้ำหนักที่กระทำจำนวนรอบของน้ำหนักกระทำและชั้นดินที่รองรับส่วนปัจจัยทางอ้อมได้แก่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นโดยปัจจัยทางอ้อมเหล่านี้เป็นสาเหตุของการหดตัวและขยายตัวของแผ่นคอนกรีตจึงทำให้ความกว้างของรอยต่อเปลี่ยนไปและส่งผลกระทบต่อถ่ายน้ำหนัก

## 2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

รูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมี 2 แบบ คือรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอกการใช้คอนกรีตรูปลูกบาศก์ในการหาค่ากำลังอัดเป็นที่นิยมในอังกฤษเยอรมัน และประเทศในกลุ่มยุโรปเป็นส่วนใหญ่ส่วนรูปทรงกระบอกนั้นนิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส แคนาดา ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์สำหรับประเทศไทยนั้นในช่วงแรกนิยมใช้รูปลูกบาศก์แต่ปัจจุบันใช้ทั้ง 2 แบบเนื่องจากการที่คนไทยได้ไปศึกษาเล่าเรียนการทดสอบทั้ง 2 แบบจากประเทศดังกล่าว

### 2.4.1 คอนกรีตรูปลูกบาศก์

แบบหล่อคอนกรีตรูปลูกบาศก์เป็นแบบเหล็กขนาด 15 ซม. ทำจากเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ผิวเรียบ และสามารถป้องกันไม่ให้น้ำปูนรั่วออกจากแบบในระหว่างที่เทหรือมีคอนกรีตอยู่ในแบบก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบาง ๆ ที่ด้านในแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้นการทาน้ำมันมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกินทำให้มีปัญหาเรื่องการแข็งตัวและลดกำลังอัดของคอนกรีต

การหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้มาตรฐาน BS 1881 Part 108 [3] โดยใส่คอนกรีตสดลงไปแบบมาตรฐานขนาด 15 × 15 × 15 ซม. จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นให้เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบโต๊ะหรือกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กอย่างน้อย 35 ครั้ง เหล็กกระทุ้งมีน้ำหนัก 1.8 กิโลกรัม ยาว 38 เซนติเมตร หน้าที่ดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 เซนติเมตร กระทุ้งคอนกรีตอย่างเต็มที่เพื่อให้เป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อในอาคารต่าง ๆ ซึ่งได้รับการกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่เช่นเดียวกัน แต่การกระทุ้งจะต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดกาแยกตัวภายหลังจากการกระทุ้งเรียบร้อยแล้วจึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบทั้งคอนกรีตไว้ 24 ± 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 15 ถึง

25 องศาเซลเซียสความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 จากนั้นถอดแบบออกและนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 18 ถึง 22 องศาเซลเซียส การทดสอบนิยมทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วันซึ่งมักเป็นอายุที่ใช้ในการออกแบบแต่ทั้งนี้ยังสามารถทำการทดสอบที่อายุอื่นเช่นที่ 3 7 14 และ 90 วันก็ได้ หากทำการออกแบบกำลังของคอนกรีตที่ใช้งานตามอายุดังกล่าว

การทดสอบกำลังอัดใช้คอนกรีตที่ผ่านการบ่มและอยู่ในสภาพเปียกโดยใช้หน้าที่เรียบของคอนกรีต 2 ด้านตรงกันข้ามเป็นด้านแรงรับตั้งนั้นผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของแรงกดการให้น้ำหนักกระทำแก่คอนกรีตใช้อัตราคงที่ที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 0.40 เมกะปาสกาลต่อวินาทีจนกระทั่งคอนกรีตวิบัติและไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นได้ต่อไปอีกการให้อัตราคงต่อคอนกรีตที่เร็วมาก ๆ จะทำให้กำลังอัดที่ทดสอบได้สูงกว่าความเป็นจริงและในทางกลับกันการให้อัตราคงที่ช้ามากจะทำให้กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าความเป็นจริง

#### 2.4.2 คอนกรีตรูปทรงกระบอก

แบบหล่อคอนกรีตสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ทำจากเหล็กมีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบสามารถคงรูปทรงกระบอกและสามารถป้องกันน้ำปูนไม่ให้รั่วมาจากแบบหล่อได้

มาตรฐาน ASTM C192 [4] ได้กำหนดให้หล่อคอนกรีตลงแบบมาตรฐานเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรคอนกรีตเท่า ๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้งด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 61 เซนติเมตร โดยชั้นที่ 2 และ 3 ต้องกระทุ้งให้ทะลุไปยังชั้นที่ต่ำกว่า 2.5 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง เมื่อครบทั้ง 3 ชั้นแล้วจึงทำการปาดผิวหน้าให้เรียบและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิระหว่าง 16 ถึง 27 องศาเซลเซียส โดยไม่รบกวนจนคอนกรีตแข็งตัว การถอดแบบจะทำเมื่อคอนกรีตมีอายุ  $24 \pm 8$  ชั่วโมงและนำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส และทำการทดสอบกำลังอัดตามอายุที่กำหนด

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกในการทดสอบกำลังอัดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐานตามอเมริกันเป็นหลักโดยคิดเป็นร้อยละ 70 และคอนกรีตลูกบาศก์ประมาณร้อยละ 30 แม้ว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจะเป็นที่นิยมและใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณและออกแบบก็ตามแต่ในทางปฏิบัติพบว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น คอนกรีตรูปลูกบาศก์ใช้คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกจึงมีน้ำหนักเบา (คอนกรีตรูปลูกบาศก์หนักประมาณลูกละ 8.5 กิโลกรัม ขณะที่คอนกรีตรูปทรงกระบอกหนักประมาณ 13 กิโลกรัม) สามารถเก็บและบ่มในน้ำโดยใช้พื้นที่การบ่มที่น้อยกว่ากรณีของคอนกรีตรูปทรงกระบอกนอกจากนี้ในการทดสอบกำลังอัดยังสามารถใช้ผิวด้านที่เรียบทำการทดสอบได้ทันทีแต่ถ้าเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกต้องหล่อหัวเคลือบหน้าคอนกรีตให้เรียบก่อนทำการทดสอบ

อย่างไรก็ตามคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีข้อดีกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์หลายประการ เช่น การหล่อและการทดสอบในแนวตั้งเช่นเดียวกันมีลักษณะของการเทและรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตในงานจริงโดยทั่วไปนอกจากนี้คอนกรีตรูปทรงกระบอกยังมีผลกระทบจากขนาดของหินน้อยกว่าและการกระจายของหน่วยแรงสม่ำเสมอกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์เนื่องจากมีผลกระทบของการยึดที่ปลายด้านบนและด้านล่างของคอนกรีตในระหว่างการทดสอบน้อยกว่า

## 2.5 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) [5]

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของเหล็กเสริมชนิดกลมและชนิดข้ออ้อยที่ฝังในก้อนคอนกรีตตัวอย่างด้วยวิธีการดึง (Pull-Out Test) ทั้งนี้เพราะโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปส่วนใหญ่จะมีการเสริมเหล็กเพื่อช่วยในการรับแรงไม่ว่าจะเป็นการเสริมเหล็กธรรมดาหรือลวดเหล็กก็ตามดังนั้นกำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ของคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เพียงพอจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงได้เต็มประสิทธิภาพตามที่ต้องการ

### 2.5.1 กำลังการยึดเหนี่ยว (Bond Strength)

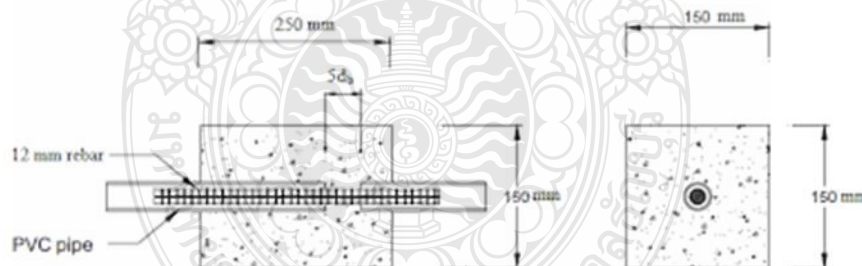
กำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) เกิดจากการยึดติด (Adhesion) และแรงเสียดทาน (Friction) ของเหล็กเสริมกับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วแต่มีความยากในการวัดค่าที่แท้จริงทั้งนี้เพราะมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง เช่น

ขณะที่คอนกรีตได้รับการบ่มและแข็งตัวจะเกิดการหดตัวทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง

คอนกรีตมีการแตกร้าวหรือน้ำซึมผ่านได้ง่ายก็จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง

### 2.5.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตำแหน่งในการเสริมเหล็ก เช่น บริเวณใต้เหล็กบนอาจมีช่องอากาศเนื่องจากการโยกทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลงการใส่สารผสมเพิ่ม เช่น สารกักกระจายฟองอากาศทำให้แรงยึดเหนี่ยวลดลง



## รูปที่ 2.3 การเกิด Bond และ Adhesion ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [5]

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงยังไม่มีวิธีการวัดกำลังในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ที่เป็นมาตรฐานแต่อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยการดึง ถือเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการเปรียบเทียบกำลังในการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตซึ่งทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15 X 15 X 15 เซนติเมตร และก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 15 X 30 เซนติเมตร แล้วฝังเหล็กเสริมไว้ต่อนั้นทำการดึงเหล็กเสริมออกด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยกำลังในการยึดเหนี่ยวสูงสุด (Maximum Bond Strength) สามารถหาได้จากแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่ของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับคอนกรีต



ในทางปฏิบัตินั้นถือว่าการยึดเหนี่ยวของคอนกรีต (Bond Strength) มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต คือ เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตจะเพิ่มตามและกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยจะมากกว่าเหล็กกลมและพบว่ากำลังในการยึดเหนี่ยวลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทั้งนี้เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ไม่เท่ากันของเหล็กและคอนกรีต

## 2.6 การเปลี่ยนแปลงสภาพของคอนกรีต [6]

การหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ได้เกิดจากแรงกระทำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ และการหดตัวเนื่องจากความชื้น การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของโครงสร้างของงานคอนกรีตซึ่งความเครียดจากอุณหภูมิหรือความเค้นจากอุณหภูมิมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อุณหภูมิจากฤดูกาลและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันก็สามารถทำให้เกิดการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิได้เช่นกัน ส่วนการหดตัวเนื่องจากความชื้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดในโครงสร้างบาง (Thin Structure) (พื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับอัตราส่วนปริมาตร) เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำได้อย่างรวดเร็ว เช่น ทางเดินเท้า ผืนดิน และพื้น เป็นตัวอย่างของโครงสร้างที่มีความไวต่อการแตกร้าวแบบแห้ง ถึงแม้การหดตัวแบบออโตจีนัสจะมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียความชื้นภายใน แต่ก็สามารถทำให้เกิดการแตกร้าวในโครงสร้างบางในกรณีของคอนกรีตกำลังสูงได้เช่นกัน การหดตัวที่สัมพันธ์กับความชื้นนั้นรวมถึงการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) จะมีการอธิบายภาพ รวมของการหดตัวเหล่านี้ในส่วนต่อไป โดยจะมุ่งเน้นไปที่การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้ง

### 2.6.1 การหดตัวแบบพลาสติก

การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) เกิดขึ้นเมื่อน้ำระเหยออกจากผิวหน้าของคอนกรีตไปสู่สภาพแวดล้อมโดยรอบในระหว่างที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะพลาสติก สภาพแวดล้อมที่มีเงื่อนไขที่ประกอบไปด้วยผลจากแสงแดด ความเร็วลม อุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำนั้นทำให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงต่อความเป็นไปได้ในการเกิดการแตกร้าวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) โดยปกติแล้วปริมาตรโดยรวมจะลดลงถ้าหากปริมาณน้ำที่สูญเสียไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่ามากเกินไปจนทำให้เกิดการเยิ้มน้ำบริเวณพื้นผิว การหดตัวแบบพลาสติกเป็นการกระทำทางกายภาพและเป็นผลจากแรงดึงผิว เนื่องจากการหดตัวของส่วนที่แห้งบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสอากาศจะถูกยึดรั้งด้วยส่วนภายในของคอนกรีตเอง ทำให้เกิดความเครียดยึดรั้งที่ผิวหน้า เมื่อความเครียดยึดรั้งนี้มีค่ามากกว่าความสามารถในการรับความเครียดดึง (Tensile Strain Capacity) ซึ่งมีความน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะพลาสติก คอนกรีตจะแตกร้าว ซึ่งการป้องกันการระเหยของคอนกรีตอย่างรวดเร็วหลังจากการหล่อสามารถกำจัดปัญหาของการแตกร้าวแบบพลาสติกได้

### 2.6.2 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเป็นปรากฏการณ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ซึ่งเกิดกับคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมภายนอก การหดตัวแบบแห้งนั้นเป็นการหดตัวที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดสำหรับคอนกรีตที่แห้งตัวแล้ว เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะเปิดนั้น จะมีแนวโน้มที่คอนกรีตจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมนั้นๆ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) ของสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าค่าความชื้น



สัมพัทธ์ในช่องว่างคาปิลารีที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตจะทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตสูญเสียน้ำจากการระเหย อัตราการระเหยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ความพรุนของคอนกรีตและพื้นที่ของผิวหน้าที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก น้ำที่จะสูญเสียไปก่อนคือน้ำที่อยู่ในช่องว่างคาปิลารีขนาดใหญ่ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การสูญเสียน้ำไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร แต่ในขณะที่แห้งตัวนั้นก็เกิดการสูญเสียน้ำจากช่องว่างคาปิลารีขนาดเล็กและจากช่องว่างในเจล จากการลดลงของแรงดันน้ำในช่องว่างคาปิลารี ความเค้นดึงในน้ำที่เหลืออยู่ จะเพิ่มขึ้น ความเค้นดึงของน้ำในช่องว่างคาปิลารี (Capillary Water) ถูกทำให้สมดุลด้วยความเค้นอัดในคอนกรีตโดยรอบทำให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต การระเหยของน้ำในเจล (Gel Water) จะเปลี่ยนพลังงานที่ผิวหน้าในช่วงสภาวะของแข็ง (Solid Phase) และทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น

การหดตัวแบบแห้งนั้นเกิดจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการแห้งและปัจจัยภายในที่สัมพันธ์กับคอนกรีตและส่วนประกอบของคอนกรีต ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นของคอนกรีต เช่น สภาพสิ่งแวดล้อม ขนาดและรูปร่างของคอนกรีต ส่วนปัจจัยภายในที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของคอนกรีต เช่น องค์ประกอบทางเคมี ส่วนประกอบของแร่ธาตุ ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณน้ำคุณสมบัติของมวลรวมและปริมาตรมวลรวม และปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้สัมพันธ์กับการก่อตัวของคอนกรีต เช่น การเท การอัดแน่น และการบ่ม เป็นต้น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการหดตัวแบบบิสระคือ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to binder ration, w/b) ปริมาณของน้ำที่ส่งผลโดยตรงต่อขนาดของความพรุน (เช่น ซีเมนต์เพสต์ที่มีค่า w/b สูงจะมีความพรุนสูง) เพราะฉะนั้นตัวอย่างทดสอบที่มีค่า w/b ต่ำจะมีปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างน้อยและมีผลให้เกิดการหดตัวแบบแห้งต่ำเช่นกัน การแตกร้าวแบบแห้งสามารถสังเกตเห็นได้จากระยะเวลาหลังจากการบ่มเสร็จสิ้น ระยะและจำนวนของรอยแตกอาจจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปจนคอนกรีตมีอายุสองถึงสามปี

### 2.6.3 การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) โดยพฤติกรรมแล้วเป็นผลของการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต และการลดลงของปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียความชื้นภายใน (Self-desiccation) การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดจากปริมาตรของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydrated Products) น้อยกว่าปริมาตรของวัสดุซีเมนต์และน้ำในช่วงเริ่มต้น การสูญเสียความชื้นภายในเป็นการลดปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในอันเนื่องมาจากการดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ (Unhydrated Cement) ซึ่งมีผลให้ความชื้นในช่องว่างคาปิลารี (Capillary Tension) ภายในช่องว่างคาปิลารีของน้ำและการอัดตัวในส่วนปริมาตรของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระบบของส่วนปริมาตรของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหดตัวลงเนื่องจากกำลังรับแรงอัดที่ได้รับ การหดตัวแบบออโตจีนัสได้ถูกอธิบายไว้ในปี 1930 ว่าเป็นปัจจัยสนับสนุน ทำให้เกิดการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage) ในเวลานั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการเกิดขึ้นในสภาวะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตคอนกรีตได้ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีช่องว่างคาปิลารีใหญ่กว่าและต่อเนื่องกันมากกว่า การบ่มทำให้น้ำ

สามารถแทรกเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เป็นผลให้แรงดึงคาปิลารีต่ำและการหดตัวแบบอโตจินัสมีค่าน้อยมาก แต่ด้วยการลดลงของน้ำและตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำจะมีผล อย่างมากเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าต่ำ ทำให้การหดตัวแบบอโตจินัสเป็นสาเหตุที่ต้องศึกษา การแตกร้าวสามารถเกิดได้ในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากการผสมผสานกันระหว่างผลจากการหดตัวอย่างต่อเนื่อง และการยึดรั้งจากปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในเนื้อคอนกรีตที่มีค่าสูง เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้การหดตัวแบบอโตจินัสที่แกนกลางมีค่าสูงกว่าที่ผิวหน้า ทำให้คอนกรีตเกิดการ หดตัวอย่างต่อเนื่อง และเกิดการยึดรั้งภายในเนื่องจากมวลรวมและเหล็กเสริม สำหรับโครงสร้างแบบบางนั้น การผสมผสานกันของการหดตัวแบบอโตจินัสและการหดตัวแบบแห้งสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวที่มีรอยร้าวตัดขวางหน้าตัดได้

## 2.7 กลไกการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบยึดรั้ง [6]

การหดตัวของคอนกรีตจะไม่เป็นปัญหาหากคอนกรีตสามารถหดตัวได้อย่างอิสระ แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนคอนกรีตมักถูกยึดรั้งในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง หรือหลายทิศทางโดยแรงยึดรั้งจากภายในหรือภายนอก ดังนั้นจึงอาจเกิดการแตกร้าวได้ การหดตัวแบบ ยึดรั้งของคอนกรีตสามารถแยกได้เป็น 3 ระดับของขนาดที่แตกต่างกัน ได้แก่

ระดับมหภาค (Macroscopic) คือ การยึดรั้งด้วยวัสดุหรือโครงสร้างแวดล้อมของคอนกรีต เช่น วัสดุทางเดิน โครงเหล็กหล่อคอนกรีต หรือส่วนอื่นๆ ของโครงสร้าง หรือเหล็กเสริม แรงที่ถูกตรึงในคอนกรีต ระดับมหภาคของการหดตัวแบบยึดรั้งอาจรวมถึงแรงดึงจากภายนอกที่มากระทำกับโครงสร้างคอนกรีตด้วย

ระดับกลาง (Mesoscopic) คือ การยึดรั้งโดยรอบมวลรวม หรือแรงยึดรั้งตัวเอง เนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ ระดับกลางยังหมายถึงแรงยึดรั้งตัวเองอีกด้วย (Self-restraint) การยึดรั้งตัวเองเกิดจากความแตกต่างระหว่างการหดตัวบริเวณผิวหน้าและการหดตัวภายในของคอนกรีต เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งบริเวณผิวหน้าที่เปิดโล่งจะมีค่าสูง ทำให้ส่วนที่อยู่ภายในได้รับแรงดึงยึดรั้งจากการหดตัวของผิวหน้าคอนกรีต ดังนั้นจึงเกิดความเค้นที่ไร้รูปแบบกระจายตัวตามแนวตั้ง ซึ่งจะก่อให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้า

ระดับจุลภาค (Microscopic) คือ สภาวะของแข็งในซีเมนต์เพสต์ เช่น อนุภาคของปูนซีเมนต์ ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว หรือผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

การหดตัวแบบยึดรั้งสามารถทำให้เกิดความเค้นดึง หรือความเครียดจากการยึดรั้งซึ่งถ้ามีค่าสูงเกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึง หรือความสามารถในการรับความเครียดดึงของคอนกรีตแล้วจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ขนาดของความเค้นดึงหรือความเครียดจากการยึดรั้งที่เกิดขึ้นจากการหดตัวแบบยึดรั้งของคอนกรีตนั้นเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณและอัตราการหดตัว การคลายตัวเนื่องจากการคืบ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความสามารถในการรับความเครียดดึง หรือกำลังรับแรงดึงและระดับการยึดรั้งของคอนกรีต ดังนั้นปริมาณการหดตัวเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าว แต่การหดตัวเพียงอย่างเดียวไม่น่าเพียงพอในการประเมินการแตกร้าวในคอนกรีต เพราะฉะนั้นการทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งจึงทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีต

## 2.8 การผสมเพิ่ม [7]

### 2.8.1 สารลดน้ำ

สารลดเป็นสารเคมีผสมเพิ่มที่สำคัญและใช้กันแพร่หลายมากบ่อยครั้งเมื่อกล่าวถึงสารเคมีผสมเพิ่มจะหมายถึงสารในกลุ่มสารลดน้ำ สารเคมีผสมเพิ่มในกลุ่มนี้ใช้สำหรับคัดแปลงเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำของคอนกรีต แบ่งได้เป็น 7 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C494 [5] ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F

### 2.8.2 สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษหรือเรียกอีกอย่างว่า ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ สามารถลดน้ำในปริมาณที่มากกว่าสารลดน้ำธรรมดาแต่เนื่องจากมีราคาแพงจึงใช้เฉพาะงานคอนกรีตที่สำคัญและต้องการคุณสมบัติพิเศษ

องค์ประกอบกลไกของการลดน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตได้จำนวนมากมีความคล้ายกับกรณีของการใช้สารลดน้ำธรรมดาแต่ไม่มีผลกระทบต่อ การตั้งผิวของน้ำมากนักดังนั้นจึงเกิดฟองอากาศในส่วนผสมค่อนข้างน้อยทำให้สามารถใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่สูงได้มาตรฐาน ASTM C494 [5] จัดสารลดน้ำพิเศษอยู่ในประเภท F การใช้งานของสารลดน้ำพิเศษโดยทั่วไปนิยมใช้ 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.6 คือ เพิ่มความสามารถในการเทหรือทำคอนกรีตไหลและทำคอนกรีตกำลังสูง โดยทั่วไปสารลดน้ำพิเศษที่เป็นของเหลวจะมีน้ำผสมอยู่ประมาณร้อยละ 50-60 และมีวัสดุที่ใช้ในการลดน้ำอยู่ ร้อยละ 40-50 ดังนั้นในการคำนวณปริมาณน้ำจะต้องไม่ลืมคิดปริมาณน้ำที่อยู่ในสารลดน้ำพิเศษในการเพิ่มความสามารถในการเทของคอนกรีตควรใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ 1 ถึง 3 ลิตรต่อคอนกรีต 1 ม.3 และในการทำคอนกรีตกำลังสูงจะใช้สารลดน้ำพิเศษมากขึ้นคือ 5 ถึง 20 ลิตร ต่อคอนกรีต 1 ม.3 สารลดน้ำพิเศษสามารถใช้ทำคอนกรีตไหลได้ซึ่งมีค่าการยุบตัวอย่างน้อย 19 ซม. ขึ้นไปและไม่เกิดการแยกตัวการเติมน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีค่าการยุบตัวสูงขึ้นมากเช่นนี้จะทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวออกจากกันได้ง่าย สารลดน้ำพิเศษสามารถใช้ทำคอนกรีตไหลโดยทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นมากและสามารถไหลได้โดยไม่เกิดการแยกตัวข้อกำหนดทางกายภาพสำหรับสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1017 [6] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดของสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีตไหลได้ตาม ASTM C 1017

คุณสมบัติ	ประเภท I พลาสติกไซเซอร์	ประเภท II พลาสติกไซเซอร์และหน่วงการก่อตัว
เวลาก่อตัว (ชั่วโมง:นาที)	-	-
ระยะต้น – อย่างน้อย	เร็วขึ้น 1:00	ช้าลง 1:30
- ไม่เกิน	หรือช้าลง 1:30	ช้าลง 1:30
ระยะสุดท้าย – อย่างน้อย	เร็วขึ้น 1:00	-
- ไม่เกิน	หรือช้าลง 1:30	ช้าลง 1:30
ค่าการยุบตัว เพิ่มขึ้นอย่างน้อย (ชม.)	9	9
กำลังอัดเทียบกับคอนกรีตควบคุม ต่ำสุด (ร้อยละ)		
- อายุ 3 วัน	90	90
- อายุ 7 วัน	90	90
- อายุ 28 วัน	90	90
- อายุ 6 เดือน	90	90
- อายุ 1 ปี	90	90
กำลังตัดเทียบกับคอนกรีตควบคุม ต่ำสุด (ร้อยละ)		
- อายุ 3 วัน	90	90
- อายุ 7 วัน	90	90
- อายุ 28 วัน	90	90
การเปลี่ยนแปลงความยาว 1 สูงสุด		
- เพิ่มขึ้นไม่เกิน (ร้อยละ)	35	35
เมื่อการหดตัวของคอนกรีตควบคุมสูงกว่า 300 $\mu\epsilon$		
- เพิ่มขึ้นไม่เกิน ( $\mu\epsilon$ )	100	100
เมื่อการหดตัวของคอนกรีตควบคุมสูงกว่า 300 $\mu\epsilon$	100	100
แฟกเตอร์ความทนทานสัมพัทธ์ 2 ต่ำสุด	80	80

การใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงเป็นอีกงานหนึ่งที่นิยมกันมากกำลังคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดปริมาณน้ำสารลดน้ำพิเศษสามารถลดปริมาณน้ำลงจากปกติได้มากกว่าปกติได้มากกว่าร้อยละ 30 คอนกรีตกำลังสูงที่ได้จะมีความสามารถในการเทปกติแต่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำมาก เช่น มีการแข่งขันคอนกรีตพลังช้างครั้งที่ 3 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.0 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม) เท่ากับ 0.17 สามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันสูง เท่ากับ 1,500 กก./ชม.2 [8] กำลังอัดที่สูงมากกว่านี้สามารถทำได้โดยใช้แรงดันและความร้อนหรือใช้การบ่มไอน้ำความดันสูงนอกจากนี้การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหินหรือซิลิกาฟูมสามารถเพิ่มกำลังอัดที่อายุมากกว่า 28 วัน ให้กับคอนกรีตได้อีกด้วย

## 2.9 การทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัว [7]

การทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้มั่นใจว่าคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นไปตามที่ออกแบบและสามารถใช้งานได้ทั้งนี้ยังมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบตามอายุที่กำหนดเนื่องจากความต้องการคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันที่อายุต่างกันนอกจากนี้การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่กำลังก่อสร้างอยู่จะทำให้ทราบถึงพัฒนาการของคุณสมบัติของคอนกรีตและให้แน่ใจว่าคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างองค์อาคารทั้งหมดมีคุณสมบัติไม่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้ออกแบบในช่วงอายุที่กำหนดการทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่สำคัญคือการทดสอบรับกำลังต่าง ๆ เช่น กำลังอัดกำลังรับแรงดึงกำลังรับแรงดัดเหนียวแรงกระแทก เป็นต้น

### 2.9.1 การทดสอบหาความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ASTM C39-94 [8]

กำลังอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีตเนื่องจากการออกแบบคอนกรีตส่วนมากมักออกแบบให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดอย่างเดียวถึงแม้ว่าคอนกรีตจะรับแรงดึงได้บ้างก็มักจะไม่นำมาคิดในอาคารส่วนที่ต้องรับแรงดึงมักจะให้เหล็กเสริมรับแรงส่วนนี้ไป

กำลังอัดของคอนกรีต นั้นหมายถึงกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่างมาตรฐานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ที่อายุ 28 วัน ในบางครั้งแท่งตัวอย่างรูปปาดซ์ขนาด 5x5x5 cm ก็มักนิยมใช้ในงานก่อสร้างแต่กำลังอัดของรูปปาดซ์จะสูงกว่ากำลังอัดของรูปทรงกระบอกมาตรฐาน

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิภาคส่วนผสม (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์) การบ่มประกอบกับส่วนอื่น ๆ วิวัฒนาการทางวิชาการของคอนกรีตได้พัฒนาไปมากจนในปัจจุบันนี้ สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดถึง 700 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรหรือสูงกว่าได้แต่คอนกรีตในงานก่อสร้างในประเทศไทยยังมีกำลังอัดไม่สูงนัก (ประมาณ 100-400 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร)

ในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กการกำหนดใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงขีดความสามารถของผู้รับเหมาก่อสร้างด้วยว่าจะมีความสามารถผลิตคอนกรีตคุณภาพนั้น ๆ หรือไม่โดยปกติผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมักจะกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับการผสมจริง ให้สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้คำนวณออกแบบโครงสร้างประมาณร้อยละ 15-25 เนื่องจากกำลังของคอนกรีตในที่ก่อสร้างย่อมต่ำกว่ากำลังของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 2.4 ลักษณะการวางการทดสอบกำลังอัด

## 2.10 กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (Direct Tensile Test)

ความต้านทานในด้านรับแรงดึงของคอนกรีตมีต่ำมาก ถึงแม้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงก็ตาม แต่การทราบค่ากำลังรับแรงดึงนี้จะช่วยการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และการหดตัว

### 2.10.1 วิธีกำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

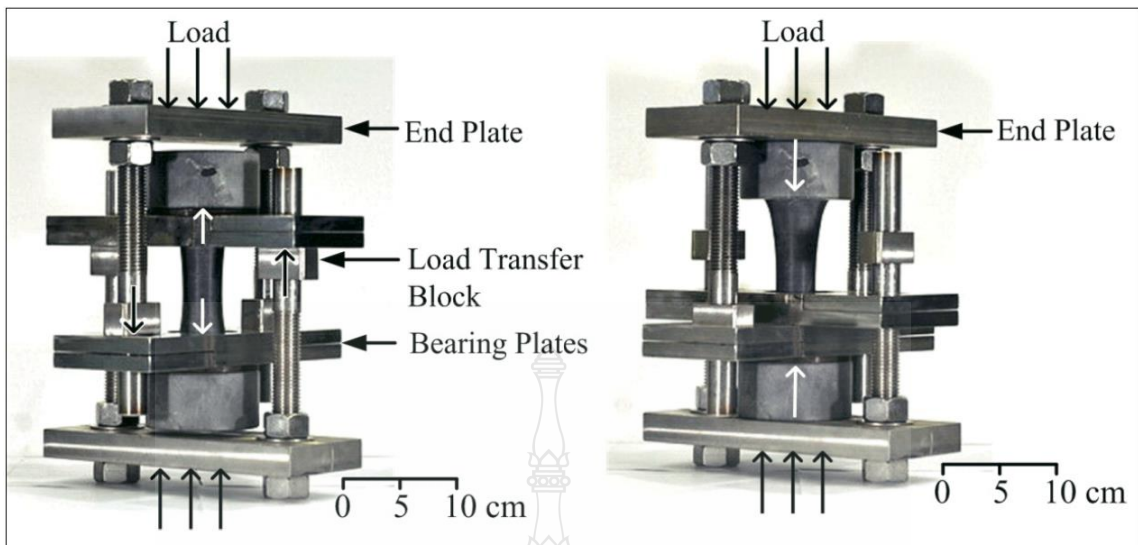
โดยปกติแล้วการให้แรงโดยตรงแก่ก้อนตัวอย่างทดสอบคอนกรีต จะทำได้ยาก เพราะมักเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบเนื่องจาก

2.10.1.1 เกิดการเยื้องศูนย์ของก้อนตัวอย่าง ทำให้คอนกรีตแตกหักก่อนจะได้อ่ากำลังรับแรงดึงที่แท้จริง

2.10.1.2 มีหน่วยแรงอื่นแทรกเข้ามาจากหัวจับยึด ทำให้เกิดเป็นหน่วยแรงเฉพะที่และในที่สุดจะเกิดการแตก ณ บริเวณนี้

2.10.1.3 การร้าวจะแพร่ขยายอย่างรวดเร็ว กำลังดึงที่ได้จะเป็นของบริเวณที่กำลังต่ำสุด ซึ่งไม่ตรงต่อความเป็นจริง

เพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบ จึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ซึ่งกิตติเทพ เฟื่องขจร และสิปปกร กลั่นภูมิศรี [9] ได้พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ เพื่อทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด โดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบตรงของตัวอย่างหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6



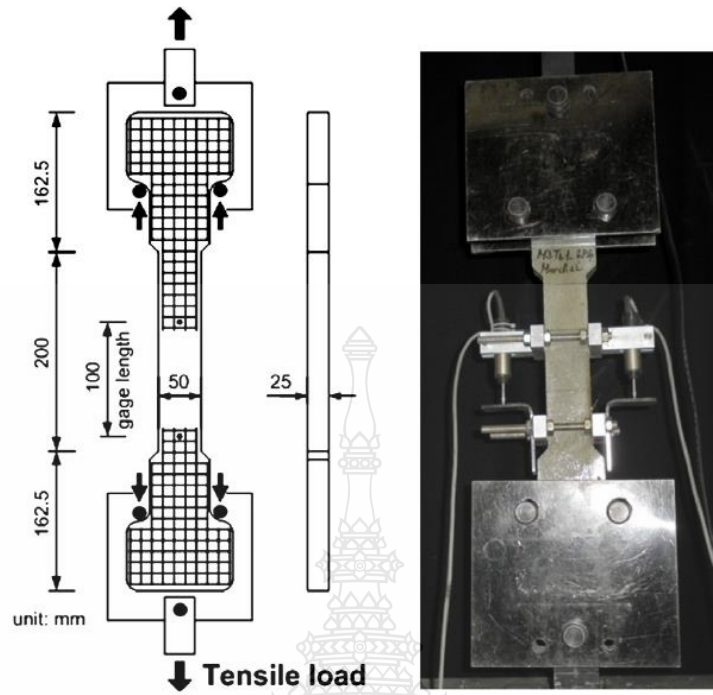
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงตัวอย่างรูป Dog Bone [9]



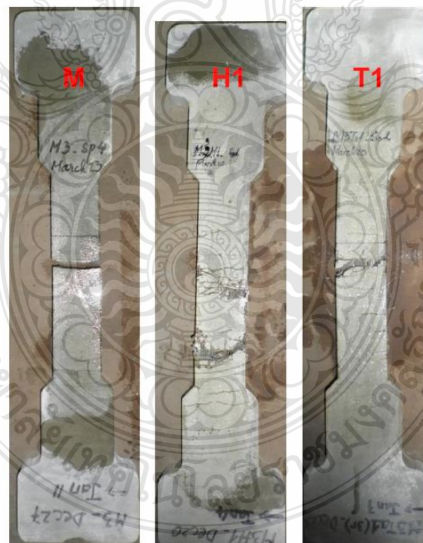
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูป Dog Bone ที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง [9]

Tuan Kiet Tran และ Dong Joo Kim [10] ได้พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของแรงดึงโดยตรงจากซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีประสิทธิภาพสูง ภายใต้ความเครียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8





รูปที่ 2.7 เครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรงตัวอย่างรูปตัวไอ [10]



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างรูปตัวไอที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง [10]



## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.11.1 การศึกษาการใช้ตะกอนน้ำประปา

จากงานวิจัยของ พิมศิลป์ จันทร์ประเสริฐ [11] ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยแทนที่ตะกอนประปาด้วยเถ้าลอย L/FA โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  พบว่ากำลังอัดที่มีอัตราส่วน L/FA จะลดลงตามการลดลงของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  โดยให้ค่าเหมาะสมเมื่อปริมาณ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 80:20 และหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นในระยะต้น และจากการลดลงของอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  พบว่าทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาค ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำ L ลดลง ซึ่งจากการบ่มได้ภาพถ่ายกำลังขยายสูงแสดงให้เห็นว่า NaOH ที่สูงเกินไปทำให้เกิดการแตกของของเถ้าลอย ทำให้กำลังอัดลดลง และพบว่าการเพิ่มของ L/FA ทำให้อนุภาคของตะกอนดินประปา-เถ้าลอย สามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดีขึ้น โดยพบว่าอัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.3 โดยเมื่อ L/FA สูงกว่าค่าที่เหมาะสม จะก่อให้เกิดโพรงและรอยแตกในตัวอย่าง

จากงานวิจัยของอนุจิตร ภูมิพันธ์ [12] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมและคุณสมบัติของโครงสร้างผนังคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมประติษฐ์ที่ทำมาจากตะกอนประปาเพื่อแทนที่มวลรวมหยาบ ซึ่งมี 3 ขนาดคือ  $3/8$  ,  $1/2$  , และ  $3/4$  นิ้ว ทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน พบว่าการแทนที่มวลรวมประติษฐ์จากตะกอนประปาในคอนกรีตที่ขนาดมวลรวมประติษฐ์เท่ากับ  $1/2$  นิ้ว และ  $3/4$  นิ้ว เมื่อร้อยละเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่การแทนที่ด้วยมวลประติษฐ์ขนาด  $3/8$  นิ้ว ร้อยละเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง โดยที่กำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดที่อายุ 28 วัน จากการแทนที่ด้วยมวลประติษฐ์ขนาด  $1/2$  นิ้วในคอนกรีตร้อยละ 50 จะมีค่า 287.33 กก./ตร.ซม. และ กำลังอัดเฉลี่ยต่ำสุดที่อายุ 28 วัน จากการแทนที่ด้วยมวลประติษฐ์ขนาด  $3/8$  นิ้ว ในคอนกรีตร้อยละ 100 มีค่าเท่ากับ 105.00 กก./ตร.ซม. จากผลแสดงให้เห็นว่ามวลรวมประติษฐ์สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ [13] ได้ทำการศึกษากถึงผลของการใช้ตะกอนน้ำประปา มาใช้ในงานคอนกรีต ต่อกำลังอัดประลัย แรงดึงโดยตรง ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน การหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต โดยการใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้วัสดุแทนที่ให้มีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ เพื่อลดผลกระทบจากขนาดอนุภาค ทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของตัวอย่างขนาด  $15 \times 15 \times 15$  เซนติเมตร และแรงดึงโดยตรง ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน สำหรับ การหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวแบบออโตจีนัส ใช้ตัวอย่างขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร บ่มในอากาศ บ่มน้ำ และหุ้มพลาสติกสำหรับ การหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวแบบออโตจีนัส ใช้ตัวอย่างขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร บ่มในอากาศ บ่มน้ำ และหุ้มพลาสติก

จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ตะกอนประปาที่มากขึ้น โดยการแทนที่ร้อยละ 20 จะมีค่าต่ำสุดทั้งกำลังอัดและแรงดึง ส่วนการหดตัวของคอนกรีตจะมีค่าลดลงมากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ตะกอนประปาที่มากขึ้น แต่เมื่ออายุมากขึ้นการหดตัวจะหดตัวน้อยลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การบ่มในน้ำจะมีค่าการหดตัวน้อยที่สุด และเมื่ออายุมากขึ้นแนวโน้มการหดตัวจะมีอัตราการหดตัวที่น้อยลงมาก ส่วนผลกระทบของวิธีการบ่มจะพบว่าการ

บ่มอากาศจะมีค่าการหดตัวมากกว่าการห่อพลาสติกและการบ่มน้ำ และการใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลให้การหดตัวมีค่ามากขึ้นตามการแทนที่ที่มากขึ้น

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ตะกอนประปามากขึ้น เพื่อนำตะกอนประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด เช่น การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน (จิตรกร วงศ์กรเชาวลิต [14]) การใช้แทนทรายในการทำบล็อกประสาน (สมบุญ คงสมศักดิ์ศิริ และ อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ [15]) การทำเป็นวัสดุประสานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (รัฐพล สมณา และ เกียรติสุดา สมณา [16]) การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ (Naprarath Waijarean et. al., [17]) เป็นต้น



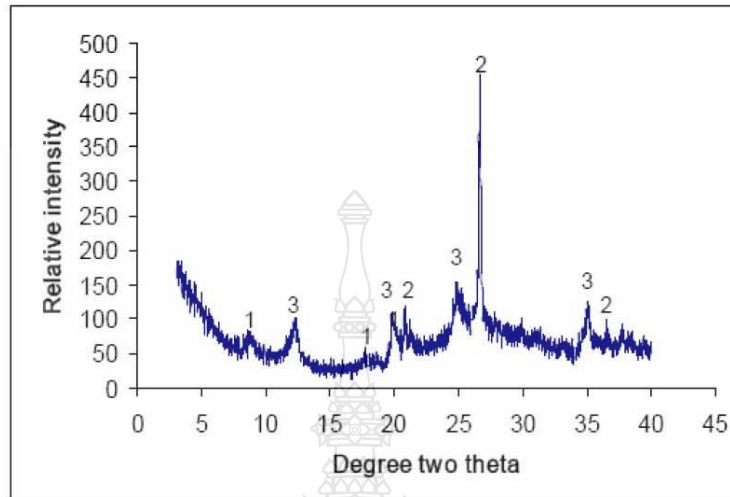
รูปที่ 2.9 ลักษณะของตะกอนน้ำประปา (ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547) [18]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา (รัฐพล สมณา และ เกียรติสุดา สมณา, 2557) [16]

Composition (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
ตะกอนประปา	56.76	20.33	6.03	0.70	4.63	1.51	-	0.47	6.95

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา พบว่า มี ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และ อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในปริมาณสูงซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวัสดุพอลิซิลาน มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างได้ และเมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของตะกอนประปา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปา (สุพิณ แสงสุข [19]) พบว่าโครงสร้างโดยทั่วไปของตะกอนน้ำประปามีทั้งเป็นผลึกและไม่เป็นผลึก โดยมีผลึกของ Quartz, kaolinite และ illite หากมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการนำไปเผาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบจะช่วยเพื่อคุณสมบัติที่ดี ก่อนที่จะนำตะกอนน้ำประปาไปใช้ประโยชน์ได้ แสดงดังรูปที่ 2.10 จากงานวิจัยของ Naprarath

Waijarean et.al. [17] เห็นได้ว่าเฟสของสารประกอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค XRD แต่เมื่อนำไปเป็นวัสดุประสานพบว่าทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น



หมายเหตุ 1 คือ illite 2 คือ quartz และ 3 คือ kaolinite

รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปา (สุพิน แสงสุข [19] )

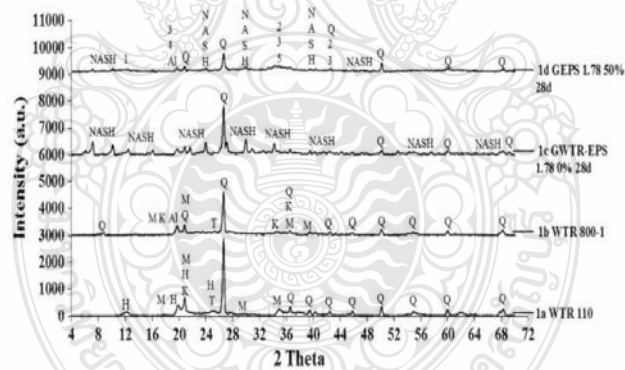


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of geopolymer synthesized from WTR and cured for 28 days, (1a): non-calcined WTR, (1b): calcined WTR at 800 °C, (1c): synthetic geopolymer without EPS and (1d): synthetic geopolymer with 50%EPS. H=Halloysite ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), Q=Quartz ( $SiO_2$ ), Al=Aluminum Silicate Oxide ( $Al_2SiO_5$ ), M=Muscovite ( $KAl_2Si_3O_{10}(OH)_2$ ), K=potassium Aluminum Silicate ( $KAl_3Si_3O_{11}$ ), T=Anatase ( $TO_2$ ), NASH=Sodium Aluminum Silicate Hydrate ( $Na_{50}Al_{36}Si_{96}O_{328}.216H_2O$ ), 1=Sodium Aluminum Iron Hydrate Silicate, 2=Zinc Chromium Oxide, 3=Zinc Oxide, 4=Sodium Iron Oxide, 5=Andalusite.

รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปาเมื่อมีการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (Naprarath Waijarean et.al., 2014) [17]

## 2.11.2 การนำตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์

จากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนประปาทำให้มีหลายงานวิจัยที่มีการใช้ประโยชน์จากตะกอนประปา เช่น

### 2.11.2.1 การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

จากองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณสูงเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลาน ทำให้สามารถนำตะกอนประปามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน (ร้อยละ 5 – 20 โดยน้ำหนัก) Paramalinggam Thanalechumi et.al., [20] แต่ก่อนการนำตะกอนประปามาใช้ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแคลไซด์ที่อุณหภูมิในช่วง 500 – 900 องศาเซลเซียส (จิตรกร วงศ์กรเขาวลิต [14] และ รัฐพล สมณา และ เกียรติสุดา สมณา [16]) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขององค์ประกอบของตะกอนประปาและช่วยกระตุ้นให้สารประกอบในตะกอนประปาสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี ช่วงเวลาการเผายู่ในช่วง 15 – 60 นาที โดยจากการทดลองของจิตรกร วงศ์กรเขาวลิต [14] พบว่า การรับกำลังของมอร์ตาร์ผสมตะกอนน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการแคลไซด์ที่ 500 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเผา 15 นาที แต่มีค่าดัชนีการรับกำลังร้อยละ 75 ตามมาตรฐาน ASTM C618 [ใส่อ้างอิงเป็นตัวเลข]

### 2.11.2.2 การผลิตบล็อกประสาน

โดยทั่วไปในการผลิตบล็อกประสานจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์และทราย เราสามารถใช้ตะกอนประปาในการแทนที่ทราย โดยใช้ตะกอนประปาเป็นมวลรวมละเอียดเพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและร้อยละการดูดซึมน้ำ ตาม มอก.57-2530 พบว่าการใช้ตะกอนประปาแทนที่ทรายร้อยละ 40, 50 และ 60 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.6 ที่อายุ 28 วัน เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปหล่อเป็นบล็อกประสานให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 163, 142 และ 96 กก/ซม<sup>2</sup> ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 13, 14 และ 15 ตามลำดับดังนั้นอัตราส่วนที่มีตะกอนดินผสมอยู่ ร้อยละ 60 เหมาะสมที่สุด ที่จะนำไปผลิตบล็อกประสานซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก.57-2530) และเป็นอัตราส่วนที่มีตะกอนดินผสมอยู่มากที่สุด (สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ และ อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ [15])

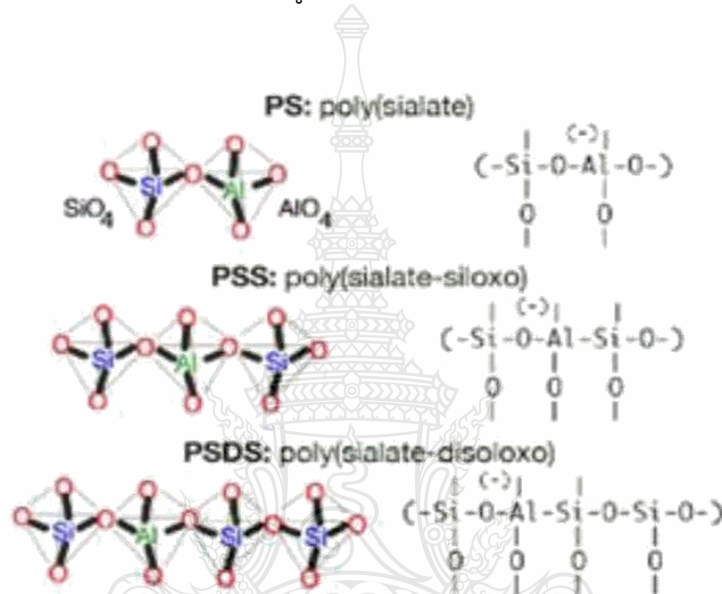
### 2.11.2.3 การใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์

ตะกอนประปามีซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณสูงเมื่อน้ำมาผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณสูง โดยใช้หลักการของปฏิกิริยาปอซโซลาน (ASTM C618) กล่าวคือ วัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ โดยตัวมันเองไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานแต่เมื่อมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสามารถเป็นวัสดุประสานได้ แต่การใช้ตะกอนประปาเป็นวัสดุประสานจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแคลไซด์ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 500 – 900 องศาเซลเซียสก่อน โดยใช้อัตราส่วนผสมที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อตะกอนประปา 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 โดยน้ำหนัก พบว่า การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสที่อัตราส่วน 50:50

โดยนำหน้าแก้วสุประสานสามารถแข็งตัวได้และรับกำลังอัดได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ (รัฐพล สมนา และ เกียรติสุตา สมนา, 2557) [16]

#### 2.11.2.4 การใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ แต่อาศัยหลักการของการใช้วัสดุปอซโซลาน หรือวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณสูงมาสังเคราะห์ร่วมกับสารละลายต่างเข้มข้น เพื่อให้เกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ของซิลิกาโดยใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 2008) [21]

การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ด้วยการใช้ตะกอนประปาเป็นวัสดุตั้งต้นนั้น หากไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของตะกอนประปาพบว่า ต้องใช้สารละลายต่างเข้มข้นในปริมาณสูงเนื่องจากตะกอนประปามีคุณสมบัติในการดูดน้ำมาก การผสมตัวอย่างเมื่อไม่ใช้อุณหภูมิเป็นตัวกระตุ้นไม่สามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างเข้มข้นที่สูงเกิน 10 โมลาร์ เนื่องจากการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ลดลง แข็งตัวเร็วและไม่สามารถทำให้ผสมกันได้ดี ถ้าหากมีการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 6 โมลาร์จะให้ค่ากำลังอัดที่ดีและหากใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่านั้นควรใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ผสมเพิ่มเพื่อให้จีโอโพลิเมอร์พัฒนากำลังอัดได้ (พิรุฬห์ลักษณ์ คำผายและคณะ[22]) เช่นเดียวกับ งานวิจัยของ พิมพ์ศิลป์ จันทร์ประเสริฐ, 2556 [23] ที่สังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอนประปาร่วมกับเถ้าถ่านหินด้วยสัดส่วน 70:30 ใช้อัตราส่วน L/FA (liquid alkali activator/Fly ash) ในช่วง 1.1 ถึง 1.5 และกระตุ้นด้วยความร้อน 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้ หากต้องการใช้ตะกอนประปาเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้ดีจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพของตะกอนประปาด้วยการ แคลไซด์ที่อุณหภูมิ 600 – 900 องศาเซลเซียส (Naprarath Waijarean et.al.[17]) ในการศึกษาพบว่าอัตราส่วน

$\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.78 ใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายต่างเข้มข้น พบว่าจีโอโพลิเมอร์จากตะกอนประปาที่แคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังอัดที่สูง

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ตะกอนประปาสามารถเป็นได้ทั้งวัสดุประสานและวัสดุมวลรวม จากองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาที่มีซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณสูงทำให้มีคุณสมบัติที่มีแนวโน้มในการเป็นวัสดุปอซโซลาน ข้อเสียของตะกอนประปาคือการดูดน้ำ ทำให้เมื่อนำไปเป็นวัสดุประสานส่วนผสมจะมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยหากต้องการนำตะกอนประปามาใช้เป็นวัสดุประสานจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของตะกอนประปาด้วยการนำมาแคลไซต์ที่อุณหภูมิในช่วง 500 – 900 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในตะกอนประปาให้มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุประสานและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาได้อย่างหลากหลาย นอกจากนี้ยังเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์อีกด้วย

### 2.10.3 การหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ผศ.ดร.ปิติศานต์ กร้ามาตร [24] ได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาความต้องการน้ำ และการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์ ค่าการไหลแผ่ ความพรุน ค่าการหัดตัวแห้ง และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต ของวัสดุประสานที่ใช้ถ้ำลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม โดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Fujiwara [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมและการหัดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำมากจะทำให้เกิดการหัดตัวแบบแห้งมากซึ่งเกิดในกรณีของปริมาณส่วนผสมที่มีความหนืดปานกลางและน้อย หากจะป้องกันการหัดตัวแบบแห้งที่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวตามมานั้นจำเป็นต้องลดปริมาณน้ำลงให้มากที่สุด โดยให้อยู่ในช่วงสัดส่วนผสมเหล่านี้ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าส่วนผสมที่มีความหนืดมากจะทำให้เกิดการหัดตัวมากกว่าที่คาดไว้ทุกๆ ที่น้ำมีปริมาณน้อย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพสต์และการหัดตัวแบบแห้งนั้นหาได้จากการค้นคว้าบางวิธี ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากยิ่งหมายถึงจะเกิดการหัดตัวแบบแห้งมากเมื่อสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ ยกเว้นในส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยมากที่จะเกิดการหัดตัวมาก

Hindy และคณะ [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหัดตัวแบบแห้งที่เกิดในคอนกรีตผสมเสริมคุณภาพสูง (HPC) จากการศึกษาผลจากเวลาในการบ่ม สภาพการบ่ม ซิลิกาฟูม และสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถสรุปได้ว่าการหัดตัวแบบแห้งจะลดลงเมื่อใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงจะทำให้การหัดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นและช่วยเร่งปฏิกิริยา และทำให้เกิดพื้นที่สำหรับการรวมตัวของน้ำอิสระ ซิลิกาฟูมทำให้การเกิดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การระเหยของน้ำและการหัดตัวแบบแห้งลดลง สำหรับผลของขนาดขึ้นทดสอบนั้นปรากฏว่ายิ่งสัดส่วนระหว่างปริมาตรต่อพื้นที่ผิวมีค่าสูงจะทำให้การหัดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นน้อย ณ คอนกรีตที่มีอายุเท่ากัน ดังนั้นผลจากการทดลองโดยทั่วไปที่ทดลองกับขึ้นทดสอบขนาดเล็กนั้น ดูเหมือนจะประมาณการหัดตัวของ HPC มากเกินไปสำหรับโครงสร้างจริง



#### 2.10.4 การหดตัวของบ่อโตนีลของคอนกรีต

Tazawa และ Miyazawa [27] ทำการทดลองเพื่อค้นหาปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดการหดตัวของบ่อโตนีลของคอนกรีต เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาตรของมวลรวม เพื่อใช้สร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต เป็นที่ทราบกันว่าผลของมวลรวมต่อการหดตัวของบ่อโตนีลของคอนกรีตหลังอายุ 24 ชั่วโมง สามารถหาได้จากแบบจำลองของ ฮอบบ์ (Hobbs' model) สำหรับมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีปริมาตรของมวลรวมต่างๆ กัน การหดตัวของบ่อโตนีลของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ เห็นได้ชัดว่าการหดตัวของบ่อโตนีลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง

Hanehara และคณะ [28] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบ่อโตนีล โครงสร้างระดับจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในระยะแรก การหดตัวของบ่อโตนีลของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับความชื้นของซีเมนต์เพสต์ที่ลดลง แม้จะมีความต่างของเวลาระหว่างการหดตัวแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในระยะแรก แต่ก็ไม่มีเกิดการหดตัวของบ่อโตนีล ในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสม  $w/c$  เท่ากับ 0.5 ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าไม่มีการลดลงของความชื้น การหดตัวของบ่อโตนีลที่เกิดกับซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของ  $w/c$  เท่ากับ 0.25 นั้นเกิดจากการแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ตั้งแต่ร้อยละ 100 ถึง 80 จึงสามารถกล่าวได้ว่าการหดตัวของบ่อโตนีลนั้นเกิดขึ้นเพราะน้ำอิสระที่มีอยู่ในช่องว่างภายในระหว่างเจลขนาดเล็กที่เกิดจากการผลิต C-S-H ปริมาณมาก น้ำอิสระนั้นจะถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและความชื้นในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วลดลง ผลิตภัณฑ์และการเปลี่ยนแปลงของผลจากปฏิกิริยาอะลูมิเนตไฮเดรต (Aluminate Hydrate) นั้นสัมพันธ์กับการเพิ่มการหดตัวของบ่อโตนีล

Park และคณะ [29] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบ่อโตนีลและปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการค้นคว้าเกี่ยวกับผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีต่อปรากฏการณ์การหดตัวของบ่อโตนีลและความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบ่อโตนีลและอัตราของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวของบ่อโตนีลไม่สามารถอธิบายด้วยการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียวได้ อีกนัยหนึ่งคือมีช่วงเวลาระหว่างที่การหดตัวของบ่อโตนีลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพิ่งเริ่มเกิดขึ้น ในช่วงเวลานี้จะเกิดการหดตัวของบ่อโตนีลขึ้นเพราะเกิดความเค้นคาปี-ลารีเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำในพื้นที่ของซีโรเจล (Xerogel) และมีการลดลงของระยะระหว่างชั้นจากจุดนั้นการหดตัวของบ่อโตนีลมีกลไกอยู่ 2 แบบคือปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และการเปลี่ยนแปลงช่องว่างของโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวัสดุ เครื่องมือ วิธีการทดสอบ และสัดส่วนผสมของของคอนกรีตที่ใช้ในการดำเนินงานโดยการดำเนินงานจะใช้ตะกอนแทนที่ในปูนซีเมนต์ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์

### 3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานเริ่มจากการหาคุณสมบัติของวัสดุความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักของทราย หิน และตะกอนประปา ออกแบบและปรับส่วนผสมคอนกรีตทั้งแบบกำลังสูงปกติที่อายุต้นและผสมตะกอนประปาเพิ่ม จากนั้นหล่อคอนกรีตเพื่อทดสอบจริง ทำการทดสอบกำลังอัด การขยายตัว และแรงยึดเหนี่ยวของตะกอนประปา แล้วเทียบกับคุณสมบัติของคอนกรีตควบคุม

### 3.2 วัสดุวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอก. 15 เล่ม 1-2547 [30] ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.2.2 มวลรวมละเอียดใช้ทรายที่ทดสอบบรอนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ตาม ASTM C 33 [31] ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลองผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16



3.2.3 มวลรวมหยาบใช้หินย่อย ขนาด 3/4" - #4 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 ตะกอนจากขบวนการผลิตน้ำประปา ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ตั้งอยู่ที่ 400 ถนน  
ประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตะกอนประปา

3.2.5 สารลดน้ำพิเศษประเภท F

3.2.6 เหล็กข้ออ้อย DB 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เหล็กข้ออ้อย DB 12 มิลลิเมตร

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องผสมคอนกรีต ขนาด 0.05 ลูกบาศก์เมตร

3.3.2 ชุดหล่อตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร

3.3.3 ชุดหล่อตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $15 \times 30$  เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชุดหล่อตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $15 \times 30$  เซนติเมตร

3.3.4 ชุดหล่อตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ 15 x 15 x 15 ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

3.3.5 แบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

3.3.6 แบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 30 เซนติเมตร

3.3.7 เครื่องทดสอบ (Compression Machines) ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบ (Compression Machines)



3.3.8 เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine)

3.3.10 เครื่องบดวัสดุ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องบดวัสดุ

### 3.3.11 เครื่องวัดความยาวแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความยาวแท่งคอนกรีต

## 3.4 ขั้นตอนการศึกษา

การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์เกร้าท์ สำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป นั้นมีวิธีการทดสอบต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 การเตรียมวัสดุตะกอนประปา โดยนำมาอบแห้งและทำการบดให้ละเอียดโดยมีขนาดให้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

3.4.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะมวลรวมละเอียดใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C128 [32]

ความถ่วงจำเพาะมวลรวมหยาบใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C127 [33]

หน่วยน้ำหนักใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C29 [34]

3.4.3 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการต่อตัวใช้การทดสอบตาม มอก.15 เล่ม 8-2514 [35] และ มอก.15 เล่ม 9-2518 [36]

3.4.4 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์เกร้าท์และคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

การเลือกส่วนผสมจะใช้ปริมาณสัดส่วนผสมที่มีปริมาณมวลรวมละเอียดที่น้อยและใช้ปริมาณน้ำน้อยเพื่อให้มีค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่สูงและการใช้สารลดน้ำในส่วนผสมของมอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปาเพื่อให้มีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกับมอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์เกร้าท์และมอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษา กำลังอัด แรงยึดเหนี่ยว และการหดตัว

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่	สัญลักษณ์	ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ (กก./ม. <sup>3</sup> )				สารผสมเพิ่ม (ร้อยละ)
		ซีเมนต์	ทราย	น้ำ	ตะกอนประปา	
1	C1	1000	1375	400	-	-
2	5C1-F	948.5	1375	350	49.93	1.50

หมายเหตุ : ใช้สารลดปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ของปูนซีเมนต์และตะกอนประปา

C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

F หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F

5 หมายถึง ร้อยละของตะกอนประปาที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ

การอ่านสัญลักษณ์

5C1-F หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกอนประปาร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ ใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F

**ตารางที่ 3.2** สัดส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับการทดสอบ กำลังอัด แรงยึดเหนี่ยว แรงดึงโดยตรง และกำลังตัด

สัดส่วนผสมคอนกรีต	ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ (กก./ม. <sup>3</sup> )			
	ซีเมนต์	หิน	ทราย	น้ำ
คอนกรีต	370	856	400	185

ตารางที่ 3.2 เป็นสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ แรงอัด แรงดึงโดยตรง และแรงยึดเหนี่ยว

**3.4.5 การเตรียมตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์เกร้าท์**

การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์เกร้าท์รูปทรงลูกบาศก์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [37] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตรจำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุที่ 1 3 7 14 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

3.4.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับใช้กับตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตลูกบาศก์มาตรฐาน BS 1881 Part 108 [38] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร



### 3.4.7 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบแบบหล่อคอนกรีตแล้วการใส่เหล็ก

ทำการเตรียมตัวอย่างก้อนคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ รูปทรงกระบอก รูปคาน รูปตัวโอ ทำความสะอาดแบบหล่อ แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้านตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่าๆ กัน แต่ละชั้นตาด้วยเหล็กตาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ม.ม. 25 ครั้งสำหรับคอนกรีตรูปทรงกระบอกและใช้เหล็กหนัก 1.8 กก. ยาว 38 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 ซม. กระทั่งจำนวน 35 ครั้งสำหรับตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ เมื่อตาดขึ้นสุดท้ายเสร็จให้ปาดผิวหน้าให้เรียบ ตัวอย่างละ 3 ก้อนวัดความยาวระยะฝังเหล็ก แล้วฝังเหล็กที่ต้องการทดสอบลงไป (ระยะฝังเหล็กต้องมีระยะห่างจากฐานแบบหล่อไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร) สำหรับการทดสอบตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก

การถอดแบบและการบ่มตัวอย่าง หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 20 ซม. จึงถอดแบบออก ต่อจากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วันสำหรับตัวอย่างรูปคานและรูปตัวโอทดสอบแรงยึดเหนี่ยวที่เจาะฝังเหล็กแล้วใส่มอร์ตาร์เกร้าท์เชื่อมประสาน

### 3.4.8 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบแบบหล่อคอนกรีตและเจาะที่หลังแล้วใช้ซีเมนต์เกร้าท์ยึดเหล็ก

ทำการเตรียมตัวอย่างก้อนคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ รูปทรงกระบอก รูปคาน รูปตัวโอ ทำความสะอาดแบบหล่อ แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้านตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่าๆ กัน แต่ละชั้นตาด้วยเหล็กตาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ม.ม. 25 ครั้งสำหรับคอนกรีตรูปทรงกระบอกและใช้เหล็กหนัก 1.8 กก. ยาว 38 ซม. หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5 ซม. ตาด 35 ครั้งสำหรับตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ เมื่อตาดขึ้นสุดท้ายเสร็จให้ปาดผิวหน้าให้เรียบ ตัวอย่างละ 3 ก้อน การถอดแบบและการบ่มตัวอย่าง หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 20 ซม. จึงถอดแบบออก การบ่มตัวอย่างโดยนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำ ที่ 28 วัน เมื่อครบกำหนดวันที่ 28 วัน แล้วให้ยกขึ้นจากน้ำและรอให้คอนกรีตแห้งจากการบ่มประมาณ 1 ซม. และทำการเจาะคอนกรีตตามความลึกที่ออกแบบไว้ใส่ซีเมนต์เกร้าท์ในรูเจาะให้เต็มรูระยะฝังเหล็ก แล้วเสียบเหล็กที่ต้องการทดสอบลงไปทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวที่อายุมอร์ตาร์เกร้าท์ 1 3 7 14 และ 28 วัน สำหรับการทดสอบตัวอย่างรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก (ระยะฝังเหล็กต้องมีระยะห่างจากฐานแบบหล่อไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร)สำหรับตัวอย่างรูปคานและรูปตัวโอทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวโดยฝังเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มม. ยาว 30 ซม. ลงช่วงกลางตัวอย่างโดยเจาะใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ข้างเดียว 15 ซม.ขนาดรูเจาะเท่ากับ 16 มม. ทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วันเช่นเดียวกัน

### 3.4.9 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของซีเมนต์เกร้าท์

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับมอร์ตาร์เกร้าท์ของตัวอย่างรูปทรงกระบอก โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 x 30 เซนติเมตร หล่อแบบฝังเหล็ก DB 12 มิลลิเมตรและหล่อแบบเจาะเสียบฝังเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร รุเจาะใส่มอร์ตาร์เกร้าท์ ขนาด 16 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.20 ทดสอบแรงดึงของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 3.17 แบบทรงกระบอก 15 x 30 เซนติเมตร

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับมอร์ตาร์เกร้าท์ของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร หล่อแบบฝังเหล็ก DB 12 มิลลิเมตรและหล่อแบบเจาะเสียบฝังเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร รุเจาะใส่มอร์ตาร์เกร้าท์ ขนาด 16 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.18 ทดสอบแรงดึงของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 3.18 แบบทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร



รูปที่ 3.19 การทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 x 30 เซนติเมตร แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบเจาะที่หลังแล้วใช้ มอร์ตาร์เกร้าที่ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 การทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ มาตรฐาน โดยใช้ตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบเจาะที่หลัง แล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าที่ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร

#### 3.4.10 การทดสอบกำลังดัด

การทดสอบโดยวิธีหาความเค้นดัดของตัวอย่างรูปคาน มาตรฐาน ASTM C293/293M [39] โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด  $10 \times 10 \times 60$  เซนติเมตร โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะทำการใส่เหล็กข้างหนึ่งฝังในตัวอย่างคอนกรีตขณะหล่อ และ ส่วนปลายเหล็กอีกข้างหนึ่งจะฝังเข้าไปในรูเจาะของตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่ 2 ด้วยมอร์ตาร์เกร้าท์ ใช้เหล็กขนาด DB 12 มิลลิเมตรโดยรูเจาะใส่มอร์ตาร์เกร้าท์มี ขนาด 16 มิลลิเมตร จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุ แสดงในรูปที่ 3.21 ทดสอบโดยให้แรงดัดที่อายุมอร์ตาร์เกร้าท์ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน

ทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นดัดของคานคอนกรีตล้วนที่ไม่ฝังเหล็กกับคานคอนกรีตที่ฝังเหล็กโดยใช้วัสดุเกร้าท์ขนาด  $10 \times 10 \times 60$  เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเกร้าท์สามารถรับกำลังดัดได้เท่ากับคอนกรีตล้วน



รูปที่ 3.21 แบบคาน  $10 \times 10 \times 60$  เซนติเมตร



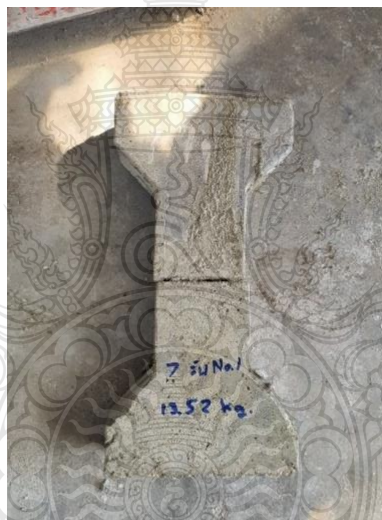
รูปที่ 3.22 การทดสอบกำลังดัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปคาน โดยใช้ตัวอย่างขนาด  $10 \times 10 \times 60$  แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตฝังเดียวแล้วเจาะฝังเหล็กที่หลังแล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร



### 3.4.11 การทดสอบกำลังดึงโดยตรง

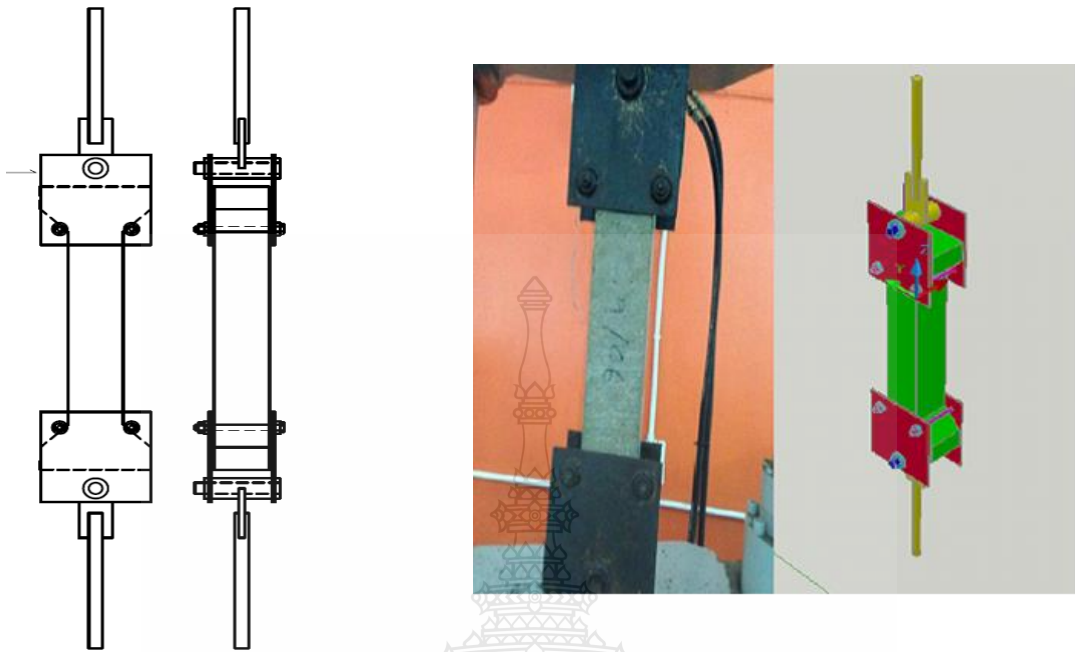
ทำการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับมอร์ตาร์เกร้าท์ ด้วยการทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอขนาด  $20 \times 10 \times 60$  เซนติเมตร โดยทำการหล่อตัวอย่างโดยแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะทำการใส่เหล็กข้างหนึ่งฝังในตัวอย่างคอนกรีตขณะหล่อ และส่วนปลายเหล็กอีกข้างหนึ่งจะฝังเข้าไปในรูเจาะของตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่ 2 ด้วยมอร์ตาร์เกร้าท์ โดยใช้เหล็กยาว 30 เซนติเมตร ใช้เหล็กขนาด DB 12 มิลลิเมตร มีรูเจาะขนาด 16 มิลลิเมตร เมื่อประกอบกันแล้วจะได้เป็นตัวอย่างรูปตัว I จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุ แสดงในรูปที่ 3.23 ทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัว I โดยใช้เหล็กข้ออ้อย 12 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบแรงดึงโดยตรงที่อายุวัสดุเกร้าท์ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน

ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตล้วนที่ไม่ฝังเหล็กกับคอนกรีตที่ฝังเหล็กแล้วใช้วัสดุเกร้าท์ ของตัวอย่างรูปตัวไอขนาด  $20 \times 10 \times 60$  เซนติเมตรที่อายุ 28 วันเพื่อเปรียบเทียบแรงดึงโดยตรงว่าวัสดุเกร้าท์สามารถรับแรงได้เท่ากับคอนกรีตล้วนหรือไม่

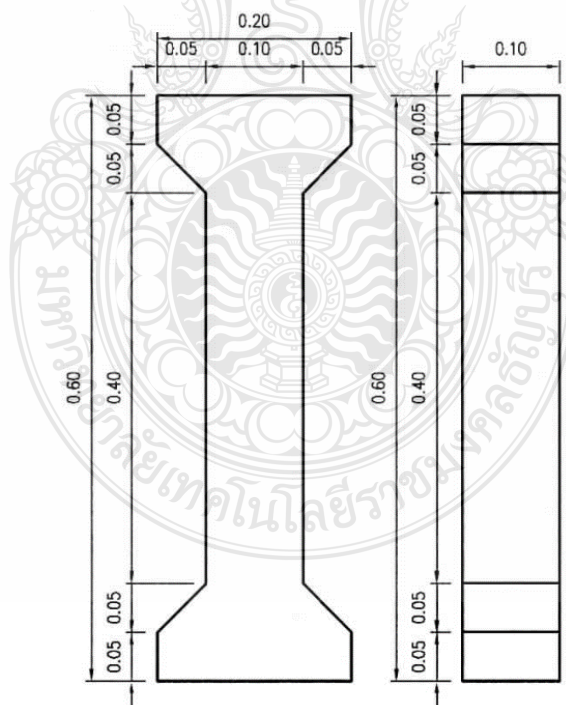


รูปที่ 3.23 แบบตัวไอ  $20 \times 10 \times 60$  เซนติเมตร

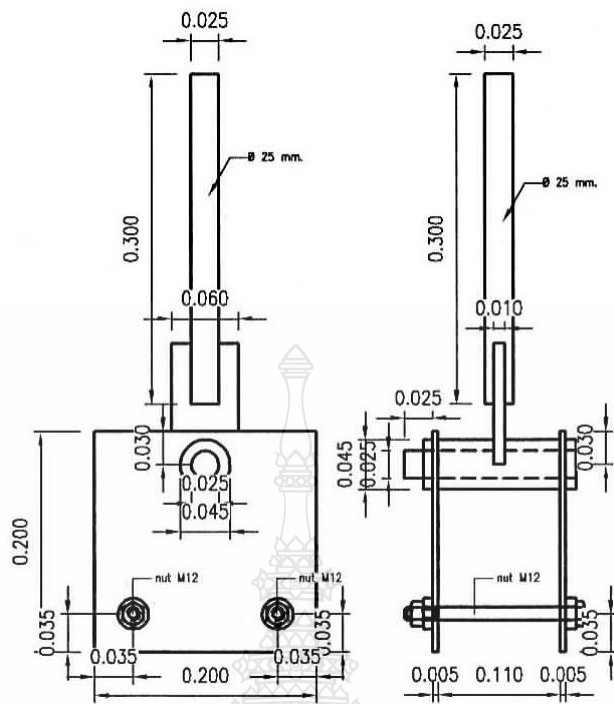
การทดสอบแรงดึงโดยตรง นำตัวอย่างที่อายุครบกำหนดตามวันทดสอบมาฝังให้แห้ง จากนั้นทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักจนครบถ้วน ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรง เพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบ จึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยดัดแปลงหัวยึดจับตัวอย่างคอนกรีตมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง ของ Tuan Kiet Tran และ Dong Joo Kim [10] การติดตั้งคอนกรีตตัวอย่างเข้ากับหัวยึด ดังแสดงใน (รูปที่ 3.24) รูปแบบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงใน (รูปที่ 3.25) รูปหัวยึดตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงใน (รูปที่ 3.24) โดยจุดยึดบนและล่างเป็นแบบจุดยึดหมุน และการทดสอบคอนกรีตตัวอย่าง ดังแสดงใน (รูปที่ 3.26)



รูปที่ 3.24 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับหัวยึด



รูปที่ 3.25 รูปแบบและขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.26 หัวยึดตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.27 การทดสอบแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)



รูปที่ 3.28 การทดสอบกำลังดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอ โดยใช้ตัวอย่างขนาด 20 x 10 x 60 แบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีต DB 12 มิลลิเมตร กับแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตฝั่งเดี่ยวแล้วเจาะฝั่งเหล็กทีหลังแล้วใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็ก DB 12 มิลลิเมตร

#### 3.4.12 การทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ด้วยตะกอนประปา

ทำการทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์โดยใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนแทนที่ด้วยตะกอนประปาในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและมอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ล้วนอย่างเดียว ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

การทดสอบจะเป็นการหดตัวโดยรวม (Total Shrinkage) ของมอร์ตาร์เกร้าท์ ซึ่งจะ เป็นสภาพเดียวกันกับการใช้งานในงานจริง โดยเมื่อทำการเกร้าท์มอร์ตาร์แล้ว จะไม่สามารถบ่มน้ำได้ เนื่องจากอยู่ภายในแผ่นพื้นคอนกรีต โดยการทดสอบจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596 [40] โดยใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25 x 25 x 285 มิลลิเมตร โดยในแต่ละสัปดาห์การผสมคอนกรีตที่ใช้งานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อการ นำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต หลังจากที่ได้หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอด ออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง จะนำชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าแห้ง แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา จะเข้าสู่กระบวนการชั่งน้ำหนัก โดยเครื่องชั่งและวัดความยาวเทียบกับแห้งโลหะที่มีความยาวมาตรฐานด้วยเครื่องมือ ซึ่งค่าที่วัดได้นั้น จะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัปดาห์การผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการวัดต่าง ๆ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อย กว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 0 1 3 5 7 14 และ 28 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละ ของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆ กัน



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากการศึกษาการนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำมอร์ตาร์เกร้าท์เพื่อมาใช้ในการฉาบผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปได้ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ

จากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐานต่าง ๆ

รายการ	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึม (%)	หน่วยน้ำหนัก กก./ม <sup>3</sup> .
ทราย	2.64	0.427	1.706
หิน	2.69	0.677	1.54
ตะกอนน้ำประปา	2.46	8.495	0.998

จากตารางที่ 4.1 จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอนน้ำประปาเมื่อเทียบกับทรายและหินจะพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทรายและหินเล็กน้อยเมื่อทำการทดสอบหน่วยน้ำหนักจะพบว่าตะกอนประปามีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทรายหินเนื่องจากตะกอนน้ำประปามีขนาดละเอียดกว่าทรายและมีลักษณะเป็นผงจึงมีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าทรายและหิน

#### 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัว

สัญลักษณ์	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)	ระยะเวลาก่อเริ่มต้น (นาที)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (นาที)
C1	27	95	165
5C1- FA	28	63	195

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของตัวอย่าง C1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 27 แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปราร้อยละ 5 และใช้สารลดน้ำของตัวอย่าง 5C1- FA จะพบว่าเมื่อเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 28 จะเห็นได้ว่าตะกอนประปรายจะมีการดูดซึมน้ำมากทำให้มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นมากกว่าของตัวอย่าง C1 สำหรับระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของ C1 ใช้เวลา 95 และ 165 นาทีตามลำดับ และ 5C1-FA ใช้เวลา 63 และ 195 นาทีตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อแทนที่ด้วยตะกอนประปรายมีผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นสั้นกว่า C1 แต่ระยะสุดท้ายของ 5C1-FA ใช้เวลายาวกว่า C1 เนื่องจากตะกอนประปรายที่แทนที่ไปทำหน้าที่ดูดซึมน้ำในส่วนผสมทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมให้น้อยลง และจากขนาดที่ละเอียดของตะกอนประปรายยังเป็นตัวอุดในช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์กับทรายจึงทำให้ในการก่อตัวระยะต้นมีค่าน้อยกว่าของ C1 ในส่วนของการก่อตัวระยะสุดท้าย ตัวอย่าง 5C1-FA จะมีค่ามากกว่าเนื่องจากการใช้ตะกอนประปรายไปแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า ทำให้มีปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยกว่าเป็นผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวระยะสุดท้ายมากกว่า

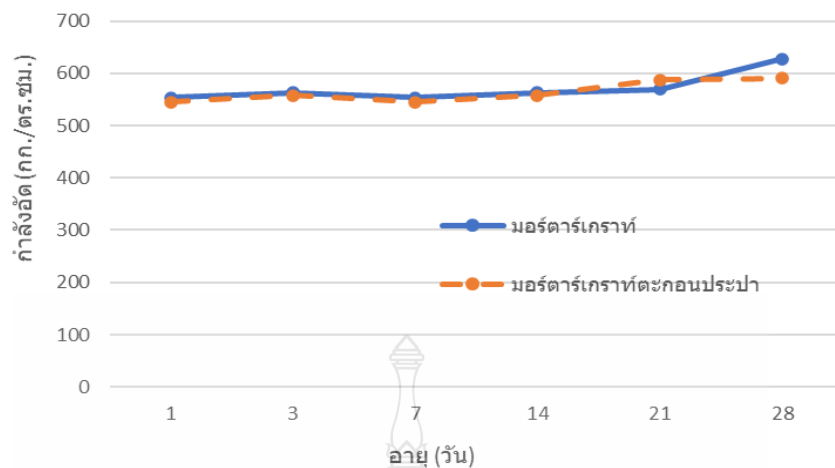
#### 4.3 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์เกร้าท์

จากการทดสอบการรับกำลังอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [37] แสดงผลตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์เกร้าท์ มาตรฐาน ASTM C109/C109M [37]

สัญลักษณ์	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.) ที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วัน					W/C
	1	3	7	14	28	
C1	553	563	569	628	673	0.40
5C1-F	545	558	587	591	658	0.37

จากตารางที่ 4.3 การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์เกร้าท์ C1 มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 ส่วน มอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปราย (5C1-F) มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.37 จากการทดลองพบว่ามอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปราย (5C1-F) ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.37 มีค่ากำลังอัดที่สูงตั้งแต่อายุต้น และมีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกับมอร์ตาร์ C1 แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปรายแทนที่ร้อยละ 5 สามารถใช้แทนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ C1 ได้

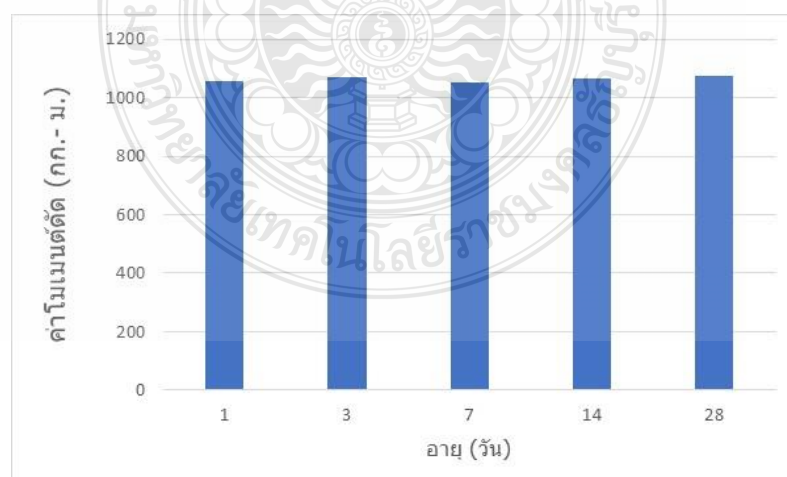


รูปที่ 4.1 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์การทดสอบกำลังอัด

#### 4.4 ผลการทดสอบกำลังของคอนกรีตล้วนที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบ แรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 เซนติเมตรสำหรับการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 365.55 กก./ตร.ซม. ผลการทดสอบแรงดัดของคอนกรีตขนาดหน้าตัด10×10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร โมดูลัสแตกร้าว เท่ากับ 5.33 กก./ตร.ซม. (โมเมนต์เท่ากับ 44.42 กก.-ม.) ผลการทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างควบคุมรูปตัวไอขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ลีค 10 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร เท่ากับ 18.78 กก./ตร.ซม.

#### 4.5 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้ความความเค้นดัดแก่คานขนาด 10×10×60 เซนติเมตร

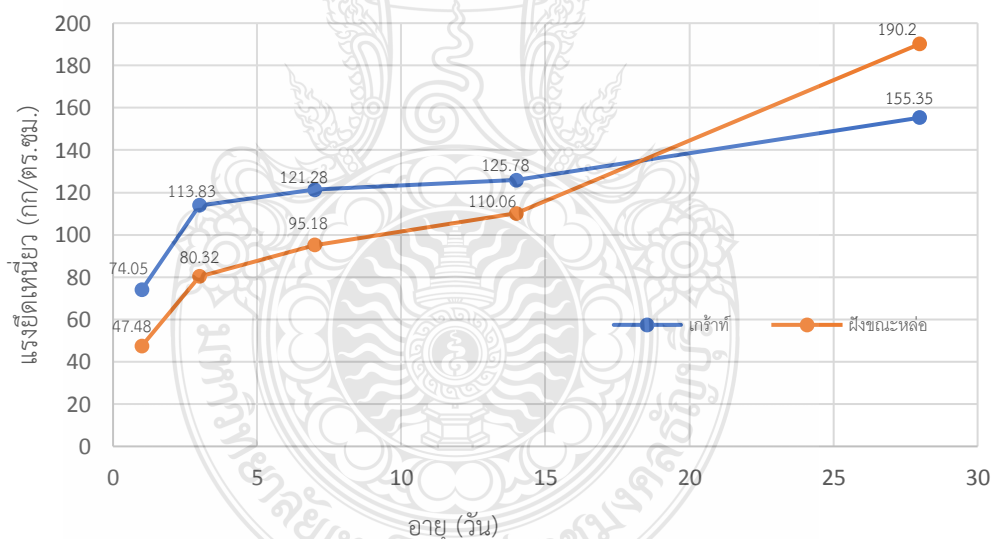


รูปที่ 4.2 โมเมนต์ดัดคานคอนกรีต ขนาด 10 × 10 × 60 เซนติเมตร เจาะฝังเหล็กใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ข้างหนึ่ง อีกข้างฝังในขณะหล่อคอนกรีต

จากผลการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานคอนกรีต ขนาด 10×10×60 เซนติเมตร เจาะฝังเหล็กโดยใช้การมอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็กในรูเจาะข้างหนึ่งลึก 15 เซนติเมตร ส่วนอีกข้างหนึ่งทำการฝังลงในตัวอย่างคอนกรีตในขณะที่หล่อคอนกรีตโดยฝังลึก 15 เซนติเมตรเหมือนกัน พบว่าจากการทดสอบค่าแรงดัดที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังในรูปที่ 4.2 เนื่องจากการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคาน โดยคานจะวิบัติจากแรงดึงเป็นหลัก เหล็กที่ฝังไว้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่าง จึงไม่ค่อยมีผลต่อการรับแรงทำให้ค่าที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งแสดงว่าแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กกับคอนกรีตเมื่อทดสอบการดัดแบบคานจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุของตัวอย่างทดสอบ แต่เกิดจากการวิบัติของแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเกร้าท์ระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตก่อน หรือที่เรียกว่า การหลุด (debond) ระหว่างเหล็กเสริมกับวัสดุเกร้าท์ ทำให้ค่ากำลังที่ได้ไม่แตกต่างกันตามอายุ

จากผลการทดสอบความเค้นดัดของตัวอย่างคานคอนกรีตล้วนกับคอนกรีตที่ฝังเหล็กแล้วใช้วัสดุเกร้าท์พบว่าค่าความเค้นดัดของคานคอนกรีตใช้มอร์ตาร์เกร้าท์มีค่า 1072.63 กก.-ม. มากกว่าคอนกรีตล้วนที่อายุ 28 วันเท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.42 กก.-ม. แสดงให้เห็นว่าการใช้มอร์ตาร์เกร้าท์สามารถรับโมเมนต์ดัดได้ดีกว่าคอนกรีตล้วน

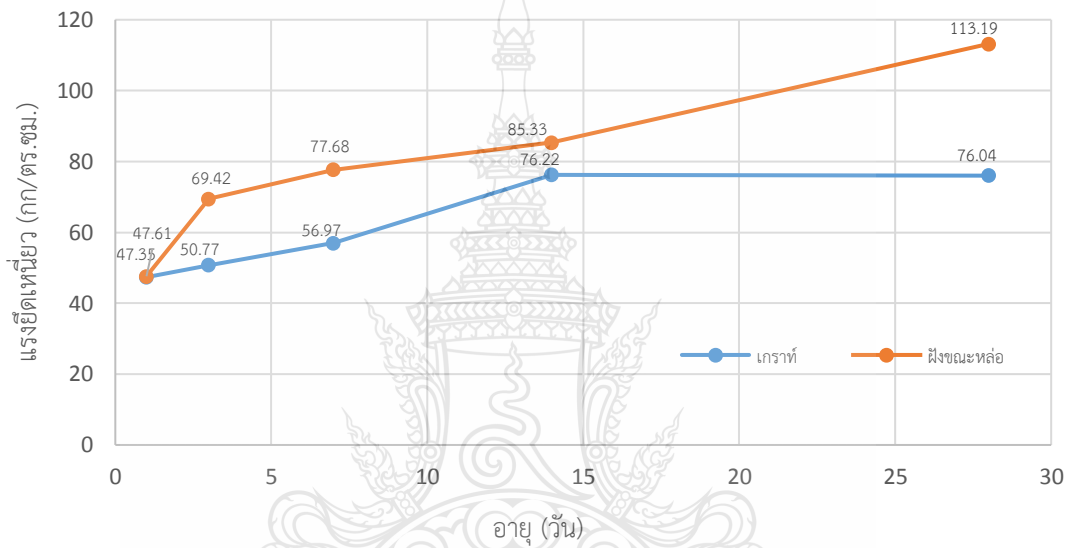
#### 4.6 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์โดยให้แรงดึงเหล็ก



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเทียบกับวัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ของลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นได้ว่าตัวอย่างการทดสอบตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15 × 15 × 15 ซม. แบบเจาะที่หลังแล้วใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็กจะมีแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมคอนกรีต (bond strength) มากกว่าแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตแบบธรรมดาในช่วงอายุเริ่มต้นจนถึงอายุ 14 วัน แต่เมื่ออายุ 28 วัน จะพบว่าการใส่เหล็กไปพร้อมกับการหล่อคอนกรีตแบบธรรมดาคะ

มีค่าสูงกว่า ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับของ นายธวัชชัย และคณะ [41] ที่พบว่าการใช้ตะกอนประปาจะให้ค่ากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตปกติในช่วงอายุต้น แต่เมื่ออายุมากขึ้นจะมีค่าน้อยกว่า และอาจจะเป็นผลมาจากการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์ทำให้การแรงยึดหดลง ซึ่งจากงานวิจัยของ ยิงพงษ์ และ จตุพล [13] แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่แทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์จะมีค่าการหดตัวมากกว่าคอนกรีตควบคุม ในที่นี้ผลการทดสอบอาจมีปัญหาด้านข้อมูลดิบ ที่เกิดจาก เครื่องมือ การเตรียมตัวอย่างที่ไม่ดี รูเจาะไม่สะอาด ใช้มอร์ตาร์เกร้าท์ไม่เต็ม รูเจาะมีฟองอากาศ มีการเจาะที่ไม่ได้แนว และควรรักษาขนาดรูเจาะที่เล็กลงหรือใหญ่ขึ้นซึ่งอาจมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยว

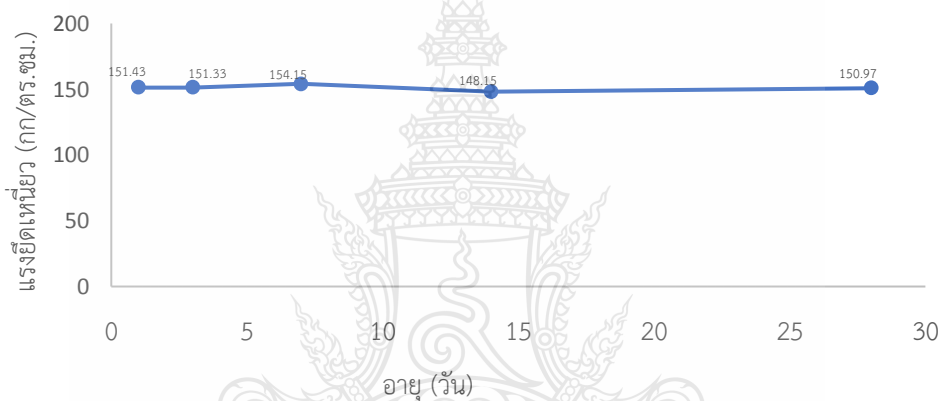


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเทียบกับเหล็กที่ใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ ทรงกระบอกขนาด 15 × 30 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นได้ว่าตัวอย่างการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกขนาด  $\varnothing 15 \times 30$  ซม. แบบเจาะที่หลังแล้วใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ยึดจับเหล็กจะมีแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมคอนกรีต (bond strength) มีค่าน้อยกว่าแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตแบบธรรมดา จะพบว่าค่าแตกต่างจากการฝังเหล็กในตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $15 \times 15 \times 15$  เป็นเพราะการเจาะฝังเหล็กที่ลึกมีผลทำให้การใส่มอร์ตาร์เกร้าท์ทำได้ยากและใส่เหล็กได้ยากกว่า ทำให้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ยึดจับได้ไม่ดี เนื่องจากรูเจาะมีขนาดใหญ่กว่าเหล็กเล็กน้อย ซึ่งขนาดรูที่เล็กจะมีผลต่อการยึดจับของมอร์ตาร์เกร้าท์ ทำให้ที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงมากขึ้นเมื่อเทียบกับการฝังคอนกรีตฝังขณะหล่อ เมื่อนำผลที่ได้ไปเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเหมือนกับผลของ นายธวัชชัย และคณะ [38] ที่พบว่าการใช้ตะกอนประปาจะให้ค่ากำลังอัดเมื่ออายุมากขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากตะกอนประปาเป็นวัสดุเนื้ออ่อน จึงไม่ได้มีผลต่อความแข็งแรงของมอร์ตาร์เกร้าท์ ทำให้ที่อายุ 28 วัน จึงมีค่าแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าแบบใส่เหล็กไปพร้อมกับการหล่อคอนกรีต ซึ่งในช่วงอายุ 1 วัน กำลังของคอนกรีตยังไม่ค่าไม่สูงมาก

ความแข็งแรงของวัสดุผสมยังไม่ส่งผลต่อกำลังอัดมากนัก แต่เมื่ออายุมากขึ้น กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ความแข็งแรงของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังอัดมากกว่า และมีผลมาจากการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์ทำให้แรงยึดหยุ่นลดลงตามงานวิจัยของ ยิ่งพงษ์ และ จตุพล [13] ถึงแม้ว่าวัสดุ เกร้าท์มีค่าแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าคอนกรีตที่ฝังเหล็กขณะหล่อแต่ยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานแรงยึดเหนี่ยวที่กำหนด [7] ผลการทดสอบที่คลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการทำความสะอาดรูเจาะไม่ดีพอ การใช้รูเจาะที่ขนาดเล็กทำให้การยึดเกาะของมอร์ตาร์เกร้าท์ไม่ดีพอ

#### 4.7 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้แรงดึงโดยตรง ในตัวอย่างรูปตัวไอขนาด 10×20×60 เซนติเมตร



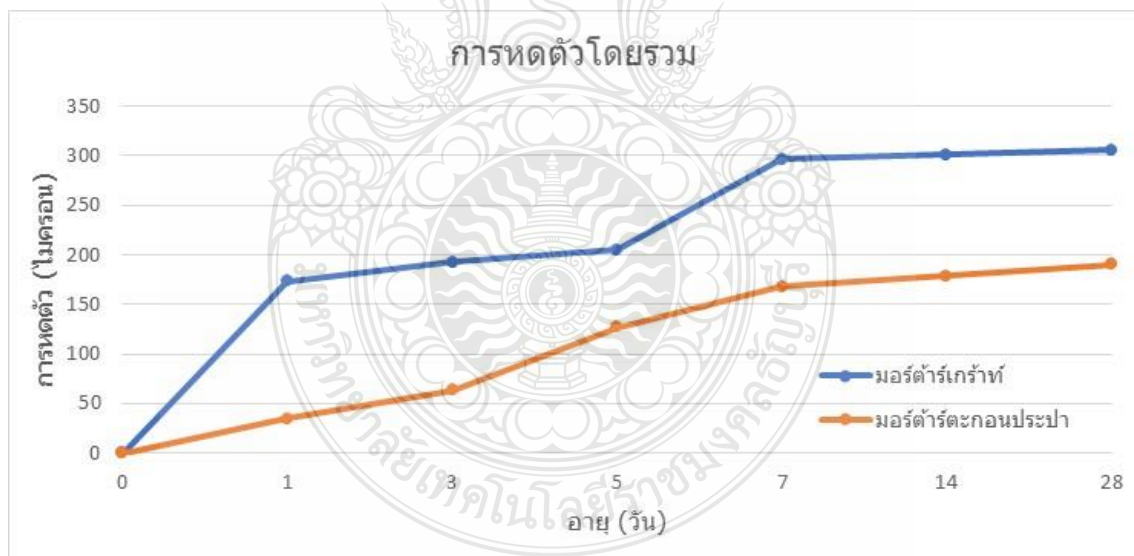
#### รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมคอนกรีตตัวอย่างตัวไอขนาด 10 × 20 × 60 เซนติเมตรที่ใช้มอร์ตาร์เกร้าท์กับอายุ

เมื่อทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัว I โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะทำการใส่เหล็กข้างหนึ่งฝังในตัวอย่างคอนกรีตขณะหล่อ และ ส่วนปลายเหล็กอีกข้างหนึ่งจะฝังเข้าไปในรูเจาะของตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่ 2 ด้วยมอร์ตาร์เกร้าท์ พบว่าเมื่อทดสอบค่าแรงดึงของตัวอย่างตามอายุที่เพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดึงที่ได้ไม่แตกต่างกันเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เกร้าท์มีกำลังสูงตั้งแต่อายุต้นทำให้ผลการทดสอบด้วยการดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอมีค่าไม่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่ยึดเหล็กมีค่าเท่ากับ 8482 กก. มีค่ามากกว่าคอนกรีตล้วนที่อายุ 28 วันเท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1878 กก. ดังนั้นสามารถนำมอร์ตาร์เกร้าท์มาใช้ในงานรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปได้

#### 4.8 ผลการทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่ปูนซีเมนต์และมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่การหดตัวโดยรวมในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในจากการใช้ไปในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งจะเป็นการสูญเสียความชื้นออกสู่ภายนอกหรือการระเหยของน้ำภายในตัวอย่างมอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์ ทำให้มีการหดตัวเกิดขึ้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์จะมีค่าการหดตัวมากกว่ามอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปา ซึ่งสาเหตุเนื่องจากในมอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปาส่งสามารถกักเก็บความชื้นได้มากกว่าปูนซีเมนต์จากคุณสมบัติที่มีความพรุนมากกว่าจึงส่งผลให้ความชื้นอยู่ภายในมากกว่ามอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์ และจากการที่ใช้ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จึงทำให้มอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปามีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่ามอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์จึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันก็น้อยกว่าทำให้มีน้ำเหลืออยู่ภายในมากกว่า ซึ่งการหดตัวเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนตั้งแต่อายุต้น โดยตั้งแต่อายุ 1 วัน มอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์มีค่าการหดตัวที่สูงกว่าและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุที่มากขึ้น แต่เมื่ออายุมากกว่า 7 วันไปแล้ว ค่าการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ปูนซีเมนต์และมอร์ตาร์เกร้าท์ตะกอนประปามีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากเนื่องจากความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตเหลือน้อยและการหดตัวได้เกิดขึ้นไปมากแล้ว



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบหดตัวโดยรวม



## บทที่ 5

### สรุป

จากการทดสอบกำลังอัดและแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ mortars ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปาพบว่า

1. Mortars ที่ใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 กับสารลดน้ำพิเศษชนิด F มีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกับ Mortars ที่แทนที่ปูนซีเมนต์
2. แรงยึดเหนี่ยวของ Mortars ที่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าการฝังเหล็กไปพร้อมขณะหล่อ
3. การทดสอบความเค้นดัดของ Mortars ที่มีความสูงค่าสูงกว่าความเค้นดัดของคอนกรีตล้วน และพบว่าอายุของ Mortars ที่ไม่มีผลต่อความเค้นดัด
4. การทดสอบแรงดึงโดยตรงพบว่าอายุของ Mortars ที่ไม่มีผลต่อการรับแรงดึงโดยตรง และค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตที่ฝังเหล็กแล้วใช้ Mortars ที่มีความสูงค่าสูงกว่าแรงดึงในคอนกรีตล้วนและอายุที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าแรงดึง
5. การหัดตัวโดยรวมของ Mortars ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะมีค่าน้อยกว่า Mortars ปูนซีเมนต์ ซึ่งการใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์จะสามารถช่วยเรื่องการหัดตัวได้ดีขึ้น
6. จากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำ Mortars ที่ตะกอนประปามาใช้ในงานรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปได้

#### ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาผลของขนาดรูเจาะที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยว



## บรรณานุกรม

- [1] นายจตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ, “กำลังอัดของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด.” วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [2] การประปานครหลวง. เพิ่มคุณค่าให้กับตะกอนดินที่จากการผลิตน้ำประปา. ข่าวประชาสัมพันธ์. 2548.
- [3] British Standards Institute. BS 1881 : Part 108. Method of Making Test Cube Fresh Concrete. London. 1983.
- [4] American Society for Testing and Materials, ASTM C192/C192 M-00 : Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 120-127.
- [5] การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวคอนกรีตต่อเหล็กเสริม. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.slideserve.com/aderyn/bond-strength> (3 กุมภาพันธ์ 2562).
- [6] ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ (2561).ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทรายบด และ ใ้ล้ลยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดประลัยแรงดึงและการหดตัวออโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [7] ปริญา จินดาประเสริฐ, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 6. 2553.
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM C39-94, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylinder Concrete Specimens, 1955. Annual Book of ASTM Standards, v.04.02, Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 17-21.
- [9] Kittitep Fuenkajorn and Sippakorn Klanphumeesri, “Direct Tension Test of Intact Rock Using Compression-to-Tension Load Converter,” Research and Development Journal, Suranaree University of Technology, Vol. 21 No. 2, pp. 51-57, 2010.
- [10] Tuan Kiet Tran and Dong Joo Kim, “Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates,” Cement and Concrete Research, Vol. 50, pp. 62-73, 2013.
- [11] พิมพ์ลิป์ จันทร์ประเสริฐ(2556). การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-ใ้ล้ลยจีโอโพลิเมอร์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] อนุจิตร ภูมิพันธ์,(2560).สัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้มวลรวมประติษฐ์ที่ทำมาจากตะกอนน้ำประปา เพื่อนำไปสู่การพัฒนาโครงสร้างผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีน้ำหนักเบา, รายงานการวิจัย,คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม งบประมาณปี 2560.
- [13] ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ และ จตุพล ตั้งปกาศิต (2562) ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัด แรงดึงโดยตรง และ การหดตัวของคอนกรีต, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 14, ประจวบคีรีขันธ์, 6 - 8 มีนาคม 2562.
- [14] จิตรกร วงศ์กรชาวลิต, 2543, “คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2543
- [15] สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ, อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ. บล็อกประสานผสมตะกอนดินจากน้ำประปา. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการ ครั้งที่1, 2551
- [16] รัฐพล สมณา และ เกียรติสุดา สมณา, วัสดุประสานที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกอนประปา, งานประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 10, ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท เชียงราย, 20-22 ตุลาคม 2557.
- [17] Naprarath Waijarean, Suwimol Asavapisit, Kwannate Sombatsompop, 2014, Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals, Construction and Building Materials 50 (2014) 486–491.
- [18] ดวงมล สุริยฉัตร ภาสันต์ วิชิตอมรพันธ์ และ วรธนะ เรืองสำเร็จ, 2547, การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา, รายงานวิชาการ ฉบับที่ สอพ. 16/2547, สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐานกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ. 10400 พิมพ์ครั้งที่ 1: 43 หน้า
- [19] สุพิณ แสงสุข, 2554, [http://www.cca.chula.ac.th/lecture\\_series/images/stories/ppt/sufficiency10.pdf](http://www.cca.chula.ac.th/lecture_series/images/stories/ppt/sufficiency10.pdf)
- [20] Paramalinggam Thanalechumi, Abdull Rahim Mohd Yusoff, Mohanadoss Ponraj and Hanim Awab, 2016, Studies on potential of Portland cement mortar for binding of waterworks sludge to reduce heavy metal leaching, *Sādhana* March 2016, Volume 41, Issue 3, pp 359–367.
- [21] Davidovits, J., 2008, Geopolymer Chemistry and Applications (2nd ed.), Saint-Quentin, FR: Geopolymer Institute, France, 585 p.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] พิรุฬห์ลักษณ์ คำผาย, เกียรติศักดิ์ ใจสะอาด, สุวิสา โพธิ์หักและเกียรติสุตา สมณา (2558) การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากตะกอนประปาโดยไม่มีส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต, การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6 ประจำปี 2558 วันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2558 ณ วิทยาลัยบัณฑิตเอเชีย จังหวัดขอนแก่น
- [23] พิมพ์ศิลป์ จันทร์ประเสริฐ (2556) การศึกษาพฤติกรรมการต้านกำลังอัดของตะกอนดินประปาแก้าลอยจีโอโพลิเมอร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [24] ผศ.ดร.ปิติศานต์ กร้ามาต, (2553) คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมแก้าลอยหินและผงหินปูน รายงานฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี- ราชมนังคชญบุรี งบประมาณปี 2553.
- [25] Fujiwara, T., “**Relation between mix proportion and drying shrinkage of hardened cement paste, mortar and concrete,**” Concrete Library of JSCE, No. 13, June 1989.
- [26] Hindy, E. E., Miao, B., Chaallal, O. and Aitcin, P. C., “**Drying shrinkage of ready-mixed high performance concrete,**” ACI Material Journal, Vol. 91 Issue.3, pp.300-305, 1994.
- [27] Tazawa, E., and Miyazawa, S., “**Effect of Constituents and Curing Condition on Autogenous Shrinkage of Concrete,**” Proceeding of the International Workshop Organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, pp.269-280, 1998.
- [28] Hanehara, S., Hirao, H., and Uchikawa, H., “**Relationships between Autogenous Shrinkage, and the Microstructure and Humidity Changes at Inner Part of Hardened Cement Paste at Early Age,**” Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, pp.93-104, 1998.
- [29] Park, K.B., Noguchi, T., and Tomosawa, F., “**A Study on the Hydration Ratio and Autogenous Shrinkage of Cement Paste,**” Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, pp.299-308.
- [30] มาตรฐานอุตสาหกรรมไทย มอก.15เล่ม 1-2547 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1  
ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] American Society for Testing and Materials, ASTM C33-01: Standard Specification for concrete Aggregates, annual Book of ASTM Standards, 1997, Vol. 04.02, Philadelphia, 10-17.
- [32] American Society for Testing and Materials, ASTM C128-97: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregates, Annual Book of ASTM : Standard,2001 Vol. 04.02, Philadelphia, 69-73.
- [33] American Society for Testing and Materials, ASTM C127-88: (Reapproved 2001): Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregates, Annual Book of ASTM : Standard,2001 Vol. 04.02, Philadelphia, 64-68.
- [34] American Society for Testing and Materials, ASTM C29/C29M-97a: Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates, Annual Book of ASTM : Standard,2001 Vol. 04.02, 1-4
- [35] มาตรฐานอุตสาหกรรมไทย มอก.15 เล่ม 8-2514 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 8 ข้อกำหนดวิธีทดสอบจำนวนน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลือปกติ ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- [36] มาตรฐานอุตสาหกรรมไทย มอก.15 เล่ม 9-2518 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 9 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต
- [37] American Society for Testing and Materials, ASTM C109/C109M-99: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube specimens), Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 83-88
- [38] British Standard Institute, BS 1881: Part 108, Method of Making Test Cube from Fresh Concrete, London, 1983.
- [39] American Society for Testing and Materials, ASTM C293/C293M : Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete ( Using Simple With Center – Point Loading ), Annual Book of ASTM : Standard,2016 Vol. 04.02
- [40] American Society for Testing and Materials, ASTM C596: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement
- [41] นายรัชชัย พลรักษ์, นายศรายุทธ เทียงแท้, นายรณชัย รุกขวัฒน์ และ นายฐิติกร แก้วประชา (2556). การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงสำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูป, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบการรับกำลังของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5  
เซนติเมตร

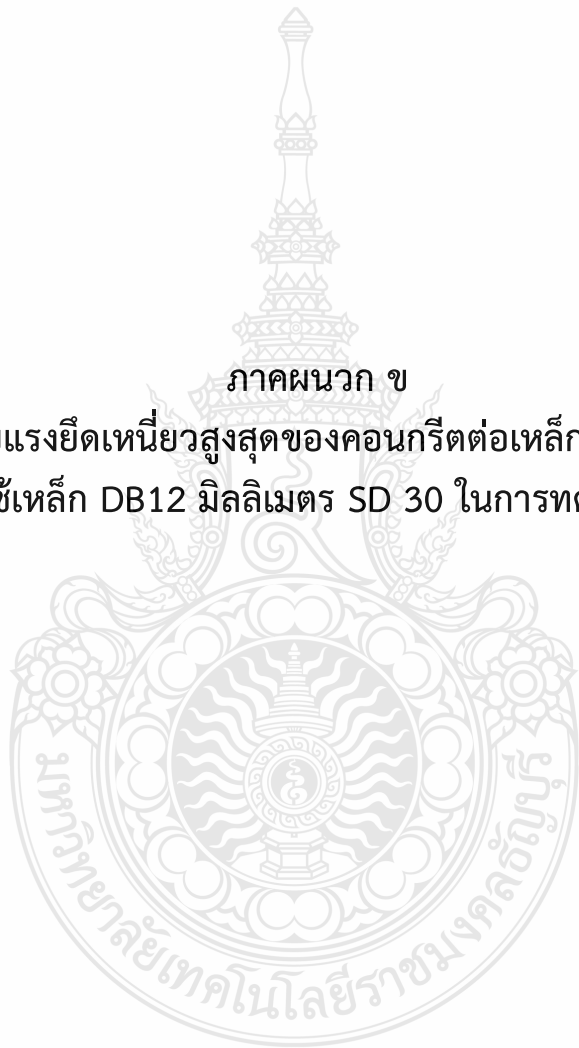


ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังอัด รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

ส่วนผสมคอนกรีต	สัญลักษณ์	ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ (กก.ลบม.)				สารผสมเพิ่ม	W/C	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.) ที่อายุ				
		ซีเมนต์	ทราย	น้ำ	ตะกอนประปา			1	3	7	14	28
1	C1	1000	1375	400			0.4	553	563	569	628	673
2	5C1-FA	948.5	1375	350	49.93	1.50%	0.369	545	558	587	591	658



ภาคผนวก ข  
ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแบบธรรมดา  
ใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ





**ตารางผนวกที่ ข1** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 1 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	1	1	1
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	2597	1926	1918
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	57.43	42.59	42.41
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	47.48		

**ตารางผนวกที่ ข2** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 3 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	3	3	3
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	3841	3871	3184
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	84.94	85.61	70.41
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	80.32		

**ตารางผนวกที่ ข3** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 7 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	7	7	7
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	4402	4002	4507
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	97.35	88.50	99.67
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	95.18		

**ตารางผนวกที่ ข4** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 14 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	5046	4203	5681
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	111.59	92.95	125.64
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	110.06		

**ตารางผนวกที่ ข5** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8300	8829	8684
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	183.47	195.16	191.96
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	190.20		

**ตารางผนวกที่ ข6** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 1 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	1	1	1
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	4043	2911	3811
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	53.64	38.62	50.57
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	47.61		

**ตารางผนวกที่ ข7** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 3 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	3	3	3
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	4958	5240	5498
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	65.79	69.53	72.95
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	69.42		

**ตารางผนวกที่ ข8** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 7 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	7	7	7
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	5994	5840	5728
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	79.53	77.49	76.00
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	77.68		

**ตารางผนวกที่ ข9** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 14 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	7009	6586	5697
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	93.00	87.39	75.59
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	85.33		

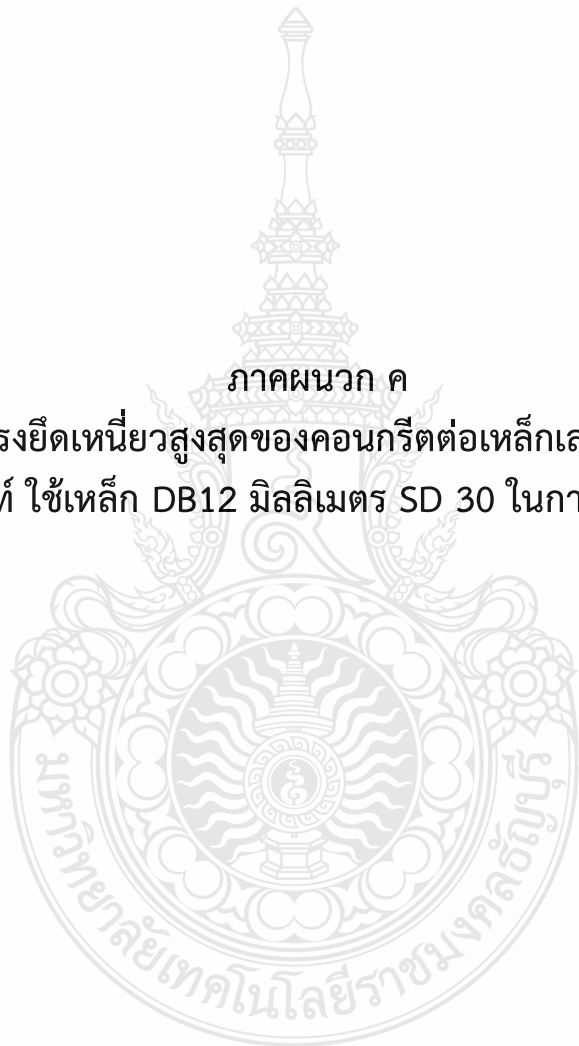
ตารางผนวกที่ ข10 แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8551	8300	8752
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	113.41	110.08	116.08
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	113.19		



ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมแบบที่ใช้มอร์ตาร์  
เกร้าท์ ใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ



**ตารางผนวกที่ ค1** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 1 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	1	1	1
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	4074	2054	3917
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	90.10	45.42	86.62
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	74.05		

**ตารางผนวกที่ ค2** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 3 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	3	3	3
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	5219	5275	4948
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	115.42	116.66	109.43
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	113.83		

**ตารางผนวกที่ ค3** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 7 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	7	7	7
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	5541	5412	5499
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	122.54	119.69	121.61
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	121.28		

**ตารางผนวกที่ ค4** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 14 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	5502	5904	5656
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	121.68	130.57	125.08
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	125.78		



**ตารางผนวกที่ ค5** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 28 วัน ของแบบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	12	12	12
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	6959	7012	7112
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	153.83	155	157.21
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	155.35		

**ตารางผนวกที่ ค6** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 1 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	1	1	1
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	3153	5058	2496
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	41.83	67.11	33.12
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	47.35		

**ตารางผนวกที่ ค7** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 3 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	3	3	3
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	3132	4361	3987
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	41.56	57.86	52.90
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	50.77		

**ตารางผนวกที่ ค8** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 7 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	7	7	7
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	3493	4948	4439
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	46.35	65.65	58.90
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	56.97		

**ตารางผนวกที่ ค9** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 14 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	6633	5100	5499
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	88.61	67.67	72.96
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	76.22		

**ตารางผนวกที่ ค10** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 28 วัน ของแบบรูปทรงกระบอก ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	20	20	20
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	5690	5722	5788
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	75.47	75.89	76.77
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	76.04		



ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริมโดยให้ความเค้น  
ดัดแก่คาน ขนาด 10×10×60 เซนติเมตร ใช้เหล็ก DB12 มิลลิเมตร SD 30 ใน  
การทดสอบ

**ตารางผนวกที่ ง1** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 1 วัน ของแบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	1	1	1
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8542	8165	8682
แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.)	8463		
โมเมนต์ดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.-ซม.)	105788		

**ตารางผนวกที่ ง2** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 3 วัน ของแบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	3	3	3
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8314	8777	8599
แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.)	8563		
โมเมนต์ดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.-ซม.)	107038		

**ตารางผนวกที่ 3** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 7 วัน ของแบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	7	7	7
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8164	8593	8470
แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.)	8409		
โมเมนต์ดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.-ซม.)	105113		

**ตารางผนวกที่ 4** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 14 วัน ของแบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8365	8437	8752
แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.)	8518		
โมเมนต์ดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.-ซม.)	106475		

ตารางผนวกที่ 5 แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 28 วัน ของแบบรูปคาน ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

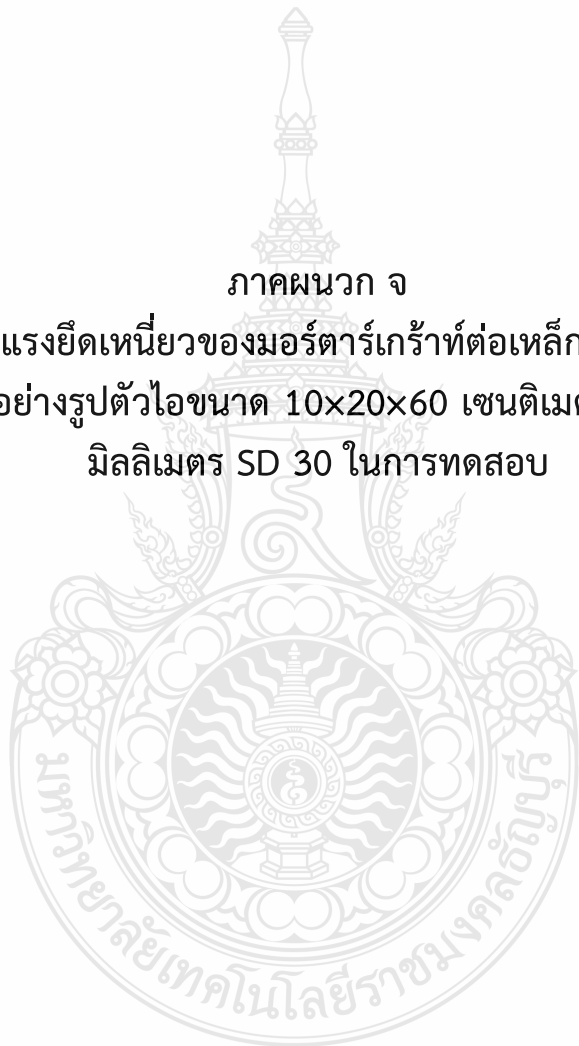
ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	28	28	28
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8512	8524	8707
แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.)	8581		
โมเมนต์ดึงสูงสุดเฉลี่ย (กก.-ซม.)	107263		





ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าที่ต่อเหล็กเสริมโดยให้แรงดึง  
โดยตรงในตัวอย่างรูปตัวไอขนาด 10×20×60 เซนติเมตร ใช้เหล็ก DB12  
มิลลิเมตร SD 30 ในการทดสอบ



**ตารางผนวกที่ จ1** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 1 วัน ของแบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	1	1	1
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	205	205	205
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8477	8864	8349
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	149.91	156.75	147.64
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	151.43		

**ตารางผนวกที่ จ2** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 3 วัน ของแบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	3	3	3
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8714	8182	8771
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	154.20	144.69	155.11
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	151.33		

**ตารางผนวกที่ จ3** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 7 วัน ของแบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	7	7	7
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	300	300	300
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8428	8857	8866
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	149.04	156.63	156.79
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	154.15		

**ตารางผนวกที่ จ4** แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 14 วัน ของแบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 60 เซนติเมตร

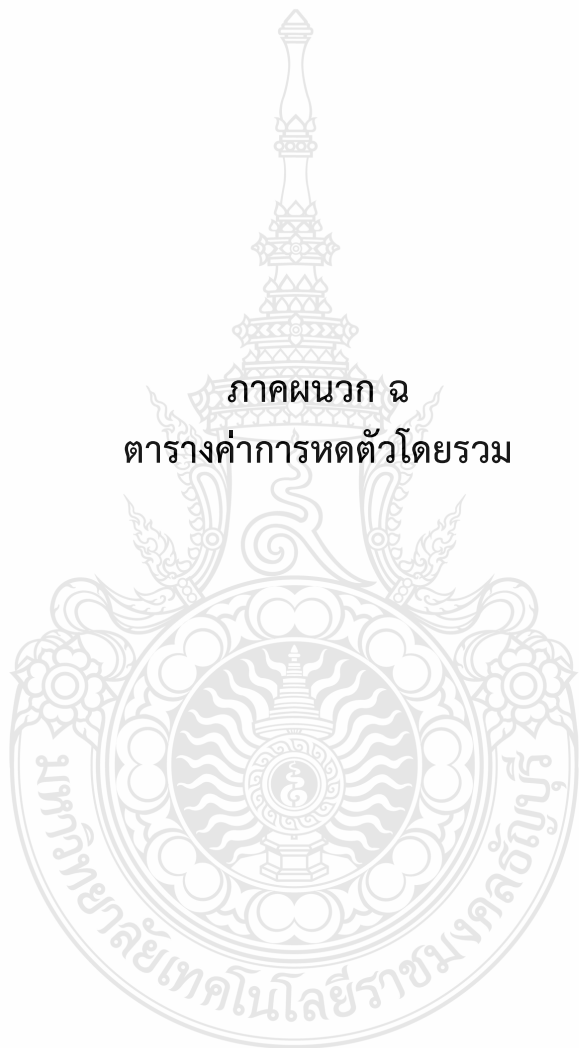
ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8211	8480	8438
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	145.20	149.96	149.22
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	148.13		

ตารางผนวกที่ จ5 แสดงข้อมูลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของมอร์ตาร์เกร้าท์ต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ที่คอนกรีต อายุ 28 วัน ของแบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 60 เซนติเมตร

ตัวอย่างการทดสอบ	1	2	3
อายุของคอนกรีต (วัน)	28	28	28
อายุของมอร์ตาร์เกร้าท์	14	14	14
ระยะฝังเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	30	30	30
กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	390	390	390
เหล็กมาตรฐาน SD 30 (กก./ตร.ซม.)	3000	3000	3000
แรงดึงสูงสุด (กก.)	8444	8520	8482
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (กก./ตร.ซม.)	149.32	150.67	150
แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	150		



ภาคผนวก ฉ  
ตารางค่าการหดตัวโดยรวม



ตารางผนวกที่ ๑1 ค่าการหดตัวโดยรวม

บ่มแห้ง

ที่	สัญลักษณ์	อายุการบ่มคอนกรีต (วัน) ของร้อยละการหดตัว								
		1	3	5	7	14	21	28	60	90
1	C1	3.439	3.503	3.529	3.571	3.625	3.636	3.647	3.683	3.685
2	5C1-F-0.30	3.305	3.340	3.369	3.432	3.473	3.483	3.495	3.583	3.615





ภาคผนวก ช  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



HOME | บทความที่ส่งตรวจแล้ว | 5/5 25 (2020) | บทความที่ส่งตรวจการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 พ.ศ. 2563 | วิศวกรรมโครงสร้าง

**การใช้ตะกอนประปา ในมอร์ตาร์เกร้าหรือรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป**

ละนิน เพรชลาธร  
 วิศวกรรมโยธา มจร.สุโขทัย

จุดหลด ส่งปกาคัด

คำสำคัญ: ตะกอนประปา เกร้า รอยต่อผิวทาง และยึดเหนี่ยว

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาตะกอนประปาใช้ในงานเกร้าหรือรอยต่อของผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป โดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาว่าแรงและความทนทานในการงาน ตะกอนประปาใช้ในงานเกร้าหรือรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป การศึกษาว่าสิ่งของเหลือคละของประปาที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดย ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และ 10 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



PDF

เผยแพร่แล้ว  
 2020-07-09

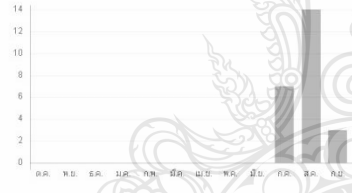
ตัวแปรที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกอนประปาในสัดส่วนต่าง ๆ ตามที่ออกแบบทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตที่ ออกแบบไว้ด้วย วิธีการเททำ สังกัดทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ด้วยวิธีการเททำ ดัง โดยการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวที่งาน เมาลวด์ดำให้ทำ สังกัดที่ออกมาใช้งาน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปาในส่วนร้อยละ 5 ของนี้ วิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็น การทดสอบกำลังอัด แต่เมื่อใช้สูตรส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 จะพบว่ากำลังอัด เนื่องจากตะกอน ประปามีการดูดซึมน้ำสูง ซึ่งจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าตะกอนประปาสามารถ มาใช้ขึ้นวัสดุ ผลงานในการพัฒนาการทาง รอยต่อคอนกรีตในรูปประติภาพและเป็นกรลอบรับงานปูนซีเมนต์ที่วิธีการหนึ่ง

HOW TO CITE

เพชลาธร, ละนิน และ สังกัด, 2020. การใช้ตะกอนประปา ในมอร์ตาร์เกร้าหรือรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*. 25 (พ.ศ. 2020). STR41.

More Citation Formats

จำนวนการดาวน์โหลด



ณีน

ปีที่ 25 (2020) : บทความประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 พ.ศ. 2563

สาขาของบทความ

วิศวกรรมโครงสร้าง

รายการอ้างอิง

- [1] การประเมินผลแรง, เพิ่มคุณค่าให้กับตะกอนผลิตจากการผลิตประปา, งานประชุมสัมมนา, 2548
- [2] ดงกมล สุริยดิษฐ์, กานันต์ วิจิตรพันธ์ และ วรชนะ เจริญสำเร็จ, การประยุกต์ใช้

รายการอ้างอิง

- [1] การประเมินผลแรง, เพิ่มคุณค่าให้กับตะกอนผลิตจากการผลิตประปา, งานประชุมสัมมนา, 2548
- [2] ดงกมล สุริยดิษฐ์, กานันต์ วิจิตรพันธ์ และ วรชนะ เจริญสำเร็จ, การประยุกต์ใช้ตะกอนจากประปา, สำนักก่อสร้างถนนที่อุบลราชธานี, กรมโยธาธิการและผังเมืองอุบลราชธานี, 2547
- [3] ชิตพรพรโต (2555). วิทยาการปฐมนิเทศศาสตร์ทางธรณีวิทยาและธรณีวิทยาจาก การผลิตประปา. และวิศวกรรมศาสตร์. 2543.
- [4] สันติภาพ, นายวิเชย ชูกลิ่น, นายสุวิชัย ละนิน และ นพ.นพ.พ.ศ. กานันต์ (2555). การนำตะกอนจากประปาผลิตน้ำประปาไปใช้ผสมปูนซีเมนต์ (การทดลองที่กำลังศึกษาอยู่) สำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2555.
- [5] สิงห์พร หนูเชื้อ และ จุฑาล สังปกาดี, ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คอนกรีตสำเร็จรูป และ การทดสอบคอนกรีต, การประชุมวิชาการของวิศวกรรมโยธา ครั้งที่ 14, ประจวบคีรีขันธ์, 6 - 8 มีนาคม 2562
- [6] Manual for Jointed Precast Concrete Pavement, 3rd edition, (2018), National Precast Concrete Association
- [7] Shiraz, Tayabji, Dan, Ye, and Neera, Buch. (2013). Precast concrete pavement systems are used in highway corridors with high traffic volume and where lane closures are problematic, PCI Journal, Winter, 2013, pp.112-128
- [8] นายวิเชย หนูเชื้อ, นายศรายุทธ เข็มเทียน, นายประชัย ขุทธิพันธ์ และ นายสุวิดิษฐ์ (2556). การนำตะกอนจากประปาผลิตน้ำประปาไปใช้ผสมปูนซีเมนต์คอนกรีตกำลังสูงสำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2556.

ส่งบทความ

ภาษา

English  
 ภาษาไทย

ข้อมูล

สำหรับผู้อ่าน  
 สำหรับผู้แต่ง  
 สำหรับบรรณาธิการ

บทความอื่น

- สาขาวิชา
- วิศวกรรมโครงสร้าง
- วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และโครงสร้าง
- วิศวกรรมโยธา
- วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
- วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
- วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน
- วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
- วิศวกรรมและงานโยธาการป้องกันประเทศ
- วิศวกรรมโครงสร้าง
- วิศวกรรมโยธา
- งานวิจัยและงานโยธาการป้องกันประเทศ
- พัฒนาเทคโนโลยี

คำแนะนำการใช้ระบบ

- สำหรับผู้แต่ง- การลงทะเบียน
- สำหรับผู้แต่ง- การส่งผลงาน
- สำหรับผู้ประเมิน

ผู้เยี่ยมชม

Visitors

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

จำนวนผู้เยี่ยมชมเว็บไซต์

Visitors

TH	17,484	IE	66
US	645	CN	36
JP	439	RU	27
KR	402	PH	12
LA	69	GB	11

Pageviews: 55,495

เว็บไซต์: FLAG COUNTER

เข้าชม: 12 พ.ค. 2562

NCCE25 FANPAGE

Ncce25

Like Page

Ncce25 about 2 months ago

พบกับการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26 ในปี 2564 โดยเจ้าภาพคือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังครับ

## การใช้ตะกอนประปา ในมอร์ตาร์เกร้าที่รอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป Use of Water Supply Treatment sludge in Mortar Grout in joint of Precast concrete pavement Grouting

ตะวัน เพชรอาวุธ<sup>1\*</sup> และ ผศ.ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล-ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

\*Corresponding author; E-mail address: [tawan\\_p@mail.mutt.ac.th](mailto:tawan_p@mail.mutt.ac.th)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของการใช้ตะกอนน้ำประปาจากโรงงานประปาบางเขนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในงานมอร์ตาร์เกร้าที่รอยต่อของผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป โดยการใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อศึกษาแรงยึดเหนี่ยว แรงดัด และ แรงดึงโดยตรง ขนาดตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 15x15x15 เซนติเมตร ทรงกระบอก ๑15 สูง 30 เซนติเมตร คาน 10x10x60 เซนติเมตร และ รูปตัวไอ พบว่าคุณสมบัติของตะกอนประปามีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทราย แต่มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าทราย ตะกอนประปามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์เกร้าที่รอยต่อ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ให้กำลังอัดสูงสุด การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวมอร์ตาร์เกร้าที่ในช่วงอายุต้นมีค่าสูงกว่าฝั่งเหล็กขนะหล่อ แต่เมื่ออายุ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าฝั่งเหล็กขนะหล่อ สำหรับการทดสอบแรงดึงโดยตรงพบว่าอายุไม่ส่งผลต่อการรับแรงดึง

**คำสำคัญ :** ตะกอนประปา, เกร้า, รอยต่อผิวทาง, แรงยึดเหนี่ยว

### ABSTRACT

This research aims to study the effects of using water supply treatment sludge from the bangkhen water supply treatment plant was used to partially replace in Portland cement type I by weight for the joint of Precast concrete pavement mortar grouting due to bonding strength, bending and direct tension. The tested of concrete cube 15x15x15 cm., cylinder 15x30, beam 10x10x60 and I-shape were determined at age of 1, 3, 7 and 28 days. The results showed that the specific gravity of water supply excess sludge was lower than sand but the absorption was

higher than sand. The compressive strength of water supply treatment sludge to replace Portland cement at the rate of 5 percent with water cement ratio as 0.35 was highest strength of mortar grouting. Bonding strength of mortar grout was higher than place steel bar while casting concrete at early ages. At the age of 28 day, bonding strength of mortar grout was lower than place steel bar while casting concrete. The direction tension was not effect by the age of sample.

**Keyword :** water supply treatment sludge, grouting, joint of pavement, bonding strength

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณตะกอนน้ำประปาที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำประปา ยังคงเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปา จากข้อมูลของการประปานครหลวงบางเขน พบว่า มีตะกอนดินทิ้งประมาณ 100 ตันต่อวัน [1] ซึ่งการนำตะกอนประปาไปใช้ให้เกิดประโยชน์ยังมีในปริมาณที่น้อย [2, 3] โดยพบว่าการใช้แทนที่คอนกรีตในปริมาณร้อยละ 5 ของวัสดุประสานจะให้ค่ากำลังอัดช่วงอายุต้นมีค่าดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว [4] ถ้าสามารถนำมาตะกอนประปามาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ก็จะ เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาให้กับโรงงานผลิตน้ำประปาได้ โดยวิธีที่จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีการใช้วัสดุในปริมาณที่มาก ทำให้มีความน่าจะเป็นที่จะสามารถนำตะกอนน้ำประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์ซึ่งจะเป็นการลดปัญหาในการทิ้งและลดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายให้กับโรงงานผลิตน้ำประปาได้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดมลภาวะทางอากาศได้จากการที่ใช้ตะกอนน้ำประปามาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ [5]

จากเทคโนโลยีการก่อสร้างที่มีการใช้ระบบการก่อสร้างสำเร็จรูปมากขึ้น เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนของแรงงานและ

ต้นทุนของวัสดุก่อสร้างที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สามารถที่จะก่อสร้างได้เร็วและลดการใช้แรงงานลง ซึ่งจากที่กล่าวมานอกจากการก่อสร้างอาคารด้วยระบบสำเร็จรูปแล้ว ในหลาย ๆ ประเทศเริ่มมีการใช้ผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปมากขึ้น ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวทำให้เห็นว่าการใช้ผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปในประเทศจะมีการใช้มากขึ้น จากแนวโน้มดังกล่าวจะเห็นว่าผิวทางสำเร็จรูปจะเป็นวัสดุที่จะถูกใช้มากขึ้นในอนาคต [6, 7] จากข้อดีของผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปที่สามารถควบคุมคุณภาพได้ ทำงานได้เร็ว ลดปัญหาจากการทำงานต่าง ๆ ลง โดยรอยต่อของแผ่นผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูปจะต้องใช้วัสดุเกร้าท์สำหรับรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีต เช่น อีพอกซี (Epoxy) แต่เนื่องจากอีพอกซีมีราคาค่อนข้างแพง การนำวัสดุอื่นมาแทนที่ เพื่อประหยัดทั้งราคาและมีคุณภาพใช้งานได้อีกทั้งยังสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะเป็นการนำสิ่งที่ไม่มียังมีค่า มาทำให้เกิดมูลค่าได้อีกทั้งยังเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทางสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำตะกอนประปามาใช้ในซีเมนต์เกร้าท์ รอยต่อและรองพื้นของถนนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Pavement) โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและทำให้วัสดุมีราคาที่ไม่สูงเกินไป

## 2. วัตถุประสงค์

2.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของตะกอนประปาจากระบบการผลิตน้ำประปา

2.2.2 เพื่อศึกษาการใช้ตะกอนประปา แทนที่ในปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเกร้าท์ในงานรอยต่อผิวทางคอนกรีต

## 3. วิธีการทดสอบ

ในการศึกษานี้ ตะกอนที่ได้จากระบบผลิตน้ำประปา ของโรงผลิตน้ำประปา ตั้งอยู่ที่ 400 ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร โดยเก็บตะกอนจากลานทิ้งตะกอนเพื่อนำมาศึกษาหาคุณสมบัติของตะกอนประปา เช่น หาความถ่วงจำเพาะ ทำการทดสอบหาส่วนผสมวัสดุเกร้าท์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยแทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 14 วัน หาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้สำหรับการเป็นวัสดุเกร้าท์ สำหรับรอยต่อผิวทางคอนกรีต เมื่อได้ส่วนผสมแล้ว จะนำมาใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กกับคอนกรีต โดยใช้การเจาะเสียบเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้โดยใช้วัสดุเกร้าท์ และทำการทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 1 ตะกอนประปาผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

### 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมสำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป นั้นมีวิธีการทดสอบต่างๆ มีรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 การทดสอบหาคุณสมบัติของมวลรวม โดยทำการหาความถ่วงจำเพาะมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ และหน่วยน้ำหนัก

3.1.2 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัว

### 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์เกร้าท์

สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่ใช้ในการทดสอบใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุเพื่อทดสอบกำลังอัด อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 1.375 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ และมีการใช้สารลดน้ำ เพื่อให้มีความสามารถในการทำงานได้และค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นสำหรับขีดเขยักำลังที่หายไปจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง ซึ่งมีรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ (กก./ม. <sup>3</sup> )				สารผสมเพิ่ม (ร้อยละ)
	ซีเมนต์	ทราย	น้ำ	ตะกอนประปา	
5C1-F-0.35	948.5	1375	350	49.93	1.50
5C1-F-0.42	948.5	1375	420	49.93	1.50
5C1-F-0.45	948.5	1375	455	49.93	1.50

หมายเหตุ : ใช้สารลดปริมาณร้อยละ 1.5 ของปริมาณน้ำหนักวัสดุประสาน

C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

F หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F



5C1 , หมายถึง ร้อยละของตะกอนประปาที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ  
0.35, 0.42 และ 0.45 หมายถึงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน  
การอ่านสัญลักษณ์

5C1-F-0.35 หมายถึง ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกอนประปาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตควบคุม

ทดสอบแรงดัดของคานคอนกรีตควบคุมใช้สัดส่วนของคอนกรีตใช้สัดส่วน ปูนซีเมนต์ : หิน เท่ากับ 370 : 856 : 1028 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 โดยใช้ขนาดตัวอย่าง 10x10x60 เซนติเมตรที่อายุ 28 วัน ทดสอบแรงดัดของคอนกรีตควบคุมรูปตัวไอขนาด 10x20x60 เซนติเมตรที่อายุ 28 วัน ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก ๑15 สูง 30 เซนติเมตรที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตควบคุมทรงลูกบาศก์ 15x15x15 เซนติเมตรที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตควบคุม เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่เจาะใส่เหล็กแล้วใช้วัสดุเกร้าที่ที่แทนที่ด้วยตะกอนประปาเป็นตัวเชื่อมประสาน

### 3.4 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเกร้าที่ที่แทนที่ด้วยตะกอนประปา

3.4.1 ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับวัสดุเกร้าที่โดยฝังเหล็กข้ออ้อย 12 มิลลิเมตรลึก 20 เซนติเมตรในตัวอย่างรูปทรงกระบอกทรงกระบอก ๑15 สูง 30 เซนติเมตร รุเจาะใส่วัสดุเกร้าที่ ขนาด 16 มิลลิเมตร ทดสอบแรงดัดของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยใช้วัสดุเกร้าที่ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน

3.4.2 ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับวัสดุเกร้าที่ โดยฝังเหล็กข้ออ้อย 12 มิลลิเมตร ลึก 12 เซนติเมตรในตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร รุเจาะใส่วัสดุเกร้าที่ ขนาด 16 มิลลิเมตร ทดสอบแรงดัดของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยใช้วัสดุเกร้าที่ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 2 ทรงกระบอก ๑15 สูง 30 เซนติเมตร



รูปที่ 3 ทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร

3.4.3 ทดสอบโดยวิธีหาความเค้นดัดของตัวอย่างคานขนาด 10x10x60 เซนติเมตร โดยการฝังเหล็กข้ออ้อย 12 มิลลิเมตรยาว 30 เซนติเมตร โดยเหล็กปลายด้านหนึ่งจะหล่อฝังไปกับตัวอย่างตอนหล่อคอนกรีตยาว 15 เซนติเมตร อีกด้านหนึ่งเจาะตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้สำหรับการใช้วัสดุเกร้าที่ลึก 15 เซนติเมตร โดยรุเจาะใส่วัสดุเกร้าที่มี ขนาด 16 มิลลิเมตร ทดสอบโดยให้แรงดัดที่อายุวัสดุเกร้าที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4 แบบ ขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร



รูปที่ 7 ตัวอย่างรูปตัวไอขนาด 10 x 20 x 60 เซนติเมตร



รูปที่ 5 ตัวอย่างคานขนาด 10 x 10 x 60 เซนติเมตร

#### 4. ผลการทดสอบ

##### 4.1 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ

จากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุได้ผลการทดสอบในตารางที่ 2 จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอนน้ำประปาเมื่อเทียบกับทรายและหินจะพบว่ามีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทรายและหินเล็กน้อยเมื่อทำการทดสอบหน่วยน้ำหนักจะพบว่าตะกอนประปามีค่าน้ำหนักน้อยกว่าทรายหิน เนื่องจากตะกอนน้ำประปามีขนาดละเอียดกว่าทรายและมีลักษณะเป็นผงจึงมีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าทรายและหิน

##### ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐานต่าง ๆ

รายการ	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำร้อยละ	หน่วยน้ำหนัก กก./ม <sup>3</sup> .
ทราย	2.64	0.427	1.706
หิน	2.69	0.677	1.54
ตะกอนน้ำประปา	2.46	8.495	0.998

##### 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3 พบว่า เมื่อแทนที่ด้วยตะกอนประปามีผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นสั้นกว่า C1 เนื่องจากตะกอนประปาที่แทนที่ไปทำหน้าที่ดูดซึมน้ำในส่วนผสมทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมให้น้อยลง

3.4.4 ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับวัสดุเกร้าท์ โดยทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัว I โดยใช้เหล็กข้ออ้อย 12 มิลลิเมตรยาว 30 เซนติเมตร ในตัวอย่างรูปตัวไอขนาด 10x20x30 เซนติเมตร ทำการหล่อตัวอย่างโดยฝังเหล็กข้างหนึ่ง 15 เซนติเมตร เตรียมไว้ส่วนอีกด้านหนึ่งทำการเจาะเพื่อใช้วัสดุเกร้าท์เพื่อฝังเหล็กยาว 15 เซนติเมตร มีรูเจาะขนาด 16 มิลลิเมตร เมื่อประกอบกันแล้วจะได้เป็นตัวอย่างรูปตัว I สำหรับทดสอบแรงดึงโดยตรงที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 6 แบบรูปตัวไอ ขนาด 20 x 10 x 30 เซนติเมตร

ทำให้การก่อตัวระยะต้นมีค่าน้อย แต่ระยะสุดท้ายของ 5C1-F ใช้เวลามากกว่าของ C1 เพราะตะกอนประปาที่แทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมน้อยลง การทำปฏิกิริยาน้อยลงระยะเวลาการก่อตัวระยะสุดท้ายจึงช้ากว่าปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำและระยะเวลาการก่อตัว

สัญลักษณ์	ค่าความชื้น เหลว (ร้อยละ)	ระยะเวลาก่อ เริ่มต้น (นาท.)	ระยะเวลาก่อตัว สุดท้าย (นาท.)
C1	27	95	165
5C1-F	28	63	195

#### 4.3 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์การทดสอบกำลังอัด

จากการทดสอบการรับกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์เกร้าท์ลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เกร้าท์

สัญลักษณ์	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.) ที่อายุ 1, 3, 7, 14 วัน			
	1	3	7	14
5C1-F-0.35	143	163	255	347
5C1-F-0.42	51	133	204	275
5C1-F-0.45	82	153	184	214

จากการทดลองพบว่า 5C1-F-0.35 เป็นส่วนผสมที่ดีที่สุดเนื่องจากใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยที่สุด หรือมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.37 เมื่อรวมน้ำที่อยู่ในสารลดน้ำ เพื่อให้ได้ค่ากำลังที่สูงในช่วงอายุต้นจึงต้องใช้สารลดน้ำและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อย โดยในช่วงอายุ 7 ถึง 14 วัน จะมีการพัฒนากำลังอัดที่เร็วกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ แต่เมื่ออายุมากกว่า 14 วันไปแล้ว การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากเหมือนช่วงอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน

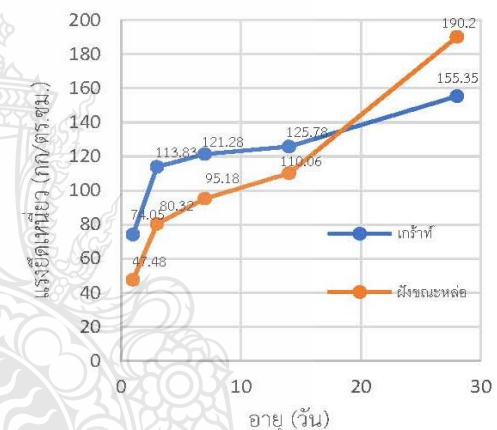
#### 4.4 ผลการทดสอบกำลังของคอนกรีตควมคุมที่ 28 วัน

ผลการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 10x10x60 เซนติเมตรมีค่าเท่ากับ 5.33 กก./ตร.ซม. แรงดึงของตัวอย่างรูปตัวไอขนาด 10x20x60 เซนติเมตรมีค่าเท่ากับ 18.78 กก./ตร.ซม. แรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตรมีค่าเท่ากับ 365.55 กก./ตร.ซม.

ตารางที่ 5 โมเมนต์ดัดคานคอนกรีต ขนาด 10x10x60 เซนติเมตร เเจาะฝังเหล็กใช้วัสดุเกร้าท์ข้างหนึ่ง อีกข้างหล่อฝังในคอนกรีต

อายุ (วัน)	ค่าโมเมนต์ดัด (กก.-ซม.)
1	105787.50
3	107041.67
7	105112.50
14	106475.00
28	107254.17

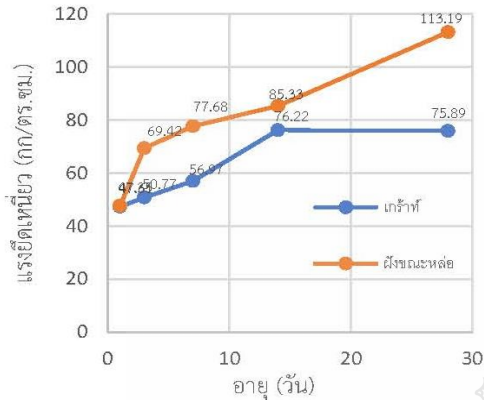
จากผลการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างคานคอนกรีต ขนาด 10x10x60 เซนติเมตร เเจาะฝังเหล็กเกร้าท์ข้างหนึ่ง 15 เซนติเมตร ฝังในคอนกรีตข้างหนึ่ง 15 เซนติเมตรในตารางที่ 5 พบว่าค่าแรงดัดที่อายุ 1 จนถึง 28 วัน มีค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเทียบกับใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ของลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร

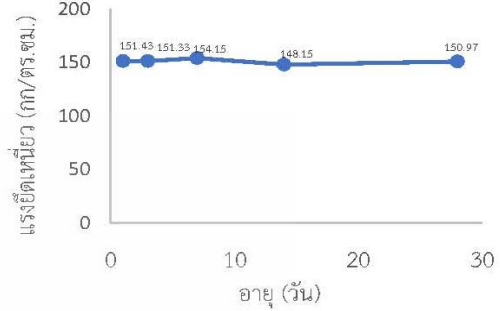
จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นได้ว่าตัวอย่างการทดสอบตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. แบบเจาะที่หลังแล้วใช้วัสดุมอร์ตาร์เกร้าท์ยึดเหล็กจะมีแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมคอนกรีต (bond strength) มากกว่าแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตแบบธรรมดาในช่วงอายุเริ่มต้นจนถึงอายุ 14 วัน แต่เมื่ออายุ 28 วัน จะพบว่าการใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตแบบธรรมดามีค่าสูงกว่า ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับของ นายธวัชชัย และคณะ [8] ที่พบว่าการใช้ตะกอนประปาจะให้ค่ากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตปกติ แต่เมื่ออายุมากขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าจะเป็นจากการหดตัวของมอร์ตาร์เกร้าท์ที่แทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์ทำให้การแรงยึดเหนี่ยวลดลง ซึ่งจากงานวิจัยของ ยิ่งพงษ์ และ จตุพล [5] แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่แทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์จะมีค่าการหดตัวมากกว่าคอนกรีตควบคุม





รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตเทียบกับเหล็กที่ใช้วัสดุ mortard 15x30 เซนติเมตร

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นได้ว่าตัวอย่างการทดสอบตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15 x 30 ซม. แบบเจาะที่หลังแล้วใช้วัสดุ mortard 15x30 เซนติเมตรจับยึดเหล็กจะมีแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมคอนกรีต (bond strength) มีค่าน้อยกว่าแบบใส่เหล็กตอนหล่อคอนกรีตแบบธรรมดา จะพบว่าค่าแตกต่างจากการฝังเหล็กในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 15x15x15 อาจจะเป็นเพราะการเจาะฝังเหล็กที่ลึกกว่าทำให้การใช้วัสดุ mortard 15x30 เซนติเมตรทำได้ยากกว่าจึงส่งผลให้ mortard 15x30 เซนติเมตรจับยึดได้ไม่ดี และเมื่ออายุ 28 วัน ค่าแนวโน้มของกำลังอัดลดลงมากขึ้นเมื่อเทียบกับการฝังคอนกรีตฝังขณะหล่อ เมื่อนำผลที่ได้ไปเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเหมือนกับผลของ นายธวัชชัย และคณะ [8] ที่พบว่าการใช้ตะกอนประปาจะให้ค่ากำลังอัดเมื่ออายุมากขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากตะกอนประปามีความแข็งแรงไม่เท่ากับทราย ทำให้กำลังที่อายุ 28 วัน จึงมีค่าต่ำกว่า เพราะในช่วงอายุ 1 วัน กำลังของคอนกรีตยังไม่สูงมาก ความแข็งแรงของวัสดุผสมยังไม่ส่งผลต่อกำลังอัดมากนัก แต่เมื่ออายุมากขึ้น กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นความแข็งแรงรวมจะส่งผลต่อกำลังอัดมากกว่า และอาจจะไม่ผลมาจากการหดตัวของ mortard 15x30 เซนติเมตรที่แทนที่ตะกอนประปาในปูนซีเมนต์ทำให้การแรงยึดเหนี่ยวลดลง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้วัสดุ mortard 10x20x60 เซนติเมตร

เมื่อทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัว I ปลายเหล็กข้างหนึ่งฝังขณะหล่อ และ อีกข้างหนึ่งเจาะฝังด้วย mortard 10x20x60 เซนติเมตร พบว่าเมื่ออายุมากขึ้นค่าแรงดึงที่ทดสอบได้ไม่มีค่าแตกต่างกัน แสดงว่าอายุไม่ส่งผลต่อการรับแรงดึง เนื่องจากการวิบัติจะเกิดขึ้นที่คอนกรีตที่รับแรงดึงได้ไม่มากและไม่เกิดการวิบัติที่แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กฝัง

### 5. บทสรุป

จากการทดลองพบว่าสามารถนำตะกอนประปามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม mortard 15x30 เซนติเมตร โดยใช้น้ำหนักปูนซีเมนต์ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 โดยคุณสมบัติของตะกอนประปามีค่าความกว้างจำเพาะน้อยกว่าทราย แต่มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าทราย แรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตกับเหล็กเสริมในช่วงอายุต้นจะมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่ออายุ 28 วัน จะมีค่าน้อยกว่าเป็นผลมาจากการหดตัวของ mortard 15x30 เซนติเมตร และการทดสอบแรงดึงโดยตรงพบว่าอายุไม่มีผลต่อการรับแรงดึงไม่ส่งผลต่อการรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นักศึกษา เจ้าหน้าที่ และภาคโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มีส่วนช่วยในงานวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน (2543). เอกสารเรื่องการกำจัดตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาบางเขนในปัจจุบัน. โรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปาานครหลวง.



- [2] ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสันต์ วิจิตรมรพันธ์ และ วรธนะ เรืองสำเร็จ (2547). การประยุกต์ใช้ตะกอนจากน้ำประปา. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- [3] จิตรกรวงศ์ชาวลิต. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา (2543). วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] วศิน ดินกาหมื่น, นายวิชณ ชุกกลิ่น, นายสุวิชัย ละไขโยไซ้ และ นายอนุพงศ์ ผาตะพงษ์, (2555). การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงที่อายุต้น สำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป, ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [5] ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ และ จตุพล ตั้งปกาศิต (2562) ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัด แรงดึงโดยตรง และ การหดตัวของคอนกรีต, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 14, ประจวบคีรีขันธ์, 6 - 8 มีนาคม 2562.
- [6] Manual for Jointed Precast Concrete Pavemen, 3<sup>rd</sup> edition, (2018). National Precast Concrete Association
- [7] Shiraz, Tayabji. Dan, Ye. and Neeraj, Buch. (2013). Precast concrete pavement systems are used in highway corridors with high traffic volume and where lane closures are problematic, PCI Journal, Winter, 2013, pp.112-128.
- [8] นายธวัชชัย พลรักษ์, นายศรายุทธ เทียงแท้, นายรณชัย รุกขวิวัฒน์ และ นายฐิติกร แก้วประชา (2556). การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงสำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูป, ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายตะวัน เพชรอาวุธ  
วัน เดือน ปีเกิด 6 มกราคม 2524  
ที่อยู่ 6 ซอย หน้าวัดท่าไคร้ ถนนราชดำเนิน ตำบลในเมือง อำเภอเมือง  
จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000  
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

