

ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทราบด  
และถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดประลัย  
แรงดึงและการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต

EFFECT OF USING WATER SUPPLY EXCESS SLUDGE, GROUND  
SAND AND FLY ASH TO PARTIALLY REPLACED PORTLAND  
CEMENT ON COMPRESSIVE STRENGTH, TENSILE STRENGTH  
AND AUTOGENOUS AND DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE

ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษาที่ 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทราบด  
และถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อ กำลังอัดประลัย  
แรงดึงและการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต

ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษาที่ 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทราบายด์ และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดประลัย แรงดึง และการหดตัวแบบออโตจีนัสและ  
แบบแห้งของคอนกรีต

Effects of Using Water Supply Excess Sludge, Ground Sand and Fly Ash  
to Partially Replace Portland Cement on Compressive Strength, Tensile  
Strength and Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete

ชื่อ - นามสกุล

นายชิงพงษ์ หนูเนื้อ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.


ปีการศึกษา


2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัฐพงษ์ มกระธัช, ปร.ด.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทราบด และถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดประลัย แรงดึง และการหดตัวแบบบอโตจินัสและแบบแห้งของคอนกรีต
ชื่อ-นามสกุล	นายยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ค.
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของการใช้ตะกอนน้ำประปา ทราบด และถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อกำลังอัดต่อกำลังอัดประลัย แรงดึงโดยตรง ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน และทดสอบการหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวแบบบอโตจินัสของคอนกรีต โดยการใช้ตะกอนน้ำประปา ทราบด และถ้ำลอยแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานโดยใช้วัสดุแทนที่ให้มีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ เพื่อลดผลกระทบจากขนาดอนุภาค

ทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของตัวอย่างขนาด 15x15x15 เซนติเมตร และแรงดึงโดยตรง ที่อายุ 7, 28 และ 60 สำหรับการหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวแบบบอโตจินัส ใช้ตัวอย่างขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร

จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตและค่าแรงดึงโดยตรงที่ใช้ตะกอนน้ำประปามีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติทั้งกำลังอัดและค่าแรงดึงโดยตรงของการแทนที่ตะกอนน้ำประปาที่ร้อยละ 20 จะมีค่าน้อยกว่าการแทนที่ที่ร้อยละ 10 เนื่องจากการแทนที่ตะกอนน้ำประปามากขึ้น ส่วนการหดตัวของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ตะกอนประปาที่มากขึ้น

**คำสำคัญ:** กำลังอัด แรงดึง การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบบอโตจินัส ตะกอนประปา

**Thesis Title** Effects of Using Water Supply Excess Sludge, Ground Sand and Fly Ash to Partially Replace Portland Cement on Compressive Strength, Tensile Strength and Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete

**Name-Surname** Mr. Yingpong Noonuea

**Program** Civil Engineering

**Thesis Advisor** Assistant Professor Jatuphon Tangpagasit, Ph.D.

**Academic Year** 2018

## ABSTRACT

The research objectives were to study the effects of using water supply excess sludge, ground sand and fly Ash to partially replace Portland cement type I on the compressive strength and direct tensile test at the age of 7, 28, and 60 days, and on the drying shrinkage and autogenous shrinkage of the concrete. Water supply excess sludge, ground sand and fly Ash were used to replace Portland cement in the ratios of 10 and 20 percent of the binder by using the replacement materials that were the same size as the cement in order to reduce the effects of particle sizes.

The researcher performed a test of compressive strength of the sample size of 15 X 15 X 15 cm and direct tensile at age of 7, 28 and 60 days. Both the drying shrinkage and the autogenous shrinkage were tested by using the sample size of 7.5 x 7.5 x 28.5 cm.

The results revealed that the value of compressive strength of concrete and that of the direct tensile using water supply excess sludge was lower than that of normal concrete in terms of both compressive strength and direct tensile based on the replacement of water supply excess sludge at the rate of 20 percent, which had less value than the replacement of tensile strength at the rate of 10 percent now that the replacement of cement with water supply excess sludge was increased. The more value of drying shrinkage, the more replacement of water supply excess sludge.

**Keywords:** drying shrinkage, autogenous shrinkage, water supply excess sludge, tensile, compressive strength

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำแนะนำ แนวคิด แนวทางในการดำเนินงานวิจัย และวิธีการ แก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ มกระรัช ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการวิทยานิพนธ์ และได้สละเวลามาดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ทั้ง ได้กรุณาให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางจนวิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย โรงผลิตน้ำประปา บางเขน กรุงเทพมหานคร ที่ให้การสนับสนุนตะกอนน้ำประปา และ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ให้การสนับสนุนถ่านหิน เพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จ ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณครอบครัว ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจให้สามารถผ่านพ้นอุปสรรคจนวิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จ รวมถึงผู้ที่ไม่ได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัย ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	12
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการศึกษา.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (Direct Tensile Test).....	15
2.2 การทดสอบหาความต้านทานแรงดึง โดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต ASTM C496-9	15
2.3 การทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต ASTM C78-94.....	17
2.4 การอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect).....	20
2.5 กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (Direct Tensile Test).....	20
2.6 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement I).....	23
2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction).....	23
2.8 การอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect).....	24
2.9 การเปลี่ยนแปลงสภาพของคอนกรีต.....	24
2.10 กลไกการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบยัดรั้ง.....	27
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	36
3.2 รายละเอียดวิธีที่ใช้ในการศึกษา.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
4.1 บทนำ.....	46
4.2 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	46
4.3 คุณสมบัติของเพลส.....	47
4.4 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) .....	48
4.5 ผลทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength).....	49
4.6 ผลการทดสอบค่าแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength).....	51
4.7 ผลการทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength).....	53
4.8 ผลการทดสอบโมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture).....	55
4.9 การหดตัวของออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage).....	57
4.10 การหดตัวของคอนกรีต (Dry Shrinkage).....	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผล.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก ตารางค่ากำลังแรงดึงโดยตรง.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	70



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ปรับสภาพความชื้นของหินและทรายแห้งใน ลบ.ม.....	45
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะ.....	47
ตารางที่ 4.2 ปริมาณที่เหมาะสมและระยะตัว.....	48
ตารางที่ 4.3 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	50
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดัน โดยตรง.....	52
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก.....	54
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ โมดูลัสแตกหัก.....	56



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การทดสอบกำลังดึงด้วยวิธีผ่าซีก (Splitting strength).....	16
รูปที่ 2.2 การวัดขีดของการรับแรงดึงด้วยวิธีผ่าซีก (Splitting strength) .....	17
รูปที่ 2.3 การคอนกรีตตัวอย่างของการทดสอบแรงดึงทางอ้อม โดยวิธี โมดูลัสการแตก ร้าว (Modulus of Rupture).....	19
รูปที่ 2.4 ลักษณะการวัดจากแรงคัดของคอนกรีตตัวอย่างของการทดสอบแรงดึงทาง อ้อมโดยวิธี โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture).....	19
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงตัวอย่างรูป Dog Bone.....	21
รูปที่ 2.5.1 ตัวอย่างรูป Dog Bone ที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง.....	21
รูปที่ 2.6 เครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรงตัวอย่างรูปตัวไอ.....	22
รูปที่ 2.6.1 ตัวอย่างรูปตัวไอที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง.....	22
รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกอนประปา ทรายบด etailoy หิน 3/4 นิ้ว น้ำ และทรายผสมคอนกรีต.....	37
รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการบดวัสดุให้มีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์.....	38
รูปที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้หาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัว.....	38
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความยาวแท่งคอนกรีต.....	40
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต UTM (Universal Testing Machine).....	40
รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับหัวยึด.....	41
รูปที่ 3.6.1 รูปแบบและขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ.....	42
รูปที่ 3.6.2 หัวยึดตัวอย่างคอนกรีต.....	42
รูปที่ 3.6.3 การทดสอบคอนกรีตตัวอย่างกำลังแรงดึงคดโดยตรง (Direct Tensile Strength).....	43
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength).....	43
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture).....	44
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวเพลสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนประปา ทรายบด และetailoy ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก..	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดประลัยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนประปา ทราบด และเกลือลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดย น้ำหนัก.....	50
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง โดยตรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนประปา ทราบด และเกลือลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก.....	52
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีกำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนประปา ทราบด และเกลือลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก.....	54
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีกำลังรับแรงดึงโดยวิธีโมดูลัสแตกหักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนประปา ทราบด และเกลือลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก.....	56
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนิกของคอนกรีต กับอายุของคอนกรีตที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเกลือลอย ทราบดละเอียด และตะกอนน้ำประปา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยวิธีหุ้มพลาสติก.....	58
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต กับอายุของคอนกรีตที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเกลือถ่านหิน ทราบดละเอียด และตะกอนน้ำประปา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยวิธีบ่มในอากาศ.....	59

# บทที่ 1

## บทนำ

ผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทราบด และถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังอัดประลัย แรงดึง และการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาของตะกอนจากระบบการผลิตน้ำประปามีปริมาณมาก โดยโรงงานผลิตน้ำบางเขนของการประปานครหลวงที่มีการผลิตน้ำประปาประมาณวันละ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันมีปริมาณตะกอนที่เกิดจากขบวนการผลิตเท่ากับ 300 ตันแห้งในฤดูแล้ง และ 700 ตันแห้งในฤดูฝนและมีแนวโน้มที่จะมากขึ้นทุกๆ ปี โดยในปัจจุบันยังไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมได้ ซึ่งปริมาณตะกอนดังกล่าวที่มีอยู่และสะสมเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากขึ้นในแต่ละปี ทำให้การประปาต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด โดยการขนไปทิ้งปีละประมาณ 11 ล้านบาทและเพื่อหาวิธีที่จะลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ ทางกรมประปาจึงพยายามหาวิธีที่จะนำตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด เช่น ใช้ถมที่ ใช้เป็นวัสดุในการทำอิฐ และเครื่องปั้นดินเผา ฯลฯ แต่ก็ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ อีกทั้งงานวิจัยยังมีน้อย จึงยังไม่มีมีการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม จากงานศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาการนำวัสดุเหลือจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น การนำถ้ำลอยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตมาใช้เป็นวัสดุปูชโชนาน ซึ่งทำให้การไฟฟ้ามีรายได้จากการขายถ้ำลอยแทนที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปทิ้ง จากแนวคิดดังกล่าวถึงแม้ว่าตะกอนน้ำประปาซึ่งเป็นดินทรายและไม่ได้จัดว่าเป็นวัสดุปูชโชนาน แต่ถ้ามีการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำตะกอนจากระบบการผลิตน้ำประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านใดด้านหนึ่ง ก็จะเป็นการลดค่าใช้จ่ายให้แก่การประปานครหลวงได้ จากงานวิจัยของจตุพล และคณะ [1] พบว่าวัสดุที่มีความละเอียดสูงจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้นจากการที่อนุภาคขนาดเล็กๆ เข้าไปแทรกตัวระหว่างช่องว่างในคอนกรีตทำให้มีความแน่นมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อกำลังอัดที่ดีขึ้น ถึงแม้ว่าวัสดุที่ใช้นั้น ไม่ได้เป็นวัสดุปูชโชนานก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่ดีขึ้นแต่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมและยังพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น คือ 1 ถึง 3 วัน จะพบว่ากำลังจะสูงขึ้นกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้ามีการนำตะกอนน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุที่เข้าไปทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ก็เป็นแนวทางหนึ่งที่จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ จากสถานการณ์ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของที่อยู่อาศัยตามแนวโครงการรถไฟฟ้าและบริเวณชานเมืองแต่จากปัญหา

การขาดแคลนของแรงงาน และต้นทุนของวัสดุก่อสร้างที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากผลกระทบจากราคาพลังงานที่เพิ่มขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ จึงมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้มากขึ้น ซึ่งคอนกรีตสำเร็จรูปก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูปมีอัตราการขยายตัวตามไปด้วยงานคอนกรีตสำเร็จจึงมีบทบาทสำคัญและเป็นทางเลือกหนึ่งในการก่อสร้างที่ให้ความสะดวก ความรวดเร็ว และความแข็งแรงมีคุณภาพ แต่ในระบบการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปจะต้องมีการยกเพื่อที่จะย้ายออกจากแบบหล่อและการขนส่งติดตั้ง จะมีปัญหาในเรื่องของรอยแตกร้าว เนื่องจากแรงดึงและการหดตัวในคอนกรีตในระหว่างการถอดแบบหรือขนย้ายทำให้เกิดรอยร้าวและความเสียหาย ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดแรงดึงในคอนกรีต โดยทั่วไปจะออกแบบให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงได้ก่อนที่จะทำการยกโดยการเพิ่มกำลังของคอนกรีตหรือการเสริมเหล็กเข้าไปปรับแรงดึงที่เกิดขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำคอนกรีตสำเร็จรูป ดังนั้นการใช้ข้อดีของวัสดุที่มีความละเอียดที่สามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงอายุต้น เช่นตะกอนน้ำประปา ก็เป็นการแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาได้ ในการทดสอบแรงดึงของคอนกรีตในปัจจุบันจะทำการทดสอบแรงดึงโดยทางอ้อม ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นจริง แต่การทดสอบแรงดึงโดยตรงยังเป็นวิธีที่มีขั้นตอนมากและควบคุมให้ค่าที่ถูกต้องได้ยากจึงไม่เป็นที่นิยม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการสอบกำลังอัดประลัย กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยทางตรงทางอ้อม และการเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และแบบแห้ง (Dry Shrinkage) และแบบแห้งโดยนำเอาวัสดุที่เหลือใช้ของตะกอนน้ำประปา ทราขบด และเถ้าลอยมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยทำให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ตะกอนน้ำประปา ทราขบด และเถ้าลอยแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ตะกอนน้ำประปา ทราขบด และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงระหว่างทางตรงและทางอ้อม ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และแบบแห้ง (Dry Shrinkage) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอย แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาโดยจะมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

1.3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.1.2 ตะกอนน้ำประปาจากการประปานครหลวงบางเขน ทรายแม่ น้ำบด และถั่วลอถอย จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดคิดเป็นร้อยละ โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และองค์ประกอบทางเคมี

1.3.2 ทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะการก่อตัว โดยแทนที่ในปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.3.3 ทดสอบกำลังอัดประลัย โดยแทนที่ในปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.3.4 ทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยวิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม โดยแทนที่ในปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.3.5 ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และแบบแห้ง (Dry Shrinkage) โดยแทนที่ในปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และถั่วลอถอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.3.6 วิเคราะห์ผลการศึกษา

1.3.7 สรุปผลการศึกษา

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการศึกษา

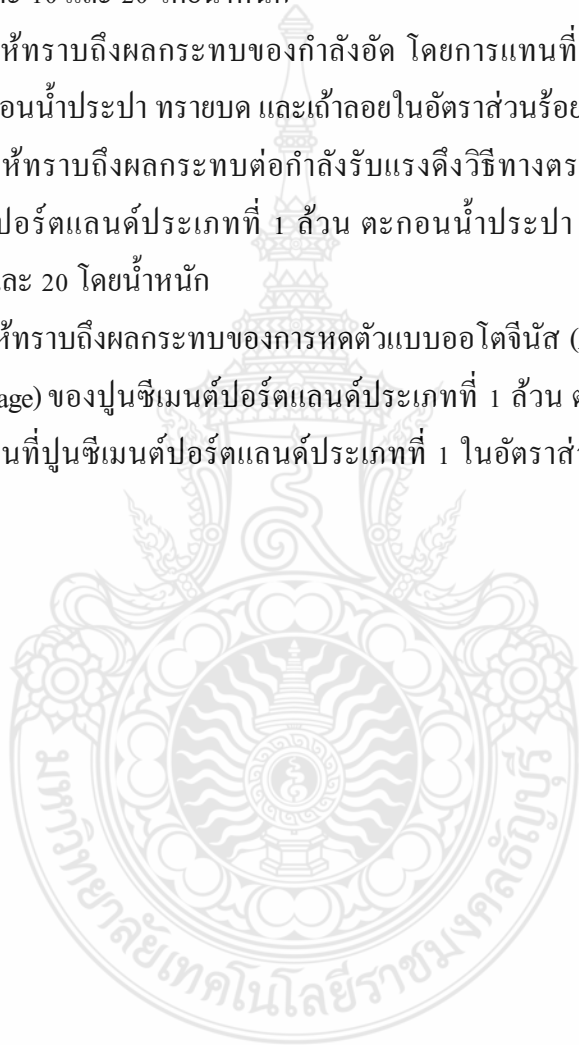
1.4.1 เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้น ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกอน น้ำประปา ทรายบด และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 เพื่อให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาก่อตัว ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และเถ้าลอยที่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.4.3 เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของกำลังอัด โดยการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.4.4 เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบต่อกำลังรับแรงดึงวิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม โดยการ แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และเถ้าลอย ใน อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.4.5 เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และ แบบแห้ง (Dry Shrinkage) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนน้ำประปา ทรายบด และเถ้าลอยที่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดย น้ำหนัก



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาแรงดึงในคอนกรีตโดยทางตรงเทียบกับทางอ้อม โดยการนำเอาตะกอนน้ำประปาจากระบบผลิตน้ำประปาปล่อยจากโรงไฟฟ้า ทราขบมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตที่อายุตามมาตรฐาน สำหรับงานคอนกรีตมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

โดยปกติกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตสามารถระบุได้ 3 ลักษณะกล่าวคือ

- กำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)
- กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength)
- ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture)

#### 2.1 กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต ( $f_t$ ) มีค่าประมาณ  $0.10f'_c$  ซึ่งได้จากการทดสอบตัวอย่าง

#### 2.2 การทดสอบหาความต้านทานแรงดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต ASTM C496-90

ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength) โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าประมาณร้อยละ 7 ถึง 11 ของความต้านทานกำลังรับแรงอัดเท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่นิยามกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต และจะให้เหล็กเสริมรับแรงดึงนี้ไปทั้งหมดในการคำนวณ อย่างไรก็ตามในโครงสร้างบางชนิด เช่น เขื่อน ถังบรรจุน้ำ ท่อหรือฝิวสนามบิน ที่ไม่ต้องการให้คอนกรีตแตกร้าว จำเป็นต้องใช้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมาใช้ในการออกแบบ

เนื่องจากความยากลำบากในการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตให้เหมือนกับการทดสอบวัสดุอื่นๆ เนื่องจากคอนกรีตมีความเปราะ จึงต้องทดสอบกำลังรับแรงดึงคอนกรีตโดยทางอ้อม โดยใช้การทดสอบหาลังรับแรงดึงแยก (Splitting tensile strength) และทดสอบกำลังดัด (Flexural strength) แทนการทดสอบหาลังรับแรงดึง (Tensile strength) โดยตรง



สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกนี้ จะทำการทดสอบโดยนำแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานวางในแนวนอนในเครื่องทดสอบ แล้วกดด้วยแรงสม้ำเสมอโดยผ่านแท่งเหล็ก ถ้าย้ำหนักที่รองรับด้วยไม้รอง จนกระทั่งแท่งคอนกรีตแยกออกจากกันเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน ซึ่งกำลังรับแรงดึงแยกจากการทดสอบด้วยวิธีนี้ จะมีค่าประมาณร้อยละ 8 ถึง 14 ของกำลังรับแรงอัดคอนกรีต แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการทดสอบด้วยกำลังตัดแล้วจะต่ำกว่าเสมอ ซึ่งค่าของกำลังรับแรงดึงแยกคำนวณได้จากสมการ

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.1)$$

โดยที่

T = ความต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีต, N/mm<sup>2</sup>

P = แรงกดสูงสุด, N

L = ความยาวของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก, mm

D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก, mm



รูปที่ 2.1 การทดสอบกำลังดึงด้วยวิธีผ่าซีก (Splitting strength)



รูปที่ 2.2 การวัดค่าการรับแรงดึงด้วยวิธีผ่าซีก (Splitting strength)

### 2.3 การทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต ASTM C78-94

การทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต (Flexural test) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการหาความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ในลักษณะแรงดึงภายใต้การให้น้ำหนักกดตัด แรงดึงที่เกิดจากการดัดจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง (Dimension) ความหยาบของผิววัสดุรวมรวม (Texture) และการจัดวางน้ำหนักที่มากกระทำบนคานคอนกรีตทดสอบ

การหาค่ากำลังดัดของคานคอนกรีต โดยปกติจะหาในรูปของ Modulus of rupture ; R ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$R = Mc/I \quad (2.2)$$

โดยที่

R = Modulus of rupture,  $N/mm^2$

M = ค่าโมเมนต์สูงสุดที่หน้าตัด, N-mm

I = Moment of inertia ของหน้าตัด,  $mm^4$

C = ระยะจาก Neutral Axis ถึงผิวนอกของคาน, cm

จากสมการ สามารถเขียนในรูปของแรงกระทำ (Load; P) กับมิติต่างๆของคานคอนกรีต สำหรับวิธี Third-point loading และคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมได้ คือ

ถ้ารอยร้าวอยู่ภายในส่วนกลางของสามส่วนของช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ (Span length)

$$R = PL/bd^2 \quad (2.3)$$

โดยที่

P = แรงกดสูงสุด (ผลรวมของแรงกดทั้งสอง) ซึ่งดูได้จาก Testing machine, N

L = ช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับ (Spanlength), mm

b = ความกว้างเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่รอยแตกร้าว, mm

d = ความลึกเฉลี่ยของคานคอนกรีตที่รอยแตกร้าว, mm

หมายเหตุ (1) ไม่ได้รวมน้ำหนักของคานคอนกรีตในสมการข้างต้น

(2) ถ้ารอยแตกร้าวอยู่นอกส่วนกลางของสามส่วนของช่วง Span length โดยไม่เกินร้อยละ 5 ของ Span length ให้คำนวณค่า Modulus of rupture ดังสมการ

$$R = 3Pa/bd^2 \quad (2.4)$$

โดยที่

a = ระยะทางเฉลี่ยระหว่างรอยแตกกับจุดรองรับที่ใกล้ที่สุด, มิลลิเมตร

ถ้ารอยแตกร้าวอยู่นอกส่วนกลางของสามส่วนของช่วง Span length มากกว่าร้อยละ 5 ของ Span length ให้ถือว่า ผลการทดสอบนี้ใช้ไม่ได้



รูปที่ 2.3 การคอนกรีตตัวอย่างของการทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการวิบัติจากแรงดัดของคอนกรีตตัวอย่างของการทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture)

## 2.4 การอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect)

การอัดตัวของอนุภาคเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการที่ขนาดของอนุภาคมีผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น โดยที่ค่าการอัดตัวของอนุภาคเกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่าง หรือในช่องอากาศระหว่างอนุภาคที่ใหญ่กว่าที่มีอยู่ในคอนกรีต ซึ่งเป็นการทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นได้ นายจตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการใช้ทรายขนาดละเอียดจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้น ในการที่จะหาค่าการอัดตัวของอนุภาคจะต้องใช้วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการพัฒนากำลังมาใช้เพื่อที่จะได้ค่าการอัดตัวของอนุภาค

จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้วัสดุละเอียดต่อคุณสมบัติในการรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาโดยใช้การทดสอบด้วยวิธีกำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (Direct Tensile Test)

## 2.5 กำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (Direct Tensile Test)

ความต้านทานในด้านรับแรงดึงของคอนกรีตมีต่ำมาก คือประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัดประลัย ถึงแม้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงก็ตาม แต่การทราบค่ากำลังรับแรงดึงนี้จะช่วยการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และการหดตัว

### 2.5.1 วิธีกำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

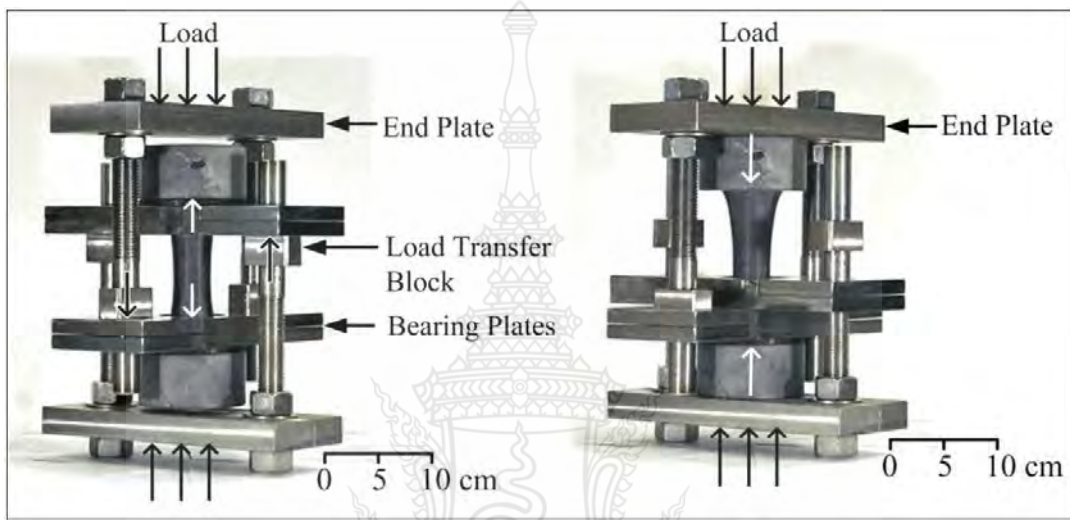
โดยปกติแล้วการให้แรงโดยตรงแก่ก้อนตัวอย่างทดสอบคอนกรีต จะทำได้ยากเพราะมักเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบเนื่องจาก

2.5.1.1 เกิดการเอียงศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง ทำให้คอนกรีตแตกหักก่อนจะได้ค่ากำลังรับแรงดึงที่แท้จริง

2.5.1.2 มีหน่วยแรงอื่นแทรกเข้ามาจากหัวจับยึด ทำให้เกิดเป็นหน่วยแรงเฉพาะที่ และในที่สุดจะเกิดการแตก ณ บริเวณนี้

2.5.1.3 การร้าวจะแพร่ขยายอย่างรวดเร็ว กำลังดึงที่ได้จะเป็นของบริเวณที่กำลังต่ำสุด ซึ่งไม่ตรงต่อความเป็นจริง

เพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบ จึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ซึ่งกิตติเทพ เพ็ญขจร และสิปปกร กลั่นภูมิศรี [2] ได้พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ เพื่อทดสอบคุณสมบัติกำลังดึงของหินภายใต้แรงกด โดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบตรงของตัวอย่างหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.5.1

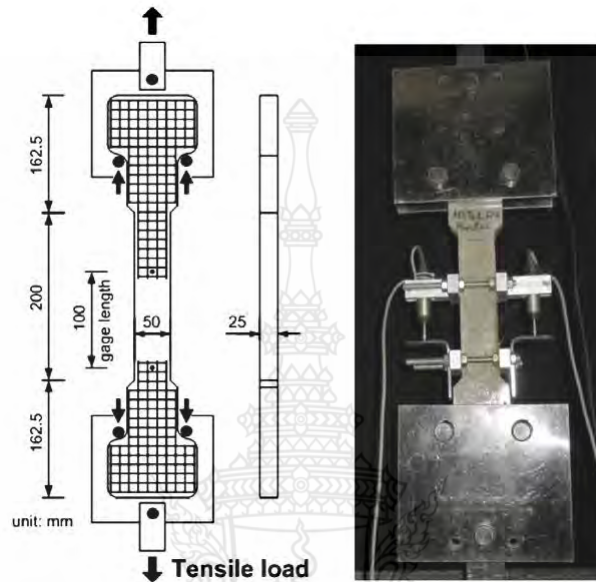


รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรงตัวอย่างรูป Dog Bone [2]

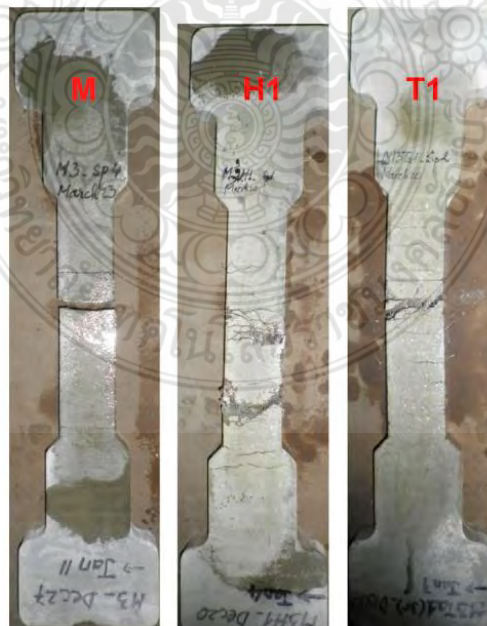


รูปที่ 2.5.1 ตัวอย่างรูป Dog Bone ที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง [6]

Tuan Kiet Tran และ Dong Joo Kim [3] ได้พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเพื่อการตรวจสอบพฤติกรรมของแรงดึงโดยตรงจากซีเมนต์เสริมเส้นใยที่มีประสิทธิภาพสูง ภายใต้ความเครียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.6.1



รูปที่ 2.6 เครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรงตัวอย่างรูปตัวไอ [3]



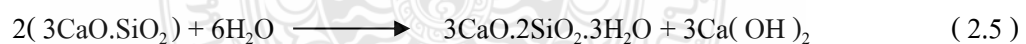
รูปที่ 2.6.1 ตัวอย่างรูปตัวไอที่ใช้ทดสอบแรงดึงโดยตรง [3]

## 2.6 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I)

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (Calcareous) ดินเหนียวประเภท (Argillaceous) ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็กแล้วนำมาบดเป็นผงละเอียดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C. 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

## 2.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [8] เกิดจากไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3CaO.SiO_2$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2CaO.SiO_2$ ) ไตรแคลเซียมอลูมินา ( $3CaO.Al_2O_3$ ) เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ) รวมกับน้ำจะทำให้ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นของเหลวข้น และเกิดสารประกอบขึ้นมา 2 ชนิดคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $Z_3C_3O_2.SiO_2.3H_2O$ ) หรือเรียกย่อๆว่า C-S-H และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $C_3(OH)_2$ ) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)



แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นวัสดุประสานทำให้คอนกรีตเกิดแรงยึดเหนี่ยวให้กำลังอัดได้ ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีต่อไปได้ ซึ่งกำลังของคอนกรีตไม่ได้มีแต่เฉพาะปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้นแต่มีปฏิกิริยาอื่นที่ทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้น เช่นปฏิกิริยาปอชโซลาน หรือการอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect) ซึ่งทำปฏิกิริยาปอชโซลานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากสารผสมเพิ่มซึ่งได้แก่ เถ้าลอยเป็นต้น



## 2.8 เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าซึ่งเถ้าลอยเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านหิน ซึ่งเถ้าลอยจะมีออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลักอัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิการเผาและสภาพแวดล้อมขณะเผาด้วยเหตุนี้ American Society for Testing and Materials (1997 G : 294-296) จึงได้แยกเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือชั้น F และชั้น C โดยเถ้าลอย ชั้น F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่เถ้าลอย ชั้น C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวอยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และนอกจากนี้แล้วยังมีข้อกำหนดที่ 5 เหมือนกันของเถ้าลอยชั้น F และชั้น C คือกำหนดให้มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI, Loss on Ignition) ไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก สำหรับชั้น C ส่วนชั้น F ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาร้อนผ่านน้ำด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ต้องมีอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงไม่เกินร้อยละ 34 ของน้ำหนักทั้งหมด ส่วนกำลังอัดคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต้องให้กำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทั้งหมด) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัวลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัวลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยก็มีข้อเสียด้วยคือทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศ มากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการ ในระดับเดียวกับกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่

## 2.9 การเปลี่ยนแปลงสภาพของคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ได้เกิดจากแรงกระทำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ และการหดตัวเนื่องจากความชื้น การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของโครงสร้างของงานคอนกรีตซึ่งความเครียดจากอุณหภูมิหรือความเค้นจากอุณหภูมิมิมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อุณหภูมิจากฤดูกาลและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างวันก็สามารถทำให้เกิดการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิได้เช่นกัน ส่วนการหดตัวเนื่องจากความชื้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนที่สุด

ในโครงสร้างบาง (Thin Structure) (พื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับอัตราส่วนปริมาตร) เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำได้อย่างรวดเร็ว เช่น ทางเดินเท้า ผนัง และพื้น เป็นตัวอย่างของโครงสร้างที่มีความไวต่อการแตกร้าวแบบแห้ง ถึงแม้การหดตัวแบบออโตจีนัสจะมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียความชื้นภายใน แต่ก็สามารถทำให้เกิดการแตกร้าวในโครงสร้างบางในกรณีของคอนกรีตกำลังสูงได้เช่นกัน การหดตัวที่สัมพันธ์กับความชื้นนั้นรวมถึงการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) จะมีการอธิบายภาพรวมของการหดตัวเหล่านี้ในส่วนต่อไป โดยจะมุ่งเน้นไปที่การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้ง

#### 2.9.1 การหดตัวแบบพลาสติก

การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) เกิดขึ้นเมื่อน้ำระเหยออกจากผิวหน้าของคอนกรีตไปสู่สภาพแวดล้อมโดยรอบในระหว่างที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะพลาสติก สภาพแวดล้อมที่มีเงื่อนไขที่ประกอบไปด้วยผลจากแสงแดด ความเร็วลม อุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำนั้นทำให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงต่อความเป็นไปได้ในการเกิดการแตกร้าวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) โดยปกติแล้วปริมาตรโดยรวมจะลดลงถ้าหากปริมาณน้ำที่สูญเสียไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่ามากเกินไปจนทำให้เกิดการเยิ้มน้ำบริเวณพื้นผิว การหดตัวแบบพลาสติกเป็นการกระทำทางกายภาพและเป็นผลจากแรงดึงผิว เนื่องจากการหดตัวของส่วนที่แห้งบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสอากาศจะถูกยึดรั้งด้วยส่วนภายในของคอนกรีตเอง ทำให้เกิดความเครียดดึงที่ผิวหน้า เมื่อความเครียดดึงนี้มีค่ามากกว่าความสามารถในการรับความเครียดดึง (Tensile Strain Capacity) ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาวะพลาสติก คอนกรีตจะแตกร้าว ซึ่งการป้องกันการระเหยของคอนกรีตอย่างรวดเร็วหลังจากการหล่อสามารถกำจัดปัญหาของการแตกร้าวแบบพลาสติกได้

#### 2.9.2 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเป็นปรากฏการณ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ซึ่งเกิดกับคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมภายนอก การหดตัวแบบแห้งนั้นเป็นการหดตัวที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดสำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะเปิดนั้น จะมีแนวโน้มที่คอนกรีตจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมนั้นๆ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) ของสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่องว่างคาปิลารีที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตจะทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตสูญเสียน้ำจากการระเหย อัตราการระเหยขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ความพรุนของคอนกรีตและพื้นที่ของผิวหน้าที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก น้ำที่จะสูญเสียไปก่อนคือน้ำที่อยู่ในช่องว่างคาปิลารีขนาดใหญ่ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว การสูญเสียไม่ใช้

สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร แต่ในขณะที่แห้งตัวนั้นก็จะเกิดการสูญเสียน้ำจากช่องว่างคาปิลารีขนาดเล็กและจากช่องว่างในเจล จากการลดลงของแรงดันน้ำในช่องว่างคาปิลารี ความเค้นดึงในน้ำที่เหลืออยู่ จะเพิ่มขึ้น ความเค้นดึงของน้ำในช่องว่างคาปิลารี (Capillary Water) ถูกทำให้สมดุลด้วยความเค้นอัดในคอนกรีตโดยรอบทำให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต การระเหยของน้ำในเจล (Gel Water) จะเปลี่ยน พลังงานที่ผิวหน้าในช่วงสภาวะของแข็ง (Solid Phase) และทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น

การหดตัวแบบแห้งนั้นเกิดจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการแห้งและปัจจัยภายในที่สัมพันธ์กับคอนกรีตและส่วนประกอบของคอนกรีต ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำของคอนกรีต เช่น สภาพสิ่งแวดล้อม ขนาดและรูปร่างของคอนกรีต ส่วนปัจจัยภายในที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของคอนกรีต เช่น องค์ประกอบทางเคมี ส่วนประกอบของแร่ธาตุ ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณน้ำ คุณสมบัติของมวลรวมและปริมาตรมวลรวม และปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้สัมพันธ์กับการก่อตัวของคอนกรีต เช่น การเท การอัดแน่น และการบ่ม เป็นต้น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการหดตัวแบบอิสระคืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to binder ration, w/b) ปริมาณของน้ำที่ส่งผลโดยตรงต่อขนาดของความพรุน (เช่น ซีเมนต์เพสต์ที่มีค่า w/b สูงจะมีความพรุนสูง) เพราะฉะนั้นตัวอย่างทดสอบที่มีค่า w/b ต่ำ จะมีปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างน้อยและมีผลให้เกิดการหดตัวแบบแห้งต่ำเช่นกัน การแตกร้าวแบบแห้งสามารถสังเกตพบได้จากระยะเวลาหลังจากการบ่มเสร็จสิ้น ระยะและจำนวนของรอยแตกอาจจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปจนคอนกรีตมีอายุสองถึงสามปี

### 2.9.3 การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) โดยพฤติกรรมแล้วเป็นผลของการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขึ้นสุดท้ายของคอนกรีต และการลดลงของปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายใน (Self-desiccation) การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดจากปริมาตรของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydrated Products) น้อยกว่าปริมาตรของวัสดุซีเมนต์และน้ำในช่วงเริ่มต้น การสูญเสียน้ำภายในเป็นการลดปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในอันเนื่องมาจากการดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ (Unhydrated Cement) ซึ่งมีผลให้ความชื้นในช่องว่างคาปิลารี (Capillary Tension) ภายในช่องว่างคาปิลารีของน้ำและการอัดตัวในส่วนปริมาตรของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระบบของส่วนปริมาตรของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหดตัวลงเนื่องจากกำลังรับแรงอัดที่ได้รับ การหดตัวแบบออโตจีนัสได้ถูกอธิบายไว้ในปี 1930 ว่าเป็นปัจจัยสนับสนุน

ทำให้เกิดการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage) ในเวลานั้นการหดตัวแบบอโตจีนัสเป็นการเกิดขึ้นในสถานะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตคอนกรีตได้ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีช่องว่างคาปิลารีใหญ่กว่าและต่อเนื่องกันมากกว่า การบ่มทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เป็นผลให้แรงดึงคาปิลารีต่ำและการหดตัวแบบอโตจีนัสมีค่าน้อยมาก แต่ด้วยการลดลงของน้ำและตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำจะมีผลอย่างมากเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าต่ำ ทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสเป็นสาเหตุที่ต้องศึกษา การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากการผสมผสานกันระหว่างผลจากการหดตัวอย่างต่อเนื่อง และการยึดรั้งจากปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในเนื้อคอนกรีตที่มีค่าสูง เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสที่แกนกลางมีค่าสูงกว่าที่ผิวหน้า ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวอย่างต่อเนื่อง และเกิดการยึดรั้งภายในเนื่องจากมวลรวมและเหล็กเสริม สำหรับโครงสร้างแบบบางนั้น การผสมผสานกันของการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวที่มีรอยร้าวตัดขวางหน้าตัดได้

## 2.10 กลไกการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบยึดรั้ง

การหดตัวของคอนกรีตจะไม่เป็นปัญหาหากคอนกรีตสามารถหดตัวได้อย่างอิสระ แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนคอนกรีตมักถูกยึดรั้งในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง หรือหลายทิศทางโดยแรงยึดรั้งจากภายในหรือภายนอก ดังนั้นจึงอาจเกิดการแตกร้าวได้ การหดตัวแบบยึดรั้งของคอนกรีตสามารถแยกได้เป็น 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 ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้า

- ระดับจุลภาค (Microscopic) คือ สภาวะของแข็งในซีเมนต์เพสต์ เช่น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว หรือผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

การหดตัวแบบยี่ดิ่งสามารถทำให้เกิดความเค้นดึง หรือความเครียดจากการยี่ดิ่งซึ่งถ้ามีค่าสูงเกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึง หรือความสามารถในการรับความเครียดดึงของคอนกรีตแล้วจะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ขนาดของความเค้นดึงหรือความเครียดจากการยี่ดิ่งที่เกิดขึ้นจากการหดตัวแบบยี่ดิ่งของคอนกรีตนั้นเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณและอัตราการหดตัว การคลายตัวเนื่องจากการคืบ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความสามารถในการรับความเครียดดึง หรือกำลังรับแรงดึงและระดับการยี่ดิ่งของคอนกรีต ดังนั้นปริมาณการหดตัวเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการแตกร้าว แต่การหดตัวเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอในการประเมินการแตกร้าวในคอนกรีต เพราะฉะนั้นการทดสอบการหดตัวแบบยี่ดิ่งจึงทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีต

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จตุพล ตั้งปกาศิต แสวง ทรงหมู่ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล [4] ผลการทดลองพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง โดยอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 20 30 และ 40 มีค่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่ากับร้อยละ 87 81 72 และ 57 ของมอร์ต้าควบคุม ตามลำดับ สำหรับกำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบด หากทรายแม่น้ำบดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวสูงขึ้น ในตรงกันข้ามการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดใหญ่กว่าซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวต่ำลง

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัยและคณะ [5]จากผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและ โมดูลัสการแตกร้าวมีค่าสูงตามกำลังอัดที่ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วันมีค่าระหว่าง  $0.09\text{fc}' - 0.30\text{fc}'$  กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าระหว่าง  $0.86\sqrt{\text{fc}'} - 1.32\sqrt{\text{fc}'}$  และ โมดูลัสการแตกร้าวมีค่าระหว่าง  $0.27\sqrt{\text{fc}'} - 1.32\sqrt{\text{fc}'}$  ซึ่งจากการทดสอบที่อายุ 28 วันกำลังรับแรงดึงโดยตรงมีค่าระหว่าง  $0.06\text{fc}' - 0.20\text{fc}'$  กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าระหว่าง  $0.72\sqrt{\text{fc}'} - 1.55\sqrt{\text{fc}'}$  และ โมดูลัสการแตกร้าวมีค่าระหว่าง  $0.83\sqrt{\text{fc}'} - 1.55\sqrt{\text{fc}'}$  จะเห็นว่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและ โมดูลัสการแตกร้าวเมื่อพิจารณาเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งที่อายุ 28 วันและ 56 วัน

จากผลงานวิจัยของเรืองรุชดี และชัย [6] ได้ทำการศึกษาเถ้านหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุ ปอชโซลาน พบว่าการนำมาใช้โดยไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพจะมีกำลังอัดต่ำ และหลังทำการบด ให้มีอนุภาคลดลงจะมีค่ากำลังสูงขึ้น โดยมีค่ากำลังอัดมากกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618

จิตรกร วงศ์เชาวลิต [7] (วิทยานิพนธ์เรื่องคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปาคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2543) ได้ศึกษาการนำตะกอน สลัดจ์ที่เกิดจากระบวนการผลิตน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนและโรงงานผลิตน้ำประปา มหาสวัสดิ์มาใช้เป็นวัสดุปอชโซแลนในงานด้านคอนกรีตโดยทำการเผาตะกอนสลัดจ์ที่อุณหภูมิ 500 700 และ 900 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเผา 15 30 และ 60 นาทีแล้วทำการทดสอบหาค่าดัชนีการรับ กำลังอัดจากผลการวิจัยพบว่าค่าดัชนีกำลังแรงอัดของมอร์ต้าร์ผสมตะกอนสลัดจ์จาก โรงงานผลิตน้ำ ประปาบางเขนทุกตัวอย่างมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ผ่านตามมาตรฐาน ASTM C618 ส่วนค่าดัชนีการรับ กำลังของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าตะกอนสลัดจ์จาก โรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียสและระยะเวลาการเผา 15 นาทีโดยมีค่าดัชนีการรับกำลัง ร้อยละ 74 จากวิทยานิพนธ์เรื่องคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ดังกล่าวตะกอนที่นำมาใช้ต้อง มีการเผาเป็นวัสดุปอชโซแลนทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในการเผา ถ้าสามารถนำตะกอน สลัดจ์เปล่าที่ไม่ผ่านการเผามาใช้เป็นวัสดุปอชโซแลนในงานด้านคอนกรีตและให้ผลใกล้เคียงกับการ นำตะกอนสลัดจ์ไปเผาที่จะสามารถลงพลังงานและค่าใช้จ่ายลงไปได้

#### 2.11.1 การหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ผศ.ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตร [8] ได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาความต้องการน้ำ และการก่อตัว ของตัวอย่างเพสต์ ค่าการไหลแผ่ ความพรุน ค่าการหัดตัวแห้ง และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต ของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม โดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Fujiwara [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมและการ หัดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จากผลการทดสอบสามารถสรุป ได้ว่าปริมาณน้ำมากจะทำให้เกิดการหัดตัวแบบแห้งมากซึ่งเกิดในกรณีของปริมาณส่วนผสมที่มีความ หนืดปานกลางและน้อย หากจะป้องกันการหัดตัวแบบแห้งที่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวตามมานั้น จำเป็นต้องลดปริมาณน้ำลงให้มากที่สุด โดยให้อยู่ในช่วงสัดส่วนผสมเหล่านี้ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่า ส่วนผสมที่มีความหนืดมากจะทำให้เกิดการหัดตัวมากกว่าที่คาดไว้ทุกๆ ที่น้ำมีปริมาณน้อย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพสต์และการหัดตัวแบบแห้งนั้นหาได้จากการค้นคว้าบางวิธี ปริมาณ

ปูนซีเมนต์ที่มากยิ่งหมายถึงจะเกิดการหดตัวแบบแห้งมากเมื่อสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ ยกเว้นใน ส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยมากที่จะเกิดการหดตัวมาก

Hindy และคณะ [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวแบบแห้งที่เกิดในคอนกรีต ผสมเสริมคุณภาพสูง (HPC) จากการศึกษาผลจากเวลาในการบ่ม สภาพการบ่ม ซิลิกาฟูม และสัดส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถสรุปได้ว่าการหดตัวแบบแห้งจะลดลงเมื่อใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น สัดส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงจะทำให้การหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นและช่วยเร่งปฏิกิริยา และทำ ให้เกิดพื้นที่สำหรับการรวมตัวของน้ำอิสระ ซิลิกาฟูมทำให้การเกิดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเพิ่ม มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การระเหยของน้ำและการหดตัวแบบแห้งลดลง สำหรับผลของขนาดชิ้นทดสอบ นั้นปรากฏว่ายิ่งสัดส่วนระหว่างปริมาตรต่อพื้นที่ผิวมีค่าสูงจะทำให้การหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นน้อย ฃ คอนกรีตที่มีอายุเท่ากัน ดังนั้นผลจากการทดลองโดยทั่วไปที่ทดลองกับชิ้นทดสอบขนาดเล็กนั้น ฃ เหมือนจะประมาณการหดตัวของ HPC มากเกินไปสำหรับโครงสร้างจริง

Pacheerat [11] ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและร้อยละ การแทนที่ของเถ้าลอยต่อความยาวที่เปลี่ยนไป รวมไปถึงการเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลง ความยาวของมอร์ตาร์และคอนกรีต ในการศึกษาใช้การแทนที่ของเถ้าลอยร้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เรียงลำดับตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่า 0.35, 0.50 และ 0.65 จากผลของการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตให้ค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกันกับ มอร์ตาร์เพียงแต่ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวจะน้อยกว่าในทุกๆ ส่วนผสม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสานขึ้นจะพบว่าเกิดการกระจายตัวและเพิ่มขึ้นของการหดตัวแบบแห้งในขณะที่การหดตัว แบบออโตจีนัสลดลง เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาว ทั้งหมดลดลง

Barr และคณะ [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติที่มีต่อการหด ตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่เสริมและไม่เสริมใยเหล็ก การผสมผสานกันระหว่างการเพิ่มปริมาณ ปูนซีเมนต์ การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูม (SF) และการลดสัดส่วนของน้ำต่อวัสดุผสมนั้นทำเพื่อหา ช่วงกว้าง (C30-C70) ของกำลังรับแรงของคอนกรีต ในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบกับ ความเครียดหดตัวที่ได้จากแบบจำลอง ACI 2009 ผลที่ได้คือผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น สัมพัทธ์และอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาตินั้นมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งและแบบออโต จินัสอย่างจำกัดเท่านั้น การเพิ่มใยเหล็กขึ้นร้อยละ 2 นั้นแทบจะไม่มีผลต่อการหดตัวที่กำลังรับแรง ต่ำสุด (C30) แต่แรงดึงรั้งที่มีต่อการหดตัวที่กำลังเกิดขึ้นนั้นช่วยเสริมกำลังของคอนกรีต การ

เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและค่าความเครียดหดตัวที่คาดไว้ไม่เหมาะสมกับคอนกรีตกำลังสูงถึงแม้จะพบความสัมพันธ์ที่น่าพอใจที่กำลังรับแรงต่ำก็ตาม

Kim และ Lee [13] ได้ทำการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในของชิ้นงานคอนกรีตแห้งในระยะเริ่มต้น ความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์นั้นเกิดจากมีการวัดค่าการแห้งของชิ้นทดสอบในสถานะแวดล้อมปิด จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของความชื้นในคอนกรีตกำลังต่ำที่มีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงมักจะเกิดการแพร่เนื่องจากการสัมผัสกับอากาศมากกว่าการแห้งตัว (Self-desiccation) ในทางกลับกันในคอนกรีตกำลังสูงที่มีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ การแห้งตัวจะมีผลต่อการกระจายตัวของความชื้น

Sontaya [14] ได้ศึกษาผลของการหดตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้กำลังอัดเร็วในระยะเริ่มต้นประเภทที่ 3 และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตประเภทที่ 5 จากการทดสอบการหดตัวรวมทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้เป็นผลรวมของการหดตัวแบบอโตจินัสกับการหดตัวแบบแห้ง โดยในช่วงระยะเริ่มต้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 จะมีการหดตัวรวมสูงกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เนื่องจากการหดตัวแบบอโตจินัสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 สูงกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จึงส่งผลให้การหดตัวรวมสูงขึ้นไปเช่นเดียวกัน แต่ในช่วงระยะยาวการหดตัวแบบอโตจินัสมีอัตราลดลง จึงส่งผลให้การหดตัวรวมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

Subsomboon [15] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของเกลือลอยแม่เมาะที่มีต่อการหดตัวและการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ ชิ้นทดสอบถูกควบคุมโดยการใช้อ้อยละการแทนที่ของเกลือลอยที่ 0, 30 และ 50 ผลที่ได้คือการหดตัวแบบแห้งจะลดลงด้วยการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเกลือลอย

Akkaya และคณะ [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวแบบอโตจินัสและการหดตัวแบบแห้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และคอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองและสามชนิด คอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองและสามชนิดนั้นได้จากการแทนที่ส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ด้วยเกลือลอย เกลือลอยที่มีความละเอียดมาก และซิลิกาฟูม การทดสอบการหดตัวแบบยัดรี้งนั้นก็สามารถปฏิบัติเพื่อทดสอบผลของชนิดของวัสดุผสมที่มีต่อการแตกร้าวในระยะแรก หลังจากการแตกร้าวของวงแหวนยัดรี้งตัวอย่างแล้วทำการวัดรอยกว้างของรอยแตกร้าวแล้วเปรียบเทียบกับผลของ R-Curve ตามแบบจำลองที่ใช้การยึดหยุ่นของจุดสูงสุด และการคืบของความเครียด มีการพบว่าคอนกรีตที่ผสมเกลือลอยและคอนกรีตผสมเกลือลอยที่มีความละเอียดมากจะลดความเครียดของการหดตัวแบบอโตจินัสแต่เพิ่มความเครียดของการหดตัวแบบแห้ง เนื่องจากความเครียดของการหดตัวทั้งหมดของคอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองชนิดและสามชนิดนั้นมีค่าคล้ายคลึงกัน การพัฒนากำลังกลายมาเป็นปัจจัยสำคัญของการแตกร้าว



คอนกรีตกำลังน้อยที่มีวัสดุผสมสามชนิดนั้นทำให้เกิดการแตกร้าวง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองชนิด คอนกรีตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะแตกเร็วสุดและมีความกว้างของรอยแตกร้าวมากที่สุด การวัดรอยแตกร้าวนั้นเพื่อนำมาคำนวณและหาความสัมพันธ์กับแบบจำลอง R-Curve

#### 2.11.2 การหาค่าแบบอโตจินัสของคอนกรีต

Tazawa และ Miyazawa [17] ทำการทดลองเพื่อค้นหาปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดการหดตัวของแบบอโตจินัสของคอนกรีต เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาตรของมวลรวม เพื่อใช้สร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต เป็นที่ทราบกันดีว่าผลของมวลรวมต่อการหดตัวของแบบอโตจินัสของคอนกรีตหลังอายุ 24 ชั่วโมง สามารถหาได้จากแบบจำลองของฮอบบส์ (Hobbs' model) สำหรับมอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีปริมาตรของมวลรวมต่างๆ กัน การหดตัวของแบบอโตจินัสของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ เห็นได้ชัดว่าการหดตัวของแบบอโตจินัสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง

Hanehara และคณะ [18] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจินัส โครงสร้างระดับจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในระยะแรก การหดตัวของแบบอโตจินัสของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับความชื้นของซีเมนต์เพสต์ที่ลดลง แม้จะมีความต่างของเวลาระหว่างการหดตัวแบบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในระยะแรก แต่ก็ไม่มีการเกิดการหดตัวของแบบอโตจินัส ในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสม w/c เท่ากับ 0.5 ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าไม่มีการลดลงของความชื้น การหดตัวของแบบอโตจินัสที่เกิดกับซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของ w/c เท่ากับ 0.25 นั้นเกิดจากการแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ตั้งแต่ร้อยละ 100 ถึง 80 จึงสามารถกล่าวได้ว่าการหดตัวของแบบอโตจินัสนั้นเกิดขึ้นเพราะน้ำอิสระที่มีอยู่ในช่องว่างภายในระหว่างเกล็ดขนาดเล็กที่เกิดจากการผลิต C-S-H ปริมาณมาก น้ำอิสระนั้นจะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันและความชื้นในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วลดลง ผลิตภัณฑ์และการเปลี่ยนรูปของผลจากปฏิกิริยาอะลูมิเนตไฮเดรต (Aluminate Hydrate) นั้นสัมพันธ์กับการเพิ่มการหดตัวของแบบอโตจินัส

Park และคณะ [19] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจินัสและปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการค้นคว้าเกี่ยวกับผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีต่อปรากฏการณ์การหดตัวของแบบอโตจินัสและความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบอโตจินัสและอัตราของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวของแบบอโตจินัสไม่สามารถอธิบายด้วยการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียวได้ อีกนัยหนึ่งคือมีช่วงเวลาระหว่างที่การหดตัวของแบบอโตจินัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพิ่งเริ่มเกิดขึ้น ในช่วงเวลานี้จะเกิดการหดตัวของแบบอโตจินัสขึ้น

เพราะเกิดความเค้นคาปิลารีเนื่องจากแรงดึงผิวของน้ำในพื้นที่ของซีโรเจล (Xerogel) และมีการลดลงของระยะระหว่างชั้น จากจุดนี้นั้นการหดตัวแบบอโตจีนัสมีกลไกอยู่ 2 แบบคือปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และการเปลี่ยนแปลงช่องว่างของโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

Baroghel-Bouney และคณะ [20] ได้ทำการค้นคว้าผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ภายในช่วงการหดตัวแบบอโตจีนัสที่ 0.25-0.60 การหดตัวแบบแห้งและความสัมพันธ์ของการหดตัวแบบแห้งกับคุณสมบัติโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุ การวิเคราะห์ระดับจุลภาค-มหภาค ได้มุ่งเน้นที่ค่าต่ำสุดของ w/c (มีค่าประมาณ 0.40) ณ ระดับมหภาค (ไม่เฉพาะกับการหดตัวแบบอโตจีนัสเท่านั้น แต่กับการหดตัวแบบแห้งและคุณสมบัติที่เกี่ยวกับความคงทนด้วย) และ ณ ระดับจุลภาค (คุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ความพรุนแบบ MIP และขนาดการกระจายตัวของช่องว่างคาปิลารี เป็นต้น) ผลจากการค้นคว้า แสดงให้เห็นถึงขนาดของการหดตัวแบบอโตจีนัสแบบหนึ่งมิติจะเพิ่มขึ้นเป็นแนวเส้นตรงในขณะที่ยค่า w/c ลดลงจาก 0.60 ถึง 0.25 จากผลของกระบวนการแห้งและโครงสร้างขยายตัว (และเป็นไปตามคุณสมบัติเฉพาะของโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุ) ในทางกลับกันขนาดของการหดตัวแบบแห้งอย่างแท้จริงนั้นจะลดลงเมื่อค่า w/c ลดลงจาก 0.60 จนถึง 0.25

Tazawa และ Miyazawa [21] ได้ทำการศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีตและความสำคัญของการหดตัวในเทคโนโลยีคอนกรีต โดยศึกษาจากผลของหลายตัวแปรและแบบจำลองการหดตัวแบบอโตจีนัสของปูนซีเมนต์นั้นเกิดจากส่วนผสมที่เป็นแร่ธาตุต่างๆ ของปูนซีเมนต์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แบบจำลองได้จากการวิเคราะห์แบบย้อนกลับของการหดตัวแบบอโตจีนัส ในรูปฟังก์ชันของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแร่ธาตุของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.3 เป็นที่ชัดเจนว่า  $C_3A$  และ  $C_4AF$  มีผลต่อการเกิดการหดตัวแบบอโตจีนัสมาก

Sontaya [22] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต โดยจากผลการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 5 จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีอัตราการหดตัวแบบอโตจีนัสสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีอนุภาคที่มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จึงช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้สูงขึ้น และขนาดของช่องว่างคาปิลารี (Capillary Pores) ที่เล็กกว่าชนิดอื่นๆ ทำให้แรงดึงแบบคาปิลารี (Capillary Tension) สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้การหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น

Sudsangium [23] ได้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยแม่เมาะซึ่งมีปริมาณ  $SO_3$  แตกต่างกันเพื่อหาวิธีการลดคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบเถ้าลอยแม่เมาะกับเถ้าลอยจากห้องทดลอง ผลของการลดคาร์บอนไดออกไซด์ในแง่ของกำลังรับแรงอัด กำลังต้านทานแรงดึงและการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยห้องทดลอง ผลการทดลองสรุปได้ว่า หากอยู่ภายใต้สภาวะปิด สามารถใช้เถ้าลอยเพื่อลดคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยเถ้าลอยมีอนุภาคทรงกลมซึ่งทำให้มีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มากขึ้นและปริมาณ  $SO_3$  ของเถ้าลอยแม่เมาะที่มากขึ้น จะทำให้การลดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เถ้าลอยแม่เมาะช่วยทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังต้านทานแรงดึงมีประสิทธิภาพดีขึ้น

Tangtermsirikul [24] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลายชนิด ขนาดของอนุภาค และร้อยละของการแทนที่ต่อการลดคาร์บอนไดออกไซด์ของเพสต์ผสมเถ้าลอย ได้มีการค้นพบว่า ผลของส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยกับปริมาณ  $SO_3$  สูงทำให้การลดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ผลที่เกิดจากขนาดของอนุภาคนั้นยังเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์เท่าใด การลดคาร์บอนไดออกไซด์ก็เกิดขึ้นมาก ในขณะที่เพสต์และเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์จะทำให้การลดคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ สำหรับผลของปริมาณเถ้าลอยนั้นเถ้าลอยที่มีการคัดขนาดและไม่มีการคัดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ เช่น การลดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 มีค่ามากกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 เมื่อใช้เถ้าลอยที่ไม่มีการคัดขนาด หรืออาจกล่าวได้ว่าการลดคาร์บอนไดออกไซด์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 มีค่าน้อยกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 นั้นจะเกิดในกรณีที่เป็นเพสต์ผสมกับเถ้าลอยที่มีการคัดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ใช่เพียงส่วนประกอบทางเคมีเท่านั้นที่มีผลต่ออัตราการแข็งตัวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเพสต์ผสมเถ้าลอยแต่ขนาดของอนุภาคก็มีผลต่อช่องว่างในโครงสร้างของเพสต์ ก็ต้องถูกนำมาพิจารณาในการสร้างแบบจำลองการลดคาร์บอนไดออกไซด์ของเพสต์ผสมเถ้าลอย

Chan และคณะ [25] ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับผลของวัสดุปอซโซลานและอัตราส่วนเพสต์ต่อมวลรวมต่อการลดคาร์บอนไดออกไซด์ การผสมเถ้าลอยใน HPC นำไปสู่การลดคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น ในส่วนของ OPC ที่ใส่เถ้าลอยนั้น ปริมาณของวัสดุซีเมนต์ที่กำลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงและการดูดซึมน้ำในช่องว่างของโครงสร้างจึงลดลง จึงมีคำแนะนำว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วน  $p/a$  สูงนั้นอาจทำให้เกิดการลดคาร์บอนไดออกไซด์มากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่คอนกรีตที่มีสัดส่วน  $p/a$  ที่น้อยไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคาร์บอนไดออกไซด์มากนัก เนื่องจากแรงยึดรั้งระหว่างมวลรวมมีค่าสูง

Termkhajornkit และคณะ [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอย (เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ) ที่มีต่อการหดตัวแบบบอโตจีนัส ความเชื่อมโยงกันระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยนั้นหาได้ด้วยวิธีการเลือกทำลาย (Selective Dissolution Method) อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 25 และ 50 โดยปริมาตร ตัวอย่างของเพสต์ผสมเถ้าลอยถูกเตรียมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.22 และ 0.30 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่ผิวของเบลน (Blaine) เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและการหดตัวแบบบอโตจีนัสจะเพิ่มขึ้น โดยเชื่อมโยงกับการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย การหดตัวแบบบอโตจีนัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 แต่หากการแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 แล้วการหดตัวแบบบอโตจีนัสจะลดลง ยิ่งไปกว่านั้นมีการพบว่าปริมาณทั้งหมดของ  $Al_2O_3$  ในเพสต์ผสมเถ้าลอยมีผลให้เกิดการหดตัวแบบบอโตจีนัสในช่วงอายุเริ่มต้นแต่ผลกระทบในระยะยาวนั้นถือว่าน้อยมาก

Sontaya [27] ได้ทำการศึกษาการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตที่แทนที่ด้วย เถ้าลอย อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.55 และ 0.65 ปรากฏพบว่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคทรงกลม ทำให้เก็บกักน้ำได้น้อย จึงมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มากขึ้นและปริมาณ  $SO_3$  ของเถ้าลอยยังส่งผลให้การหดตัวแบบบอโตจีนัสลดลง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึงขั้นตอนในการศึกษาแต่ละขั้นตอน โดยจะแสดงถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบ ซึ่งแยกเป็นรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกอนประปา ทราบด เถ้าลอย หิน น้ำ และทรายผสมคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 โดยมีลักษณะเป็นปูนซีเมนต์ใหม่และไม่จับตัวเป็นก้อน

3.1.2 ตะกอนประปา ซึ่งได้มาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ นำมาตากให้แห้งแล้วจึงนำไปบดให้มีความละเอียดใกล้เคียงความละเอียดของปูนซีเมนต์

3.1.3 ทราบด นำทรายผสมคอนกรีตมาล้างทำความสะอาดแล้วตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปบดให้มีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

3.1.4 เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ใช้ในการศึกษาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.5 หิน (Stone) เลือกที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 และนำไปอบแห้ง

3.1.6 น้ำ (Water) ในการศึกษานี้ใช้น้ำประปาที่สะอาด

3.1.7 ทราย (Sand) ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

## วัสดุที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกอนประปา ทรายบด เถ้าลอย หิน 3/4 นิ้ว น้ำ และทรายผสมคอนกรีต

### 3.2 รายละเอียดวิธีที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานและคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 โดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตอรัลเยร์ (Le Chatelier Flask) หาอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรแทนที่ในน้ำมันก๊าด

3.2.1.2 ทำการบดวัสดุประสานด้วยเครื่องบดตั้งรูป ให้มีความละเอียดใกล้เคียงปูนซีเมนต์

3.2.1.3 องค์กรประกอบทางเคมี กระทำโดยวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ องค์กรประกอบทางเคมี



รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการบดวัสดุให้มีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

3.2.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมการก่อตัว และการขยายตัวในเตาอบโตเคลฟของเพสต์ โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 ด้วยวิธีเข็มไวแคท (Vicat Apparatus)

3.2.2.2 การก่อตัว (Setting Time) โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191 ซึ่งทำการก่อตัวระยะต้นและระยะเวลาการก่อตัวระยะปลายตัวของซีเมนต์เพสต์ ด้วยเครื่องมือไวแคท



รูปที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้หาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัว

3.2.3 การหดตัวของแบบอโตจีนัสและแบบแห้ง ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แทนที่ด้วยตะกอนประปา ทราบคด และถั่วลลย ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.3.1 ในการทดสอบการหดตัวของแบบอโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของคอนกรีตตัวอย่างต่างๆ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 157 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อการนำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัว เมื่อหล่อขึ้นงานเสร็จแล้วให้นำมาหุ้มด้วยพลาสติก เพื่อไม่ให้มีน้ำระเหยออกเมื่อครบ 1 วัน แกะแบบออกแล้วหุ้มด้วยพลาสติกและห่อด้วยฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง แล้ววัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนการผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มึระยะห่างแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 60 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆ กัน

3.2.3.2 ในการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีต ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 596 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร โดยในแต่ละสัดส่วนการผสมคอนกรีตที่ใช้งานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อการนำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวของแบบแห้งของคอนกรีต หลังจากที่ได้หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นการบ่ม จะนำชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าแห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา จะเข้าสู่กระบวนการชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งและวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวมาตรฐานด้วยเครื่องมือดังรูป (รูปที่ 3.4) ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนการผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการวัดต่าง ๆ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มึระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 7 14 28 56 และ 60 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆ กัน





รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความยาวแท่งคอนกรีต

3.2.4 ค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังรับแรงดึงทางตรงและทางอ้อมของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

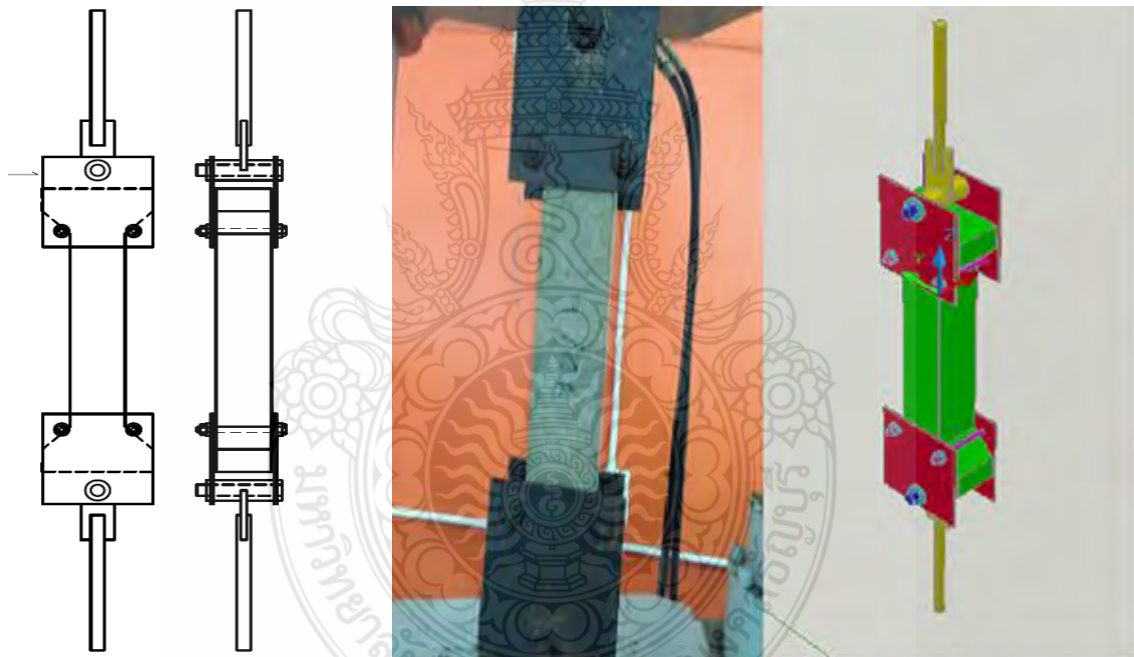
3.2.4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Cone)

3.2.4.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยทำการทดสอบของคอนกรีตด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) (รูปที่ 3.5) นำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แกะแบบเมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบและนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 7 14 28 และ 60 วัน

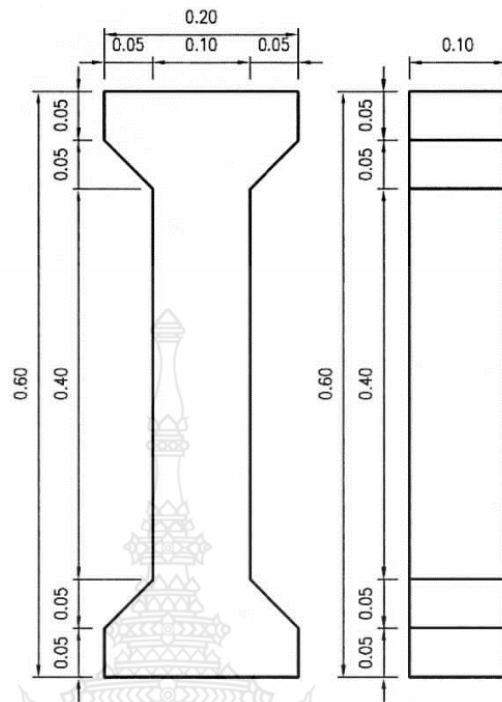


รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต UTM (Universal Testing Machine)

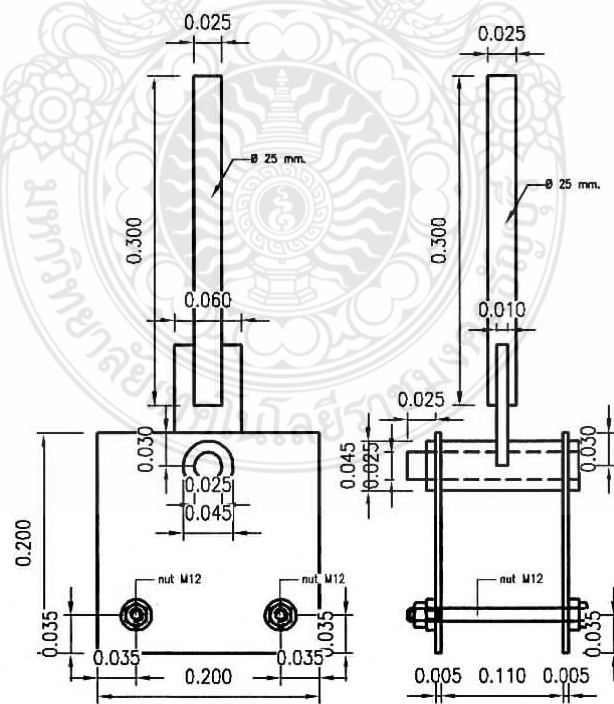
3.2.4.3 การทดสอบแรงดึงโดยตรง นำตัวอย่างที่อายุครบกำหนดตามวันทดสอบมา ฝั่งให้แห้ง จากนั้นทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักฉบับที่กล่าวไว้ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรง เพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบ จึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุง เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง และรูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดย ดัดแปลงหัวยึดจับตัวอย่างคอนกรีตมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง ของ Tuan Kiet Tran และ Dong Joo Kim [3] การติดตั้งคอนกรีตตัวอย่างเข้ากับหัวยึด ดังแสดงใน (รูปที่ 3.6) รูปแบบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงใน (รูปที่ 3.6.1) รูปหัวยึดตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงใน (รูปที่ 3.6.2) โดยจุดยึดบนและล่างเป็นแบบจุดยึดหมุน และการทดสอบคอนกรีตตัวอย่าง ดังแสดงใน (รูปที่ 3.6.3)



รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับหัวยึด



รูปที่ 3.6.1 รูปแบบและขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.6.2 หัวยึดตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.6.3 การทดสอบคอนกรีตตัวอย่างกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)

3.2.4.4 การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength) กำลังดึงของคอนกรีตโดยวิธี Splitting Tensile Test ตามมาตรฐานมาตรฐาน ASTM C 496 ใช้แบบหล่อตัวอย่าง เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร นำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นการทำให้เป็น แต่งผิวหน้าให้เรียบ เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบและนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยการทดสอบแรงดึงคอนกรีต จะวางตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกในแวนนอนบนเครื่องทดสอบ แล้วกดด้วยแรงที่เป็นเส้น (Line Load) จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างแยกออกจากกันเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength)

3.2.4.5 การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ตามมาตรฐาน ASTM C78-94 ใช้แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 10 x 10 x 50 เซนติเมตร นำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นการทำให้เป็น แต่งผิวหน้าให้เรียบ เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบและนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยการทดสอบแรงดึงคอนกรีต จะวางตัวอย่างคอนกรีตแนวนอนบนเครื่องทดสอบล แล้วกดด้วยแรงตรงกลาง จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างหักออกจากกันเป็นสองส่วน (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture)



ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ปรับสภาพความชื้นของหินและทรายแล้วใน 1 ลบ.ม.

Mix.	C (Kg.)	FA (Kg.)	SP (Kg.)	SL (Kg.)
C	327.0	-	-	-
FA10		32.7	-	-
SP10	294.3	-	32.7	-
SL10		-	-	32.7
FA20		65.4	-	-
SP20	261.6	-	65.4	-
SL20		-	-	65.4
Rock	1134.0	Kg.	W/C	0.55
Sand	785.0	Kg.	Slump	7 ± 2.5
Water	180.0	Kg.	(cm.)	

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

FA หมายถึง ฝั่้าถ่านหิน

SP หมายถึง ทรายบด

SL หมายถึง ตะกอนประปา

10, 20 หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 บทนำ

บทนี้เป็นการกล่าวถึงผลจากการทดสอบตามกระบวนการทดสอบในบทที่ 3 เกี่ยวกับผลกระทบจากการนำตะกอนประปา ทราซบด และเถ้าลอย แทนที่ในคอนกรีต โดยมีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีผลกระทบต่อกำลังอัด แรงดึงทางตรงทางอ้อมและการหดตัวของคอนกรีต โดยการทดสอบหาลำดับอัดประลัย (Compressive Strength) ลำดับรับแรงดึงทางตรงทางอ้อม และการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

#### 4.2 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนประปา ทราซบด และเถ้าลอย โดยสมบัติของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดคิดเป็นร้อยละโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และองค์ประกอบทางเคมี โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.2.1. ความถ่วงจำเพาะ

จากผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.10 ตะกอนประปาเท่ากับ 2.65 ทราซบดเท่ากับ 2.65 และเถ้าลอยเท่ากับ 2.29

##### 4.2.2 ความละเอียดคิดเป็นร้อยละโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325

ผลการทดสอบความละเอียดของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าความละเอียดเท่ากับ 13.5 ตะกอนประปาเท่ากับ 13.6 ทราซบดเท่ากับ 13.8 และเถ้าลอยเท่ากับ 13.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด และความถ่วงจำเพาะ

คุณสมบัติทางเคมี	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ (FA)	ทราย บดละเอียด (SP)	ตะกอน น้ำประปา (SL)
SiO <sub>2</sub>	19.87	39.40	92.86	41.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.87	17.93	3.17	37.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.55	12.92	0.27	7.38
CaO	65.03	19.19	0.55	4.06
MgO	0.73	3.03	0.55	-
SO <sub>3</sub>	2.52	2.99	0.49	1.16
Na <sub>2</sub> O	0.02	1.36	0.42	0.14
K <sub>2</sub> O	0.45	2.50	0.32	1.34
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.34	-	0.76
ความละเอียดผ่านตะแกรง เบอร์ 325 (เปอร์เซ็นต์)	13.5	13.2	13.8	13.6
ความถ่วงจำเพาะ	3.10	2.29	2.65	2.65

### 4.3 คุณสมบัติของเพลส

ดังตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพลสปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนและเพลสผสมตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าลอย โดยแทนที่ในปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าเพลสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพลสน้อยกว่าเพลสปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคที่ค่อนข้างกลมมนช่วยในการลื่นไหล ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยลง ส่วนเพลสของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่ผสมตะกอนประปาและทรายบดในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ผลของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพลสมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ซึ่งในกรณีนี้เป็นเพราะพื้นผิวที่ไม่เรียบของตะกอนประปาและทรายบด จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าตัวอย่างที่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

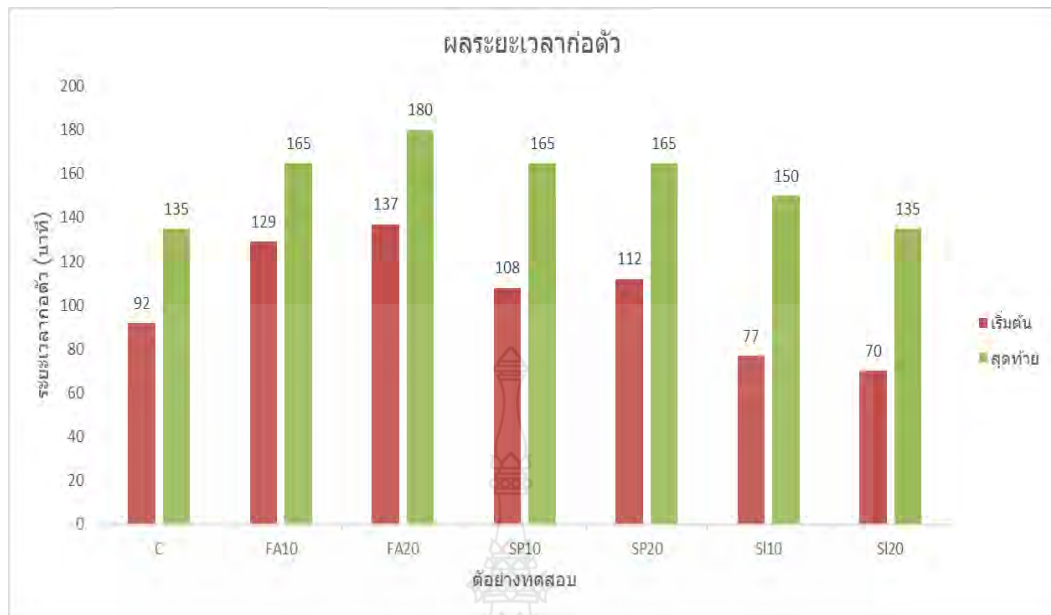


ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาก่อตัว

สัดส่วนของเพสต์	ปริมาณน้ำ	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
	(ร้อยละ)	เริ่มต้น	สุดท้าย
C	22.50	92	135
FA10	20.40	129	165
FA20	19.50	137	180
SP10	23.00	108	165
SP20	23.50	112	165
SI10	23.50	77	150
SI20	24.10	70	135

4.4 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

รูปที่ 4.1 แสดงระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ผสมตะกอนประปา ทราบบด และ เถ้าลอย โดยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมทราบบดและเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักมีค่า ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าเพสต์ปูนพอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลงไปด้วย ปฏิกิริยาปอซโซลาน จะเกิดในภายหลัง ส่วนทราบบดไม่เป็นวัสดุปอซโซลานแต่มีค่าการดูดซึมน้ำน้อย จึงทำให้ระยะเวลา การก่อตัวช้าลงไปด้วย ส่วนตะกอนประปามีค่าการก่อตัวที่เร็วที่สุด อันเนื่องจากตะกอนประปามี ลักษณะคล้ายดิน [28] มีการดูดซึมน้ำได้มาก จึงมีผลทำให้การก่อตัว เร็วกว่า คอนกรีตล้วน ทราบบด และเถ้าลอย ส่วนการก่อตัวช่วงสุดท้ายก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่คอนกรีตล้วนจะมีระยะเวลาก่อ ตัวสุดท้ายที่เร็วที่สุด เนื่องจากคอนกรีตล้วน มีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดความร้อน มากที่สุด



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวเพลสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าลอย ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

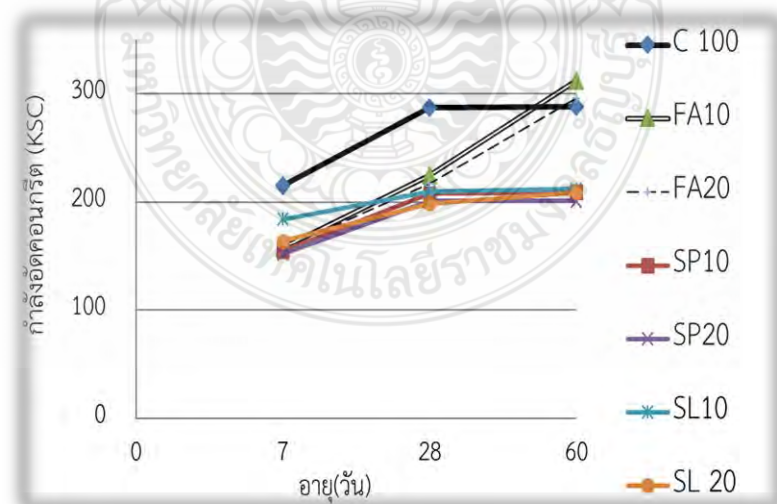
#### 4.5 ผลทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength)

สำหรับการศึกษากำลังอัด ของคอนกรีตในครั้งนี้ ประกอบด้วยตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยผสมแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ได้ทำการพิจารณาผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตในอายุคอนกรีตที่ 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน ดังในตารางที่ 4.1 และรูป 4.1 ผลที่ได้คือตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในช่วงแรก เนื่องจากมีปฏิกิริยาไฮเดรชันมากที่สุด จึงส่งผลให้กำลังคอนกรีตมากที่สุด ส่วนตัวอย่างที่ผสมตะกอนประปามีค่ากำลังอัดรองลงมาจากคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากตะกอนประปามีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วที่สุด ทรายบดและเถ้าลอย อีกทั้งส่วนผสมที่ใช้ทรายบด และตะกอนประปามีปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งตะกอนประปาและทรายบดเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี [10] มีปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อย จึงส่งผลให้กำลังคอนกรีตในช่วงต้นมีกำลังน้อยกว่าคอนกรีตตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่ออายุครบ 28 วัน เถ้าลอย มีการพัฒนา กำลังอัดที่มากกว่า ตะกอนประปา และทรายบด เนื่องจากเถ้าลอยมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้กำลังอัดมากขึ้น แต่ยังมีค่ารับกำลังอัดน้อยกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่ออายุ 60 วัน ตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่ากำลังอัด

สูงที่สุด เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างต่อเนื่อง ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงที่สุด โดยตัวอย่างของตะกอนประปา และทรายบด จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากทรายบดและตะกอนประปา ไม่มีปฏิกิริยาปอซโซลานมาช่วย ทำให้มีกำลังรับอัดที่น้อย ส่วนผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงตามลำดับ ทั้งในตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าลอย

ตารางที่ 4.3 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัด (กก/ซม <sup>2</sup> )		
	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C	215	286	288
FA10	158	224	312
FA20	156	217	296
SP10	155	208	209
SP20	151	200	201
SL10	184	210	212
SL20	164	199	209



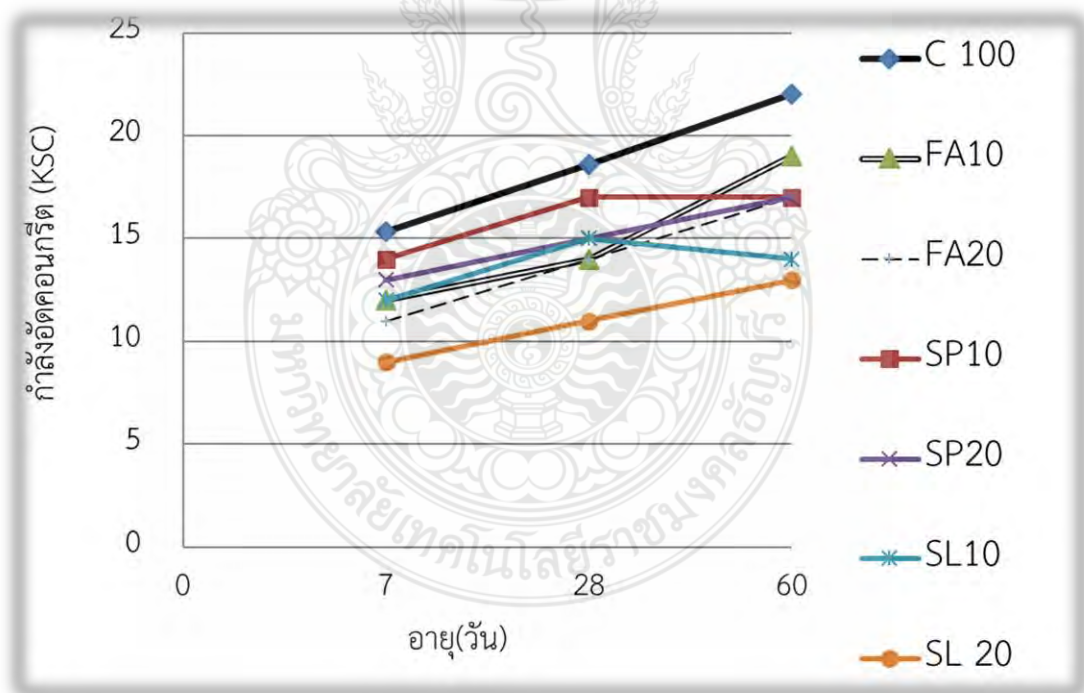
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับอัดประลัยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

#### 4.6 ผลการทดสอบค่าแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)

จากการทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอ พบว่าค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 C100 มีค่าเท่ากับ 15 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 19 กก/ซม<sup>2</sup> ที่ 28 วัน และเพิ่มเป็น 22 กก/ซม<sup>2</sup> เมื่อใช้ถั่วลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง FA10 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 12 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วัน เมื่ออายุ 28 วัน มีค่าแรงดึงเท่ากับ 14 กก/ซม<sup>2</sup> และเมื่ออายุ 60 วันจะมีค่ารับแรงดึงเท่ากับ 19 กก/ซม<sup>2</sup> โดยให้ค่ารับแรงดึงโดยตรงน้อยกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 C100 เล็กน้อยแต่มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงมากกว่าตะกอนประปา และทรายบด ในช่วงอายุ 60 วัน มีผลมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับตัวอย่างใช้ถั่วลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง FA20 มีค่าแรงดึงโดยตรงเท่ากับ 11 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วัน เมื่ออายุ 28 วันเท่ากับ 14 กก/ซม<sup>2</sup> และเมื่ออายุได้ 60 วันมีค่าแรงดึงโดยตรงเท่ากับ 17 กก/ซม<sup>2</sup> ให้ค่าไปในทิศทางเดียวกันกับการแทนที่ด้วยถั่วลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของตัวอย่างคอนกรีต SP10 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 14 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วัน เมื่ออายุ 28 วัน มีค่าแรงดึงโดยตรงเท่ากับ 17 กก/ซม<sup>2</sup> และเมื่ออายุได้ 60 วัน มีค่าแรงดึงเท่ากับ 17 กก/ซม<sup>2</sup> เมื่อใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SP20 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 13 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วันเมื่ออายุ 28 วันเท่ากับ 15 กก/ซม<sup>2</sup> จากการใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักพบว่ามีค่ารับแรงดึงโดยตรงที่ดีในช่วงอายุ 7 และ 28 วันเนื่องจากทรายเป็นวัสดุประสานที่มีความแข็งจึงส่งผลให้รับค่าแรงดึงโดยตรงได้ดีกว่าตะกอนประปาและถั่วลอย เมื่อใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักตัวอย่าง SL10 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 12 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วัน เมื่ออายุ 28 วัน มีค่าแรงดึง เท่ากับ 15 กก/ซม<sup>2</sup> และเมื่ออายุได้ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 14 กก/ซม<sup>2</sup> เมื่อใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างตัวอย่าง SL20 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 9 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วันเมื่ออายุ 28 วันเท่ากับ 11 กก/ซม<sup>2</sup> และเมื่ออายุ 60 วันมีค่าแรงดึงเท่ากับ 13 กก/ซม<sup>2</sup> จากผลจะเห็นตะกอนน้ำประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้จะมีค่าการรับแรงดึงโดยตรงที่น้อยที่สุด แต่ในอัตราการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าที่ดีกว่า จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตมีการเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงโดยตรง

ตัวอย่าง	แรงดึงโดยตรง (กก/ซม <sup>2</sup> )		
	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C	15	19	22
FA10	12	14	19
FA20	11	14	17
SP10	14	17	17
SP20	13	15	17
SL10	12	15	14
SL20	9	11	13



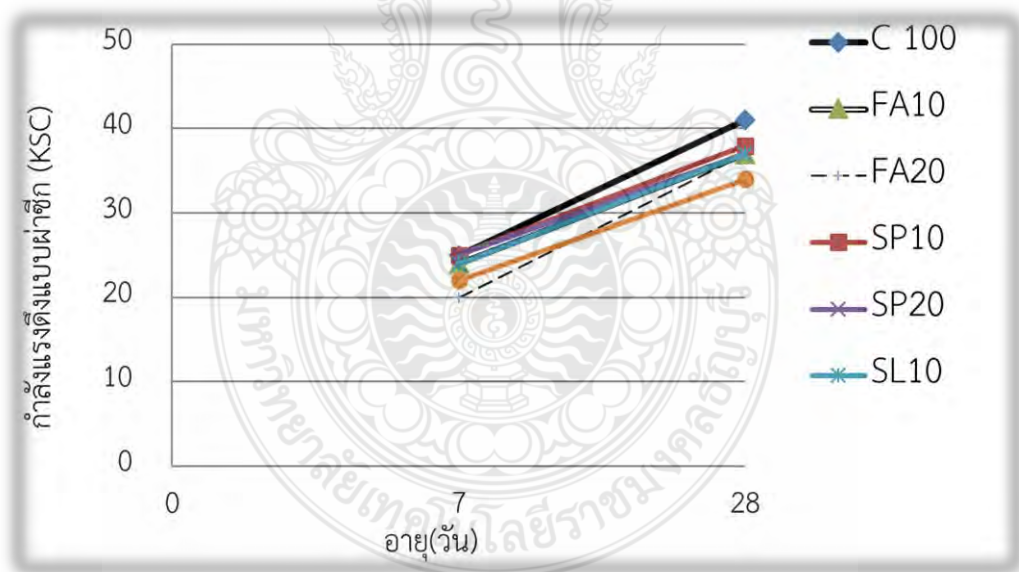
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงโดยตรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนตะกอนประปา ทราบด และถ้ำลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

#### 4.7 ผลการทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength)

จากการทดสอบตัวอย่างรูปทรงกระบอก เมื่อทำการทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต พบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 C100 มีค่าเท่ากับ 25 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วันและเพิ่มเป็น 41 กก/ซม<sup>2</sup> ที่ 28 วัน ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) มากที่สุด เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง FA10 มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) เท่ากับ 24 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่าแรงดึงเท่ากับ 37 กก/ซม<sup>2</sup> ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง FA20 มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) เท่ากับ 23 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วันเท่ากับ 37 กก/ซม<sup>2</sup> ใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SP10 มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) เท่ากับ 25 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่าแรงดึงเท่ากับ 38 กก/ซม<sup>2</sup> ใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SP20 มีค่าแรงดึงเท่ากับ 25 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วันเท่ากับ 37 กก/ซม<sup>2</sup> ใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SL 10 มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) เท่ากับ 24 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) เท่ากับ 37 กก/ซม<sup>2</sup> ใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SL 20 มีค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) เท่ากับ 22 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วันเท่ากับ 34 กก/ซม<sup>2</sup> จากผลของค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงดึงมีทิศทางเดียวกับการทดสอบวิธีแรงดึงโดยตรง แต่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ยังมีค่าน้อยอยู่เนื่องจากทดสอบแค่ที่อายุ 28 วัน การทำปฏิกิริยาปอซโซลานยังทำไม่สมบูรณ์ ผลที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีกำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) มีค่าการทดสอบที่สูงกว่าค่าการทดสอบแรงดึงโดยตรง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ตัวอย่าง	แรงดึงแบบผ่าซีก (กก/ซม <sup>2</sup> )	
	7 วัน	28 วัน
C	25	41
FA10	24	37
FA20	23	37
SP10	25	38
SP20	25	37
SI10	24	37
SI20	22	34



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงทางอ้อม โดยวิธีกำลังรับแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก ของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตะกอนประปา ทราบด และเถ้าลอยในอัตราส่วน ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

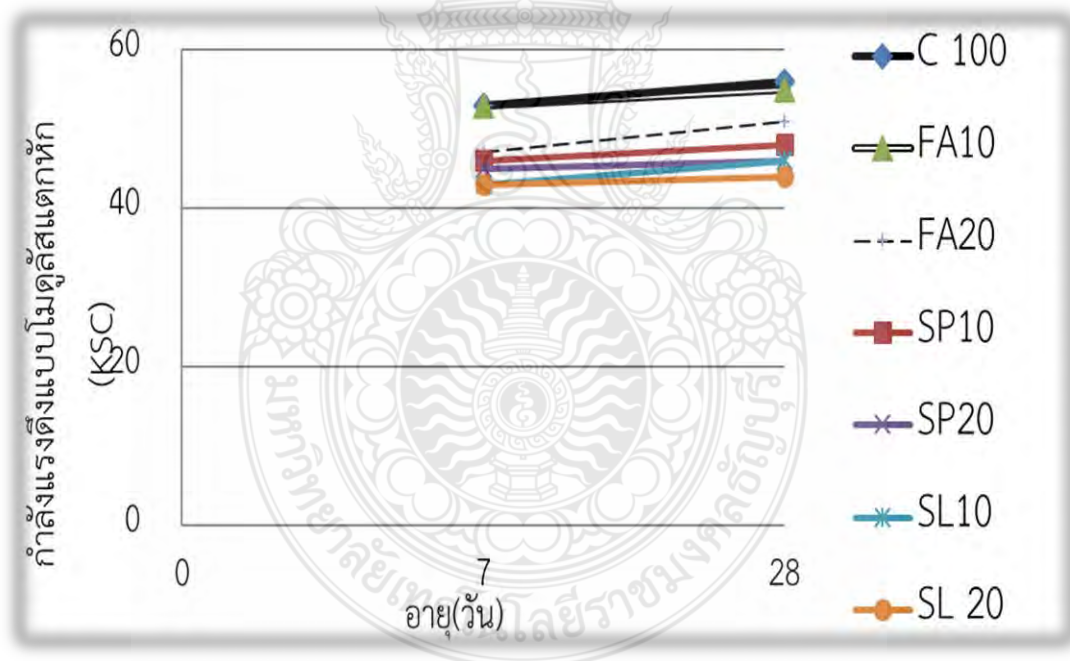
#### 4.8 ผลการทดสอบโมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture)

จากการทดสอบโดยวิธี โมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) ตัวอย่างรูปทรงคาน เมื่อทำการทดสอบ โมดูลัสแตกหักของคอนกรีตพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตัวอย่าง C100 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 53 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 วันและเพิ่มเป็น 56 กก/ชม<sup>2</sup> ที่ 28 วัน ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงดึงโดยวิธี โมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) ที่มากที่สุด เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง FA10 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 53 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 55 กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง FA20 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 47 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 51 กก/ชม<sup>2</sup> โดยตัวอย่างของการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการทดสอบที่มากกว่าตะกอนประปาและทรายบดแต่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตัวอย่าง C100 เล็กน้อย เมื่อใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SP10 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 46 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 48 กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SP20 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 45 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 46 กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SL10 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 43 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 46 กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อใช้ตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง SL 20 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 43 กก/ชม<sup>2</sup> ที่อายุ 7 และเมื่ออายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 44 กก/ชม<sup>2</sup> จากผลการใช้ทรายบดและตะกอนประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้มีผลใกล้เคียงกันแต่น้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากการทดสอบโดยวิธี โมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) จะให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงที่สุดในการทดสอบทั้งสามวิธี



ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโมดูลัสแตกหัก

ตัวอย่าง	โมดูลัสแตกหัก (กก/ซม <sup>2</sup> )	
	7 วัน	28 วัน
C	53	56
FA10	53	55
FA20	47	51
SP10	46	48
SP20	45	46
SL10	43	46
SL20	43	44

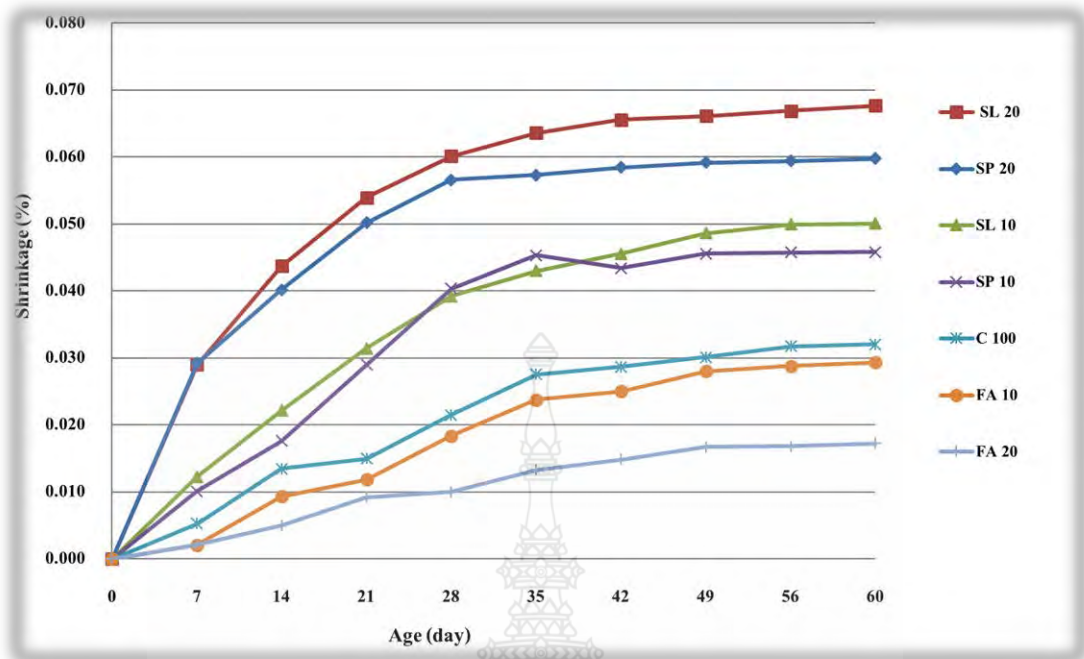


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมโดยวิธีกำลังรับแรงดิ่งโดยวิธีโมดูลัสแตกหักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ตะกอนประปา ทราบด และถ้ำลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาถึงวิธีทดสอบทั้งสามวิธี ทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength) ทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีผ่าซีก (Split Tensile Strength) และวิธี โมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) พบว่าการทดสอบโมดูลัสแตกหักจะให้ค่ามากที่สุด และการทดสอบแรงดึงโดยตรงจะให้ค่าน้อยที่สุด โดยที่อายุ 28 วัน การทดสอบโมดูลัสแตกหักมีค่าแรงดึงเท่ากับ 56 กก/ซม<sup>2</sup> การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่า 41 กก/ซม<sup>2</sup> การทดสอบแรงดึงโดยตรง 19 กก/ซม<sup>2</sup> อีกทั้งยังพบว่าในช่วงอายุ 7 วันค่าแรงดึงตัวอย่างที่ใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์จะให้ค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ตะกอนน้ำประปา และที่อายุ 28 วันการใช้ตัวอย่างทรายบดก็ยังมีค่าที่สูงกว่า เนื่องจากทรายบดเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงทำให้การยึดเกาะได้ดีกว่าตะกอนน้ำประปา

#### 4.9 การหดตัวของออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)

การหดตัวของออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) จากการพิจารณาการหดตัวของตัวอย่าง FA10 และ FA20 ดังรูปที่ 4.6 มีค่าการหดตัวต่ำ และตัวอย่างคอนกรีต SP 20 และ SL 20 จะมีค่าการหดตัวสูง และพบว่าตัวอย่างที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณมาก ยิ่งทำให้การหดตัวของออโตจีนัสลดลง การแทนที่เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้นจะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำอิสระให้แก่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มากขึ้น เนื่องจากการหดตัวของออโตจีนัสเป็นผลจากการใช้น้ำในกระบวนการของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งหมายความว่าหากมีปริมาณน้ำอิสระมากจะสามารถลดการหดตัวได้ยิ่งขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าลอยช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีต C100 ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดในระยะยาว แต่ซีเมนต์เฟลสก็มีความแข็งแรงมากขึ้นในระยะยาว ซึ่งหน่อการหดตัวของคอนกรีต

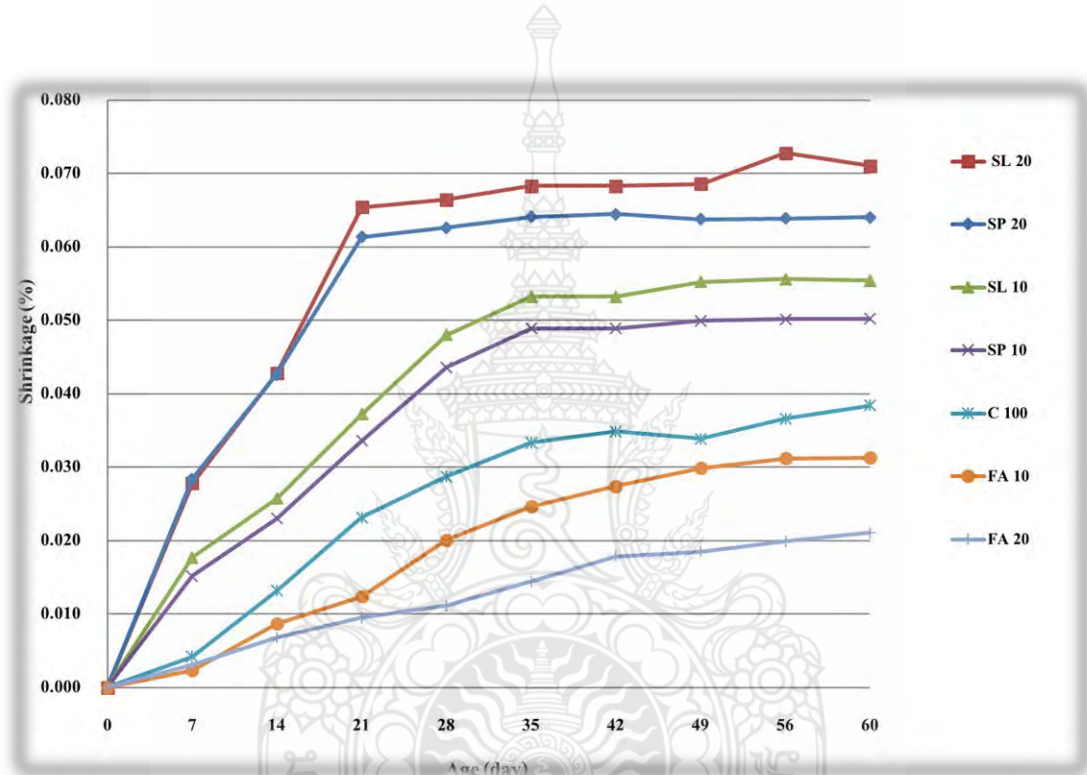


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต กับอายุของคอนกรีต ที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยถ้ำลอย ทราขบดละเอียด และตะกอนน้ำประปา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยวิธีหุ้มพลาสติก

#### 4.10 การหดตัวของคอนกรีต (Dry Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้ง (Dry Shrinkage) จากผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ตัวอย่างคอนกรีต C100 จะมีการหดตัวมากในช่วงอายุ 28 วันแรก แต่เมื่ออายุมากกว่า 28 วัน จะมีทิศทางการหดตัวที่มีอัตราการหดตัวน้อยลง สำหรับการใส่ทราขบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ โดยขนาดของทราขบดมีขนาดเท่ากับขนาดของปูนซีเมนต์ จะพบว่าการหดตัวมีค่ามากกว่าคอนกรีต C100 ทั้งการแทนที่ทราขบดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยในช่วง 28 วันแรก จะมีการหดตัวที่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ใช้ทราขบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ จึงมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมน้อยกว่าคอนกรีต C100 จึงมีน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยามากกว่าและน้ำส่วนเกินนี้ก็จะระเหยออกไปสู่ภายนอกได้มากกว่า อีกทั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่า ก็มีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ทำให้เกิดการหดตัวที่สูงกว่า แต่เมื่ออายุของตัวอย่างคอนกรีต SP10 และ SP 20 มากกว่า 28 วัน ขึ้นไปก็จะมีอัตราการหดตัวที่น้อย โดยการแทนที่ที่มากขึ้น สำหรับตัวอย่าง SL10 และ SL 20 ซึ่งใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ พบว่าทิศทางการหดตัวจะมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับตัวอย่าง SP 10 และ SP 20

สำหรับการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ จะพบว่าทิศทางของการหดตัวของตัวอย่างคอนกรีตมีทิศทางหดตัวที่น้อยลง โดยการใช้ปริมาณ เถ้าลอยที่มากขึ้นจากคอนกรีต FA 10 เป็น FA 20 ซึ่งใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ โดยในช่วงอายุ 14 วันแรกจะเกิดการสูญเสียน้ำอิสระตลอดเวลา แต่เถ้าลอยไปทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งช่วยในการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของปิติสานต์และคณะ [8] ที่พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ มีผลทำให้การหดตัวในคอนกรีตลดลง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต กับอายุของคอนกรีตที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ทราบบดละเอียด และตะกอนน้ำประปา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยวิธีบ่มในอากาศ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปราย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการวิจัยผลการทดสอบแรงดึงโดยตรงและทางอ้อม โดยมีการใช้ตะกอนน้ำประปาทรายบด และเถ้าถ่านหิน แทนที่ในปูนซีเมนต์ สรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลของระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยตะกอนประปามีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้น โดยที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีอัตราการก่อตัวที่เร็วที่สุด สำหรับระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ที่แทนที่เถ้าถ่านหินจะมีระยะเวลาการก่อตัวช้ากว่าของปูนซีเมนต์ โดยที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีการก่อตัวที่ช้าที่สุด

5.1.2 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้กำลังอัดประลัย ของคอนกรีตช่วงอายุต้นน้อยกว่าคอนกรีตปกติ แต่เมื่ออายุมากขึ้นจะมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยที่อายุ 60 วัน จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตปกติ

5.1.3 ทรายบดละเอียดและตะกอนน้ำประปา จะมีค่ากำลังอัดประลัยต่ำกว่าคอนกรีตปกติ โดยตะกอนน้ำประปาและทรายบดจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อมีการแทนที่ในปูนซีเมนต์มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงมากขึ้น โดยการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุด

5.1.4 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางตรงจะให้ค่าน้อยที่สุด และวิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมโดยวิธีค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture) จะให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่มากที่สุด ทดสอบการรับแรงดึงของคอนกรีตปกติจะให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่มากที่สุด สำหรับตะกอนประปาจะมีค่ากำลังรับแรงดึงน้อยที่สุด

5.1.5 การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีการหดตัวน้อยกว่า เมื่อเทียบกับทรายบดละเอียด และตะกอนน้ำประปา โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีการหดตัวน้อยที่สุด การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณมากขึ้นจะสามารถลดการหดตัวได้ดียิ่งขึ้น

5.1.6 การหดตัวแบบแห้ง (Dry Shrinkage) ของคอนกรีต แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 และ 20 มีการหดตัวน้อยกว่าการใช้ตะกอนน้ำประปาและทรายบด โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีการหดตัวน้อยที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย จะเพิ่มสูงขึ้นตามอายุของคอนกรีต จึงควรเพิ่มอายุการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น เพื่อให้เห็นผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน



## บรรณานุกรม

- [1] นายจตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ, “กำลังอัดของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด.” วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] จตุพล ตั้งปกาศิต แสง ทรงหมู่ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, “การศึกษาผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30 ฉบับที่ 1,
- [5] เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย และคณะ, “การศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552,
- [6] เรืองรุชดี ชีวะโรจน์ จตุพล ตั้งประกาศิต ชัย จาตุรพิทักษ์ และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, “ผลกระทบของขนาดอนุภาคเส้นใยแก้วเส้นใยแก้วต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26 ฉบับที่ 4, หน้า 295-300, 2546.
- [7] จิตรกร วงศ์เชาวลิต, “วิทยานิพนธ์เรื่องคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา.” คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2543.
- [8] ผศ.ดร.ปิตินานต์ กร้ามาต, (2553) คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินและผงหินปูน รายงานฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งบประมาณปี 2553.
- [9] Fujiwara, T., “**Relation between mix proportion and drying shrinkage of hardened cement paste, mortar and concrete,**” Concrete Libibrary of JSCE, No. 13, June 1989.
- [10] 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.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Pacheerat, N., “**Shrinkage of mortar and concrete with fly ash,**” M.Eng. Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 2001.
- [12] Barr, B., Hoseinian, S. B., and Beygi, M. A., “**Shrinkage of concrete stored in natural environments,**” Cement and Concrete Composites, No. 25, pp.19-29, 2003.
- [13] Kim J. K., and Lee, C. S., “**Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages.**” Cement and Concrete Research, No. 29, pp.1921-1927, 1999.
- [14] Sontaya Tongaroonsri, “**Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking in Concrete,**” Ph.D. Thesis., Sirindhorn International Institute of Technology and Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, Thailand, 2009.
- [15] Subsomboon, K., “**Utilization of Mae-Moh fly ash as cement replacement material to reduce autogenous shrinkage.**” M.Eng. Thesis, AIT., Bangkok, 1995.
- [16] Akkaya, Y., Ouyang, C., and Shah, S.P., “**Effect of supplementary cementitious material on shrinkage and crack development in concrete,**” Cement and Concrete Composites, No. 29, pp.117-123, 2007.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Baroghel-Bouny, V., Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A., and Rafai, N.,. **Autogenous deformations of cement pastes Part II. W/C effects, micro–macro correlations, and threshold values.** Cement and Concrete Research, No. 36, pp.123-136, 2006
- [21] Tazawa, E., and Miyazawa, S., “**Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology,**” Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, Barcelona, Spain, pp.189-168, 1993.
- [22] Sontaya Tongaroonsri. “**Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking in Concrete,**” Ph.D. Thesis., Sirindhorn International Institute of Technology and Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, Thailand, 2009.
- [23] Sudsangium, T., “**Utilization of Mae-Moh Fly Ash as Cement Replacement Material to Reduce Autogenous Shrinkage,**” Master Thesis., AIT, Bangkok, Thailand, 1993.
- [24] Tangtermsirikul, S., “**Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste,**” Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, pp.175-186, 1998.
- [25] Chan, Y.W., Liu, C.Y., and Lu, Y.S., “**Effects of Slag and Fly Ash on the Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete,**” Proceeding of the International Workshop Organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, pp.221-228, 1998.
- [26] Termkhajornki, P., Nawa, T., Nakai, M., and Saito, T., “**Effect of fly ash on autogenous shrinkage.**” Cement and Concrete Research, No. 35, pp.473-482, 2005.
- [27] Sontaya Tongaroonsri. “**Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking in Concrete,**” Ph.D. Thesis., Sirindhorn International Institute of Technology and Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, Thailand, 2009.



ภาคผนวก ก

ตารางค่ากำลังแรงดึงโดยตรง

องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด และความถ่วงจำเพาะ

คุณสมบัติทางเคมี	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ (FA)	ทราย บดละเอียด (SP)	ตะกอน น้ำประปา (SL)
SiO <sub>2</sub>	19.87	39.40	92.86	41.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.87	17.93	3.17	37.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.55	12.92	0.27	7.38
CaO	65.03	19.19	0.55	4.06
MgO	0.73	3.03	0.55	-
SO <sub>3</sub>	2.52	2.99	0.49	1.16
Na <sub>2</sub> O	0.02	1.36	0.42	0.14
K <sub>2</sub> O	0.45	2.50	0.32	1.34
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.34	-	0.76
ความละเอียดผ่านตะแกรง เบอร์ 325 (เปอร์เซ็นต์)	13.5	13.2	13.8	13.6
ความถ่วงจำเพาะ	3.10	2.29	2.65	2.65

ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ลำดับที่	คอนกรีต	ค่าการยุบตัว (ซม.)
1	C	5.0
2	FA10	6.0
3	FA20	6.5
4	SP10	5.5
5	SP20	5.0
6	S110	5.0
7	S120	5.0

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาก่อตัว

สัดส่วนของเพสต์	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
		เริ่มต้น	สุดท้าย
C	22.50	92	135
FA10	20.40	129	165
FA20	19.50	137	180
SP10	23.00	108	165
SP20	23.50	112	165
S110	23.50	77	150
S120	24.10	70	135

ตารางการหดตัวแบบอโตจีนัส

วันที่	SL 20	SP 20	SL 10	SP 10	C 100	FA 10	FA 20
0	0.000	<b>0.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.029	<b>0.029</b>	0.012	0.010	0.005	0.002	0.002
14	0.044	<b>0.040</b>	0.022	0.018	0.013	0.009	0.005
21	0.054	<b>0.050</b>	0.031	0.029	0.015	0.012	0.009
28	0.060	<b>0.057</b>	0.039	0.040	0.022	0.018	0.010
35	0.064	<b>0.057</b>	0.043	0.045	0.028	0.024	0.013
42	0.066	<b>0.058</b>	0.046	0.043	0.029	0.025	0.015
49	0.066	<b>0.059</b>	0.049	0.046	0.030	0.028	0.017
56	0.067	<b>0.059</b>	0.050	0.046	0.032	0.029	0.017
60	0.068	<b>0.060</b>	0.050	0.046	0.032	0.029	0.017

ตารางการหดตัวแบบแห้ง

วันที่	SL 20	SP 20	SL 10	SP 10	C 100	FA 10	FA 20
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.028	0.028	0.018	0.015	0.004	0.002	0.003
14	0.043	0.043	0.026	0.023	0.013	0.009	0.007
21	0.065	0.061	0.037	0.034	0.023	0.012	0.010
28	0.066	0.063	0.048	0.044	0.029	0.020	0.011
35	0.068	0.064	0.053	0.049	0.033	0.025	0.014
42	0.068	0.064	0.053	0.049	0.035	0.027	0.018
49	0.069	0.064	0.055	0.050	0.034	0.030	0.019
56	0.073	0.064	0.056	0.050	0.037	0.031	0.020
60	0.071	0.064	0.055	0.050	0.038	0.031	0.021

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายยิ่งพงษ์ หนูเนื้อ
วัน เดือน ปีเกิด	12 ตุลาคม 2523
ที่อยู่	464/239 ถ.ปัญญาอินทรา แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรโยธา บริษัท เอื้อขนส่ง จำกัด พ.ศ. 2549 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	099-4925196
Email	Ynooner@gmail.com

