

สมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย

**PROPERTIES OF CONCRETE USING DUST STONE  
TO REPLACE SAND**

สุวรรณ อ่อนเฉียบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

สุวรรณ อ่อนเจียม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย  
Properties of Concrete Using Dust Stone to Replace Sand  
ชื่อ - นามสกุล นายสุวรรณ อ่อนเฉียบ  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.  
ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... จงพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการ  
(อาจารย์จงพล ตั้งปกาศิต, ปร.ค.)

.....  กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวิชัย สาราณวนิช, ปร.ค.)

.....  กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญชัย พึ่งไผ่งาม, ปร.ค.)

.....  กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย
ชื่อ - นามสกุล	นายสุวรรณ อ่อนเจียม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2561

## บทคัดย่อ

มวลรวมของคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด เมื่อมีการนำมาใช้ก็ย่อมต้องมีจำนวนลดลงตามกาลเวลา ส่วนหินฝุ่นเป็นของเหลือ (by product) จากกระบวนการโม่หิน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือ เป็นไปได้ในการนำมาใช้ทดแทนมวลรวมของคอนกรีตได้

วิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นการศึกษาสมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายบางส่วน โดยใช้หินฝุ่นที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 (SD) และหินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (OD) แล้วศึกษาค่าการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) กำลังดึงแบบผ่าซีก ( $\sigma_t$ ) ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต รวมทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวโดยรวม และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

จากการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD มีค่ามากกว่าของ OD ส่วนการก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD มีค่าไม่แตกต่าง ในขณะที่ของหินฝุ่น OD มีแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน สำหรับ  $f_c'$  และ  $\sigma_t$  ของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย มีค่ามากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดย  $f_c'$  และ  $\sigma_t$  ของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD นอกจากนี้พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย มีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน โดยการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์หินฝุ่น SD และ OD มีค่าไม่แตกต่างกัน สำหรับการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ และควมลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นในคอนกรีต เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย มีค่าไม่แตกต่างกับของมอร์ตาร์/คอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน สุดท้ายพบว่า ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD มีค่าน้อยกว่าในขณะของหินฝุ่น OD มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

**คำสำคัญ :** หินฝุ่น ทราย สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต ความคงทนของคอนกรีต

<b>Thesis Title</b>	Properties of Concrete Using Dust Stone to Replace Sand
<b>Name - Surname</b>	Mr. Suwan Ornceb
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2018

## ABSTRACT

The aggregate of concrete is a natural material that is limited. When it is used continuously, it is these decreased over time. Dust stone, which is an inert material, is by-product of the milling process. It is possible to use it to replace the aggregate of concrete.

This thesis aimed to study the properties of concrete using dust stone to replace partially sand, dust stone having gradation according to ASTM C33 (SD) and dust stone from the source passing a no.4 sieve (OD). The slump, setting time, compressive strength, and splitting tensile strength of concrete were considered. Autogenous and total shrinkages of mortar, carbonation and chloride penetration resistance of concrete and the expansion in sodium sulfate solution of mortar were investigated.

The result showed that the slump of concrete when using dust stone, both SD and OD, was less than that of concrete with plain sand. The value of slump of SD concrete was greater than that of OD concrete. Moreover, the setting time of SD concrete was not significantly different, while the setting time of OD concrete tends to be longer when compared to that of concrete with plain sand. For compressive strength and splitting tensile strength of concrete when using dust stone instead of sand, there were had higher values of concrete with plain sand. The compressive strength and splitting tensile strength of SD concrete were more likely that of the OD concrete. In addition, the autogenous of dust stone mortar was less likely than that of mortar with plain sand, and the autogenous of SD mortar and OD mortar was not significantly different. For the mortar/concrete using dust stone replaced with sand, the total shrinkage of mortar, the expansion in sodium sulfate solution of mortar and the carbonation depth of concrete were not different from that of mortar/concrete with plain sand. Finally, it was found that the chloride penetration resistance of SD concrete was lower, while its OD concrete was more valuable when compared to that of plain sand concrete.

**Keywords:** dust stone, sand, basic properties of concrete, durability of concrete

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากการอนุเคราะห์และให้คำแนะนำต่าง ๆ พร้อมทั้งการให้ความสนับสนุนเป็นอย่างดีจากหลายฝ่าย ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ปิติศักดิ์ กร้ามาตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีชัย สำราญวานิช ที่เสียสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งส่งผลให้วิทยานิพนธ์บรรลุตามจุดประสงค์และเป้าหมายที่ตั้งไว้ อีกทั้งปลูกฝังแนวคิดแนวทางปฏิบัติตนเพื่อให้เป็นบุคลากรที่ดีของสังคมต่อไป และขอขอบพระคุณบริษัทกาญจนาสิลาภัณฑ์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อนิกร อ่อนเจียม และคุณแม่แหว อ่อนเจียม ที่อดทนด้วยความยากลำบากในการเลี้ยงดู สั่งเสีย และคอยอบรมสั่งสอนให้ได้เล่าเรียน ตลอดจนให้กำลังใจที่ดีในการดำเนินชีวิต และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด จนมีโอกาสอบการศึกษาถึงระดับนี้

สุวรรณ อ่อนเจียม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	3
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	4
กิตติกรรมประกาศ.....	5
สารบัญ.....	6
สารบัญตาราง.....	8
สารบัญรูป.....	9
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	11
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์.....	14
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	44
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	44
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	52
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	55
4.2 สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต.....	56
4.3 สมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีต.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	75

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางแสดงสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	76
ภาคผนวก ข ตารางแสดงสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต .....	85
ภาคผนวก ค ตารางแสดงสมบัติด้านความคงทนของมอร์ต้าร์และคอนกรีต .....	112
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	119
ประวัติผู้เขียน .....	143



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอไรต์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม.....	33
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำทะเล.....	34
ตารางที่ 2.3 ข้อเสนอแนะสำหรับคอนกรีตน้ำหนัปกติในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต .....	40
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนิส การหดตัวโดยรวม และการขยายตัวในสารละลายซัลเฟต .....	53
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของการทดสอบค่ายุบตัว กำลังอัดประลัย การแทรกซึมของ คาร์บอนขึ้น และการแทรกซึมของคลอไรด์.....	54
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย หินฝุ่นSD และหินฝุ่นOD .....	55
ตารางที่ 4.2 หน่วยน้ำหนักของทราย หินฝุ่นSD และหินฝุ่นOD .....	55
ตารางที่ 4.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต.....	57
ตารางที่ 4.4 การก่อตัวของคอนกรีต.....	58
ตารางที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต.....	60
ตารางที่ 4.6 กำลังดึงแบบผ่าซีก.....	63
ตารางที่ 4.7 สรุปเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของมอร์ตาร์/คอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น กับเมื่อใช้ทรายล้วน .....	71

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัด.....	23
รูปที่ 2.2 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength).....	25
รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดแรงดันและการบีบอัดรอบๆ ช่องว่างกะปิลารี .....	27
รูปที่ 2.4 กระบวนการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต.....	29
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีต.....	32
รูปที่ 2.6 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต.....	36
รูปที่ 3.1 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine).....	45
รูปที่ 3.2 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength).....	46
รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดหาค่าการหดตัวของมอร์ตาร์เทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวมาตรฐาน ....	47
รูปที่ 3.4 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์. ...	49
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างคอนกรีตเสร็จแล้วบ่มด้วยน้ำตามอายุ.....	49
รูปที่ 3.6 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และที่เติมสารละลาย.....	50
รูปที่ 3.7 การหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต .....	51
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่ค้างตะแกรงมาตรฐานสะสมกับขนาดของตะแกรง ...	56
รูปที่ 4.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต .....	57
รูปที่ 4.3 การก่อตัวของคอนกรีต .....	59
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต .....	61
รูปที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน .....	62
รูปที่ 4.6 กำลังดึงผ่าซีกกับอายุของคอนกรีต .....	64
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจิน์สกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่น แทนที่ทราย.....	65
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจิน์สกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้ หินฝุ่น SD และ OD แทนที่ทราย .....	66
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย..	67



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ความถี่การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีต .....	68
รูปที่ 4.11 ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมทรายล้วนและคอนกรีตผสมหิน ฝุ่นชนิด SD และ OD แทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 56 วัน .....	69
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของ มอร์ตาร์ .....	70



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminium oxide
$\text{CaCO}_3$	Calcium Carbonate
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Calcium hydroxide
$\text{CaO}$	Calcium Oxide
$\text{CaSO}_4$	Calcium sulfate
$\text{C}_2\text{S}$	Dicalcium Silicate
$\text{C}_3\text{A}$	Tricalcium Aluminate
$\text{C}_3\text{S}$	Tricalcium Silicate
$\text{C}_4\text{AF}$	Tetracalcium Alumino Ferrite
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferric Oxide
$\text{H}_2\text{O}$	Water
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Sulfuric Acid
$\text{MgO}$	Magnesium Oxide
$\text{MgCO}_3$	Magnesium Carbonate
$\text{MgSO}_4$	Magnesium Sulfate
$\text{NaCl}$	Sodium Chloride
$\text{NaOH}$	Sodium Hydroxide
$\text{Na}_2\text{O}$	Sodium Oxide
$\text{NaSO}_4$	Sodium Sulfate
$\text{SiO}_2$	Silicon Dioxide
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.S.	British Standards
CAH	Calcium Aluminate Hydrates
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrates
CH	Calcium hydroxide
CSH	Calcium Silicate Hydrate

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
MH	Magnesium Hydroxide
M-S-H	Magnesium Silicate Hydrate



# บทที่ 1

## บทนำ

สำหรับบทนำนั้นเป็นการกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันงานด้านวิศวกรรมโยธาเป็นพื้นฐานสำคัญของประเทศที่กำลังพัฒนา เช่น งานก่อสร้างถนน งานก่อสร้างอาคารบ้านเรือน งานก่อสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำ งานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น งานก่อสร้างเหล่านี้จะใช้คอนกรีตเป็นส่วนมากในการก่อสร้าง เนื่องจากคอนกรีตนั้นสามารถหล่อขึ้นรูปร่างและออกแบบให้รับกำลังตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีความคงทนถาวรและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธานั้น โดยทั่วไปประกอบด้วย ปูนซีเมนต์มวลรวม และน้ำ เป็นส่วนผสม ในส่วนมวลรวมผสมหรือวัสดุผสม (Aggregate) จึงเป็นวัสดุเนื้อย่อย ได้แก่ หิน ทราย กรวด จึงเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมนั้นมีปริมาตรร้อยละ 70-80 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด [1] ซึ่งมวลรวมเหล่านี้เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด เมื่อมีการนำมาใช้ก็ย่อมต้องมีจำนวนลดลงตามกาลเวลา และมีราคาที่สูงขึ้นด้วย

การนำหินที่อยู่ตามธรรมชาติมาใช้นั้นเช่น ใช้เป็นมวลรวม จะต้องมีการกระบวนการแปรรูปให้มีขนาดและรูปร่างเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน โดยหินก่อสร้างขนาดต่างๆที่โรงโม่ส่วนใหญ่จะทำการผลิตประกอบด้วย หิน 1 นิ้ว หินย่อย 3/4 นิ้ว หินเกล็ด (หิน 3/8 นิ้ว) และหินฝุ่น (หิน 3/16 นิ้ว) แต่ทว่าหินฝุ่นที่ได้จากกระบวนการแปรรูปหินจากธรรมชาตินั้น มักจะเป็นผลผลิตของโรงโม่ที่มีขนาดจำหน่ายต่ำ เมื่อเทียบกับผลผลิตทั้งหมดในแต่ละครั้งของโรงโม่หิน จึงเป็นภาระให้กับผู้ประกอบการที่จะต้องหาพื้นที่เก็บกอง และเสียค่าใช้จ่ายในการขนย้าย ทำให้ผู้ประกอบการหลายรายถือว่าหินฝุ่น เป็นวัสดุเหลือใช้ที่สร้างภาระและค่าใช้จ่าย

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของการใช้หินฝุ่นแทนที่ในมวลรวมละเอียด ต่อสมบัติเบื้องต้นและความคงทนของคอนกรีต โดยสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตประกอบด้วย ค่าการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีก ส่วนสมบัติด้านความคงทนประกอบด้วย การหดตัวแบบบอโตจีนัสและโดยรวมของมอร์ตาร์ ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ เพื่อพัฒนานำเอาหินฝุ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของหินปูนที่ใช้ในการศึกษา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของหินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของหินปูนต่อคุณสมบัติด้านความคงทนคอนกรีตเมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษานี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 1.3.2 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ หน่วงน้ำหนัก และขนาดคละ
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย ได้แก่ ค่าการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีก
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ได้แก่ การหดตัวแบบออโตจีนัสและโดยรวมของมอร์ตาร์ ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์
- 1.3.5 ศึกษาผลกระทบของหินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.3.6 ศึกษาผลกระทบของหินปูนต่อสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของหินปูนที่ใช้ในการศึกษา
- 1.4.2 เพื่อทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.4.3 เพื่อทราบถึงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนผสมที่ทราย
- 1.4.4 เพื่อทราบถึงผลกระทบของหินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.4.5 เพื่อทราบถึงผลกระทบของหินปูนต่อคุณสมบัติด้านความคงทนคอนกรีต เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย
- 1.4.6 เพื่อพัฒนานำเอาหินปูนมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ปูนซีเมนต์ [1]

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้

##### 2.1.1.1 ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกันทำให้ปฏิกริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจากปฏิกริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวของน้ำ

##### 1. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate,  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1



##### 2. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกริยากับน้ำช้ากว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกริยาเหมือนกัน คือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

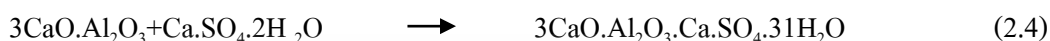


##### 3. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมินต

ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมินตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3



เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตก่อให้เกิดขึ้นบางๆ ของแตริงไจท์ (Ettringite :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{SO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4



#### 4. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ที่มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{S}$  กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของแตริงไจท์และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเฟสที่มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_4\text{AF}$  ทำให้แตริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต และเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้น จะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

##### 2.1.2 มวลรวม [1]

คุณสมบัติของมวลรวม (Aggregate) หลากๆ อย่างที่ได้มาจากคุณสมบัติของหินต้นกำเนิด แต่ก็มีคุณสมบัติบางอย่างที่มีเฉพาะในมวลรวม คุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่ ขนาด รูปร่างและลักษณะ ผิว และปริมาณความชื้น คุณสมบัติของมวลรวมทั้งที่ได้มาจากคุณสมบัติของหินต้นกำเนิด และคุณสมบัติประจำตัวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อ ความสามารถทำงานได้ (Workability) กำลังและความคงทนของคอนกรีต ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก คุณสมบัติของมวลรวมเหล่านี้มีความสำคัญต่อการออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพตามต้องการ

### 2.1.2.1 รูปร่างและลักษณะผิว

มวลรวมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมและผิวเรียบจะมีความต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่น นอกจากนี้ยังมีการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมต่ำ จึงทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดี สำหรับมวลรวมที่มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนเหลี่ยมและผิวหยาบจะมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง ทำให้คอนกรีตต้องการซีเมนต์เพสต์เพื่อเคลือบผิวมากขึ้น และความเป็นเหลี่ยมยังทำให้เกิดการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ต่ำ รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมละเอียดมีความสำคัญต่อความต้องการน้ำของส่วนผสมมวลรวมละเอียดที่มีช่องว่างอยู่มากจะมีการดูดน้ำมากทำให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการน้ำสูงขึ้น

รูปร่างและลักษณะผิวมีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยเฉพาะคอนกรีตกำลังสูง มวลรวมก้อนเหลี่ยมและหยาบมีพื้นที่ผิวสูง ดังนั้นจึงมีพื้นที่สำหรับการยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ผิวที่หยาบจะทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น และให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้นด้วย

### 2.1.2.2 ความชื้นและการดูดน้ำ

ในมวลรวมมีช่องว่างเล็กๆ ที่น้ำสามารถไหลเข้าหรือออกได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดน้ำได้ มวลรวมที่กองเก็บในสถานที่ต่างกันไปจะมีปริมาณน้ำต่างกัน ปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต ทำให้น้ำที่เหลือในส่วนผสมน้อยกว่าที่ต้องการ ในทางกลับกันถ้ามวลรวมมีน้ำมากเกินไปก็คืออยู่ในสภาพเปียกชื้น น้ำส่วนเกินจะทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่าที่ต้องการ

ในการผสมคอนกรีตโดยใช้มวลรวมแห้ง มวลรวมแห้งจะดูดน้ำทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถทำงานได้ลดลง ดังนั้นเพื่อให้ได้ความสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการต้องการปรับปริมาณน้ำของมวลรวมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ถ้ามวลรวมแห้งปริมาณน้ำที่ใส่ในส่วนผสมต้องเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยการดูดน้ำของมวลรวม โดยทั่วไปแล้วมวลรวมที่แห้งในอากาศสามารถดูดน้ำได้ไม่เกินร้อยละ 1

### 2.1.2.3 การฟองตัวของทราย

ความชื้นในทรายทำให้เกิดการฟองตัวของทราย แรงดึงผิวของน้ำที่ผิวของทรายสามารถทำให้เม็ดทรายอยู่ห่างจากกันเป็นผลให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นมากจะทำให้แรงดึงผิวของน้ำหมดไปและปริมาตรของทรายจะลดลงเหลือเท่าเดิม ดังนั้นปริมาตรของทรายแห้งมากและทรายเปียกมากจึงมีค่าเท่ากัน



#### 2.1.2.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) โดยทั่วไปหมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัตถุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุนั้น แต่เนื่องจากมวลรวมมีโพรงที่น้ำซึมผ่านได้และโพรงที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นปริมาตรของมวลรวมจึงมีอยู่หลายความหมายทำให้ความถ่วงจำเพาะมีหลายค่าเช่นกันความถ่วงจำเพาะที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 ค่า คือ

1. ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ (Absolute specific gravity)
2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)
3. ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)

ปริมาณสำหรับนำมาคิดความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ เป็นปริมาตรของเนื้อมวลรวมเท่านั้นในการหาความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์จึงจำเป็นต้องบดมวลรวมให้ละเอียดเพื่อขจัดโพรงภายในเนื้อมวลรวมออกให้หมด โดยปกติแล้วในงาคอนกรีตไม่มีความจำเป็นต้องรู้ค่าความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์ถ้ารวมปริมาตรของเนื้อมวลรวมกับโพรงที่น้ำซึมผ่านไม่ในการคำนวณ ความถ่วงจำเพาะที่ได้จะเป็นความถ่วงจำเพาะปรากฏ และคิดปริมาณของเนื้อมวลรวมกับ โพรงทั้งหมด ความจำเพาะที่ได้จะเป็นความถ่วงจำเพาะรวม

ความถ่วงจำเพาะที่ใช้กันมีอยู่ 2 ค่า คือ เมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอบแห้งละเมื่อมวลรวมอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง ในการคำนวณส่วนผสมของคอนกรีตจะใช้น้ำหนักของมวลรวมที่อิมตัวผิวแห้งดังนั้นความถ่วงจำเพาะรวมที่อิมตัวผิวแห้งจึงเป็นที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าความถ่วงจำเพาะอีก 2 แบบ

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดใช้วิธีแทนที่มวลรวมละเอียดในน้ำค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่ใช้กันทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 2.7 มวลรวมที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าที่จะเป็นหินอัคนีที่มีเนื้อแน่นได้แก่ หินบะซอลต์ แกรนิตและไดโอไรต์ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 ถึง 2.9

#### 2.1.2.5 หน่วยน้ำหนัก

หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของมวลรวมคือ น้ำหนักของมวลรวมที่บรรจุเต็มภาชนะหนึ่งหน่วยปริมาตร และหน่วยน้ำหนักนี้ใช้สำหรับเปลี่ยนน้ำหนักของมวลรวมเป็นปริมาตรในการคำนวณสัดส่วนผสม

หน่วยน้ำหนักขึ้นอยู่กับการกระจายขนาด รูปร่างของมวลรวม และสภาพการอัดแน่น ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมปกติมีค่าระหว่าง 1,450 ถึง 1,750 กก./ม.<sup>3</sup>

การผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเข้าด้วยกันทำให้ช่องว่างลดลงและมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ช่องว่างต่ำสุดและหน่วยน้ำหนักสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อมีมวลรวมละเอียดประมาณร้อยละ 35 ถึง 40 ของมวลรวมทั้งหมด

#### 2.1.2.6 กำลังและความแข็ง

ความแข็งแรงของมวลรวมไม่ค่อยมีผลต่อกำลังของคอนกรีตมากนัก เนื่องจากมวลรวมส่วนมากมีกำลังและแข็งแรงสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มาก แต่ความแข็งแรงของมวลรวมจะมีผลต่อความมีเสถียรภาพของปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งได้แก่ การเสีรูปร่างภายใต้แรงกระทำ การคืบ และการหดตัวแห้ง

#### 2.1.2.7 ขนาดคละ (Gradation)

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดคละกันดีจะมีส่วนผสมที่เข้ากันสม่ำเสมอ เทเข้าแบบได้ง่ายไม่เกิดการแยกตัว ทำให้แน่นได้ง่าย การปาดแต่งผิวหน้า กำลังอัดและความทนทานยังเป็นไปตามข้อกำหนด

ในทางปฏิบัติได้แบ่งมวลรวมออกเป็น 2 ประเภท คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบหมายถึงมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของแรงเบอร์ 4 ส่วนมวลรวมละเอียดคือมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างของแรงเบอร์ 4 มวลรวมที่มีขนาดคละดีจะทำให้ช่องว่างเหลือน้อยที่สุดทำให้ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุดซึ่งช่วยให้คอนกรีตมีราคาต่ำลงได้ คอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดมากหรือหยาบมากต้องออกแบบส่วนผสมเป็นพิเศษ การใช้ทรายละเอียดอาจทำให้ขนาดคละของมวลรวมเป็นแบบข้ามขนาดและทำให้เกิดการแยกตัวได้ง่าย ส่วนทรายที่หยาบมากจะทำให้ส่วนผสมกระด้างและควรเพิ่มปริมาณทรายเพื่อให้ความสามารถทำงานได้ดีขึ้น

##### 1. ค่าความละเอียด (Fineness Modulus) , (F.M.)

โมดูลัสความละเอียดเป็นค่าที่บอกความละเอียดของทรายหาได้โดยการรวมค่าเปอร์เซ็นต์ค้างสะสม (Cumulative Percentages Retained) บนตะแกรงเบอร์ 4,8,16,30, 50 และ 100 แล้วหารด้วย 100

- (1) ทรายสำหรับผลิตคอนกรีต ควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.2 - 3.2
- (2) ค่า F.M. น้อย (F.M. 2.2) แสดงว่า ทรายละเอียด
- (3) ค่า F.M. มาก (F.M. 3.2) แสดงว่า ทรายหยาบ
- (4) ค่า F.M. ที่เหมาะกับงานคอนกรีต = 2.7

ทรายที่มีความละเอียด (F.M. 2.2) จำเป็นต้องใช้จำนวนมากเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้ (Workability) ที่เท่ากันเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า เมื่อน้ำหนักเท่ากันถ้าทรายมีความหยาบมากขึ้นไป (F.M. 3.2) ก็จะทำให้ความสามารถในการแทรกประสานเข้าไปในช่องระหว่างมวลรวมหยาบไม่ดีพอ ต้องใช้ปริมาณเพสต์เพื่อเข้าไปแทนที่ช่องว่างมากขึ้นอันทำให้คอนกรีตที่ได้มีราคาสูงขึ้นด้วย

## 2. ส่วนละเอียดของงมวบรวม

ส่วนผสมคอนกรีตควรประกอบด้วยทรายที่มีส่วนละเอียดผ่านแรงเบอร์ 50 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 และผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ถึง 5 ส่วนละเอียดเหล่านี้ทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้และเกาะตัวกันดีขึ้น แต่ที่สำคัญคือต้องไม่มีอนุภาคขนาดผ่านแรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 5 เพราะอนุภาคเหล่านี้ต้องการน้ำมากและมักประกอบด้วยดินเหนียวซึ่งมีผลเสียต่อคุณสมบัติในการรับแรงของคอนกรีต

### 2.1.2.8 ความคงทนของมวลรวม

ความคงทนของมวลรวมมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมากเพราะมวลรวมเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ในคอนกรีต

#### 1. ความคงทนทางกายภาพ

##### (1) การคงตัว

การไม่คงตัวของมวลรวมสามารถทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงปริมาตรอาจเกิดจากการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกันภายในมวลรวมหรือจากการเปียกและแห้งสลับกัน

##### (2) ความทนทานต่อการขัดสี

ในงานคอนกรีตบางชนิด เช่น พื้นผิวคอนกรีตที่มีการสัญจรมากและพื้นผิวถนน ความคงทนต่อการขัดสี (Wear resistance) ของผิวจราจรมีความสำคัญ มวลรวมที่ใช้ควรมีความแข็งแรงทนทานต่อการขัดสี

#### 2. ความคงทนทางเคมี

##### (1) ปฏิกิริยาอัลคาไลกับซิลิกา

ปฏิกิริยาอัลคาไลในปูนซีเมนต์กับซิลิกาในมวลรวมเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกร้าวอย่างมากในคอนกรีตและนำไปสู่การวิบัติ ซิลิกาในมวลรวมที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับสารอัลคาไลได้อัลคาไลซิลิกาเจล (Alkali-Silica Gel) ซึ่งสามารถดูดน้ำและขยายตัวได้มาก การขยายตัวถ้ามีมากพอจะนำไปสู่การแตกร้าวของซีเมนต์เพสต์โดยรอบมวลรวม

##### (2) ปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนต

ปฏิกิริยาอัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali-Carbonate Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับสารคาร์บอเนต ในมวลรวมที่เป็นหินปูนบางชนิด เป็นปฏิกิริยาทำให้เกิดการขยายตัวและทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายได้

### 2.1.2.9 สารที่เป็นอันตรายในมวลรวม

#### 1. สารเจือปน

สารเจือปนหรือสิ่งเจือปนที่ติดมากับมวลรวมส่วนมากเป็นอินทรีย์สารที่พบกันทั่วไปเป็นสารที่มาจากพืชที่เน่าและสลายตัว ส่วนมากเป็นจำพวกกรดแทนนิก (Tannic Acid) อินทรีย์สารพวกนี้พบในมวลรวมละเอียดมากกว่าที่จะพบในมวลรวมหยาบ

#### 2. วัสดุละเอียด

วัสดุละเอียดที่มากับมวลรวมเป็นวัสดุจำพวกดินเหนียว ทรายแป้ง หรืออาจเป็นฝุ่นของหิน มีขนาดเล็กสามารถผ่านร็องเบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) วัสดุจำพวกนี้ทำให้คอนกรีตต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้วัสดุละเอียดยังสามารถเกาะกับผิวของมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า และทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์เสียไป ทรายที่มีส่วนละเอียดมากหรือทรายขี้เป็ดจะทำให้กำลังรับแรงลดลงได้อย่างมาก

#### 3. อนุภาคไม่คงตัว

อนุภาคที่ไม่คงตัวที่มีน้ำหนักเบา ได้แก่ หินดินดาน ก้อนดินเหนียว เศษไม้ และถ่านหิน อนุภาคเหล่านี้สามารถทำให้ผิวคอนกรีตเป็นรอยร้าวและแตกเป็นหลุม

### 2.1.3 สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต

ในงานคอนกรีตใดๆ คอนกรีตสดต้องมีความชื้นเหมาะสมมีความสามารถนำไปเทเข้าแบบได้ดี (Workability) ไม่มีการแยกตัวของวัสดุผสมในขณะลำเลียงและเทคอนกรีต มีระยะเวลาก่อตัวที่นานพอที่จะทำงานได้ และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ต้องมีกำลังรับแรงตามที่ต้องการ มีเนื้อที่แน่นสม่ำเสมอ สิ่งต่างๆดังกล่าวเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตที่ต้องการเพื่อให้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีคุณภาพตามที่ต้องการ

#### 2.1.3.1 ความสามารถเทได้ [2]

ความสามารถเทได้ (Workability) หมายถึงการที่คอนกรีตไหลเข้าแบบได้ดี ทำให้แน่นตัวได้ง่าย และคอนกรีตที่หล่อได้ปราศจากรูโพรงต่างๆ กล่าวคือช่องว่างระหว่างวัสดุผสมจะต้องมีซีเมนต์เพสต์บรรจุเต็ม เหล็กเสริมต้องมีคอนกรีตหุ้มเป็นอย่างดี และไม่มีการแยกตัวของวัสดุผสม ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ซึ่งอยู่ในเทอมของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กล่าวคือถ้าใช้น้ำมากเกินไปคอนกรีตจะเหลวแลเทลงแบบได้ง่ายก็จริง แต่กำลังความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง เนื่องจากเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีโพรงหรือมีพรุนมาก

2. รูปร่างและส่วนขนาดคละของวัสดุผสม ถ้าวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้มีความสามารถเทได้ดีกว่าวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยม

3. ปริมาณซีเมนต์และชนิดของซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ถ้าใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้น

4. ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศ ถ้าใช้ในปริมาณที่พอเหมาะคอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ง่าย แต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง อีกทั้งความคงทนก็มิได้เพิ่มขึ้นอีก

5. สารผสมเพิ่ม สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำและยืดเวลาการก่อตัว เช่น Hydrated Lime, Bentonite และ Fly Ash จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้น

6. เวลาและอุณหภูมิ ถ้าทั้งคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ ใช้นานเกิน 15 นาที คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ต่ำลง หรืออาจจะแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยเกินไป

#### 2.1.3.2 ระยะเวลาการก่อตัว [3]

การก่อตัวของคอนกรีตเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนคอนกรีตแข็งตัว ดังนั้นระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตจึงเป็นค่าที่กำหนดขึ้นโดยอาศัยความแข็งแรงของมอร์ตาร์ในการต้านทานการทะลุทะลวงของเข็มทดสอบ ซึ่งระบุว่ามอร์ตาร์ที่ร้อนจากคอนกรีตสดมีการก่อตัวระยะต้นและปลาย เมื่อมอร์ตาร์มีความสามารถต้านทานการทะลุทะลวงได้เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ โดยเวลาเริ่มต้นของการนับคือเวลาที่น้ำสัมผัสกับปูนซีเมนต์เป็นต้นไป

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีหลายอย่าง เช่น ปริมาณน้ำ ชนิดของปูนซีเมนต์ การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่หรือเพิ่มเข้าไปในปูนซีเมนต์ ชนิดของน้ำยาผสมคอนกรีต ความชื้น และอุณหภูมิที่ทดสอบ เป็นต้น

#### 2.1.3.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต [2]

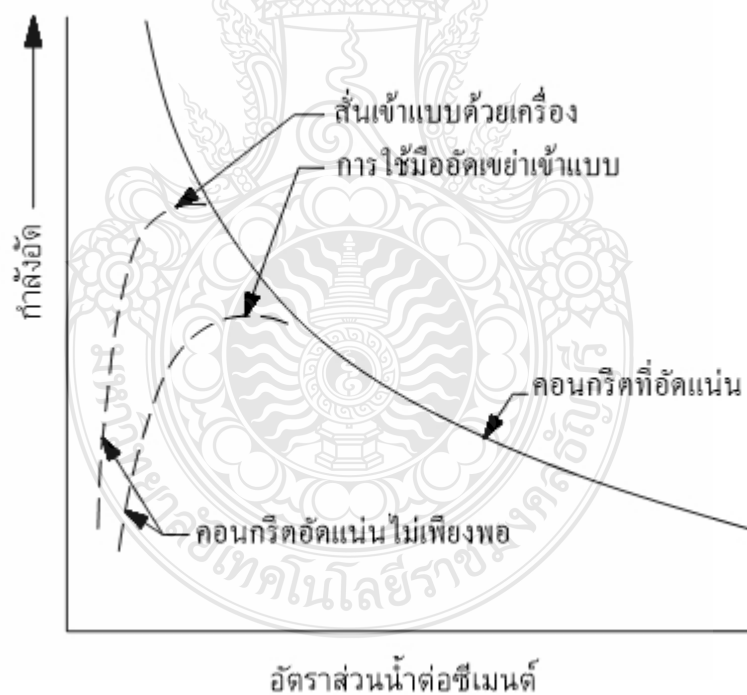
กำลังอัดถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะกำลังของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้โดยตรง เข้าใจง่าย และทดสอบได้ง่ายเช่นกันในบางกรณีคุณสมบัติอย่างอื่น เช่น ความคงทนต่อการกัดกร่อนหรือการทึบน้ำ อาจมีความสำคัญกว่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนต่อคอนกรีตรุนแรง แต่ในทางปฏิบัติ พบว่าคอนกรีตที่รับกำลังได้ดีจะมีคุณสมบัติด้านอื่นดีด้วย

### 1. ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต

มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์หรือ อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสาน (ในกรณีผสมวัสดุปอซโซลาน ) อัตราส่วนเจลดต่อ ปริมาตรอายุของคอนกรีตชนิดของปูนซีเมนต์ชนิดของมวลรวมวิธีการบ่มคอนกรีต เป็นต้นนอกจากนี้ การทำ คอนกรีตให้แน่นมี ความสำคัญมากและส่งผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีต การที่คอนกรีตมี ฟองอากาศหรือโพรงมากจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตและกำลังลดลง ดังนั้นต้องกระทุ้ง หรือ เขย่าคอนกรีตสดให้มีความหนาแน่นสูงๆ เพื่อลดฟองอากาศในคอนกรีต

#### (1) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

โดยทั่วไปแล้วกำลังของคอนกรีตที่อายุเท่ากันผ่านการบ่มและการทำให้ แน่นเหมือนกันจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัด [2]

(2) ชนิดของปูนซีเมนต์

ขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์และขนาดเม็ดปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ที่มีการบดละเอียดเม็ดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสจะมากทำปฏิกิริยาได้เร็ว ทำให้สามารถรับกำลังอัด ได้สูงในระยะเวลาเร็ว

(3) คุณรูปของหิน – ทราย

หิน – ทราย ที่เหมาะสมในการทำคอนกรีต และให้กำลังอัดสูงมีลักษณะดังนี้ คือ มีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทกและการสึกกร่อน คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี มีรูปร่างเป็นแฉ่งเหลี่ยมคม แต่ไม่เป็นแผ่นแบนหรือยาวเรียว และมีความสะอาด

(4) อัตราส่วนของหิน – ทราย

จากการทำ Trial Mixed พบว่าอัตราส่วนของ หิน-ทราย ที่ ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงและสามารถทำงานได้ (Workability) อยู่ในช่วง 0.4 – 0.5 (S/A) กรณีที่ทรายมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตมีลักษณะสีแดง ค่ารับกำลังอัดจะต่ำถึงแม้ว่าการทำงานจะง่ายก็จริงกรณีที่หินมากเกินไป คอนกรีตที่ได้จะมีสีออกไปทางสีขาวค่ารับกำลังอัดจะสูง แต่สำหรับการทำงานหน้างานจะยาก เช่น การเทคอนกรีตที่มีลักษณะหน้าตัดคานแคบ หรืองานที่ใช้ Slump คอนกรีตอาจเกิดการแยกตัว (Segregate) ได้ง่าย

(5) น้ำยาผสมคอนกรีต

ขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำยาที่ใช้โดยทั่วไปแล้วน้ำยา Type D (Plasticizer) และน้ำยา Type G (Super Plasticizer) จะส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้สูงขึ้นที่ Slump เดียวกัน

2. กำลังอัดของคอนกรีต

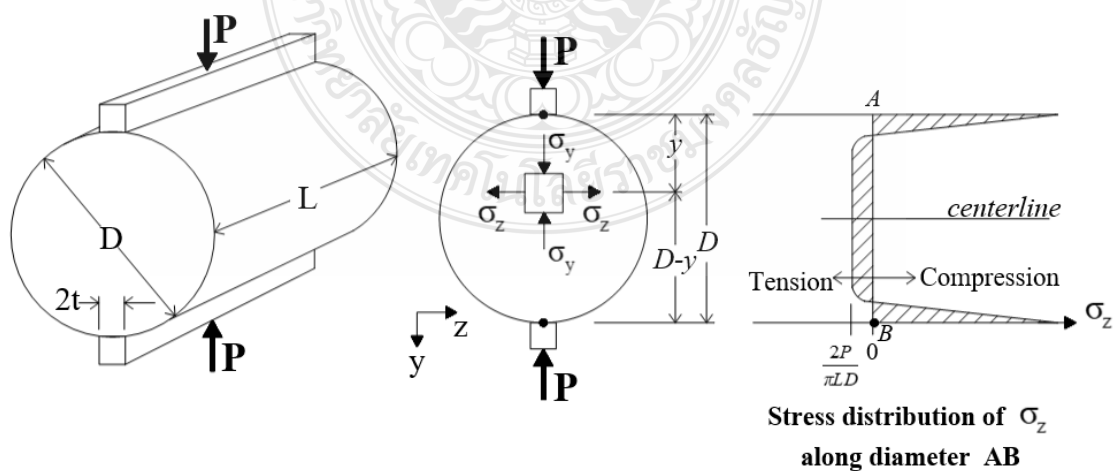
โดยทั่วไปการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กใช้กำลังของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยมีสมมุติฐานว่าคอนกรีตรับแรงอัดเป็นหลักโดยไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตในเรื่องของการรับแรง นอกจากนี้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งที่กระทำได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบอื่นๆ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังของคอนกรีตที่นิยมใช้กันคือ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอกซึ่งให้ตัวอย่างรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตวิบัติ โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 4 นาทีต่อตัวอย่าง กำลังอัดที่คอนกรีตรับได้อาจอยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดาหรือมีค่ามากกว่า 1000 กก/ซม<sup>2</sup> ในกรณีที่เป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก

#### 2.1.3.4 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต [1]

คอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำมากและเป็นวัสดุที่เปราะ ดังนั้นในการออกแบบคอนกรีตจึงไม่นิยมออกแบบให้คอนกรีตรับแรงดึง แต่มีงานบางประเภท เช่น งานพื้นถนนที่กำหนดให้คอนกรีตรับแรงดึงในรูปโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยทั่วไปแรงดึงของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัด ดังนั้นในการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงสมมติให้คอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้เลยและให้เหล็กรับแรงดึงทั้งหมด

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตมีอยู่ 2 วิธีได้แก่ วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม วิธีทดสอบดึงโดยตรง คือ การดึงตัวอย่างคอนกรีตให้ขาดออกจากกัน แต่การยึดจับตัวอย่างคอนกรีตเพื่อดึง ทำได้ยากมากจึงต้องทำการดัดแปลงอุปกรณ์ในการจับขึ้นตัวอย่างคอนกรีตให้สามารถรับแรงดึงโดยตรง นอกจากนี้ถ้าดึงคอนกรีตไม่ตรงแนวศูนย์กลางจริงๆจะมีแรงบิดหรือโมเมนต์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยทำให้คอนกรีตแตกหรือหักด้วยแรงอื่นไม่ใช่แรงดึงโดยตรง ดังนั้นผลการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตจากอุปกรณ์ที่ดัดแปลงขึ้นจึงมีผลไม่แน่นอนและยากต่อการทดสอบ

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีทางอ้อมเป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะทำได้ง่าย สะดวก และให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ การทดสอบแรงดึงโดยวิธีดัด (Bending) หรือเรียกการทดสอบว่า ค่าโมดูลัสแตกร้าวและการทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Test) เป็นการทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีอ้อมที่ใช้กันมาก และพบว่าค่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดัดหรือโมดูลัสแตกร้าวมีค่าสูงกว่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการผ่าซีกดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength) [5]



ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตประมาณร้อยละ 60 ถึง 100 และมีค่าประมาณร้อยละ 11 ถึง 23 ของกำลังอัด ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังอัดประมาณ 250 กก/ซม<sup>2</sup> จะมีประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัด การใช้หินที่มีผิวหยาบและรูปร่างเป็นเหลี่ยมจะทำให้การเพิ่มกำลังอัดสูงกว่าการเพิ่มกำลังอัด ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.) [10] ได้กำหนดให้โมดูลัสแตกร้าว (R) ของคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา ดังสมการ 2.6 และให้ปรับค่าลดลงเมื่อเป็นคอนกรีตน้ำหนักเบา

$$R = 2.0 \sqrt{f_c'} \text{ กก/ซม}^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $f_c'$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตมีหน่วยเป็น กก/ซม.<sup>2</sup>

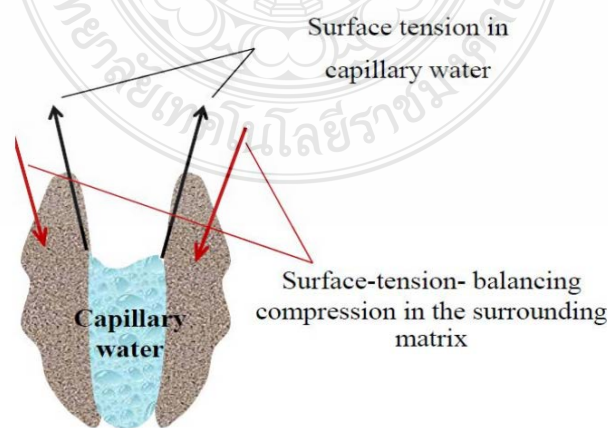
#### 2.1.4 คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [10] ได้กล่าวไว้ว่า ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กในอดีต จนถึงปัจจุบัน วิศวกรผู้ออกแบบจะคำนึงแต่คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซอง เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะประเมินมาจากผลการทดสอบคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่ง แต่ในความเป็นจริงแล้วหลายๆ โครงสร้างคอนกรีตเหล่านี้จะอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีการทำลายคุณสมบัติคอนกรีตตลอดเวลา ทำให้คุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังในการรับแรงต่ำลงในระยะยาว เป็นผลให้ต้องมีการบำรุงรักษา ตลอดจนจรรยาบรรณการและซ่อมแซม เพื่อให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้งานต่อไปได้อีก ดังนั้นถ้าได้มีการคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตตามกาลเวลาในการออกแบบแล้ว ทั้งโดยสิ่งแวดล้อมหรือโดยตัวเอง ก็จะสามารถช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมกระทำไ้รัดกุมขึ้น ตลอดจนลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมลงไปได้ โดยการยืดอายุของโครงสร้างคอนกรีตจากการเสื่อมสภาพออกไปได้อีก เป็นที่ทราบกันดีว่าการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างให้มีความแข็งแรงคงคเดิม นั้น ต้องเสียค่าใช้จ่ายมหาศาล ในประเทศแถบทวีปยุโรป งบประมาณค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างไม่ต่ำกว่างบประมาณที่ใช้ก่อสร้างก่อสร้างโครงการใหม่ ซึ่งสภาวะการณ์นี้อาจยังไม่ประสบกับประเทศไทยที่เพิ่งเริ่มก่อสร้างโครงสร้างเป็นจำนวนมากเมื่อไม่นานมานี้ แต่ในอนาคตประเทศไทยก็ต้องประสบกับสภาวะการณ์นี้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ก็ยังคงเหมือนว่าวิศวกรในประเทศไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในด้านความคงทนของคอนกรีตเป็นอย่างยิ่ง

ความทนทานของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หมายถึงความสามารถของคอนกรีตในการทนต่อสภาพกัดกร่อน ไม่ว่าจะเป็นทางเคมี ทางกลหรือทางกายภาพ สาเหตุทางเคมีที่ทำลายคอนกรีตที่ทำลายคอนกรีตในระหว่างการใช้งาน ได้แก่ การเกิดคาร์บอนเนชัน การเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต คลอไรด์ กรด ของเสียที่อยู่ในรูปของเหลว และก๊าซต่างๆจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น สาเหตุทางกลที่ทำให้คอนกรีตเสียหายได้แก่ การกระแทก การขีดสี และการสึกกร่อน เป็นต้นสำหรับสาเหตุทางกายภาพที่กระทำต่อคอนกรีตได้แก่ อุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ทำให้เกิดการขยายตัวที่ไม่เท่ากันในคอนกรีตและสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน เป็นต้น

#### 2.1.4.1 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต [2]

การหดตัวแบบออโตจีนัส คือ การหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำ ภายในคอนกรีต เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยไม่รวมถึงการสูญเสียน้ำที่สู่อากาศ การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นหลังจากการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตรวมทั้งการสูญเสียน้ำในช่องว่างกะปิลลารี ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัวขึ้น[3] การหดตัวแบบออโตจีนัสจะไม่มี การสูญเสียน้ำที่ระเหยออกสู่ภายนอกหรือจากภายนอกเข้าสู่ภายในตัวคอนกรีตแต่จะเป็นการสูญเสียน้ำภายในตัวคอนกรีต โดยกระบวนการการหดตัวแบบออโตจีนัสเริ่มจาก การดึงน้ำที่มีอยู่ภายในคอนกรีตไปใช้ทำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันกับวัสดุประสาน ซึ่งน้ำที่ใช้นี้จะถูกดึงมาจากว่างกะปิลลารี (Capillary Pores) และ โพรงเจล (Gel Pores) เมื่อน้ำถูกดึงไปใช้ในการทำ ปฏิกิริยาแล้วทำให้โพรงมีสภาพว่างเปล่าทำให้เกิดแรงดัน กะปิลลารีขึ้นรอบๆ ช่องว่างกะปิลลารี เพื่อการรักษาสมดุลย์ของแรง โดยเรียกแรงนี้ว่า “Capillary Suction” อันเป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดหดตัว เนื่องจากแรง Capillary Suction นี้ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Self-Desiccation” แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดแรงดันและการบีบอัดรอบๆ ช่องว่างกะปิลลารี [6]

ปัจจุบันการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนัสมีผลสำคัญเป็นอย่างมาก ต่องานโครงสร้างคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) สาเหตุของการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนัสในงานโครงสร้างคอนกรีตกำลังสูง เช่น ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มาก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และการใช้สารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ เพื่อเร่งกำลังอัดของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งคอนกรีตเหล่านี้จะมีค่าความชื้นน้ำต่ำ ช่องว่างคาปิลลารีมีปริมาณน้อย มีขนาดที่เล็กและไม่ต่อเนื่องกัน เมื่อความชื้นในช่องว่างคาปิลลารีถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้โพรงมีรูปร่างเปล่าทำให้เกิดแรงดันกะปิลลารีขึ้นรอบๆ ช่องว่างกะปิลลารี เพื่อการรักษาสมดุลย์ของแรง ส่งผลให้คอนกรีตมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนัสที่สูง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ไม่สามารถละเลยได้ สำหรับการออกแบบส่วนผสมในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ปัจจุบันนี้

#### 1. ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนัส

(1) ความเร็วของการดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมากถ้าปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเร็วจะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสเกิดความเร็วและสูงตามไปด้วย ดังนั้นการหดตัวแบบอโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น ในปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วขึ้น เช่น มีปริมาณ  $C_3A$  สูง เป็นต้น

(2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ถ้ามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิดการหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความชื้นน้ำจะต่ำลง และขนาดช่องว่างคาปิลลารีก็เล็กลงด้วย

(3) ลักษณะโครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ยังมีขนาดเล็กและมีความไม่ต่อเนื่องก็จะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระเคลื่อนตัวไม่สะดวกและช่องว่างมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดแรงดึงแบบคาปิลลารีสูง

#### 2. การเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนัส

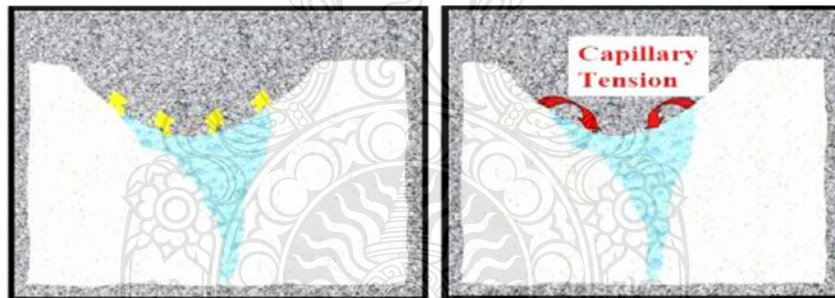
บริเวณที่น้ำบ่มคอนกรีตไม่สามารถเข้าไปถึงได้อย่างเต็มที่และเป็นบริเวณที่ถูกยึดด้วยสิ่งที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า เช่น ถูกยึดด้วยเหล็กเสริม ถูกยึดด้วยคอนกรีตที่เทไว้แล้วหรือแม้แต่ถูกยึดด้วยเนื้อคอนกรีตบริเวณที่ผิวที่ได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ เป็นต้น การหดตัวแบบอโตจีนัสจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำจึงทำให้การหดตัวแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรกๆ และจะค่อยๆ มีอัตราต่ำลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป

##### 2.1.4.2 การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต [2]

การหดตัวโดยรวม คือ การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตสู่สภาพแวดล้อมอย่างอิสระ โดยการระเหยของน้ำเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมต่างๆ

ได้แก่ อุณหภูมิที่สูง หรือความชื้นที่ต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณที่ผิวสัมผัสกับอากาศเกิดการสูญเสียน้ำ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัว และเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ โดยกลไกการหดตัวโดยรวมเกิดจากการที่น้ำภายในช่องว่างค้ำปิลลารีและโพรงเจลระเหยออกสู่สภาพแวดล้อมอย่างอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.4 (ก) ทำให้ช่องว่างเกิดการบีบตัว จึงส่งผลให้เกิดแรงดึงผิวค้ำปิลลารีขึ้น เพื่อการรักษาสมดุลของแรง แสดงดังรูปที่ 2.4 (ข) เป็นสาเหตุให้คอนกรีตมีปริมาตรลดลงและนำไปสู่การแตกร้าว หรือการบิดงอของโครงสร้าง เนื่องจากการยึดรั้งในขณะที่คอนกรีตเกิดการหดตัว

ในปัจจุบันปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายอย่างมากอีกปัญหาหนึ่ง เนื่องจากสภาพภูมิอากาศปัจจุบันเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ทำให้พบปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวโดยรวมนี้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งปัญหาการแตกร้าวนี้ มักพบในโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมากๆ เช่น พื้น หรือ กางเพง เป็นต้น จึงทำให้ปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต เป็นปัญหาสำคัญอีกปัญหาหนึ่ง ที่ไม่สามารถละเลยได้ สำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมในงานโครงสร้างคอนกรีต ณ ปัจจุบันนี้



(ก) การระเหยของน้ำในช่องว่างค้ำปิลลารี (ข) แรงดึงค้ำปิลลารีทำให้คอนกรีตหดตัว  
รูปที่ 2.4 กระบวนการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต [7]

#### 1. ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวโดยรวม

เนื่องจากการหดตัวโดยรวมเกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวโดยรวมทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

(1) ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตมากจากมีน้ำอิสระ (Free Water) มาก น้ำอิสระเป็นน้ำที่สามารถจะระเหยออกจากคอนกรีตไปได้

(2) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างค้ำปิลลารี (Capillary Pores) มาก ปริมาณน้ำอิสระจะออกมาน้อย การที่คอนกรีตมีช่องว่างค้ำปิลลารีมาก จะทำให้น้ำระเหยระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

(3) ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้น คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยหรือ อีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็จะทำให้เกิดการหดตัวน้อยลงด้วย

(4) ชนิดและคุณรูปของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากซีเมนต์เพสต์ได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวโดยรวมในคอนกรีตมากตามไปด้วย ขนาดละเอียดของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งซึ่งช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

(5) ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้ปอชโซลาน หรือวัสดุผงบางชนิดก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวโดยรวมได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวโดยรวมได้ เนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้คอนกรีต การใช้ผงหินปูนก็อาจช่วยลดการหดตัวโดยรวมด้วย

(6) อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวโดยรวมมากขึ้น

(7) มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวโดยรวมได้ง่าย

## 2. การเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวโดยรวม

การหดตัวโดยรวมมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตสัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวฉนวนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวโดยรวมมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แม้แต่อายุ

คอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนมากแล้วจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังสิ้นสุดการบ่ม

#### 2.1.4.4 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนेशनในคอนกรีต

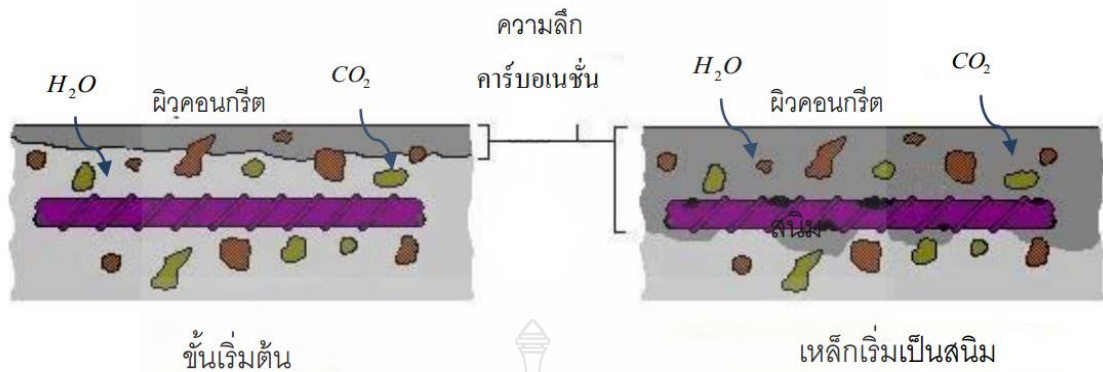
คาร์บอนेशनเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศซึ่งมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.03-0.1 โดยปริมาตร [8] (จะมีความเข้มข้นสูงกว่านี้หากอยู่ในบริเวณของแหล่งชุมชน หรือ โรงงานอุตสาหกรรม) คาร์บอนेशनเป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรด ( $\text{CO}_2$ ) เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (Alkaline Cement Paste) โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก ทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไฮดรอกซิลซิลิกา ไฮดรอกซิลอลูมินา ดังสมการ



หรือ



โดยปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนेशनจนหมดซึ่งหากมีอัตราการเกิดคาร์บอนेशनมากจะทำให้การเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและทำให้ฟิล์มที่เคลือบอยู่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตถูกทำลายลงจึงอาจส่งผลให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในที่สุด [8] ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยาของสมการที่ 2.7 มากกว่า สมการที่ 2.8 และในความเป็นจริงแล้ว ทั้งสองปฏิกิริยาต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนेशनเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอนेटไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนेशन จะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนेशनจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนेटไปแล้วซึ่งมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนेशन ต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และ น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีต [8]

1. คาร์บอนเนชั่นทำให้เกิดผลสำคัญ 3 ประการ คือ

(1) ทำให้เกิดความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลง  
 (2) ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลง เนื่องจาก แคลเซียม ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ไฮดรอกไซด์ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ผลในประการแรก อาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ถ้าคาร์บอนเนชั่นเกิดเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีต รอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต

(3) ทำให้เกิดการหดตัว (Carbonation Shrinkage) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้หน่วยแรงอัดที่เกิดจากการหดตัวโดยรวมหรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัวของคาร์บอนเนชั่น ทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียดต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม กี่ดีในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น

- (1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นรุนแรง
- (2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศยิ่งมากก็จะทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นรุนแรง
- (3) อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นดำเนินไปเร็ว



(4) ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำจะเกิดการบอบเนิ่นได้เร็วและมาก

(5) การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดการบอบเนิ่นมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไป

### 3. การป้องกันการเกิดคาร์บอเนชัน

(1) ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราการเกิดคาร์บอเนชันลดลง

(2) บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวนานขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น

(3) สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ควรออกแบบโครงสร้างให้มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากขึ้น ถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีคาร์บอเนชันรุนแรง

#### 2.1.4.5 คลอไรด์

คอนกรีตอาจมีคลอไรด์เนื่องจากการใช้ส่วนผสมของวัสดุที่มีคลอไรด์ เช่น ใช้น้ำ ทราช หิน ปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่ามีปริมาณคลอไรด์อยู่ในบริเวณที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิมต้องมีค่าไม่เกินที่กักตาม ตารางที่ 2.1 โดยคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตอัดแรงจะกำหนดไว้ค่อนข้างต่ำคือ ไม่เกินร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ตารางที่ 2.1 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม [9]

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (CI) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
	คอนกรีตอัดแรง
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือที่มีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00
งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30



## 1. แหล่งที่มาของคลอไรด์

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ [10] คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง หรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ซึ่งจะอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทาน ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้ โดยมีวิธีหลักๆที่ทำให้คลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตดังนี้

(1) การซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบ เข้าไปในคอนกรีตแห้ง (Capillary Suction)

(2) การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (Chloride Diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าไปสู่ ความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต

(3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ (Hydraulic Pressure)

โดยทั่วไปแล้ว แหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมาจากน้ำทะเล แต่สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น แม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่สามารถเกิดขึ้น ดังนั้นผลกระทบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงมีไม่มากนัก

### ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำทะเล [11]

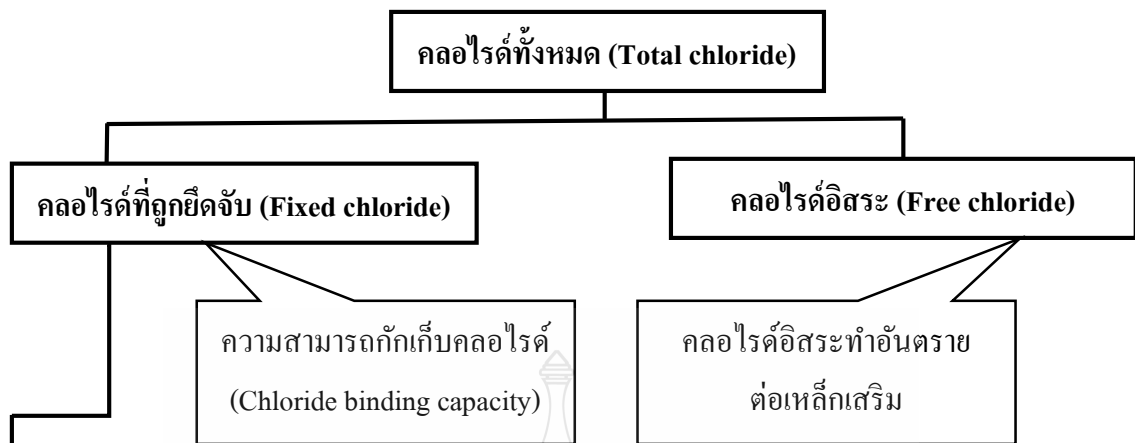
ส่วนประกอบของน้ำทะเล	ปริมาณส่วนประกอบ (ppm.)
โซเดียมคลอไรด์	27,000
แมกนีเซียมคลอไรด์	3,200
แมกนีเซียมซัลเฟต	2,200
แคลเซียมซัลเฟต	1,100
แคลเซียมคลอไรด์	500
รวมเป็นสารละลายเกลือทั้งหมด	34,000

## 2. ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ [12] การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ชนิดของแคลอไอออน ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆเผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้น จะเป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท (Total Chloride) ได้แก่

(1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed Chloride) คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในรูปของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Friedal's salt) หรือ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium Chloroferrite) และเกิดปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium Chloro-aluminate Hydrate ที่เรียกว่า Friedel's salt หรือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของ Gel pores และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Production) ของเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

(2) คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) คือ คลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลายละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ซึ่งถ้ามีคลอไรด์ประเภทนี้ในปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียกสลับแห้ง เช่น บริเวณคลื่นละอองน้ำ (Splash Zone) หรือ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบจากการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนที่ค่อนข้างรุนแรงกว่า โครงสร้างที่อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เช่น บริเวณใต้ทะเล (Submerged Zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่เป็นแผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต



**ยึดจับโดยวัสดุประสาน (Cementitious materials)**

1. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางเคมีกลายเป็นส่วนหนึ่งของผลผลิตจากปฏิกิริยา
  - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Calcium Chloroaluminate, Friedel's selt)
  - $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Calcium Chloroferrite)

} Adsorbed chloride
2. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดรชันและปอซโซลานิก
  - C-S-H from hydration of  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$
  - CAH from pozzolanic reaction

} Adsorbed chloride on the pore wall
3. คลอไรด์ถูกยึดจับด้วยกระบวนการทางกายภาพไว้ที่ผิวของผลผลิตไฮเดรชันอื่นๆ เช่น โมโนซัลเฟต (Monosulfate) เอททริงไจท์ (Ettringite) เป็นต้น

**ยึดจับที่ผิวของวัสดุเฉื่อย (Non-reactive materials) เช่น มวลรวม และผงหินปูน**

รูปที่ 2.6 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต [13]

3. การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ [9] ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไก และธรรมชาติของสารที่เคลื่อนที่ผ่าน

ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

(1) การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ อีออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิมพัลส์ แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์อีออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของอีออน โดยคลอไรด์อีออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อีออนสูง ไปยัง บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อีออนต่ำ

(2) การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary Suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น

(3) การดึงดูดอีออน (Ion Adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมี ความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเลปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดอีออนจะเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวก บริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์อีออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

(4) แรงดันน้ำ (Hydraulic Pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดินอุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic Head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์อีออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic Head สูง ไปยังบริเวณที่มี Hydraulic Head ต่ำ และเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิมพัลส์ด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำ

ให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์ เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 2.1.4.1 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับกลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of Sulfate Attack on Portland Cement) นั้น เนื่องจากเกลือซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต ที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) และแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) เป็นต้น เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดิน ทั่วไปใน น้ำเสียจากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ เป็นต้น ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียม ซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความ สามารถในการละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

#### 1. กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [14]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.14 เริ่มต้นเมื่อโซเดียม ซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังสมการที่ 2.11 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซัลไฟด์ไฮเดรต ( $\text{CSH}_2$ ) ที่ได้จากสมการที่ 2.11 จะทำปฏิกิริยา กับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $\text{C}_4\text{AH}_3$ ) โมโนซัลเฟต ( $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ ) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังสมการที่ 2.12 ถึง 2.14 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัวดังนั้นการทำลายโซเดียมซัลเฟต จึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต



โดยที่ C = CaO, N =  $\text{Na}_2\text{O}$ , M = MgO, S =  $\text{SiO}_2$ , S =  $\text{SiO}_3$ , และ H =  $\text{H}_2\text{O}$

2. กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attacks) [14]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.17 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีค่าความเป็นด่างสูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต ดังแสดงในสมการที่ 2.16 จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 ทั้ง  $CSH_2$  จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ (S<sub>2</sub>H) ดังแสดงในสมการที่ 2.17 ได้แมกนีเซียมซัลไฟด์ไฮดรอกไซด์ (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการยึดประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H ให้เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัว และจะเกิดสะสม  $CSH_2$  โดยไม่เกิดการขยายตัวมาก ดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต



3. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายซัลเฟต ได้แก่

- (1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตลดจนความเข้มข้นของซัลเฟต
- (2) ความทึบของน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยากลดการทำลายชั้นรุนแรง
- (3) ปริมาณ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  และ  $C_4AF$  น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  สูง และปูนซีเมนต์ มีอัตราส่วน  $C_2A$  และ  $C_3S$  ต่ำ ก็มีความต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น
- (4) ปริมาณ  $Ca(OH)_2$  ในคอนกรีตถ้าลดปริมาณของ  $Ca(OH)_2$  ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วยวิธีการลด  $Ca(OH)_2$  ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

4. วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

- (1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี  $C_3A$  และอัตราส่วนของ  $C_2A$  และ  $C_3S$  ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือเรียกว่าปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (Sulfate Resisting Cement)

(2) การใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  รวมทั้งลด  $\text{C}_3\text{A}$  และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

(3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

(4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่เกินไป ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟต ที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่พอในสภาวะที่ซัลเฟตเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้ปอชโซลานประกอบด้วยก็จะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดียิ่งขึ้นจกตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงข้อแนะนำของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกา[15] สำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่างๆ กัน

ตารางที่ 2.3 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต [14]

สภาพแวดล้อม ซัลเฟต	ซัลเฟตในดิน ที่ละลายน้ำ ( $\text{SO}_4^{-2}$ ร้อย ละ)		ประเภทของ วัสดุประสาน	อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุ ประสาน (W/C ratio)
	ซัลเฟต (PPM)			
เบาบาง	0.00 - 0.10	0 - 150	-	-
ปานกลาง	0.10 - 0.20	150 - 1500	ประเภท 2, ประเภท 1 +สารปอชโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.50
รุนแรง	0.20 - 2.00	1500 - 10000	ประเภท 5	ไม่สูงเกิน 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10000	ประเภท 5 + สารปอชโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.45

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประชุม คำพูน [16] ได้ศึกษาคุณสมบัติของหินฝุ่นเพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียด พบว่าหินฝุ่นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับทรายมาก คือ มีความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.71 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.47 ค่าหน่วยน้ำหนัก 1.695 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความชื้นร้อยละ 3 ถึง 4 ค่าการพองตัวร้อยละ 33.33 ปริมาณดินและฝุ่นผงที่ผสมอยู่ร้อยละ 4.34 ดังนั้นหินฝุ่นสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตได้

เผ่าพงศ์ นิจันทรพันธ์ศรี และ ประชุม คำพูน [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้หินฝุ่นแทนทรายในงานคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและใส่หินฝุ่นแทนทรายบางส่วนที่ออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุผงต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ให้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ผสมหินฝุ่นแทนทรายร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ และอัตราส่วนนำต่อปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 0.52 พบว่าการผสมหินฝุ่นในมอร์ตาร์ทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในทุกอัตราส่วนและช่วยให้กำลังอัดช่วงต้นสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วย

ธีระ เทพพรหม [18] ศึกษากำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบ กรณีศึกษาหินฝุ่นโรงโม่หิน นราธิวาส โรงโม่หิน โดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบที่ร้อยละ 0 40 60 80 90 และแทนทรายทั้งหมด ที่ค่าการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัด 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความยุบตัว 8 - 10 เซนติเมตร และหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่าง ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร บ่มคอนกรีตโดยวิธีแช่น้ำตลอดอายุคอนกรีตที่ อายุคอนกรีต 7 14 และ 28 วัน ที่ค่าการออกแบบกำลังอัดประลัย 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่ผสมหินฝุ่นบางส่วนและทั้งหมด มีค่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.99 ถึง 1.07 เท่า ของกำลังอัดประลัยเฉลี่ยจากการผสมด้วยทรายหยาบทั้งหมด และที่ค่าการออกแบบกำลังอัดประลัย 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่ผสมหินฝุ่นบางส่วนและทั้งหมด มีค่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.00 ถึง 1.06 เท่า ของกำลังอัดประลัยเฉลี่ยจากการผสมด้วยทรายหยาบทั้งหมดจากผลการทดสอบในทั้งสองค่าการออกแบบแสดงว่า คอนกรีตที่ผสมหินฝุ่นจากโรงโม่หิน นราธิวาส โรงโม่หิน เป็นส่วนผสมประเภทมวลรวมละเอียดแทนทรายหยาบ สามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมด้วยทรายหยาบจากแม่น้ำยะกังเป็นมวลรวมละเอียดทั้งหมด ดังนั้นจึงถือได้ว่าหินฝุ่นจากโรงโม่หิน นราธิวาส โรงโม่หิน สามารถใช้แทนทรายหยาบในการทำคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปได้



สุรัชย์ โภเมนธรรมโสภณ [19] ได้ศึกษากำลั่งอัดของคอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตค้ำขนาดเป็นส่วนผสมแทนทราย กรณีศึกษาหินปูนแกรนิตจากโรงโม่หินของบริษัท โรงโม่ไทยจำกัด โดยใช้หินปูนแกรนิตค้ำขนาดเป็นส่วนผสมแทนทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 (แทนทรายทั้งหมด) โดยน้ำหนักทำการค้ำขนาดหินปูนแกรนิตให้มีการกระจายตัวของขนาดเม็ด (grainsize distribution) เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับการกระจายตัวของขนาดเม็ดของทรายที่นำมาผสม การผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วน 1:2:4 (ปูนซีเมนต์:ทราย:หิน) โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ w/c เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 หินปูนแกรนิตค้ำขนาด มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.68 ร้อยละของการดูดซึม 0.4 ทรายที่นำมาผสมมีคุณลักษณะตามมาตรฐาน ASTM C33 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump test) เฉลี่ย 8.8 ซม. แต่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการรับกำลังอัดเป็นแท่งคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C192 เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. บ่มคอนกรีตโดยใช้วิธีแช่น้ำตลอดอายุคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน ทั้งนี้ปรากฏว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนแทนที่น้ำหนักทรายที่ให้กำลังอัดสูงสุด คือ อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 80 โดยมีกำลังอัด 368 กก./ตร.ซม. (w/c = 0.45) 329 กก./ตร.ซม. (w/c = 0.55) และ 265 กก./ตร.ซม. (w/c = 0.65) ในขณะที่คอนกรีตปกติ (ผสมทรายทั้งหมด) มีค่ากำลังอัดสูงสุด 395 กก./ตร.ซม. (w/c = 0.45) 321 กก./ตร.ซม. (w/c = 0.55) และ 262 กก./ตร.ซม. (w/c = 0.65) เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดสูงสุดที่แต่ละ w/c จะมีความแปรปรวนร้อยละ 1.1, 2.5 และ 6.8 ตามลำดับ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนแกรนิตค้ำขนาดแทนทรายบางส่วนนั้นสามารถนำไปใช้งานในงานโครงสร้างบางประเภทได้ เช่น งานโครงสร้างประเภท AA (งานโครงสร้างพิเศษ) ตามที่กำหนดใน ASTM C150 ที่ระบุค่ากำลังอัดประลัยไว้ไม่น้อยกว่า 282 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้โดยจัดให้อัตราส่วนผสมของหินปูนแกรนิตค้ำขนาดแทนทราย และ อัตราส่วน w/c มีความเหมาะสมสัมพันธ์กัน

รัฐสุวรรณ กิ่งแก้ว และคณะ [20] ผลการทดสอบมวลรวมพบว่า ทรายและหินปูน มีค่าโมดูลัส ค่าความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึม หน่วยน้ำหนัก และความชื้น ใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด สามารถนำไปใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จได้ ผลการทดสอบค่าการรับกำลังอัดที่เหมาะสมที่สุด มีดังนี้ (1) ค่าการรับกำลังอัดที่ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้สัดส่วนหินปูนแทนทรายร้อยละ 90 (2) ค่าการรับกำลังอัดที่ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้สัดส่วนหินปูนแทนทรายที่ร้อยละ 80 และ (3) ค่ากำลังอัดที่ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้สัดส่วนหินปูนแทนทรายที่ร้อยละ 100

A. Arivumangai และคณะ [21] ได้ศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีตผสมผงแกรนิต พารามิเตอร์หลักที่ทำการศึกษาในครั้งนี้คือคอนกรีตเกรด M30 ที่มีการ

ทดแทนทรายด้วยผงหินแกรนิตร้อยละ 0 25 และ 50 และปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมเข้าลอย ตะกรันและซูปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ บทความนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองโดยละเอียดเกี่ยวกับความทน แรงอัดความต้านทานแรงดึง 28 56 และ 90 วัน กำลังอัดความต้านทานแรงดึงที่อายุ 28 56 และ 90 วัน ศึกษาความทนทานต่อการโจมตีของคลอไรด์ และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเทียบกับคอนกรีต ทั่วไป จากการทดลองพบว่าการใช้ผงแกรนิตและสารผสมในคอนกรีตช่วยปรับปรุงสมรรถนะของ คอนกรีตทั้งในด้านความแข็งแรงและความทนทาน



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของเพอร์ลิตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 หรือ มอก.80-2517 โดยมีลักษณะเป็นปูนซีเมนต์ใหม่และไม่จับตัวเป็นก้อน

3.1.2 ทราย (Sand) ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจนสะอาด โดยมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

3.1.3 หินฝุ่น (Dust Stone) ใช้หินฝุ่นจากโรงโม่หินของบริษัท กาญจนาศิลาภัณฑ์ จำกัด โดยใช้ 2 ชนิด คือ ชนิดแรกคือหินฝุ่นที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 (SD) ส่วนชนิดที่สองคือหินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (OD)

3.1.5 หิน (Stone) เลือกที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและร่อนค้ำตะแกรงเบอร์ 4

3.1.6 น้ำ (Water) ในการศึกษานี้ใช้น้ำประปา

#### 3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

รายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาประกอบด้วย สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต และสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 สำหรับสมบัติเบื้องต้นของหินฝุ่นที่ศึกษา ประกอบด้วย

3.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

3.2.1.2 หน่วยน้ำหนัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29

3.2.1.3 การกระจายขนาดคละ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136

3.2.2 สอบสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ ประกอบด้วย

3.2.2.1 ค่าการยุบตัว ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143

3.2.2.2 การก่อตัว ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403

3.2.2.3 กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 โดยมีรายละเอียดดังนี้

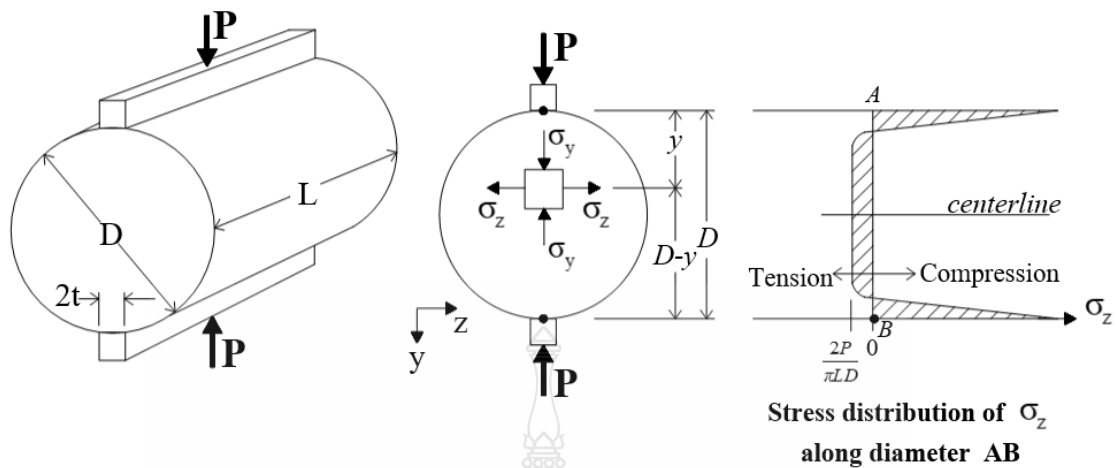
การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุการทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตหลังจากที่ได้ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปรมในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) ตลอดเวลาจนถึงอายุที่จะทดสอบ โดยทดสอบกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน ด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)

3.3.2.4 กำลังดึงแบบผ่าซีก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

การทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เป็นรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุการทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังดึงของคอนกรีต หลังจากที่ได้ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปรมในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) จนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยการทดสอบแรงดึงคอนกรีต วางตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานในแนวนอนเครื่องทดสอบ แล้วกดด้วยแรงที่เป็นเส้น (Line Load) จนกระทั่งขึ้นตัวอย่างแยกออกจากกันเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength) [5]

3.2.3 สำหรับสมบัติด้านความคงของมอร์ตาร์/คอนกรีตที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ ประกอบด้วย

3.2.3.1 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์

ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ (Autogenous Shrinkage) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ซึ่งเตรียมขึ้น โดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 2.54 x 2.54 x 28.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อเฉลี่ยของการหดตัว เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ให้แกะแบบออกแล้ว หุ้มด้วยพลาสติก และต่อด้วยกระดาษฟอยอีกชั้นหนึ่ง หลังจากนั้นวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนผสม จากนั้นเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 3 7 15 28 และ 56 วัน พร้อมชั่งน้ำหนักของตัวอย่างตามอายุการทดสอบ เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีการระเหยของน้ำออกไป แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆ กัน

การคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัสนั้น โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้นที่ได้จากการวัดครั้งแรก และค่าที่ วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ นำไปคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัส ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$\text{การหดตัว (ร้อยละ)} = [(L_i - L_s) / L_s] \times 100 \quad (3.1)$$

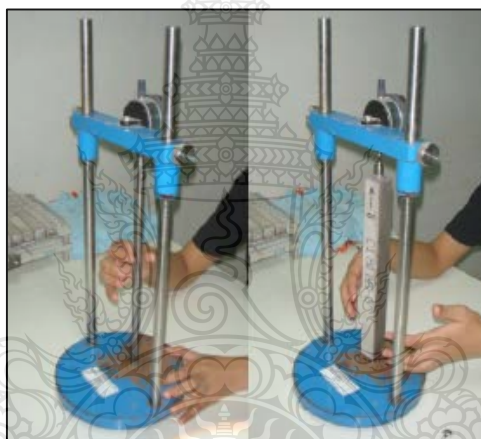
เมื่อ  $L_i$  คือ ความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีต (มิลลิเมตร)

$L_s$  คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุต่างๆ ที่ต้องการวัดการหดตัว (มิลลิเมตร)

$L_s$  คือ ความยาวมาตรฐานของตัวอย่างคอนกรีตเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

### 3.2.2.4 การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์

ในการทดสอบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ (Total Shrinkage) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 2.54 x 2.54 x 28.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน โดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว เป็นเวลา 7 วัน และทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐานดังรูปที่ 3.3 ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนผสม แล้วนำชิ้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2$  °C หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 3 7 15 28 และ 56 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุบ่มต่างๆ กัน



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดหาค่าการหดตัวของมอร์ตาร์เทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวมาตรฐาน การคำนวณร้อยละของการหดตัวโดยรวมนั้น โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรกหลังจากบ่มในน้ำ 7 วัน และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ นำไปคำนวณร้อยละของการหดตัวโดยรวม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$\Delta L = [(L_x - L_i) / L_g] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\Delta L$  คือ ค่าการหดตัวโดยรวม (ร้อยละ)

$L_x$  คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างที่อายุใดๆ (มิลลิเมตร)

$L_i$  คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างที่อายุเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

$L_g$  คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือ 285 มิลลิเมตร

### 3.2.3.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้น (Carbonation) ใช้วิธีการประเมินการเกิดคาร์บอนชั้น โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร ภายหลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตเสร็จแล้ว หลังจากที่อยู่ขึ้นตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดขึ้นตัวอย่างออกจากแบบแล้วนำไปปรมในน้ำที่อ้อมตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในตู้อบคาร์บอนชั้น โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 56 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทดสอบให้ตัวอย่างแตกออกเป็น 2 ซีก แล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ที่บริเวณหน้าตัดภายใน สังเกตสีที่เปลี่ยนไปของหน้าตัดดังกล่าว หากบริเวณใดที่มีการเกิดคาร์บอนชั้นส่งผลให้หน้าตัดไม่มีสี ส่วนบริเวณที่ไม่เกิดคาร์บอนชั้นส่งผลให้หน้าตัดเป็นสีม่วงอมชมพู ปล่อยให้แห้งประมาณ 30 นาที แล้วนำไปวัดระยะการเกิดคาร์บอนชั้นด้วยไซเวอร์เนียร์ คือระยะจากผิวนอกสุดของของแท่งตัวอย่างจนถึงบริเวณที่เป็นสีม่วงอมชมพูที่ขึ้นตัวอย่างที่แตก เป็นระยะความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น

### 3.2.3.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

สำหรับการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride Penetration Resistance) ของตัวอย่างคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C1202 – 97 ด้วยชุดเครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน (รูปที่ 3.7) โดยการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต ใช้ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 50 มิลลิเมตร ในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตใช้ขึ้นตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง หาค่าเฉลี่ยความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต



ก) แบบหล่อ



ข) ตัวอย่างคอนกรีต





ค) การตัดคอนกรีต



ง) ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดเสร็จแล้ว

### รูปที่ 3.4 แบบหล่อและขึ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ภายหลังหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตเสร็จ โดยแต่ละสัปดาห์ผสมคอนกรีตมีขึ้นตัวอย่าง จำนวน 2 ตัวอย่าง หลังจากที่อยู่ขึ้นตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว โดยบ่มเป็นระยะเวลา 56 วัน



### รูปที่ 3.5 ตัวอย่างคอนกรีตและการบ่มด้วยน้ำ

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ 30 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1,000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์





### รูปที่ 3.6 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

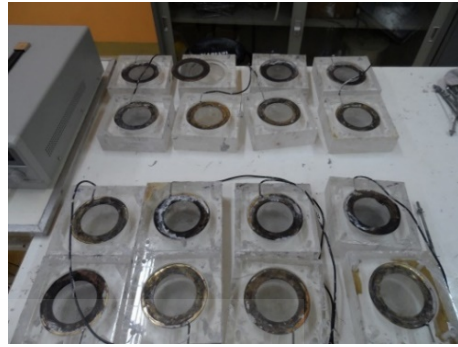
เมื่อครบอายุ 56 วัน นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีต 2 ชิ้นที่เตรียมไว้ทดสอบที่อายุ บ่มดังกล่าวขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมาใส่ในถังดูดสุญญากาศ (Vacuum Pump) แล้วจึงเปิดเครื่องดูดอากาศเพื่อให้เกิดสภาพสุญญากาศในถัง Desiccator ต่อเนื่องเป็น เวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดวาล์วปิดเครื่องดูด ใช้ท่อ Stopcock อย่างช้าๆ ให้น้ำกลั่นไหลเข้าสู่ในถังจน ท่วมตัวอย่างทั้งหมดโดยขั้นตอนนี้จะไม่ยอมให้อากาศไหลเข้าไปได้

ปิด Stopcock ก่อนที่จะเริ่มเปิดเครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum Pump) แล้ว เปิดวาล์วได้ Vacuum Gauge โดยต้องเปิดเครื่อง Vacuum Pump ต่อเนื่องเป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ทำการปิดเครื่อง Vacuum Pump และทำการต่อท่อกับภาชนะบรรจุน้ำกลั่น แล้วจึงเปิด Stopcock อย่างช้าๆ เพื่อให้น้ำค่อยๆ ไหลเข้าสู่ถัง Desiccator จนกระทั่งน้ำเริ่มไหลย้อนกลับผ่าน Stopcock จึงเปิด Stopcock ปล่อยให้ตัวอย่างคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลาอีก 18 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดฝา ถัง Desiccator นำตัวอย่างแท่งคอนกรีตมาเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด

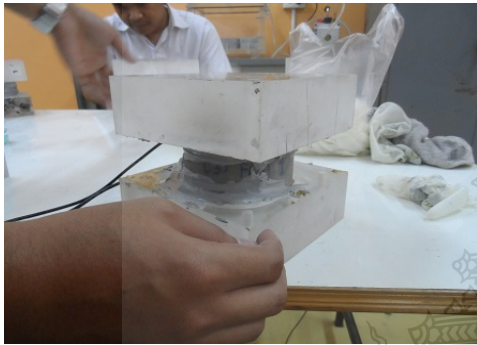
นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตเช็ดสะอาดมาประกอบเข้าไปในเซลล์ (Cell) แล้ว เติมสารละลาย NaCl ลงใน Cell ด้านซ้าย และเติมสารละลาย NaOH ลงใน Cell ด้านขวา เมื่อเติม สารละลายเสร็จนำไปประกอบเข้ากับชุดทดสอบดังรูปที่ 3.3 ซึ่งการจัดชุดทดสอบมีรายละเอียดดัง รูปที่ 3.4 หลังจากนั้นปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด  $60 \pm 0.1$  โวลต์ผ่านชิ้นตัวอย่างคอนกรีต เครื่อง Data Logger จะทำการอ่านค่ากระแสไฟที่ผ่านตัวอย่างทดสอบของแต่ละ Cell ซึ่งจะทำการบันทึกค่าโดย อัตโนมัติทุกๆ 30 นาที ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง โดยแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่ เคลื่อนผ่านตัวอย่างทดสอบ (Total Charge Passed) มีหน่วยเป็น Coulomb



ก) การใส่ตัวอย่างในถังสุญญากาศ



ข) เซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ



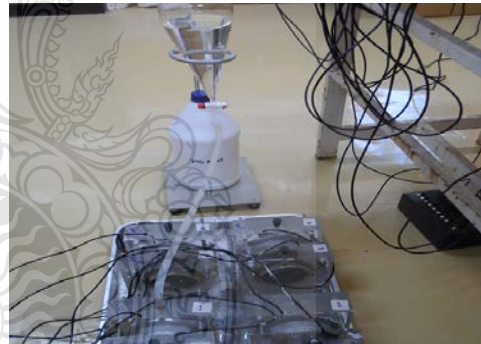
ค) ประกอบเซลล์และทาสีลิโคลนปิด



ง) ต่อวงจรของเครื่องทดสอบ



จ) ต่อวงจรเข้ากับเซลล์ตัวอย่าง



ฉ) เทสารละลายลงในเซลล์ตัวอย่าง



ช) เปิดกระแสไฟฟ้าขนาด  $60 \pm 0.1$  โวลต์



ซ) ทำการบันทึกค่าด้วยเครื่อง Data logger

รูปที่ 3.7 การหาความต้านทานการแทรกซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต

### 3.2.3.5 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

สำหรับการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C1012 ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25.4 x 25.4 x 285 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้ว นำตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวเป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (ตามมาตรฐาน ASTM C490) ต่อจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ตาร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยให้ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 5 แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 1 3 5 7 14 28 และ 56 วัน ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์คำนวณได้จากสมการ (3.3)

$$\text{การขยายตัว (ร้อยละ)} = [(L_t - L_g) / L_g] \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $L_t$  คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

$L_g$  คือ ค่าเฉลี่ยความยาวตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (มิลลิเมตร)

$L_g$  คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

## 3.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษานี้

### 3.3.1 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของมอร์ตาร์ที่ใช้การหดรัดแบบอโตจีนัส การหดรัดโดยรวม และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

### 3.3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบหาค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก การเกิดคาร์บอนชั่น และความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

สำหรับสัญลักษณ์ของสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ มีรายละเอียดดังนี้

C-DS75 หมายถึง คอนกรีตใช้ทรายที่มีขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 ร้อยละ 25 โดยปริมาตร และใช้หินปูนที่มีขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 ร้อยละ 75 โดยปริมาตร

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส การหดตัวโดยรวม และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ทราย	หินฝุ่น	น้ำ
1	M	1.00	2.75	-	0.60
2	M-SD15	1.00	2.34	15%v	0.60
3	M-SD30	1.00	1.93	30%v	0.60
4	M-SD50	1.00	1.38	50%v	0.60
5	M-SD75	1.00	0.69	75%v	0.60
6	M-SD100	1.00	-	100%v	0.60
7	M-OD15	1.00	2.34	15%v	0.60
8	M-OD30	1.00	1.93	30%v	0.60
9	M-OD50	1.00	1.38	50%v	0.60
10	M-OD75	1.00	0.69	75%v	0.60
11	M-OD100	1.00	-	100%v	0.60

หมายเหตุ M หมายถึง ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายตามมาตรฐาน ASTM C33 ล้วน  
SD หมายถึง หินฝุ่นที่มีขนาดคละของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C33  
OD หมายถึง หินฝุ่นจากแหล่ง  
15%v หมายถึง อัตราส่วนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย การเกิดคาร์บอนेशन และความต้านทานคลอไรด์ของคลอไรด์

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กิโลกรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ทราย	หินฝุ่น	หิน	น้ำ	(w/b)
1	C	400	747	-	1003	240	(0.60)
2	C-SD15	400	635	15%v	1003	240	(0.60)
3	C-SD30	400	523	30%v	1003	240	(0.60)
4	C-SD50	400	374	50%v	1003	240	(0.60)
5	C-SD75	400	187	75%v	1003	240	(0.60)
6	C-SD100	400	-	100%v	1003	240	(0.60)
7	C-OD15	400	635	15%v	1003	240	(0.60)
8	C-OD30	400	523	30%v	1003	240	(0.60)
9	C-OD50	400	374	50%v	1003	240	(0.60)
10	C-OD75	400	187	75%v	1003	240	(0.60)
11	C-OD100	400	-	100%v	1003	240	(0.60)

หมายเหตุ C หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทรายตามมาตรฐาน ASTM C33 ล้วน  
SD หมายถึง หินฝุ่นที่มีขนาดคละของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C33  
OD หมายถึง หินฝุ่นจากแหล่ง  
15%v หมายถึง อัตราส่วนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาสมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษาและวิเคราะห์ในหัวข้อดังต่อไปนี้ คือ สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย และสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย

#### 4.1 สมบัติเบื้องต้นของทรายและหินฝุ่น

##### 4.1.1 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของ ทราย หินฝุ่น SD และหินฝุ่น OD โดยทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินฝุ่นตามมาตรฐาน ASTM C128 จากการทดสอบพบว่าความถ่วงจำเพาะของ ทราย หินฝุ่น SD และหินฝุ่น OD มีค่าเท่ากับ 2.96 2.72 และ 2.77 ตามลำดับ ส่วนการดูดซึมน้ำของ ทราย หินฝุ่น SD และหินฝุ่น OD มีค่าเท่ากับ 0.89 0.88 และ 1.44 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของ ทราย หินฝุ่นSD และหินฝุ่นOD

รายการ	ทราย	หินฝุ่น	
		SD	OD
ความถ่วงจำเพาะ	2.96	2.72	2.77
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.89	0.88	1.44

##### 4.1.2 หน่วยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของ ทราย หินฝุ่น SD และหินฝุ่น OD โดยทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของหินฝุ่นตามมาตรฐาน ASTM C29 [20] จากการทดสอบพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของ ทราย หินฝุ่น SD และหินฝุ่น OD มีค่าเท่ากับ คือ 1,861.54 กก./ม<sup>3</sup> 1,875.39 กก./ม<sup>3</sup> และ 1,830.39 กก./ม<sup>3</sup> ตามลำดับ

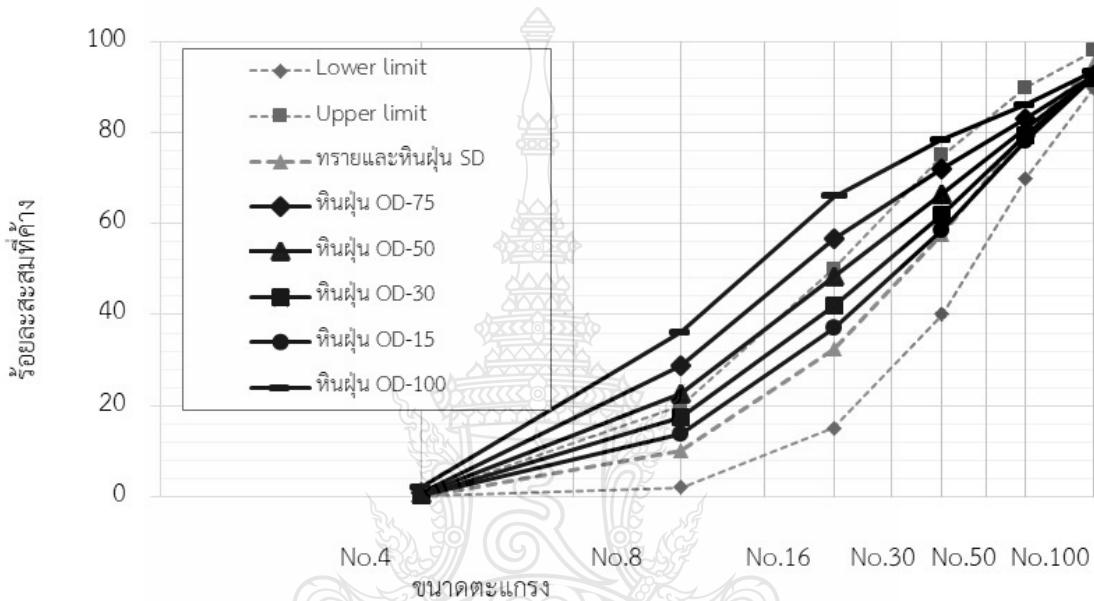
ตารางที่ 4.2 หน่วยน้ำหนักของทราย หินฝุ่นSD และหินฝุ่นOD

รายการ	ทราย	หินฝุ่น	
		SD	OD
หน่วยน้ำหนักของมวลรวม (กก./ม. <sup>3</sup> )	1,861.54	1,875.39	1,830.39



#### 4.1.3 การกระจายตัวของอนุภาค

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่ค้างตะแกรงมาตรฐานสะสมกับขนาดของตะแกรง เมื่อใช้หินฝุ่น SD และ OD แทนที่ทราย ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร การกระจายขนาดผลของหินฝุ่น OD แทนที่ทราย อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นการกระจายของขนาดผลของหินฝุ่นแทนที่ทรายร้อยละ 50 75 100 โดยปริมาตร ที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่ค้างตะแกรงมาตรฐานสะสมกับขนาดของตะแกรง

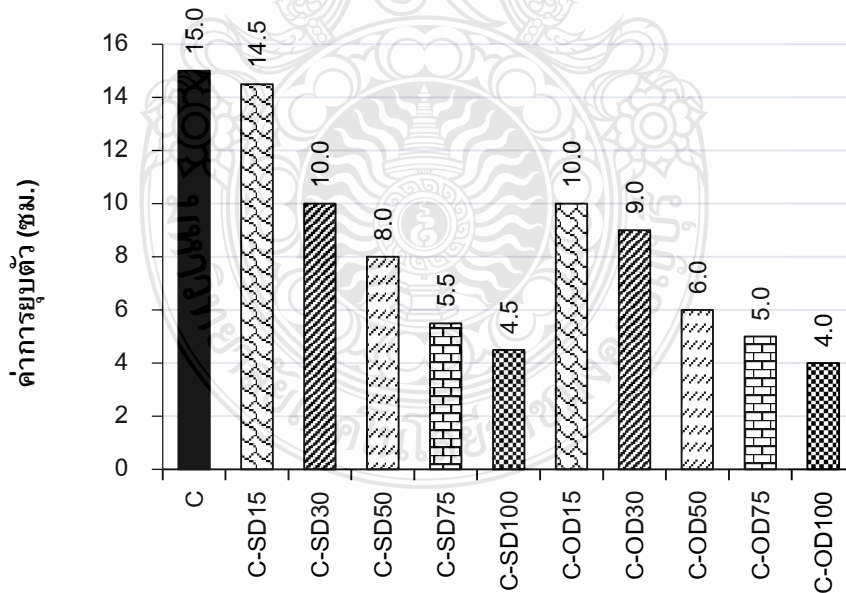
#### 4.2 สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต

##### 4.2.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน (ตามมาตรฐาน ASTM C33) โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะ หินฝุ่นมีลักษณะเม็ดที่มีความหยาบ ขรุขระ มากกว่าทราย รวมทั้งความถ่วงจำเพาะของหินฝุ่นมีค่าน้อยกว่าทราย (แทนที่โดยปริมาตร) ทำให้หินฝุ่นมีพื้นที่ผิวมากกว่า ส่งผลให้หินฝุ่นมีความต้องการน้ำมากกว่า ค่าการยุบตัวจึงมีค่าน้อยกว่า ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย มีค่ามากกว่าของ OD ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 หินฝุ่น SD มีขนาดผลที่ดี จึงทำให้มีช่องว่างน้อย พื้นที่ผิวน้อยกว่าหินฝุ่น OD

ตารางที่ 4.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตัวอย่างที่	ส่วนผสม (สัญลักษณ์)	ค่าการยุบตัว (ซม.)
1	C	15.0
2	C-SD15	14.5
3	C-SD30	10.0
4	C-SD50	8.0
5	C-SD75	5.5
6	C-SD100	4.5
7	C-OD15	10.0
8	C-OD30	9.0
9	C-OD50	6.0
10	C-OD75	5.0
11	C-OD100	4.0



รูปที่ 4.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

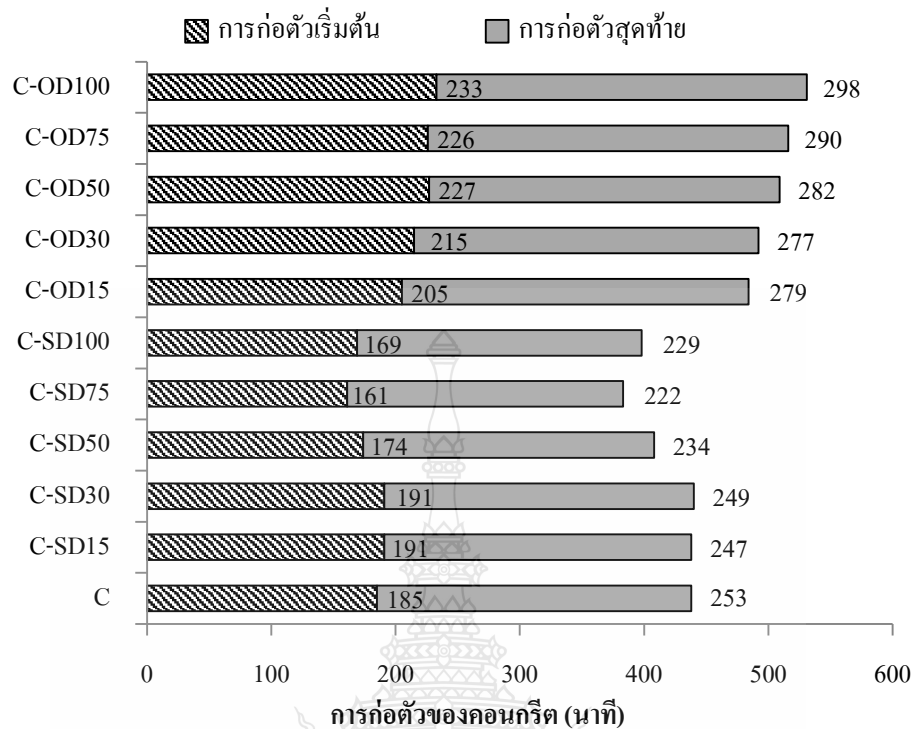


#### 4.2.2 การก่อดัวของคอนกรีต

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 แสดงการก่อดัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่า การก่อดัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายเป็น ในขณะก่อดัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น OD แทนที่ทรายมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายเป็น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ หินฝุ่น OD มีขนาดละเอียดไม่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C33 ในขณะที่ทรายมาตรฐานที่ใช้มีขนาดละเอียดดีกว่าทำให้ทรายสามารถเข้าไปกระจายตัวได้ดี จึงทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่า ทำให้การก่อดัวของคอนกรีตนั้นเกิดขึ้นเร็วกว่า

ตารางที่ 4.4 การก่อดัวของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีต	ระยะเวลาการก่อดัว (นาที)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย
C	185	253
C-SD15	191	247
C-SD30	191	249
C-SD50	174	234
C-SD75	161	222
C-SD100	169	229
C-OD15	205	279
C-OD30	215	277
C-OD50	227	282
C-OD75	226	290
C-OD100	233	298



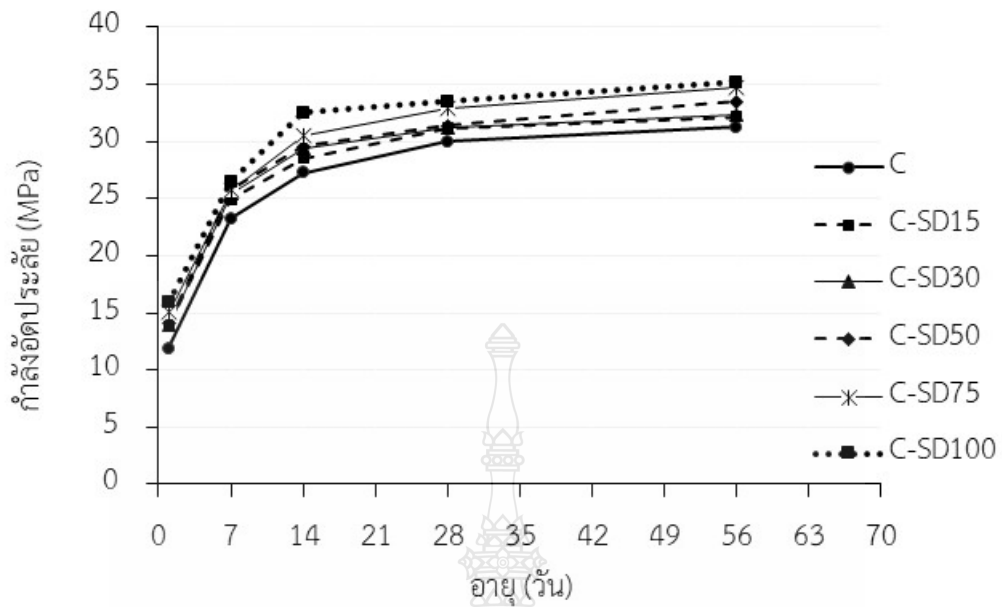
รูปที่ 4.3 การก่อตัวของคอนกรีต

#### 4.2.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

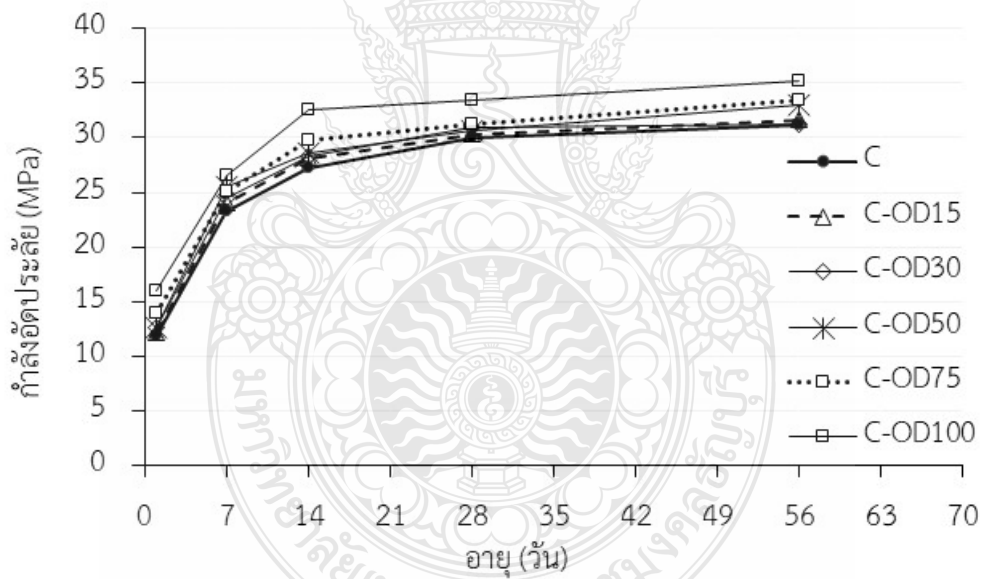
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น อาจเป็นเพราะหินฝุ่นมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมขรุขระ และมีพื้นที่ผิวมากกว่าทราย จึงทำให้มีปริมาณเพสต์มาเคลือบผิวได้มากกว่า รวมทั้งการขัดกันของหินฝุ่นดีกว่า ส่งผลให้สามารถรับกำลังอัดประลัยได้มากกว่า ส่วนรูปที่ 4.5 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างหินฝุ่น SD และ OD พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทรายมีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD ทั้งนี้เนื่องมาจาก หินฝุ่น SD มีขนาดละเอียด จึงเหลือเพสต์อิสระเป็นจำนวนมาก ทำให้การยึดประสานดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตัวอย่าง ที่	สัญลักษณ์	กำลังอัดประลัย (MPa)				
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
1	C	11.88	23.27	27.27	30.02	31.23
2	C-SD15	13.88	24.92	28.49	31.16	32.16
3	C-SD30	14.00	25.45	29.41	31.21	32.37
4	C-SD50	14.05	25.78	29.56	31.41	33.46
5	C-SD75	15.11	25.81	30.52	32.94	34.73
6	C-SD100	15.90	26.48	32.53	33.51	35.21
7	C-OD15	12.20	24.00	28.13	30.33	31.68
8	C-OD30	12.66	24.55	28.26	30.89	31.23
9	C-OD50	12.61	25.50	28.54	30.71	32.99
10	C-OD75	13.90	25.11	29.77	31.23	33.48
11	C-OD100	14.11	24.10	30.50	31.68	34.33

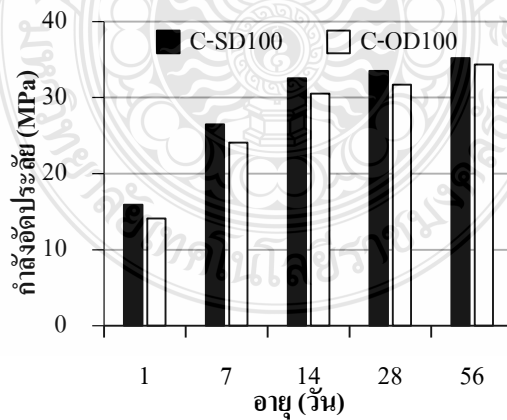
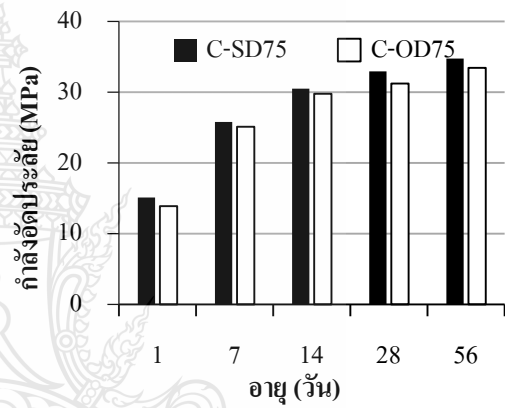
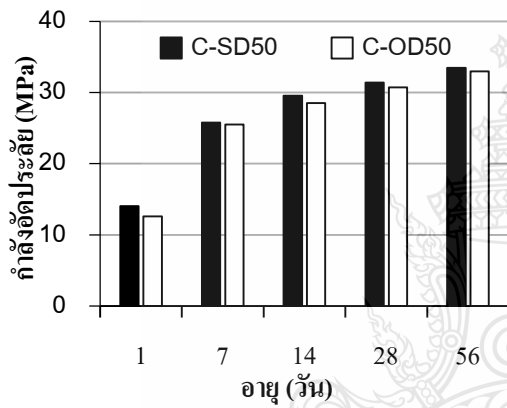
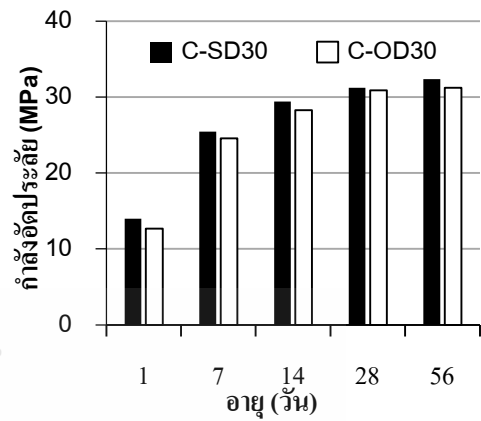
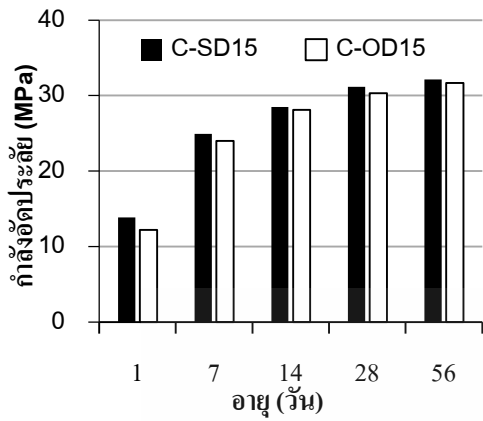


ก) หินฝุ่น SD



ข) หินฝุ่น OD

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต



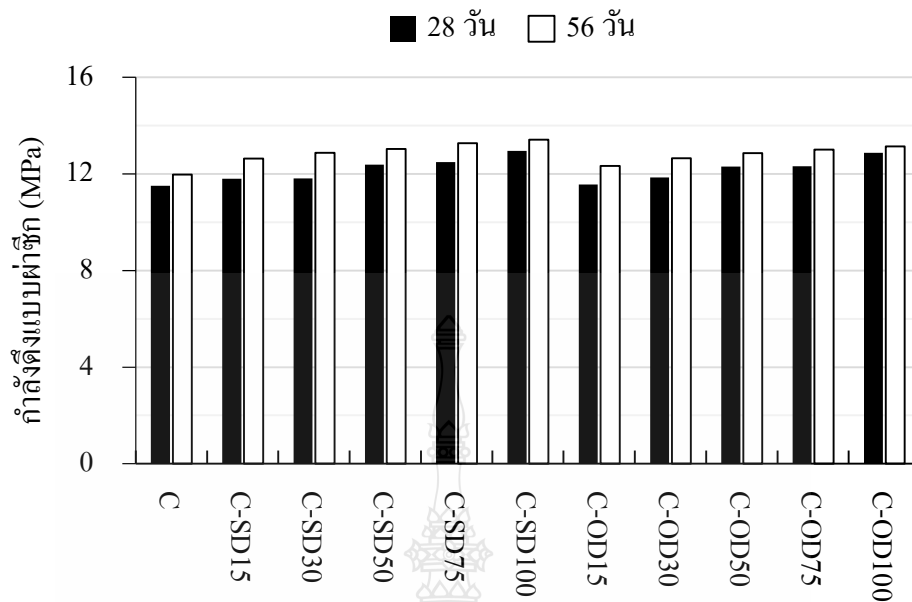
รูปที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน

#### 4.2.4 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 แสดงกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 จะเห็นว่า ผลการทดสอบไปในทางเดียวกันกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของหินฝุ่น พบว่า กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของหินฝุ่น OD เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.6 กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีต

ตัวอย่างที่	สัญลักษณ์	กำลังดึงผ่าซีก (MPa)	
		28 วัน	56 วัน
1	C	11.50	11.97
2	C-SD15	11.79	12.63
3	C-SD30	11.81	12.87
4	C-SD50	12.38	13.04
5	C-SD75	12.49	13.28
6	C-SD100	12.95	13.41
7	C-OD15	11.56	12.32
8	C-OD30	11.85	12.65
9	C-OD50	12.30	12.86
10	C-OD75	12.32	13.00
11	C-OD100	12.88	13.13



รูปที่ 4.6 กำลังดึงผ้าซีเมนต์กับอายุของคอนกรีต

### 4.3 ความคงทนของคอนกรีต

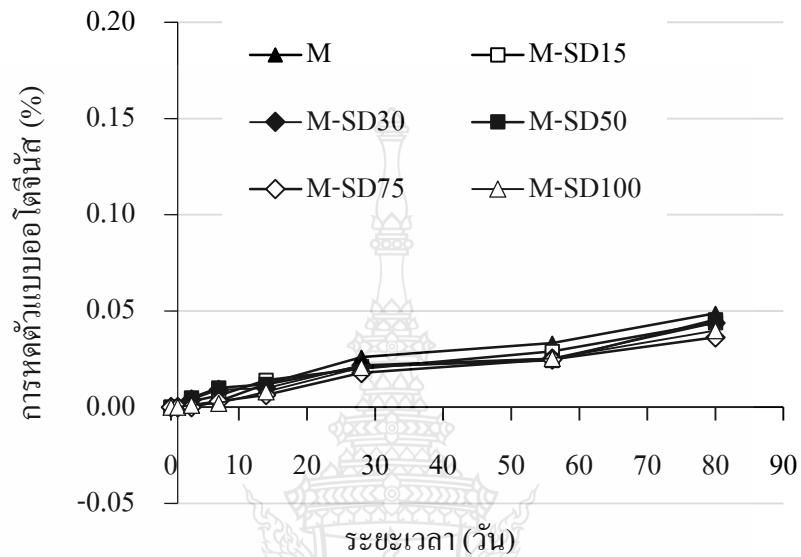
สำหรับความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีตเมื่อใช้หินปูนแทนที่ทรายที่ศึกษาในครั้งนี้ ประกอบด้วย การหดตัวแบบอโตจีนัสและ โดยรวมของมอร์ตาร์ การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 การหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

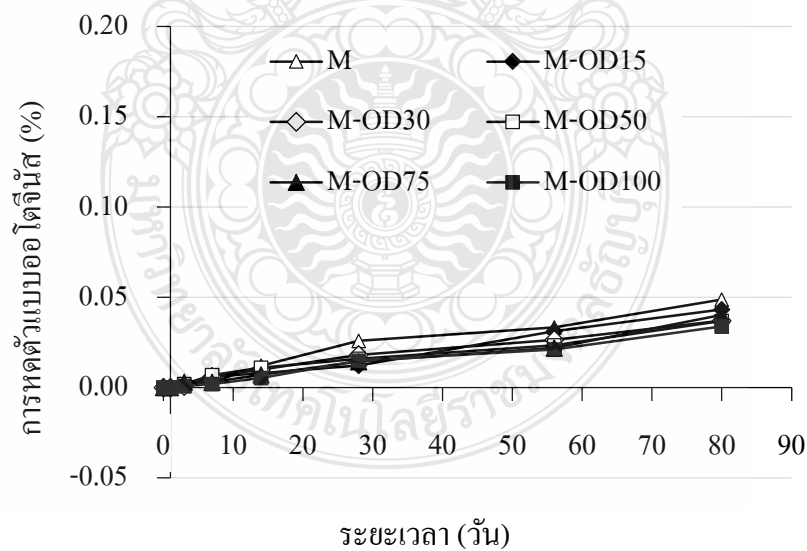
จากการศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทรายโดยหินปูนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นหินปูนจากโรงโม่หินของบริษัท กาญจนาศิลาภัณฑ์ จำกัด จำนวน 2 ชนิด คือ SD และ OD โดยการแทนที่ทรายด้วยหินปูนแต่ละชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ทรายด้วยหินปูน (ทั้ง SD และ OD) พบว่าการหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีแนวโน้มน้อยกว่ามอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหินปูนมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมผิวขรุขระ ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคด้านการหดตัวได้ดีกว่าทรายที่มีลักษณะกลมมน และเมื่อเปรียบเทียบการหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้

หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) ในอัตราส่วนการแทนที่ทรายต่างๆ ดังรูปที่ 4.8 พบว่าการหดตัวมีค่าไม่แตกต่างกัน



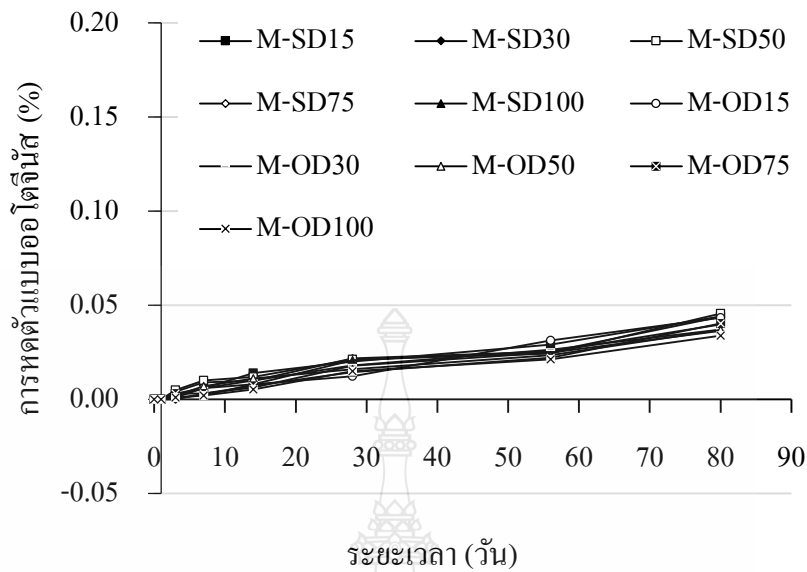
ก) หินฝุ่น SD



ข) หินฝุ่นชนิด OD

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย



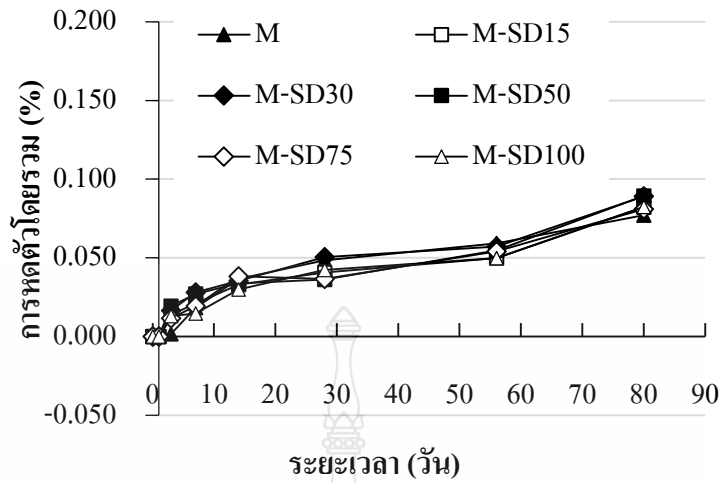


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของมอเตอร์ตัวเมื่อใช้หินฝุ่น SD และ OD แทนที่ทราย

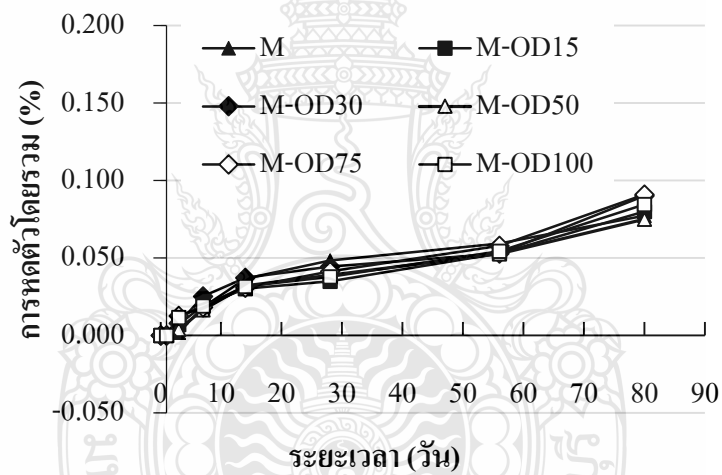
#### 4.3.2 การหดรัดตัวโดยรวมของมอเตอร์ตัวเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย

จากการศึกษาการหดรัดตัวโดยรวมของมอเตอร์ตัวเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย โดยหินฝุ่นที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นหินฝุ่นจากโรงโม่หินของบริษัท กาญจนาศิลาภัณฑ์ จำกัด จำนวน 2 ชนิด คือ SD และ OD โดยการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นแต่ละชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวโดยรวมกับอายุของตัวอย่างมอเตอร์ตัว โดยการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่น อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร พบว่าการหดรัดตัวโดยรวมของมอเตอร์ตัวเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) ในทุกๆอัตราส่วนการแทนที่มีค่าไม่แตกต่างกันกับมอเตอร์ตัวเมื่อใช้ทรายล้วน



ก) หินฟุ้ง SD



ข) หินฟุ้ง OD

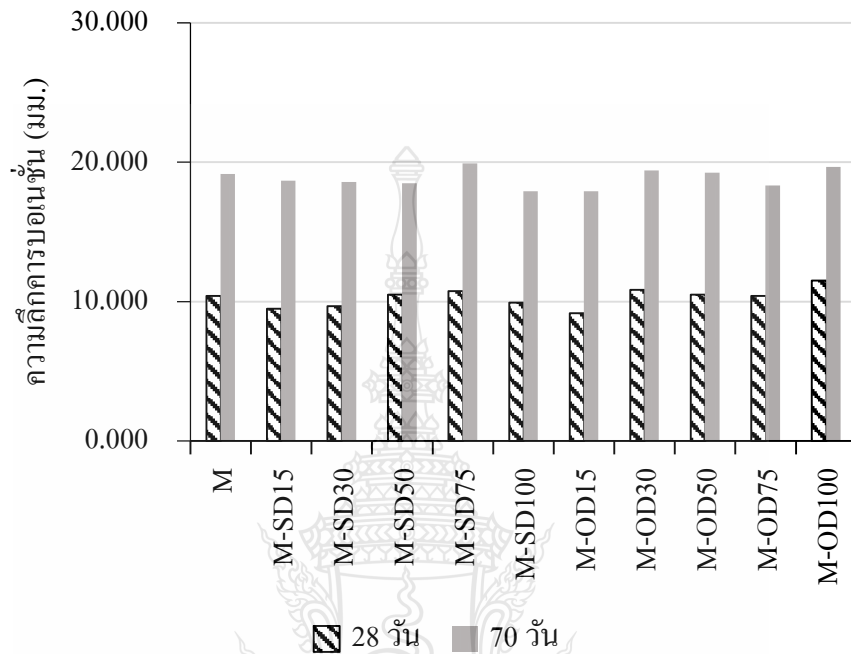
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวโดยรวมกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฟุ้งแทนที่ทราย

#### 4.3.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้หินฟุ้งแทนที่ทราย

จากการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้หินฟุ้งแทนที่ทราย โดยหินฟุ้งที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จำนวน 2 ชนิด คือ SD และ OD โดยการแทนที่ทรายด้วยหินฟุ้งแต่ละชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ 70 วัน พบว่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นในคอนกรีตเมื่อใช้หินฟุ้งแทนที่ทราย (ทั้ง SD

และ OD) ในทุกๆอัตราส่วนการแทนที่มีค่าไม่แตกต่างกันกับคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนทั้งอายุ 28 วัน และ 70 วัน

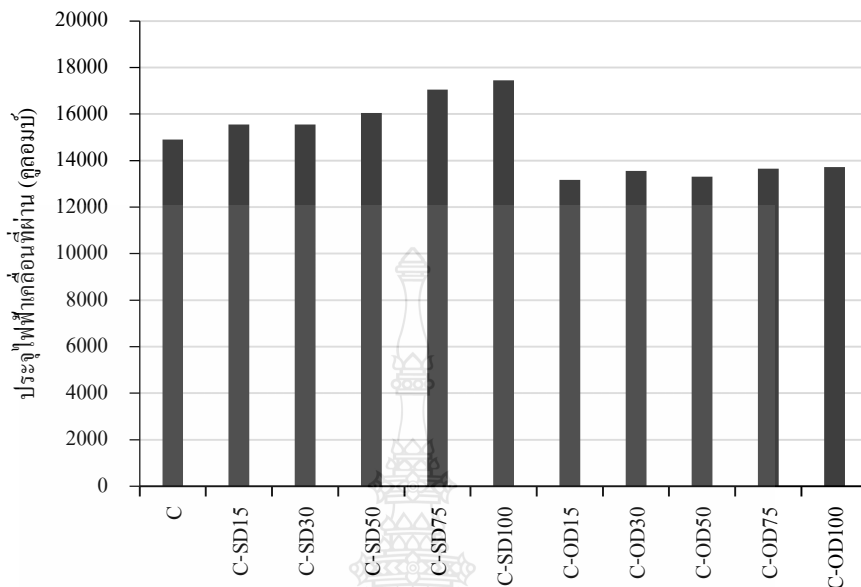


รูปที่ 4.10 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต

#### 4.3.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย

จากการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย โดยใช้หินฝุ่นจำนวน 2 ชนิด คือ SD และ OD แทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นแต่ละชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร รูปที่ 4.11 แสดงค่าประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์) ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตเมื่อตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 56 วัน พบว่าประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายชนิด SD ได้มากกว่าคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น อาจเป็นเพราะหินฝุ่นชนิด SD เกิดจากการคละกั้นตามมาตรฐาน ASTM C33 จึงมีอนุภาคขนาดใหญ่ปนอยู่มาก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น คอนกรีตมีความพรุนมากประจุไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ผ่านได้มาก ส่วนคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายชนิด OD (ในทุกๆอัตราส่วนการแทนที่) ได้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน อาจเป็นเพราะหินฝุ่นชนิด OD มีส่วนที่ละเอียดอยู่มาก จึงไปปิดช่องว่างระหว่างอนุภาค และมีพื้นที่ผิวที่ช่วยยึดจับคลอไรด์อยู่มาก ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนน้อยลงประจุไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้น

### บ่มน้ำ 56 วัน



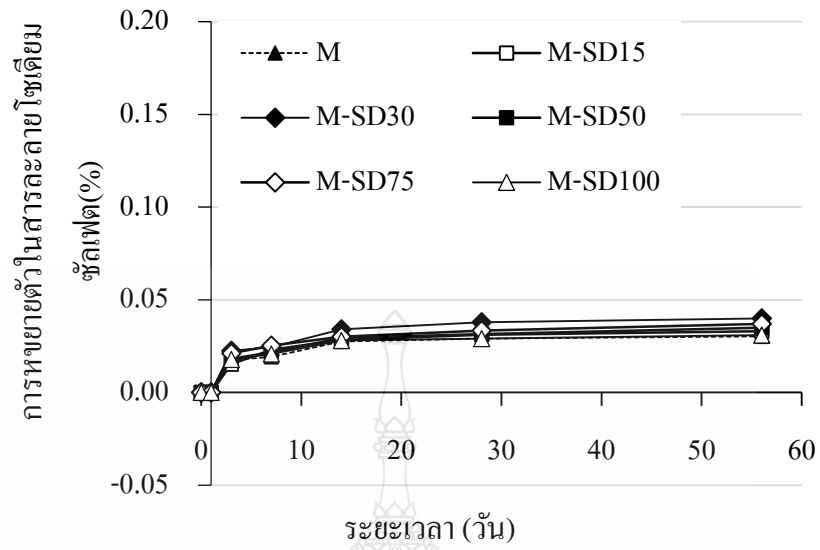
รูปที่ 4.11 ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมทรายล้วนและคอนกรีตผสมหินฝุ่นชนิด SD และ OD แทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 56 วัน

#### 4.3.5 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

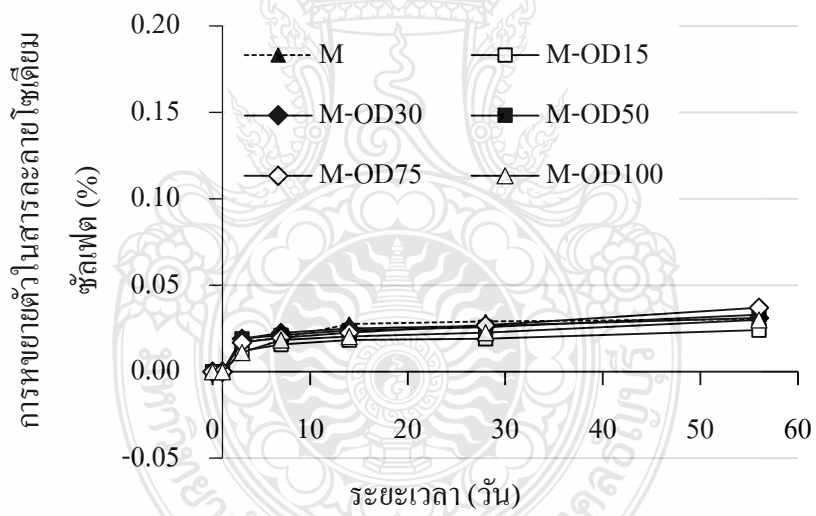
เนื่องจากกลไกการทำลายของสารละลายซัลเฟตทั้งโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ให้ผลการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ไปในทิศทางเดียว โดยเฉพาะในกรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้นให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนกว่า ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากการศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย จำนวน 2 ชนิด คือ SD และ OD โดยการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นแต่ละชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร มีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) ในทุกๆอัตราส่วนการแทนที่มีค่าไม่แตกต่างกันกับมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน



ก) หินฝุ่น SD



ข) หินฝุ่น OD

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของมอร์ต้าร์

### 4.3 สรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างมอร์ต้าร์/คอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นกับทรายล้วน

จากการศึกษาสมบัติคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในครั้งนี้ สามารถเปรียบเทียบสมบัติของมอร์ต้าร์/คอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) กับสมบัติของมอร์ต้าร์/คอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของมอร์ต้าร์/คอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นกับเมื่อใช้ทรายล้วน

รายการ	ใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย	ใช้หินฝุ่น OD แทนที่ทราย
1. สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต		
ค่าการยุบตัว	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า
ระยะเวลาก่อตัว	ไม่แตกต่าง	สูงกว่า
กำลังอัดประลัย	สูงกว่า	สูงกว่า
กำลังดึง	สูงกว่า	สูงกว่า
2. สมบัติด้านความคงทนของมอร์ต้าร์/คอนกรีต		
การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์	ต่ำกว่า	ต่ำกว่า
การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์	ไม่แตกต่าง	ไม่แตกต่าง
ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต	สูงกว่า	ต่ำกว่า
การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต	ไม่แตกต่าง	ไม่แตกต่าง
การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์	ไม่แตกต่าง	ไม่แตกต่าง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาสมบัติคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในครั้งนี สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD มีค่ามากกว่าของ OD
- 2) การก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย มีค่าไม่แตกต่าง ในขณะที่การก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น OD มีแนวโน้มนานกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน
- 3) กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD
- 4) การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน โดยการหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่น SD และ OD มีค่าไม่แตกต่างกัน
- 5) การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีค่าไม่แตกต่างกันกับมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน
- 6) ความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นในคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีค่าไม่แตกต่างกันกับคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน
- 7) ประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย มีค่ามากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ในขณะที่ประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น OD น้อยกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน
- 8) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีค่าไม่แตกต่างกันกับมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน

## บรรณานุกรม

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2553), ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 6, กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [2] วินิต ช่อวิเชียร, (2539), คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 8, กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป.สัมพันธพาณิชย์.
- [3] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2556), คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มวลรวม และคอนกรีต, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล, สุวิมล สัจจานิชย์, บุญรอด คุปดีทัฬหิ และ มนสิข สาริกะภูติ. (2543). ความคงทนของคอนกรีต.
- [5] ASTM Standard C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A (2002)
- [6] Tongaroonsri, S. (2009). Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and shrinkage Cracking in Concrete. PhD Thesis, Sirindhorn International Institute of Technology and Faculty of Engineering, Thammasat University: Pathum thani, Thailand.
- [7] ศักรินทร์ เหลืองกาจร. การควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต สืบค้นจาก [http://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy\\_com/b-p0059.pdf](http://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf)
- [8] The Constructor Civil Engineering Home, “The Mechanism of Reinforcement Corrosion : Carbonation”, (online),2014 Available: <http://theconstructor.org/concrete/durability1/reinforcement-corrosion-causesprevention/6179/>, (18 January 2014).
- [9] คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ.(2007).ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต.
- [10] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: บริษัทจุดทอง จำกัด.
- [11] Mindess, S. and J.F. Young. (1981). Concrete. Englewood Cliffs, N. J.:Prentice-Hall, Inc.
- [12] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. (2004). ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ,บริษัทจุดทองจำกัด.
- [13] ทวีชัย ตำราญวานิช. (2004). Introduction to Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete [online]. Available URL:<http://www.bucc4.buu.ac.th~twc>.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] Al-Amoudi, O.S.B., “Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review,”  
Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK., 1999.
- [15] American Concrete Institute, ACI Committee 201, “Guide to Durable Concrete”, ACI 201.  
2R-92,1992.
- [16] ประชุม คำพูน, 2548. การศึกษาคุณสมบัติของหินฝุ่นเพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียด, วารสาร  
วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2: 33-37
- [17] เผ่าพงศ์ นิจันท์พันธ์ศรี และ ประชุม คำพูน, 2549. การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่น  
แทนที่ทราย, วารสารสมาคมนักวิจัย, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2 : 29-40.
- [18] ชีระ เทพพรหม. (2552). การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทราย  
หยาบ กรณีศึกษา: หินฝุ่นโรงโม่หินนราธิวาส. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์  
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 : 28-41
- [19] สุรัชย์ โกเมนธรรมโสภณ (2556). การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ฝุ่นแกรนิตคัดขนาดเป็น  
ส่วนผสมแทนทราย กรณีศึกษาหินฝุ่นแกรนิตจากโรงโม่หินของบริษัทโรงโม่ไทยจำกัด.  
วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 : 49-60
- [20] รัฐสุวรรณ กิ่งแก้ว, ปณิตริดา ไชยจิตร, วีรพงศ์ โชติช่วย และ จรรยา ใจหาญ ,(2558). การใช้หิน  
ฝุ่นแทนทรายในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ. วารสารเทคโนโลยีภาคใต้ ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 : 55-61
- [21] A. Arivumangai and T. Felixkala .(2014). Strength and Durability Properties of Granite Powder  
Concrete. Research scholar, Department of Civil Engineering, St. Peter’s University,  
Chennai, India

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา



ตารางที่ ก.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C128

รายการ	ทราย
A: น้ำหนักของทรายหลังจากอบแห้ง (ก.)	495.57
B: น้ำหนักของขวดแก้ววัดปริมาตรที่ใส่น้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)	652.12
C: น้ำหนักของขวดแก้ววัดปริมาตร ที่ใส่ทรายและน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)	980.55
S: น้ำหนักของทรายที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (ก.)	500.00
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)=A/(B+S-C)	2.89
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity, SSD)=S/(B+S-C)	2.91
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)=A/(B+A-C)	2.96
ร้อยละการดูดน้ำของทราย (Absorption)=[(S-A)/A]x100(%)	0.89

ตารางที่ ก.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของหินฝุ่น (SD) ตามมาตรฐาน ASTM C128

รายการ	หิน (SD)
A: น้ำหนักของหินฝุ่นหลังจากอบแห้ง (กรัม)	495.65
B: น้ำหนักของขวดแก้ววัดปริมาตรที่ใส่น้ำจนถึงขีดที่กำหนด (กรัม)	650.12
C: น้ำหนักของขวดแก้ววัดปริมาตร ที่ใส่หินฝุ่นและน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (กรัม)	964.60
S: น้ำหนักของหินฝุ่นที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	500.00
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)=A/(B+S-C)	2.67
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity, SSD)=S/(B+S-C)	2.70
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)=A/(B+A-C)	2.74
ร้อยละการดูดน้ำของหินฝุ่น (Absorption)=[(S-A)/A]x100(%)	0.88

ตารางที่ ก.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของหินฝุ่น (OD) ตามมาตรฐาน ASTM C128

รายการ	หิน (OD)
A: น้ำหนักของหินฝุ่นหลังจากอบแห้ง (กรัม)	492.88
B: น้ำหนักของขวดแก้ววัดปริมาตรที่ใส่น้ำจนถึงขีดที่กำหนด (กรัม)	649.94
C: น้ำหนักของขวดแก้ววัดปริมาตร ที่ใส่หินฝุ่นและน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (กรัม)	965.15
S: น้ำหนักของหินฝุ่นที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	500.00
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)=A/(B+S-C)	2.67
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity, SSD)=S/(B+S-C)	2.71
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)=A/(B+A-C)	2.77
ร้อยละการดูดน้ำของหินฝุ่น (Absorption)=[(S-A)/A]x100(%)	1.44

ตารางที่ ก.4 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

รายการ	ทราย		หินฝุ่น SD		หินฝุ่น OD		
	1	2	3	4	5	6	
น้ำหนักกระบอกตวง (กก.)	3.8	3.804	3.8	3.804	3.8	3.804	
น้ำหนักกระบอกตวง+น้ำ (กก.)	6.7	6.704	6.7	6.704	6.7	6.704	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28	28	28	28	28	29	
น้ำหนักของน้ำที่เติมเข้าไปในกระบอกตวง (กก.)	2.900	2.900	2.900	2.900	2.900	2.900	
ปริมาตรของกระบอกตวง (ลิตร)	2.889	2.889	2.889	2.889	2.889	2.889	
น้ำหนักของกระบอกตวง+มวลรวม (กก.)	9.160	9.200	9.140	9.300	9.000	9.180	
น้ำหนักของมวลรวมที่เติมเข้าไปในกระบอกตวง (กก.)	5.360	5.396	5.340	5.496	5.200	5.376	
หน่วยน้ำหนักของมวลรวม (กก./ม. <sup>3</sup> )	แต่ละอย่าง	1,855.31	1,867.77	1,848.39	1,902.39	1,799.93	1,860.85
	เฉลี่ย	1,861.54		1,875.39		1,830.39	

ตารางที่ ก.5 การกระจายขนาดคละของทราย ASTM C33

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0	0	0
เบอร์ 8	100	10	10
เบอร์ 16	225	22.5	32.5
เบอร์ 30	250	25	57.5
เบอร์ 50	225	22.5	80
เบอร์ 100	150	15	95
ถาด	50	5	100
รวม	1000	100	

ตารางที่ ก.6 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น OD-15 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.01	0.00	0.00
เบอร์ 8	134.81	13.48	13.48
เบอร์ 16	233.61	23.36	36.84
เบอร์ 30	215.96	21.60	58.44
เบอร์ 50	196.85	19.68	78.12
เบอร์ 100	142.24	14.22	92.35
ถาด	76.33	7.63	99.98
รวม	999.80	99.98	

ตารางที่ ก.7 การกระจายขนาดกละของหินฝุ่น OD-30 ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.01	0.00	0.00
เบอร์ 8	171.75	17.18	17.18
เบอร์ 16	244.82	24.48	41.66
เบอร์ 30	200.87	20.09	61.74
เบอร์ 50	175.63	17.56	79.31
เบอร์ 100	130.46	13.05	92.35
ถาด	76.13	7.61	99.97
รวม	999.66	99.97	

ตารางที่ ก.8 การกระจายขนาดกละของหินฝุ่น OD-50 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.02	0.00	0.00
เบอร์ 8	221.01	22.10	22.10
เบอร์ 16	259.76	25.98	48.08
เบอร์ 30	180.74	18.07	66.15
เบอร์ 50	147.35	14.74	80.89
เบอร์ 100	114.75	11.47	92.36
ถาด	75.87	7.59	99.95
รวม	999.49	99.95	

ตารางที่ ก.9 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น OD-75

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.03	0.00	0.00
เบอร์ 8	282.59	28.26	28.26
เบอร์ 16	278.44	27.84	56.11
เบอร์ 30	155.57	15.56	71.66
เบอร์ 50	112.00	11.20	82.86
เบอร์ 100	95.11	9.51	92.37
ถัด	75.53	7.55	99.93
รวม	999.26	99.93	

ตารางที่ ก.10 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น OD-100

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.04	0.00	0.00
เบอร์ 8	344.16	34.42	34.42
เบอร์ 16	297.12	29.71	64.13
เบอร์ 30	130.41	13.04	77.17
เบอร์ 50	76.64	7.66	84.84
เบอร์ 100	75.47	7.55	92.38
ถัด	75.20	7.52	99.90
รวม	999.04	99.90	



ตารางที่ ก.11 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น SD-15 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	96.69	9.67	9.67
เบอร์ 16	221.74	22.17	31.84
เบอร์ 30	231.46	23.15	54.99
เบอร์ 50	220.36	22.04	77.02
เบอร์ 100	155.52	15.55	92.58
ถาด	73.83	7.38	99.96
รวม	999.60	99.96	

ตารางที่ ก.12 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น SD-30 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	95.52	9.55	9.55
เบอร์ 16	221.08	22.11	31.66
เบอร์ 30	231.86	23.19	54.85
เบอร์ 50	222.66	22.27	77.11
เบอร์ 100	157.03	15.70	92.81
ถาด	71.13	7.11	99.93
รวม	999.27	99.93	

ตารางที่ ก.13 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น SD-50 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	93.97	9.40	9.40
เบอร์ 16	220.20	22.02	31.42
เบอร์ 30	232.39	23.24	54.66
เบอร์ 50	225.73	22.57	77.23
เบอร์ 100	159.03	15.90	93.13
ถาด	67.53	6.75	99.88
รวม	998.83	99.88	

ตารางที่ ก.14 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น SD-75 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	92.02	9.20	9.20
เบอร์ 16	219.09	21.91	31.11
เบอร์ 30	233.06	23.31	54.42
เบอร์ 50	229.56	22.96	77.37
เบอร์ 100	161.54	16.15	93.53
ถาด	63.03	6.30	99.83
รวม	998.29	99.83	

ตารางที่ ก.15 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่น SD-100 ตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างอยู่บน ตะแกรง (g)	ร้อยละ ที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสม ที่ค้างบนตะแกรง
เบอร์ 4	0.00	0.00	0.00
เบอร์ 8	90.07	9.01	9.01
เบอร์ 16	217.99	21.80	30.81
เบอร์ 30	233.72	23.37	54.18
เบอร์ 50	233.39	23.34	77.52
เบอร์ 100	164.04	16.40	93.92
ถัด	58.53	5.85	99.77
รวม	997.74	99.77	





ภาคผนวก ข

ตารางแสดงสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 การยุบตัวของคอนกรีต

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีต (kg/m <sup>3</sup> )						ค่ายุบตัว (mm)
		ปูนซีเมนต์ (kg)	ทราย (kg)	หินฟูน (kg)	หิน (kg)	น้ำ (kg)	w/c	
1	C	400	747	-	1003	240	0.60	150
2	C-SD15	400	635	15%v	1003	240	0.60	145
3	C-SD30	400	523	30%v	1003	240	0.60	100
4	C-SD50	400	374	50%v	1003	240	0.60	80
5	C-SD75	400	187	75%v	1003	240	0.60	55
6	C-SD100	400	-	100%v	1003	240	0.60	45
7	C-OD15	400	635	15%v	1003	240	0.60	100
8	C-OD30	400	532	30%v	1003	240	0.60	90
9	C-OD50	400	374	50%v	1003	240	0.60	60
10	C-OD75	400	187	100%v	1003	240	0.60	50
11	C-OD100	400	-	100%v	1003	240	0.60	40



ตารางที่ ข.2 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC									
วันที่ทดสอบ		24-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		30°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		14.20 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่ที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
14.20									
17.05	165	1/2	86	88	84	172	176	168	172
17.35	195	1/2	198	200	190	396	400	380	392
17.40	200	1/4	90	108	100	360	432	400	397
17.50	210	1/4	196	174	192	784	696	768	749
17.55	215	1/20	64	66	60	1280	1320	1200	1267
18.20	235	1/20	146	136	140	2920	2720	2800	2813
18.50	265	1/40	140	156	160	5600	6240	6400	6080
19.45	320	1/50	196	198	198	9800	9900	9900	9867
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						187	188	181	185
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						257	253	248	253

ตารางที่ ข.3 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-SD15)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-SD15									
วันที่ทดสอบ		24-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		28°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		14.50 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
14.50									
17.40	170	1/2	90	68	62	180	136	124	147
17.55	185	1/2	130	120	130	260	240	260	253
18.15	205	1/4	122	106	116	488	424	464	459
18.30	220	1/20	82	80	82	1640	1600	1640	1627
19.00	250	1/40	198	176	178	3960	3520	3560	3680
19.05	255	1/40	120	116	118	4800	4640	4720	4720
19.45	295	1/50	122	120	120	6100	6000	6000	6033
20.00	310	1/50	140	138	164	7000	6900	8200	7367
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						206	183	183	191
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						263	242	235	247

ตารางที่ ข.4 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-SD30)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-SD30									
วันที่ทดสอบ		24-ธ.ค.-90							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		29°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		15.10 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
15.10									
18.20	190	1/2	136	136	136	272	272	272	272
18.40	210	1/4	152	144	150	608	576	600	595
19.05	235	1/20	130	138	136	2600	2760	2720	2693
19.20	250	1/40	104	86	100	4160	3440	4000	3867
20.00	290	1/50	106	112	126	5300	5600	6300	5733
20.30	320	1/50	150	158	160	7500	7900	8000	7800
21.00	350	1/50	176	174	161	8800	8700	8050	8517
21.20	370	1/50	180	177	170	9000	8850	8500	8783
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						193	191	188	191
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						251	254	243	249



ตารางที่ ข.5 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-SD50)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสม C-SD50									
วันที่ทดสอบ		24-ธ.ค.-90							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		29°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		15.50 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
15.50									
18.25	155	1/2	62	70	66	124	140	132	132
18.45	175	1/2	138	122	130	276	244	260	260
19.05	195	1/4	118	122	118	472	488	472	477
19.20	210	1/20	82	88	82	1640	1760	1640	1680
20.00	230	1/20	200	200	200	4000	4000	4000	4000
20.20	250	1/40	190	150	186	7600	6000	7440	7013
20.25	300	1/50	154	142	168	7700	7100	8400	7733
20.45	320	1/50	184	192	178	9200	9600	8900	9233
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						172	175	174	174
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						247	227	228	234

ตารางที่ ข.6 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-SD75)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-SD75									
วันที่ทดสอบ		24-ธ.ค.-90							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		28°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		17.00 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
17.00									
19.10	130	1/2	46	46	46	92	92	92	92
19.30	150	1/2	120	112	118	240	224	236	233
19.50	170	1/4	112	106	118	448	424	472	448
20.20	200	1/20	106	110	122	2120	2200	2440	2253
20.35	215	1/40	80	78	82	3200	3120	3280	3200
20.55	235	1/40	130	146	148	5200	5840	5920	5653
21.15	255	1/50	122	126	124	6100	6300	6200	6200
21.40	280	1/50	150	164	160	7500	8200	8000	7900
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						163	162	159	161
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						228	215	223	222

ตารางที่ ข.7 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-SD100)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-SD100									
วันที่ทดสอบ		24-ธ.ค.-90							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		29°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		17.30 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
17.30									
19.55	145	1/2	70	74	74	140	148	148	145
20.20	160	1/2	152	138	162	304	276	324	301
20.40	180	1/4	124	148	150	496	592	600	563
21.10	210	1/20	134	146	144	2680	2920	2880	2827
21.30	230	1/40	90	114	92	3600	4560	3680	3947
21.50	250	1/40	136	158	158	5440	6320	6320	6027
22.30	290	1/50	122	146	150	6100	7300	7500	6967
23.20	340	1/50	166	160	168	8300	8000	8400	8233
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						164	175	168	169
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						238	222	226	229

ตารางที่ ข.8 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-OD15)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-OD15									
วันที่ทดสอบ		23-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		25°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		17.20 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
17.20									
20.00	160	1/2	32	34	30	64	68	60	64
20.50	210	1/2	144	136	150	288	272	300	287
21.20	240	1/4	152	162	166	608	648	664	640
21.45	265	1/20	110	150	112	2200	3000	2240	2480
22.30	310	1/40	116	160	128	4640	6400	5120	5387
23.20	360	1/50	144	158	140	7200	7900	7000	7367
23.50	390	1/50	166	168	168	8300	8400	8400	8367
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						220	221	215	205
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						303	279	299	279

ตารางที่ ข.9 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-OD30)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-OD30									
วันที่ทดสอบ		23-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		25°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		18.00 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
18.00									
21.00	180	1/2	54	54	44	108	108	88	101
21.30	210	1/2	166	112	100	332	224	200	252
21.50	230	1/4	136	112	104	544	448	416	469
22.30	270	1/20	152	106	126	3040	2120	2520	2560
22.55	295	1/40	140	132	120	5600	5280	4800	5227
23.30	330	1/50	118	114	114	5900	5700	5700	5767
23.50	350	1/50	129	140	144	6450	7000	7200	6883
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						211	199	205	215
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						290	272	268	277

ตารางที่ ข.10 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-OD50)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-OD50									
วันที่ทดสอบ		23-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		24.5°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		18.35 น.							
เวลาที่บันทึก	วงเวลา(นาที)	พื้นที่ที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
18.35									
21.55	200	1/2	90	50	54	180	100	108	129
22.20	225	1/2	124	110	116	248	220	232	233
22.35	240	1/4	126	84	80	504	336	320	387
22.50	255	1/4	168	118	136	672	472	544	563
23.25	290	1/20	146	116	130	2920	2320	2600	2613
24.00	325	1/40	126	106	138	5040	4240	5520	4933
24.20	345	1/50	104	100	140	5200	5000	7000	5733
24.50	375	1/50	168	150	164	8400	7500	8200	8033
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						220	231	229	227
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						296	301	293	282

ตารางที่ ข.11 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-OD75)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสม C-OD75									
วันที่ทดสอบ		23-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		24°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		19.15 น.							
เวลาที่บันทึก	วงเวลา(นาที)	พื้นที่ที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
19.15									
23.00	225	1/2	74	86	80	148	172	160	160
23.25	250	1/2	162	146	162	324	292	324	313
23.55	280	1/4	132	138	176	528	552	704	595
24.25	310	1/20	108	126	164	2160	2520	3280	2653
24.50	335	1/40	108	108	126	4320	4320	5040	4560
1.30	375	1/50	110	104	120	5500	5200	6000	5567
2.00	405	1/50	144	165	166	7200	8250	8300	7917
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						220	225	230	226
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						290	285	294	290

ตารางที่ ข.12 การทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต (ส่วนผสม C-OD100)

ผลการทดสอบการก่อตัวของคอนกรีต ส่วนผสมC-OD100									
วันที่ทดสอบ		23-ธ.ค.-60							
อุณหภูมิที่ทดสอบ		24°C							
เวลาที่น้ำสัมผัสกับปูน		19.50 น.							
เวลาที่บันทึก	ช่วงเวลา (นาที)	พื้นที่เข็ม	แรงต้านทาน(ปอนด์)			หน่วยแรงต้าน (ปอนด์/นิ้ว)			
			No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average
19.50									
23.30	220	1/2	146	172	122	292	344	244	293
23.50	240	1/4	134	148	134	536	592	536	555
24.25	265	1/20	122	114	110	2440	2280	2200	2307
24.50	290	1/40	102	140	100	4080	5600	4000	4560
1.50	350	1/50	108	120	110	5400	6000	5500	5633
2.20	380	1/50	158	164	146	7900	8200	7300	7800
2.50	410	1/50	188	184	178	9400	9200	8900	9167
Initial setting time at penetration resistance 500 psi (min)						210	210	214	233
Final setting time at penetration resistance 4000 psi (min)						285	271	292	298



ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 1 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C	9/12/60	10/12/60	1	100	2.34	119.1	11.91	11.88
			2	100	2.34	117.8	11.78	
			3	100	2.34	119.5	11.95	
C-SD15	14/12/60	15/12/60	1	100	2.32	137.8	13.78	13.88
			2	100	2.36	138.7	13.87	
			3	100	2.34	139.9	13.99	
C-SD30	14/12/60	15/12/60	1	100	2.34	116.6	11.66	14.0
			2	100	2.38	140.0	14.00	
			3	100	2.34	144.5	14.45	
C-SD50	14/12/60	15/12/60	1	100	2.34	116.5	11.65	14.05
			2	100	2.32	119.8	11.98	
			3	100	2.32	122.4	12.24	
C-SD75	2/12/60	3/12/60	1	100	2.32	140.5	14.05	15.11
			2	100	2.36	127.7	12.77	
			3	100	2.36	102.6	10.26	
C-SD100	3/12/60	4/12/60	1	100	2.34	170.6	17.06	15.90
			2	100	2.38	151.1	15.11	
			3	100	2.36	166.9	16.69	
C-OD15	4/12/60	5/12/60	1	100	2.34	98.9	9.89	12.20
			2	100	2.32	94.1	9.41	
			3	100	2.36	68.5	6.85	
C-OD30	5/12/60	6/12/60	1	100	2.34	140.1	14.01	12.66
			2	100	2.34	122.00	12.2	
			3	100	2.34	131.1	13.11	
C-OD50	6/12/60	7/12/60	1	100	0.00	119.8	11.98	12.61
			2	100	2.34	119.7	11.97	
			3	100	2.32	132.4	13.24	

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 1 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C-OD75	7/12/60	8/12/60	1	100	2.34	145.5	14.55	13.90
			2	100	2.34	141.1	14.11	
			3	100	2.32	139.00	13.9	
C-OD100	8/12/60	9/12/60	1	100	2.34	108.8	10.88	14.11
			2	100	2.34	119.00	11.9	
			3	100	2.34	113.6	11.36	



ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 7 วัน โดยเข็นในสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C	9/12/60	16/12/60	1	100	2.34	286.2	28.62	23.27
			2	100	2.38	228.2	22.82	
			3	100	2.36	237.1	23.71	
C-SD15	14/12/60	21/12/60	1	100	2.38	317.3	31.73	24.92
			2	100	2.40	263.3	26.33	
			3	100	2.40	322.2	32.22	
C-SD30	14/12/60	21/12/60	1	100	2.38	241.2	24.12	25.45
			2	100	2.32	259.8	25.98	
			3	100	2.34	249.2	24.92	
C-SD50	14/12/60	21/12/60	1	100	2.34	241.0	24.10	25.78
			2	100	2.36	251.6	25.16	
			3	100	2.34	257.8	25.78	
C-SD75	2/12/60	9/12/60	1	100	2.38	214.5	21.45	25.81
			2	100	2.38	258.1	25.81	
			3	100	2.42	237.0	23.7	
C-SD100	3/12/60	10/12/60	1	100	2.42	240.6	24.06	26.48
			2	100	2.36	288.9	28.89	
			3	100	2.38	320.7	32.07	
C-OD15	4/12/60	11/12/60	1	100	2.34	265.8	26.58	24.00
			2	100	2.32	264.1	26.41	
			3	100	2.36	263.5	26.35	
C-OD30	5/12/60	12/12/60	1	100	2.34	268.4	26.84	24.55
			2	100	2.38	278.2	27.82	
			3	100	2.46	189.9	18.99	
C-OD50	6/12/60	13/12/60	1	100	2.34	286.7	28.67	25.50
			2	100	2.38	273.8	27.38	
			3	100	2.38	271.6	27.16	

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 7 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C-OD75	7/12/60	14/12/60	1	100	2.36	287.8	28.78	25.51
			2	100	2.46	199.8	19.98	
			3	100	2.36	265.6	26.56	
C-OD100	8/12/60	15/12/60	1	100	2.36	281.7	28.17	24.10
			2	100	2.44	162.1	16.21	
			3	100	2.36	200.2	20.02	



ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 14 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C	9/12/60	23/12/60	1	100	2.36	272.7	27.27	27.27
			2	100	2.34	315	31.5	
			3	100	2.42	273.9	27.39	
C-SD15	14/12/60	28/12/60	1	100	2.38	276.3	27.63	28.49
			2	100	2.4	330.1	33.01	
			3	100	2.38	355.1	35.51	
C-SD30	14/12/60	28/12/60	1	100	2.36	263.5	26.35	29.41
			2	100	2.4	266.9	26.69	
			3	100	2.32	276.1	27.61	
C-SD50	14/12/60	28/12/60	1	100	2.36	253.7	25.37	29.56
			2	100	2.4	161.2	16.12	
			3	100	2.38	277.1	27.71	
C-SD75	2/12/60	16/12/60	1	100	2.38	305.2	30.52	30.52
			2	100	2.4	261.6	26.16	
			3	100	2.4	247.7	24.77	
C-SD100	3/12/60	17/12/60	1	100	2.38	350.9	35.09	32.53
			2	100	2.36	325.0	32.5	
			3	100	2.38	325.5	32.55	
C-OD15	4/12/60	18/12/60	1	100	2.36	310.1	31.01	28.13
			2	100	2.36	281.3	28.13	
			3	100	2.34	298.6	29.86	
C-OD30	5/12/60	19/12/60	1	100	2.4	259.5	25.95	28.26
			2	100	2.4	296.8	29.68	
			3	100	2.36	259.3	25.93	
C-OD50	6/12/60	20/12/60	1	100	2.38	285.4	28.54	28.54
			2	100	2.36	313	31.3	
			3	100	2.46	198	19.8	

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 14 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C-OD75	7/12/60	21/12/60	1	100	2.36	284.5	28.45	29.77
			2	100	2.4	325.2	32.52	
			3	100	2.38	310.8	31.08	
C-OD100	8/12/60	22/12/60	1	100	2.36	307	30.7	30.50
			2	100	2.34	303	30.3	
			3	100	2.36	257.1	25.71	



ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C	9/12/60	6/1/61	1	100	2.38	341.7	34.17	30.02
			2	100	2.38	356.6	35.66	
			3	100	2.36	310.2	31.02	
C-SD15	14/12/60	11/1/61	1	100	2.36	273.2	27.32	31.16
			2	100	2.36	284.9	28.49	
			3	100	2.38	311.6	31.16	
C-SD30	14/12/60	11/1/61	1	100	2.38	250.5	25.05	31.21
			2	100	2.38	260.9	26.09	
			3	100	2.38	312.1	31.21	
C-SD50	14/1/60	11/1/61	1	100	2.34	232.6	23.26	31.41
			2	100	2.36	314.1	31.41	
			3	100	2.34	218.4	21.84	
C-SD75	2/12/60	30/12/60	1	100	2.36	302.1	30.21	32.94
			2	100	2.4	329.4	32.94	
			3	100	2.38	305.5	30.55	
C-SD100	3/12/60	31/12/60	1	100	2.42	289.4	28.94	33.51
			2	100	2.4	335.1	33.51	
			3	100	2.4	237.9	23.79	
C-OD15	4/12/60	1/1/61	1	100	2.36	325.5	32.55	30.33
			2	100	2.4	281.1	28.11	
			3	100	2.38	282.6	28.26	
C-OD30	5/12/60	2/1/61	1	100	2.38	359.5	35.95	30.89
			2	100	2.4	308.9	30.89	
			3	100	2.38	352.1	35.21	
C-OD50	6/12/60	3/1/61	1	100	2.38	291.3	29.13	30.71
			2	100	2.36	348.6	34.86	
			3	100	2.46	281.5	28.15	

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C-OD75	7/12/60	4/1/61	1	100	2.36	315.1	31.51	31.23
			2	100	2.4	301.1	30.11	
			3	100	2.38	279	27.9	
C-OD100	8/12/60	5/1/61	1	100	2.36	306.5	30.65	31.68
			2	100	2.34	316.8	31.68	
			3	100	2.36	297.6	29.76	





ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 56 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C	9/12/60	3/2/61	1	100	2.36	356.3	35.63	31.23
			2	100	2.38	361	36.1	
			3	100	2.38	312.3	31.23	
C-SD15	14/12/60	8/2/61	1	100	2.38	325.2	32.52	32.16
			2	100	2.38	321.6	32.16	
			3	100	2.36	383	38.3	
C-SD30	14/12/60	8/2/61	1	100	2.4	323.7	32.37	33.37
			2	100	2.4	318	31.8	
			3	100	2.36	287.7	28.77	
C-SD50	14/12/60	8/2/61	1	100	2.34	344.3	34.43	33.46
			2	100	2.4	313.3	31.33	
			3	100	2.34	346.3	34.63	
C-SD75	2/12/60	27/1/61	1	100	2.4	324	32.4	34.73
			2	100	2.36	347.3	34.73	
			3	100	2.36	325.4	32.54	
C-SD100	3/12/61	28/1/61	1	100	2.4	348.4	34.84	35.21
			2	100	2.46	342.4	34.24	
			3	100	2.4	352.1	35.21	
C-OD15	4/12/60	29/1/61	1	100	2.36	308.5	30.85	31.68
			2	100	2.38	325	32.5	
			3	100	2.38	282	28.2	
C-OD30	5/12/60	30/1/61	1	100	2.36	352.6	35.26	31.23
			2	100	2.52	333.7	33.37	
			3	100	2.36	336.1	33.61	
C-OD50	6/12/60	31/1/61	1	100	2.36	351.7	35.17	32.99
			2	100	2.38	312.3	31.23	
			3	100	2.42	325.6	32.56	

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 56 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (MPa)
C-OD75	7/12/60	1/2/61	1	100	2.4	334.2	33.42	33.42
			2	100	2.4	343.3	34.33	
			3	100	2.42	367.3	36.73	
C-OD100	8/12/60	2/2/61	1	100	2.38	343.3	34.33	34.33
			2	100	2.42	354	35.4	
			3	100	2.42	273.5	27.35	



ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 28 วัน

ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยเข็นในสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังดึง (kN)	กำลังดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (MPa)
C	9/12/60	6/1/61	1	176.715	12.64	203.3	11.50	11.50
			2	176.715	12.70	225.2	12.74	
			3	176.715	12.68	207.2	11.73	
C-SD15	14/12/60	11/1/61	1	176.715	12.68	170	9.62	11.79
			2	176.715	12.58	201.4	11.40	
			3	176.715	12.64	208	11.77	
C-SD30	14/12/60	11/1/61	1	176.715	12.74	208.7	11.81	11.81
			2	176.715	12.86	180.1	10.19	
			3	176.715	12.56	184.4	10.43	
C-SD50	14/12/60	11/1/61	1	176.715	12.70	198.4	11.23	12.38
			2	176.715	12.76	239.3	13.54	
			3	176.715	12.58	154.3	8.73	
C-SD75	2/12/60	30/12/60	1	176.715	12.72	229.1	12.96	12.49
			2	176.715	12.72	212.4	12.02	
			3	176.715	13.02	150.7	8.53	
C-SD100	3/12/60	31/12/60	1	176.715	12.84	213.1	12.06	12.95
			2	176.715	12.80	225.9	12.78	
			3	176.715	12.68	180.8	10.23	
C-OD15	4/12/60	1/1/61	1	176.715	12.72	195.3	11.05	11.56
			2	176.715	12.86	183.2	10.37	
			3	176.715	12.72	234.4	13.26	
C-OD30	5/12/60	2/1/61	1	176.715	12.84	138.1	7.81	11.85
			2	176.715	12.72	199	11.26	
			3	176.715	12.58	219.7	12.43	
C-OD50	6/12/60	3/1/61	1	176.715	12.70	244.2	13.82	12.30
			2	176.715	12.62	194.6	11.01	
			3	176.715	12.62	190.6	10.79	

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 28 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังอัดประลัย (kN)	กำลังอัด (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (MPa)
C-OD50	6/12/60	3/1/61	1	176.715	12.70	244.2	13.82	12.30
			2	176.715	12.62	194.6	11.01	
			3	176.715	12.62	190.6	10.79	
C-OD75	7/12/60	4/1/60	1	176.715	13.04	191.6	10.84	12.32
			2	176.715	12.68	225.3	12.75	
			3	176.715	12.80	210	11.88	
C-OD100	8/12/60	5/1/61	1	176.715	12.76	229	12.96	12.88
			2	176.715	12.72	227.6	12.88	
			3	176.715	12.86	228.1	12.91	



ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 56 วัน

ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังดึง (kN)	กำลังดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (MPa)
C	9/12/60	3/2/61	1	176.715	12.74	211.6	11.97	11.97
			2	176.715	12.80	223.7	12.66	
			3	176.715	12.64	237.7	13.45	
C-SD15	14/12/60	8/2/61	1	176.715	12.70	223.2	12.63	12.63
			2	176.715	12.78	209.4	11.85	
			3	176.715	12.84	211.1	11.95	
C-SD30	14/12/60	8/2/61	1	176.715	12.70	221.9	12.56	12.87
			2	176.715	12.60	232.9	13.18	
			3	176.715	12.88	247.7	14.02	
C-SD50	14/12/60	8/2/61	1	176.715	12.88	230.4	13.04	13.04
			2	176.715	12.92	221.1	12.51	
			3	176.715	12.68	244.8	13.85	
C-SD75	2/12/60	27/1/60	1	176.715	12.64	200	11.32	13.28
			2	176.715	12.84	172	9.73	
			3	176.715	12.74	228	12.90	
C-SD100	3/12/60	28/1/61	1	176.715	12.74	237	13.41	13.41
			2	176.715	13.10	225	12.73	
			3	176.715	12.82	224	12.68	
C-OD15	4/12/60	29/1/61	1	176.715	12.78	217.8	12.32	12.32
			2	176.715	12.68	249.7	14.13	
			3	176.715	12.70	218.2	12.35	
C-OD30	5/12/60	30/1/61	1	176.715	12.76	177.4	10.04	12.65
			2	176.715	12.58	240.2	13.59	
			3	176.715	12.58	223.6	12.65	
C-OD50	6/12/60	31/1/61	1	176.715	12.80	241.3	13.65	12.86
			2	176.715	12.56	227.2	12.86	
			3	176.715	12.96	236	13.35	

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 56 วัน (ต่อ)

ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ 56 วัน โดยเข็นสารละลายปูนขาว								
ส่วนผสม สัญลักษณ์	วันที่ผสม	วันที่ ทดสอบ	ตัวอย่างที่	พื้นที่ (cm <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (kg)	กำลังดึง (kN)	กำลังดึง (MPa)	ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (MPa)
C-OD75	7/12/60	1/2/61	1	176.715	12.74	213	12.05	13.00
			2	176.715	12.76	246.5	13.95	
			3	176.715	12.78	256.5	14.51	
C-OD100	8/12/60	2/2/61	1	176.715	12.82	239.6	13.56	13.13
			2	176.715	13.10	232.1	13.13	
			3	176.715	12.76	251.2	14.21	



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงสมบัติด้านความคงทนของมอร์ต้าร์และคอนกรีต



ตารางที่ ค.1 การหาค่าตัวแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวของแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ (ร้อยละ)								
ลำดับที่	สัญลักษณ์	อายุ(วัน)						
		1	3	7	14	28	56	80
1	M	0.000	0.001	0.003	0.012	0.026	0.033	0.049
2	M-SD15	0.000	0.003	0.006	0.014	0.020	0.029	0.044
3	M-SD30	0.000	0.004	0.009	0.010	0.022	0.025	0.044
4	M-SD50	0.000	0.005	0.010	0.012	0.021	0.024	0.045
5	M-SD75	0.000	0.000	0.003	0.006	0.018	0.025	0.036
6	M-SD100	0.000	0.001	0.002	0.008	0.021	0.025	0.040
7	M-OD15	0.000	0.002	0.006	0.008	0.012	0.031	0.043
8	M-OD30	0.000	0.001	0.006	0.010	0.018	0.026	0.037
9	M-OD50	0.000	0.002	0.007	0.011	0.016	0.024	0.037
10	M-OD75	0.000	0.003	0.003	0.007	0.014	0.022	0.040
11	M-OD100	0.000	0.001	0.002	0.005	0.015	0.021	0.034



ตารางที่ ค.2 การหาค่าแบบแห้งของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ (ร้อยละ)								
ลำดับที่	สัญลักษณ์	อายุ(วัน)						
		1	3	7	14	28	56	80
1	M	0.000	0.002	0.018	0.037	0.048	0.059	0.077
2	M-SD15	0.000	0.014	0.021	0.033	0.041	0.050	0.082
3	M-SD30	0.000	0.016	0.028	0.035	0.051	0.057	0.089
4	M-SD50	0.000	0.019	0.027	0.034	0.036	0.055	0.089
5	M-SD75	0.000	0.012	0.019	0.038	0.037	0.054	0.081
6	M-SD100	0.000	0.013	0.015	0.030	0.042	0.050	0.082
7	M-OD15	0.000	0.007	0.019	0.030	0.035	0.053	0.080
8	M-OD30	0.000	0.008	0.025	0.037	0.044	0.053	0.090
9	M-OD50	0.000	0.004	0.016	0.032	0.039	0.053	0.075
10	M-OD75	0.000	0.013	0.018	0.031	0.041	0.058	0.091
11	M-OD100	0.000	0.012	0.019	0.032	0.038	0.054	0.085

ตารางที่ ค.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ 28 วัน

การทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นโดยการอายุการเข็นตู้อบคาร์บอนชั้น 28 วัน (มม.)														
ลำดับที่	สัญลักษณ์	ตำแหน่งที่ทำการวัดความลึกการเกิดคาร์บอนชั้น												ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	M	9	8	12	10	11	8	9	10	13	11	10	14	10.417
2	M-SD15	12	7	8	9	7	11	14	9	10	13	6	8	9.500
3	M-SD30	14	13	8	9	12	6	9	10	7	9	7	12	9.667
4	M-SD50	10	8	8	10	15	13	10	10	11	13	7	11	10.500
5	M-SD75	13	9	10	8	8	14	8	16	9	12	8	14	10.750
6	M-SD100	8	10	9	10	8	12	11	14	9	10	9	9	9.917
7	M-OD15	11	8	7	10	7	7	11	11	8	8	10	12	9.167
8	M-OD30	12	9	8	12	10	11	9	10	14	10	11	14	10.833
9	M-OD50	10	9	9	13	12	14	11	9	13	9	9	8	10.500
10	M-OD75	11	11	11	12	10	13	9	8	11	8	13	8	10.417
11	M-OD100	11	9	12	11	13	14	13	12	10	11	14	8	11.500



ตารางที่ ค.4 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ 70 วัน

การทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นโดยการอายุการเข็นตู้อบคาร์บอนชั้น 70 วัน (มม.)														
ลำดับที่	สัญลักษณ์	ตำแหน่งที่ทำการวัดความลึกการเกิดคาร์บอนชั้น												ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	M	19	18	20	19	20	19	18	18	20	19	20	20	19.17
2	M-SD15	19	20	18	18	18	18	19	18	21	18	18	19	18.67
3	M-SD30	18	18	19	17	17	19	20	19	18	19	19	20	18.58
4	M-SD50	19	18	18	19	18	19	21	18	19	19	17	17	18.50
5	M-SD75	20	20	18	21	20	20	23	21	19	20	18	19	19.92
6	M-SD100	18	19	19	18	17	19	18	17	18	18	17	17	17.92
7	M-OD15	19	18	19	19	17	17	18	18	20	18	16	16	17.92
8	M-OD30	19	20	19	22	21	20	18	19	20	20	18	17	19.42
9	M-OD50	21	19	20	20	18	19	20	18	20	19	19	18	19.25
10	M-OD75	19	17	17	20	18	19	19	18	18	18	18	19	18.33
11	M-OD100	21	18	20	19	19	19	20	19	21	21	20	19	19.67



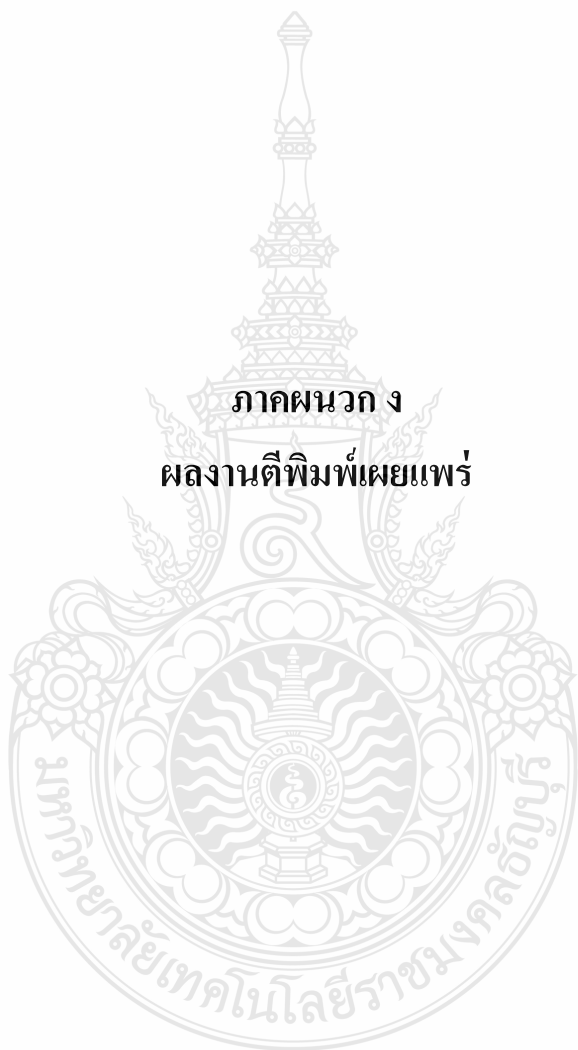
ตารางที่ ค.5 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์				
ลำดับที่	สัญลักษณ์	ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมบ์)		
		ค่าที่1	ค่าที่2	เฉลี่ย
1	C	16151	13649	14900
2	C-SD15	16729	14372	15550
3	C-SD30	16724	14378	15551
4	C-SD50	19032	13069	16051
5	C-SD75	19032	15076	17054
6	C-SD100	20824	14077	17450
7	C-OD15	13409	12919	13164
8	C-OD30	14278	12817	13547
9	C-OD50	15076	11546	13311
10	C-OD75	13649	13649	13649
11	C-OD100	13069	14378	13724

ตารางที่ ค.6 การขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์

การทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (มม.)							
ลำดับที่	สัญลักษณ์	อายุ(วัน)					
		1	3	7	14	28	56
1	M	0.000	0.018	0.019	0.027	0.029	0.030
2	M-SD15	0.000	0.015	0.023	0.028	0.031	0.033
3	M-SD30	0.000	0.022	0.024	0.034	0.038	0.040
4	M-SD50	0.000	0.018	0.022	0.029	0.032	0.035
5	M-SD75	0.000	0.021	0.025	0.030	0.033	0.037
6	M-SD100	0.000	0.018	0.021	0.028	0.029	0.031
7	M-OD15	0.000	0.012	0.016	0.018	0.019	0.024
8	M-OD30	0.000	0.019	0.022	0.025	0.026	0.031
9	M-OD50	0.000	0.019	0.021	0.024	0.026	0.033
10	M-OD75	0.000	0.017	0.020	0.023	0.027	0.037
11	M-OD100	0.000	0.011	0.018	0.020	0.023	0.030

**ภาคผนวก ง**  
**ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่**





## การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ  
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๓  
Proceeding of the 23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering

# NCCE-23



ภายใต้หัวข้อการประชุม

## วิศวกรรมโยธายุคใหม่กับการรับใช้สังคม

SMART Civil Engineering and Social Enterprise

18-20 กรกฎาคม 2561

ณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก

จัดโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย  
ในพระบรมราชูปถัมภ์

กองวิชาวิศวกรรมโยธา  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23  
23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
ศ.ดร. เวลิมชนม์ สติระพจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
ศ.ดร. ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ศ.ดร. ปิติ สุขคนสุพกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ศ.ดร. พาณิช วุฒิพุกภัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. เกษม ชูจารุกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. กิตติชัย สมนทรัพย์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
รศ.ดร. จิตติชัย รุจนกนกนาฏ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. วัชรชัย โชติชอุยางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
รศ.ดร. ชวเลง วนิชเวทิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. ดีบุญ เมธากุลชาติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
รศ.ดร. ทวีช พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. สนกร ชมภูรัตน์	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน
รศ.ดร. สนพร สุปรีย์ศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
รศ.ดร. บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
รศ.ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. พนกฤษณ คลังบุญครอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
รศ.ดร. พรเกษม จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมปฐพี





รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
รศ.พีชรี หอวิจิตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
รศ.ดร. พิทยา แจ่มสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. วรช ก้องกิจกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. วิโรจน์ บุญญกัญญา	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	วิศวกรรมโครงสร้าง
รศ.ดร. วิทิต ปานสุว	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. วิสุทธิ ช่อวิเชียร	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
รศ.ดร. วีรยา นิมอ้อย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
รศ.ดร. สมชาย ปฐมศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
รศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
รศ.ดร. สุนิติ สุภาพ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต	วิศวกรรมโครงสร้าง
รศ.ดร. สุธมา ราชกูร์กิติ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
รศ.ดร. แหลมทอง เหล่าคงดาว	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
รศ.ดร. อภิชาติ โชติสิงการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมปฐพี
รศ.ดร. อัครวัชร เล่นวาริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโครงสร้าง
รศ.ดร. อำพล การุณสุนทวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
รศ.ดร. อума สีนุญเรือง	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ผศ.ดร. เกียรติสุดา สมณา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ผศ.ดร. กมล อมรฟ้า	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมปฐพี



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23  
23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
ผศ.ดร. กริสน์ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. เจริญชัย ฤทธิรุกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. จักขดา ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. วัชร สุจินดา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	วิศวกรรมโครงสร้าง
ผศ.ดร. วัชรพันธ์ จันทนาภักดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโครงสร้าง
พ.อ.ผศ.ชวน จันทวาลย์	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ผศ.ดร. ชินพัฒน์ นัวชาติ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ผศ.ฐิติภรณ์ พอบุตรดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พ.อ.ผศ.ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมโครงสร้าง
ผศ.ดร. ดวงฤดี ไชยศักดิ์วงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ผศ.ต่อศักดิ์ ประเสริฐสังข์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ผศ.ดร. ทรงเกียรติ ภัทรปัทมาวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ผศ.ทวิศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลสุวรรณภูมิ	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ผศ.ดร. ธนศ ศรีศิริโรจนานกร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมปฐพี
ผศ.ดร. ธนากร ภูจินจำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. ธนาถ คงสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	วิศวกรรมปฐพี
ผศ.ดร. ธิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. ธิดารัตน์ บุญศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ผศ.ดร. นันทวัฒน์ จมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.นิรช นกแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
ผศ.ดร. ปกรณ์ ดิษฐกิจ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ผศ.ดร. ปฐมศ ภาณิตพจนาน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมโครงสร้าง
ผศ.ดร. ปณิศจัย ชะบุรีโชติศักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมโครงสร้าง
ผศ.ดร. ประเมศวร์ เหลือเทพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ผศ.ดร. ประชา นุญยานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
ผศ.ดร. ปรียาพร โกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ผศ.ดร. ปิติศานต์ กรำมาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. ไพจิตร ฝาวัน	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ผศ.ดร. พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ผศ.ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมปฐพี
ผศ.ดร. ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโยธาและการศึกษา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
ผศ.ภาวัต ไชยชานวาทิก	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ผศ.ดร. ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมโยธาและการศึกษา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
ผศ.ดร. รัฐพล ภูมบุผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
พ.อ.ผศ.วสันต์ พัฒน์วิชัยโชติ	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. วัจนวงศ์ กริพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมโครงสร้าง



**การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23**  
**23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering**

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
	วิทยาเขตเฉลิม	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. วิชุดา กล้าเวช	มหาวิทยาลัยทักษิณ	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. วิษุวัตต์ เต็มสมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ผศ.ดร. สโรช บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ผศ.ดร. สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. สมบูรณ์ เขียงอิน	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมโครงสร้าง
ผศ.ดร. สยาม ยิมศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมปฐพี
ผศ.ดร. สรณกร เหม-วิบูลย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ผศ.ดร. สิทธา เจนศิริศักดิ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ผศ.ดร. สิริกัญญา ทองชาติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมปฐพี
ผศ.ดร. สุชัยกัญญา ไปยะ-นันทน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ผศ.ดร. สุนิรันดร์ เพชรรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมสำรวจและระบบ สารสนเทศภูมิศาสตร์
ผศ.ดร. สุนิรัตน์ กุศาคาศัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ผศ.ดร. สุภาพร แก้วกอสยิวไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน
ผศ.ดร. สุรมศวรรค์ พิริยะวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ผศ.ดร. สุริยาจรัส ประอ้าย	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมปฐพี
ผศ.ดร. เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ผศ.ดร. เอกชัย ศิริกิจพานิชย์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน
ผศ.ดร. เอกสิทธิ์ ไชยิตสกุลชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมแหล่งน้ำ





รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
พ.อ.พศ.ดร. อนันต์ ปิจวิทย์	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
พศ.ดร. อนุสรณ์ บุญปก	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
พศ.ดร. อภิชาติ คำกาหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมปฐพี
พศ. ดร. อรรณพ วงศ์เรือง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. เกรียงไกร อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
อ.ดร. กรกฎ นุสิทธิ์	สถานวิจัยเพื่อความเลิศทางวิชาการ ด้านเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม หน่วยวิจัยด้านการแปรเปลี่ยนภูมิอากาศ ทรัพยากรธรรมชาติและภัยพิบัติ	วิศวกรรมปฐพี
ร.อ.กฤษฏา ศรีโพธิ์อ่อน	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. กิตติ ทรัพย์ประสม	ผู้อำนวยการแขวงทางหลวงสมุทรสาคร ที่ปรึกษาคน-อนุกรมการการศึกษา ด้านโลจิสติกส์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. จตุพล ตังปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.ดร. จักรพันธ์ เทือกดี-	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.ดร. ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ดร. ชาญชัย ศรีสุธรรม	สำนักสำรวจด้านวิศวกรรม และธรณี กรมชลประทาน	วิศวกรรมปฐพี
อ.ดร. ชาญยุทธ กาฬกาญจน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อ.ดร. ชูกลพัศ เจนจิตต์มงคล	มหาวิทยาลัยสยาม	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. นัฐกรณ์ เจริญธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
พ.อ.นัฐภูมิ ศรีเพชร	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์
ดร. นัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมโครงสร้าง



**การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23**  
**23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering**

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
ดร. ดุษฎี สติระเศรษฐทวี	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ร.อ.ดร. ต້องการ แก้วเฉลิมทอง	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ดร. ทนงศักดิ์ อัมใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. ทยการ จันทรางศู	กรมโยธาธิการและผังเมือง	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. ทรงฤทธิ์ ชยานันท์	กรมทางหลวง	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ดร. ทวีพงษ์ สุขสวัสดิ์	สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนากกรมทางหลวงชนบท	วิศวกรรมปฏิรูป
อ.ดร. ธีรพจน์ ศิริไพโรจน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. นพคุณ บุญกระพ้อ	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ดร. นพดล กรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.บุญพล มีไชโย	มหาวิทยาลัยนเรศวร	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. ประรตนา ประชาบุรุษย์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน	มหาวิทยาลัยพะเยา	วิศวกรรมโครงสร้าง
อ.ดร. ปรีดา พิชยาพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. ปิยนุช ใจแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. พัฒนพงศ์ ไตภาคงาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ดร. พิทรพงษ์ อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ดร. พันธุ์ระวี กองบุญเทียม	มหาวิทยาลัยแม่โจ้	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
พ.ต.พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อ.ภคพงศ์ หอมเนียม	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์ วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
ดร. กัทกรภพ ศิลปาจารย์	กรมทางหลวง	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ภัทรมาศ เทียมเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. ภาคภูมิ รักร่วม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
ดร. มนเกียรติ เสรีกิจ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	วิศวกรรมโครงสร้าง
คุณรัฐธรรม อัสโรฟาร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	วิศวกรรมปฐพี
ดร. วรรณวรางค์ รัตนาภิคม	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมปฐพี
ดร. วรศักดิ์ จักรปิยะนันท์	บริษัท พร็อพเพอร์ตี้เพอร์เฟค จำกัด (มหาชน)	วิศวกรรมโครงสร้าง
อ.ดร. วรินทร์ บุญยะโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. วิชัยรัตน์ แก้วเจือ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.วิชานันท์ ชะม้าย	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์	วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง
ดร. วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. เสถียร เจริญเหรียญ	กรมโยธาธิการและผังเมือง	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. แสงสุรีย์ พึ่งแดง	มหาวิทยาลัยนครพนม	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
ดร. สนธยา ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
อ.ดร. สมชาย ดอนเจดีย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
ดร. สฤกษ์ดี ตียะวงศ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์ วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์



**การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23**  
**23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering**

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
สสิกรณณ์ เหลืองวิซเซอร์	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. สิทธิภัทร เอื้ออภิวัชร	มหาวิทยาลัยบูรพา	วิศวกรรมปฐพี
ดร. สุกิจ ยินดีสุข	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. สุดา อภิธิสุภกรณรัตน์	ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.สุทธิพงษ์ มีใย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
ดร. สุรชาติพย์ สิ้นยัง	มหาวิทยาลัยมหิดล	วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และพลังงาน
สุธารัตน์ หมีนมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. สุริดา ทีปรัถยพันธ์ุ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.สุนิศา คุณารักษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมและเทคโนโลยี การป้องกันประเทศ
อ.สุรัตน์ ศรีจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมปฐพี
ดร. หริส ประสารดำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อ.ห้วงแก้ว บุญสวน	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
คุณเอกรินทร์ เหลืองวิสัย	กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย	วิศวกรรมปฐพี
ดร. อติเทพ ศรีคงศรี	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	วิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโยธาและการศึกษา
ดร. อนันต์ นันทวัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี (ศูนย์สามพร้าว)	วิศวกรรมโครงสร้าง
ดร. อนุวัติ อรรถไชยวุฒิ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยเขตศรีราชา	วิศวกรรมโครงสร้าง วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง





รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

รายชื่อ	สังกัด	สาขา
อ.ดร. อรรถมล วจอกสิทธ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. อรรถวิทย์ อุปโยคิน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะและโลจิสติกส์
อ.ดร. อรอนงค์ ลากปรีสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน
อ.ดร. อัฐสิทธิ์ ศิริวิชราภรณ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	วิศวกรรมปฐพี
ดร. อำนาจ ฤทธิรงค์	บจก.วิศวกรที่ปรึกษา 535	วิศวกรรมปฐพี





Technical Program NCCE23  
**Construction Material Engineering (MAT)**

**MAT\_07: Lightweight Concrete & Durability of Concretes**

Date: Thu, 19th July 2018

Room: v14

**Session Chair: Assistant Professor: Dr.Charoenchai Ridditirud**

**Session Co-Chair: Assistant Professor: Dr.Rattapon Somna**

Session 4	No.	Time	ID	Title and Authors
	1	15:30-15:45	504	<b>Title:</b> Mechanical Properties of Lightweight Mortar Using Rice Husk Ash to Replace Cement and Expandable Polystyrene as Aggregate <b>Authors:</b> Chadchol Kamnerdpan Rattapon Somna Chalermkiat Ittidetphong Kiatsuda Somna Jeerasak Supromwan and Saksit Pantawee
	2	15:45-16:00	505	<b>Title:</b> Effect of Exposed Temperatures and Durations on Strengths of Concrete after Exposure on High Temperatures <b>Authors:</b> Amnaj PorpundungRattapon Somna Nittaya Charianram Chokchai Khomobklang Proramet Petla and Tharin Deesawat
	3	16:00-16:15	522	<b>Title:</b> CEMENTITIOUS PROPERTIES OF CONCRETE AND AUTOGENOUS AND DRYING SHRINKAGES OF MORTAR USING DUST STONE INSTEAD OF SAND <b>Authors:</b> Suwan Omcheb Pitisan Krammart and Nirachorn Nokkaew
	4	16:15-16:30	528	<b>Title:</b> A Study of Compressive Strength of Cellular Lightweight Concrete <b>Authors:</b> Panisa Saengkaew Withit Pansuk and Rungrawee Wattanapornprom
	5	16:30-16:45	151	<b>Title:</b> Evaluation of long term chloride penetration in fly ash- based geopolymer concrete under marine environment by Bulk diffusion test method <b>Authors:</b> Kamolwan Suriwong Lamai Puangpaiwan Tieng Cheewaket Rattapon Somna and Wichian Chalee
	6	16:45-17:00		



## สารบัญบทความ

## หน้า

วิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering, STR)	1-53
วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง (Construction Material Engineering, MAT)	55-111
วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง (Construction Engineering and Management, CEM)	113-182
วิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering, GTE)	183-240
วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ (Intelligent Transportation, Traffic and Logistics Engineering, TRL)	241-302
วิศวกรรมแหล่งน้ำ (Water Resource Engineering, WRE)	303-336
วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Survey and Geographic Information System Engineering, SGI)	337-356
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน (Environmental and Energy Engineering, ENV)	357-378
วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Engineering, INF)	379-384
วิศวกรรมโยธาและการศึกษา (Civil Engineering and Education, CEE)	385-392
วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ (Defense Engineering and Technology, STR)	393-398



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23  
23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering

วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง  
(Construction Material Engineering, MAT)





**MAT52**  
**ID522**

**CEMENTITIOUS PROPERTIES OF CONCRETE AND AUTOGENOUS AND DRYING SHRINKAGES OF MORTAR USING DUST STONE INSTEAD OF SAND**

Suwan Ornceb, Pitisan Krammart\* and Nirachorn Nokkaew

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
\*Corresponding author; E-mail address: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

**Abstract**

This paper aimed to study the slump, setting time, compressive strength and splitting tensile strength of concrete and autogenous and drying shrinkages of mortar when using dust stone (DS) instead of sand. The DS at 0, 15, 30, 50, 75 and 100 percent replacement by volume was applied. Two types of DS were used including DS from site through sieve No. 4 (OD) and another one having gradation according to ASTM C33 (SD). The results showed that the slump of DS concrete had less than that of concrete with plain sand. The slump of OD concrete was much more likely than that of SD concrete. Additional, the setting time of DS concrete was no difference when compared with that of concrete with plain sand. While the setting time of OD concrete had longer than that of concrete with plain sand. Besides, the compressive and splitting tensile strengths of DS concrete had more than those of concrete with plain sand. The compressive and splitting tensile strengths of SD concrete were much more likely than those of OD concrete. Moreover, the autogenous of DS mortar had more than that of mortar with plain sand. The autogenous of SD mortar was no difference with of SD mortar. Finally, the drying shrinkage of DS mortar was no difference when compared with that of concrete with plain sand.

**Keywords :** Dust stone, cementitious properties, autogenous shrinkage, drying shrinkage

**สมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตและการหดตัวของบ่อโตนีตและแบบแห้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย**

สุวรรณ อ่อนเวียน, ปีติศานต์ กร้ามาต\* และ นิราชน นกแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
\*Corresponding author; E-mail address: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ศึกษา ค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตและบ่อโตนีตและแบบแห้งของมอร์ตาร์ เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้หินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (OD) และหินฝุ่นที่มีขนาดละเอียดตาม ASTM C33 (SD) ในขณะทรายใช้ขนาดละเอียดตาม ASTM C33 ผลการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตทรายล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตหินฝุ่น SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD ส่วนการก่อตัวของคอนกรีตหินฝุ่น SD มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตทรายล้วน โดยการก่อตัวของคอนกรีตหินฝุ่น OD มีแนวโน้มน้อยกว่าของคอนกรีตทรายล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตทรายล้วน โดยกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตหินฝุ่น SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD นอกจากนี้พบว่า การหดตัวของบ่อโตนีตของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ทรายล้วนโดยการหดตัวของบ่อโตนีตของมอร์ตาร์หินฝุ่น SD มีค่าไม่แตกต่างกับของหินฝุ่น OD สุดท้ายการหดตัวของแบบแห้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายมีค่าไม่แตกต่างจากของมอร์ตาร์ทรายล้วน

**คำสำคัญ :** หินฝุ่น, สมบัติด้านซีเมนต์, การหดตัวของบ่อโตนีต, การหดตัวของแบบแห้ง



สมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตและการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์  
เมื่อใช้หินฝุ่นแทนทราย  
CEMENTITIOUS PROPERTIES OF CONCRETE AND AUTOGENOUS AND DRYING  
SHRINKAGES OF MORTAR USING DUST STONE INSTEAD OF SAND

สุวรรณ อ่อนเจียม<sup>1</sup> ปิติศานต์ กร้ามาตรา<sup>2</sup> และ นีรชกร นกแก้ว<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท <sup>2,3</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี  
suwan\_o@mail.mutt.ac.th<sup>1</sup>, pitisan.k@en.mutt.ac.th<sup>2</sup>, nirachorn.n@en.mutt.ac.th<sup>3</sup>

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ศึกษา ค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ เมื่อใช้หินฝุ่นแทนทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้หินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (OD) และหินฝุ่นที่มีขนาดตาม ASTM C33 (SD) ในขณะทรายใช้ขนาดและขนาดตาม ASTM C33 ผลการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตทรายล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตหินฝุ่น SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD ส่วนการก่อตัวของคอนกรีตหินฝุ่น SD มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตทรายล้วน โดยที่การก่อตัวของคอนกรีตหินฝุ่น OD มีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตทรายล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนทราย มีค่ามากกว่าของคอนกรีตทรายล้วน โดยกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตหินฝุ่น SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินฝุ่น OD นอกจากนี้พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนทรายมีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ทรายล้วน โดยที่การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์หินฝุ่น SD มีค่าไม่แตกต่างกับของหินฝุ่น OD สุดท้ายการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนทรายมีค่าไม่แตกต่างจากของมอร์ตาร์ทรายล้วน

**คำสำคัญ:** หินฝุ่น, สมบัติด้านซีเมนต์, การหดตัวแบบออโตจีนัส, การหดตัวแบบแห้ง

**Abstract**

This paper aimed to study the slump, setting time, compressive strength and splitting tensile strength of concrete and autogenous and drying shrinkages of mortar when using dust stone (DS) instead of sand. The DS at 0, 15, 30, 50, 75 and 100 percent replacement by volume was applied. Two types of DS were used including DS from site through sieve No. 4 (OD) and another one having gradation according to ASTM C33 (SD). The results showed that the slump of DS concrete had less than that of concrete with plain sand. The slump of OD concrete was much more likely than that of SD concrete. Additional, the setting time of DS concrete was no difference when compared with that of concrete with plain sand. While the setting time of OD concrete had longer than that of concrete with plain sand. Besides, the compressive and splitting tensile strengths of DS concrete had more than those of concrete with plain sand. The compressive and splitting tensile strengths of SD concrete were much more likely than those of OD concrete. Moreover, the autogenous of DS mortar had more than that of mortar with plain sand. The autogenous of SD mortar was no difference with of SD mortar. Finally, the drying shrinkage of DS mortar was no difference when compared with that of concrete with plain sand.

**Keywords:** Dust stone, cementitious properties, autogenous shrinkage, drying shrinkage





## 1. บทนำ

ในปัจจุบันงานด้านวิศวกรรมโยธาเป็นพื้นฐานสำคัญของประเทศที่กำลังพัฒนา เช่น งานก่อสร้างถนน งานก่อสร้างอาคารบ้านเรือน งานก่อสร้างเขื่อนกั้นน้ำ งานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น งานก่อสร้างเหล่านี้จะใช้คอนกรีตเป็นส่วนมากในการก่อสร้าง เนื่องจากคอนกรีตนั้นสามารถหล่อขึ้นรูปและออกแบบให้รับกำลังตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีความคงทนถาวรและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยชานั้น โดยทั่วไปประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำ เป็นส่วนผสม ในส่วนมวลรวมผสมหรือวัสดุผสม (Aggregate) จึงเป็นวัสดุเฉื่อย ได้แก่ หิน ทราย กรวด จึงเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมนั้นมีปริมาณร้อยละ 70-80 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด [1] ซึ่งมวลรวมเหล่านี้เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด เมื่อมีการนำมาใช้ก็ย่อมต้องมีจำนวนลดลงตามกาลเวลา และมีราคาที่สูงขึ้นด้วย

การนำหินที่อยู่ตามธรรมชาติมาใช้นั้นเช่น ใช้เป็นมวลรวม จะต้องมีกระบวนการแปรรูปให้มีขนาดและรูปร่างเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน โดยหินก่อสร้างขนาดต่างๆ ที่ไร้อย่างน้อย 1 นิ้ว จะทำการผลิตประกอบด้วย หิน 1 นิ้ว หินย่อย 3/4 นิ้ว หินเกล็ด (หิน 3/8 นิ้ว) และหินฝุ่น (หิน 3/16 นิ้ว) แต่หาหินฝุ่นที่ได้จากกระบวนการแปรรูปหินจากธรรมชาตินั้น มักจะเป็นผลผลิตของโรงโม่หิน ที่มีอยู่อย่างจำกัด เมื่อเทียบกับผลผลิตทั้งหมดในแต่ละครั้งของโรงโม่หิน จึงเป็นการทำให้กับผู้ประกอบการที่จะต้องหาพื้นที่เก็บกอง และเสียค่าใช้จ่ายในการขนย้าย ทำให้ผู้ประกอบการหลายรายถือว่าหินฝุ่น เป็นวัสดุเหลือใช้ที่สร้างภาระและค่าใช้จ่าย

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของการใช้หินฝุ่น ต่อค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยนำเอาหินฝุ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

## 2. วิธีการศึกษา

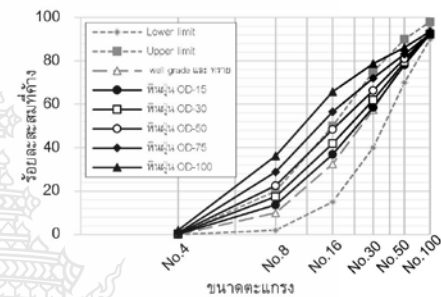
### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [3] หรือมอก.80-2517 ทรายน้ำจืดที่มีขนาดกะตามมาตรฐาน ASTM C33 [2] หินล้างน้ำให้สะอาด และนำไปร่อนตะแกรงเบอร์ 4 นำส่วนที่ค้างตะแกรงไปปรับให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวแห้ง น้ำประปาสะอาด และหินฝุ่น 2 ชนิด ชนิดแรกคือหินฝุ่นที่มีขนาดกะตามมาตรฐาน ASTM C33 [2] (SD) ส่วนชนิดที่สองคือหินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (OD) โดยตารางที่ 1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย และหินฝุ่น ส่วนรูปที่ 1 แสดงแผนภูมิของทรายและหินฝุ่นที่ใช้ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้

การแทนที่หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) ในทรายด้วยอัตราส่วนร้อยละ 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของ ทราย หินฝุ่น

รายการ	ทราย	หินฝุ่น	
		SD	OD
ความถ่วงจำเพาะ	2.96	2.72	2.77
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.89	0.88	1.44



รูปที่ 1 แผนภูมิของทรายและหินฝุ่นที่ใช้

2.2 การทดสอบค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

ค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 [4] ส่วนการก่อตัวของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 [5] กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 [6] โดยใช้ขนาดตัวอย่าง 10 x 10 x 10 ซม. แล้วทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน กรณีกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตรูปทรงระบอบ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 [7] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เป็นรูปทรงระบอบขนาดมาตรฐาน คือ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. และสูง 30 ซม. แล้วทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน

2.3 การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

โดยใช้ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 ซม. ใช้จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม โดยการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสนั้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 [8] เมื่อแกะตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วหุ้มด้วยพลาสติกและหุ้มฟอยล์อีกชั้น เพื่อไม่ให้มีน้ำระเหยออก วัดความยาวเริ่มต้น แล้ววางตัวอย่างไว้ในบรรยากาศปกติ จากนั้นวัดการหดตัวที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน ในขณะที่การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์นั้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596 [9] เมื่อแกะตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนด วัดความยาวเริ่มต้น แล้ววางตัวอย่างไว้ในบรรยากาศปกติ จากนั้นวัดการหดตัวที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน



#### 2.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

การทดสอบหาค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และ การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต ใช้สัดส่วนผสมแสดงดัง ตารางที่ 2 ส่วนการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของ มอร์ตาร์ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว การก่อตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแบบผ่าซีก

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ส่วนผสม (กิโลกรัม)			
			ทราย	หินฝุ่น	หิน	น้ำ
1	C	400	747	-	1003	240
2	C-SD15	400	635	15%v.	1003	240
3	C-SD30	400	523	30%v.	1003	240
4	C-SD50	400	374	50%v.	1003	240
5	C-SD75	400	187	75%v.	1003	240
6	C-SD100	400	-	100%v.	1003	240
7	C-OD15	400	635	15%v.	1003	240
8	C-OD30	400	523	30%v.	1003	240
9	C-OD50	400	374	50%v.	1003	240
10	C-OD75	400	187	75%v.	1003	240
11	C-OD100	400	-	100%v.	1003	240

หมายเหตุ C หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมทรายล้วน โดยใช้ทราย ตามมาตรฐาน ASTM C33 [2] ล้วน, SD หมายถึง หินฝุ่นที่มีขนาดละเอียดของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C33 [2], OD หมายถึง หินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4, 15%v. หมายถึง แทนที่ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง

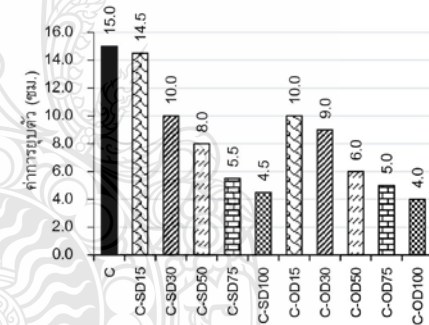
ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ส่วนผสม (กรัม)		
			ทราย	หินฝุ่น	น้ำ
1	M	1.00	2.75	-	0.60
2	M-SD15	1.00	2.34	15%v.	0.60
3	M-SD30	1.00	1.93	30%v.	0.60
4	M-SD50	1.00	1.38	50%v.	0.60
5	M-SD75	1.00	0.69	75%v.	0.60
6	M-SD100	1.00	-	100%v.	0.60
7	M-OD15	1.00	2.34	15%v.	0.60
8	M-OD30	1.00	1.93	30%v.	0.60
9	M-OD50	1.00	1.38	50%v.	0.60
10	M-OD75	1.00	0.69	75%v.	0.60
11	M-OD100	1.00	-	100%v.	0.60

หมายเหตุ M หมายถึง ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมทรายล้วน โดยใช้ทราย ตามมาตรฐาน ASTM C33 ล้วน, SD หมายถึง หินฝุ่นที่มีขนาดละเอียดของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C33, OD หมายถึง หินฝุ่นจากแหล่งผ่านตะแกรงเบอร์ 4, 15%v. หมายถึง แทนที่ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยปริมาตร

### 3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

#### 3.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 2 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ใน ปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะหินฝุ่นมีลักษณะเม็ดที่มีความหยาบ ขรุขระ มากกว่าทราย ทำให้หินฝุ่นมีพื้นที่ผิวมากกว่า ส่งผลให้หินฝุ่นมี ความต้องการน้ำมากกว่า ค่าการยุบตัวจึงมีค่าน้อยกว่า ส่วนค่าการ ยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย มีค่ามากกว่าของหิน ฝุ่น OD ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1 จะเห็นว่าหินฝุ่น SD มี ขนาดละเอียด จึงทำให้มีช่องว่างน้อย พื้นที่ผิวน้อยกว่าหินฝุ่น OD ส่งผลให้คอนกรีตผสมหินฝุ่น SD ความต้องการน้ำน้อยกว่า



รูปที่ 2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

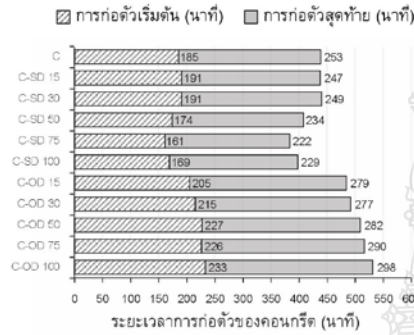
#### 3.2 การก่อตัวของคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงค่าการก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่นแทนที่ ทรายด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่า การก่อตัวของ คอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น SD แทนที่ทราย มีค่าไม่แตกต่างกับของ คอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน ในขณะที่การก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินฝุ่น OD แทนที่ทรายมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ หินฝุ่น OD มีขนาดละเอียดน้อยกว่ามาตรฐาน ASTM C33 [2] ในขณะที่ทรายมาตรฐานที่ใช้มีขนาดละเอียดที่ต่ำกว่าทำให้ทรายสามารถ เข้าไปกระจายตัวได้ดี จึงทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีกว่า





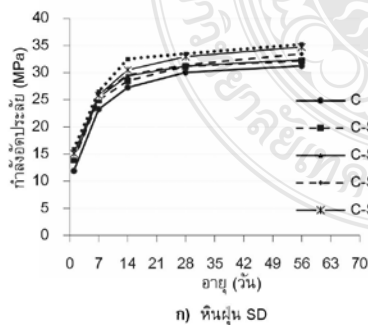
ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่า ทำให้การก่อตัวของคอนกรีต  
นั้นเกิดขึ้นเร็วกว่า



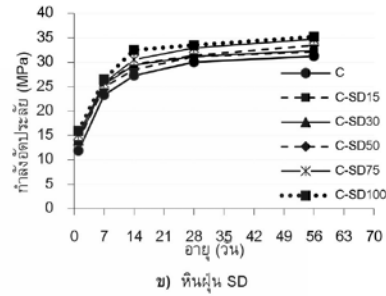
รูปที่ 3 การก่อตัวของคอนกรีต

### 3.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูนแทนที่ทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น อาจเป็นเพราะหินปูนมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม ขรุขระ และมีพื้นที่ผิวมากกว่าทราย จึงทำให้มีปริมาณแพสต์มาเคลือบผิวได้มากกว่า รวมทั้งการขัดกันของหินปูนตีกันว่า ส่งผลให้สามารถรับกำลังอัดประลัยได้มากกว่า ส่วนรูปที่ 5 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (SD และ OD) แทนที่ทราย ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างหินปูน SD และ OD พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน SD แทนที่ทรายมีแนวโน้มมากกว่าของหินปูน OD ทั้งนี้เนื่องมาจาก หินปูน SD มีขนาดกะเทาะที่ละเอียดเหลือเศษคือเป็นจำนวนมาก ทำให้การยึดประสานดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงขึ้น

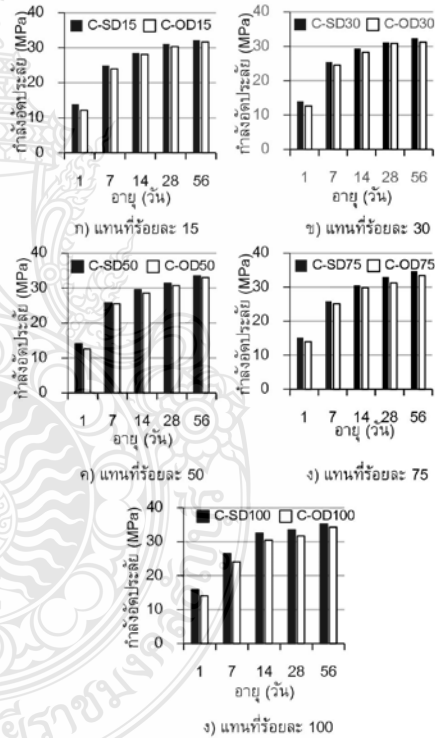


ก) หินปูน SD



ข) หินปูน SD

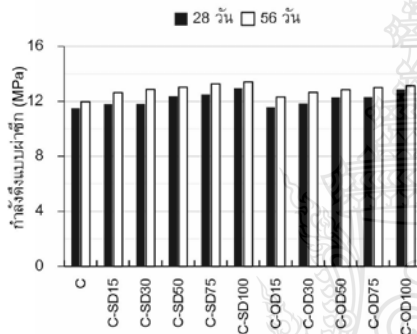
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต



รูปที่ 5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทราย ที่อายุ 1 7 14 28 และ 56 วัน

### 3.4 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

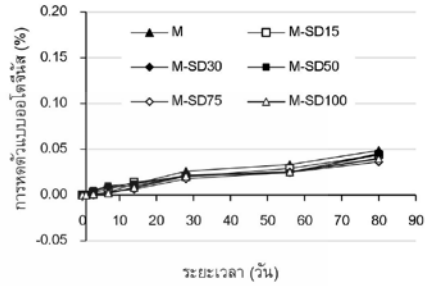
รูปที่ 6 แสดงกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 จะเห็นว่า ผลการทดสอบไปในทางเดียวกันกับกำลังอัดปลายของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของหินปูน พบว่ากำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน SD แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของหินปูน OD เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



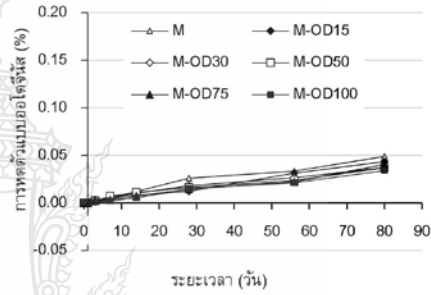
รูปที่ 6 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

### 3.5 การหดตัวแบบออโดจีนัสของมอร์ตาร์

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโดจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ทรายด้วยหินปูน อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร พบว่าการหดตัวแบบออโดจีนัสของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหินปูนมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมผิวขรุขระ ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคด้านการหดตัวได้ดีกว่าทรายที่มีลักษณะกลมมน และเมื่อเปรียบเทียบการหดตัวแบบออโดจีนัสของมอร์ตาร์ที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) ในอัตราส่วนการแทนที่ทรายต่างๆ พบว่าการหดตัวมีค่าไม่แตกต่างกัน



ก) หินปูน SD

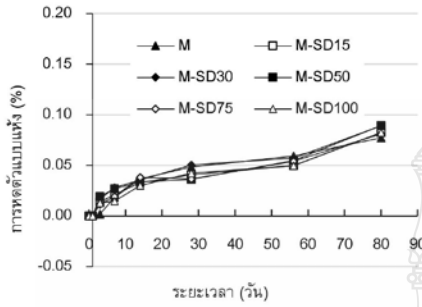


ข) หินปูน OD

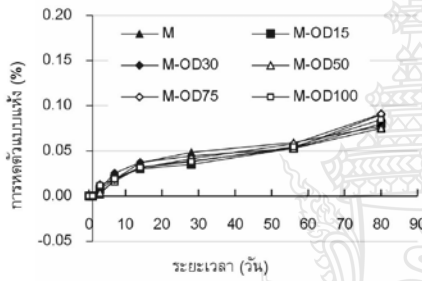
### รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโดจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

### 3.6 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ทรายด้วยหินปูน อัตราส่วนร้อยละ 0 15 30 50 75 และ 100 โดยปริมาตร พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) ในทุกๆ อัตราส่วนการแทนที่ที่มีค่าไม่แตกต่างกันกับมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน



ก) หินปูน SD



ข) หินปูน OD

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

#### 4. สรุปผล

จากการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตหินปูน SD มีแนวโน้มมากกว่าของหินปูน OD
- การก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน SD แทนที่ทราย มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ในขณะที่การก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน OD แทนที่ทรายมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น
- กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเมื่อใช้หินปูน (ทั้ง SD และ OD) แทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตหินปูน SD แทนที่ทรายมีแนวโน้มมากกว่าของหินปูน OD
- การหดตัวแบบอบแห้งของมอร์ตาร์ที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน และค่าการ

หดตัวแบบอบแห้งของมอร์ตาร์หินปูน SD มีค่าไม่แตกต่างกับหินปูน OD

5) การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย (ทั้ง SD และ OD) มีค่าไม่แตกต่างกับของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้ และบริษัท ภาณุจนาศึลาภัณฑ์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์หินปูนที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2553), ปูนซีเมนต์ ป่อโซไลอัน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [2] American Society for Testing and Materials, ASTM C33-02. ( 2002) . **Standard Specification for Concrete Aggregates**. Annual Book of ASTM Standard.
- [3] American Society for Testing and Materials, ASTM C150 / C150M-17, **Standard Specification for Portland Cement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [4] American Society for Testing and Materials, ASTM C143-00: **Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vol.04.02, Philadelphia,89-91.
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM C403/C403M-99: **Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance**. Annual Book of ASTM Standard, 2001, Vo.04.02, Philadelphia,222-227.
- [6] British Standards, BS 1881-116:1983 : **Method for determination of compressive strength of concrete cubes**.
- [7] American Society for Testing and Materials, ASTM C496-96. **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standard,2001, Vol. 40.02,Philadelphia, 273-276
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM C157. (2004). **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement, Mortar, and Concrete**. Annual Book of ASTM Standard.
- [9] American Society for Testing and Materials, ASTM C596. (2009) **Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement**. Annual Book of ASTM Standard.



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองครีกษ์  
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

12 มิถุนายน 2561

เรื่อง ยินยัการเข้าร่วม “การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23”

เรียน นายสุวรรณ อ่อนเฉียบ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “สมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตและการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย” (ID522) เพื่อพิจารณาเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23 ในหัวข้อการประชุม “วิศวกรรมโยศายุคใหม่กับการรับใช้สังคม (SMART Civil Engineering and Social Enterprise)” ในระหว่างวันที่ 18 - 20 กรกฎาคม พ.ศ.2561 ณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก ความทราบแล้วนั้น

ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงาน ขอเรียนให้ทราบว่าผู้ทรงคุณวุฒิได้พิจารณาบทความของท่านแล้ว เห็นว่าบทความของท่านมีคุณภาพสมควรเข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการครั้งนี้ได้ ดังนั้นจึงขอแจ้งยืนยันการเข้าร่วมการประชุมตามวัน และสถานที่ดังกล่าว โดยสามารถลงทะเบียนเพื่อเข้าร่วมประชุมได้ที่ <http://www.ncce23.org/>

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

ว่าที่พันตรี

(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม

ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม NCE 23

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม

โทรศัพท์ 0 2649 5000 ต่อ 27065

โทรสาร 0 3739 5526





เกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

# นายสุพรรณ อ่อนเวียง

ได้นำเสนอบทความในหัวข้อ

## สมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตและการหดตัวแบบอโตจินัส และแบบแห้งของมอร์ตาร์เมื่อใช้หินปูนแทนที่ทราย

ในการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23  
ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 18-20 กรกฎาคม 2561 ณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

๒๐๒ ๐๗๗

( รองศาสตราจารย์ เอก ศิริพานิชกร )  
ประธานสาขาวิศวกรรมโยธา  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

พันเอก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวน จันทวาลย์ )  
ผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมโยธา  
ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ว่าที่ พันตรี

( รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ศิริสวัสดิ์ )  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยนครพนม



## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล	นายสุวรรณ อ่อนเนียน
วัน เดือน ปีเกิด	28 ธันวาคม 2535
ที่อยู่	294 ม.10 ต.พลับพลาไชย อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี 72160
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรโยธา (ลูกจ้างชั่วคราวรายเดือน) แขวงทางหลวงชนบทสุพรรณบุรี สำนักทางหลวงชนบทที่18 กรมทางหลวงชนบท ตั้งแต่ พ.ศ.2559 – พ.ศ.2561 วิศวกรโยธาปฏิบัติการ กลุ่มมาตรฐานทางหลวงท้องถิ่น สำนักส่งเสริมการพัฒนาทางหลวง ท้องถิ่น กรมทางหลวงชนบท ตั้งแต่ พ.ศ.2561 – ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	061-4797888
อีเมล	suwan_o@mail.rmutt.ac.th