

ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความคงทนของคอนกรีต

EFFECTS OF SEAWATER AS MIXING WATER ON DURABILITY  
OF CONCRETE



นิวัต ฉิมพลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความคงทนของคอนกรีต



นิวัต ฉิมพลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

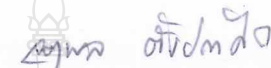
นิวัต ฉิมพลี

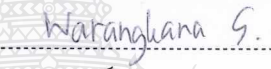
(นิวัต ฉิมพลี)




หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความทนของคอนกรีต  
Effects of Seawater as Mixing Water on Durability of Concrete  
ชื่อ - นามสกุล นายนิวัต ฉิมพลี  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, Ph.D.  
ปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรางคณา แสงสร้อย, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)  
วันที่ 10 เดือน มกราคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความคงทนของคอนกรีต
ชื่อ-นามสกุล	นายนิวัต ฉิมพลี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, Ph.D.
ปีการศึกษา	2565

## บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมคอนกรีตการนำน้ำทะเล (SW) มาใช้ผสมคอนกรีตถือเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำ การศึกษาสมบัติของคอนกรีตผสม SW เป็นสิ่งสำคัญของการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำ SW มาใช้อุตสาหกรรมคอนกรีต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของ SW ใช้ผสมต่อความคงทนของคอนกรีต โดยใช้ น้ำประปา (TW) และ SW เป็นส่วนผสมและบ่มคอนกรีต พร้อมทั้งใช้เถ้าลอย (FA) แฉ่กั้นเตาบดละเอียด (BA) และผงหินปูน (LP) แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) โดยศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชัน (CBN) ของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (CPR) ของคอนกรีต ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (CLCAP) ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ESD) ของมอร์ตาร์

ผลการศึกษาพบว่า CBN ของคอนกรีตผสม FA และผสม BA มีค่าค่อนข้างมาก ในขณะที่ของ คอนกรีตผสม LP มีค่าไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน ส่วน CBN ของ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่น้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของเมื่อใช้ w/b มากกว่า และ CBN ของคอนกรีต SW ใช้ผสมและบ่มให้ค่าน้อยกว่าของคอนกรีต TW ใช้ผสมและบ่ม และพบว่า CPR ของคอนกรีต ผสม FA และผสม BA ดีกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสม LP ด้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน ส่วน CPR ของคอนกรีตที่ใช้ w/b น้อยกว่าดีกว่าของเมื่อใช้ w/b มากกว่า และ CPR ของคอนกรีต SW ใช้ผสมและ บ่มด้อยกว่าของคอนกรีต TW ใช้ผสมและบ่ม นอกจากนี้พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ (CLRA) ของคอนกรีต ผสม FA คอนกรีตผสม BA และคอนกรีตผสม FA ร่วมกับ LP มีค่ามากกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสม LP มี ค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน ส่วน CLRA ของคอนกรีตที่มี w/b น้อยกว่ามากกว่าของ คอนกรีตที่มี w/b มากกว่า และ CLRA ของคอนกรีต SW ใช้ผสมและบ่มมีค่ามากกว่าของคอนกรีต TW ใช้ ผสมและบ่ม สุดท้ายพบว่า ESD ของมอร์ตาร์ผสม FA ที่ปริมาณน้อยมีแนวโน้มมากกว่า ในขณะที่เมื่อแทนใน ปริมาณที่มากกลับให้ค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับของ OPC ล้วน ส่วน ESD ของมอร์ตาร์ผสม LP มี แนวโน้มมากกว่าของ OPC ล้วน และ ESD ของมอร์ตาร์ SW ใช้ผสมและบ่มมีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ TW ใช้ ผสมและบ่ม

**คำสำคัญ:** น้ำทะเล คาร์บอนเนชัน การแทรกซึมคลอไรด์ การกักเก็บคลอไรด์ การต้านทานซัลเฟต

**Thesis Title** Effects of Seawater as Mixing Water on Durability of Concrete  
**Name-Surname** Mr. Niwat Chimplee  
**Program** Civil Engineering  
**Thesis Advisor** Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.  
**Academic Year** 2022

## ABSTRACT

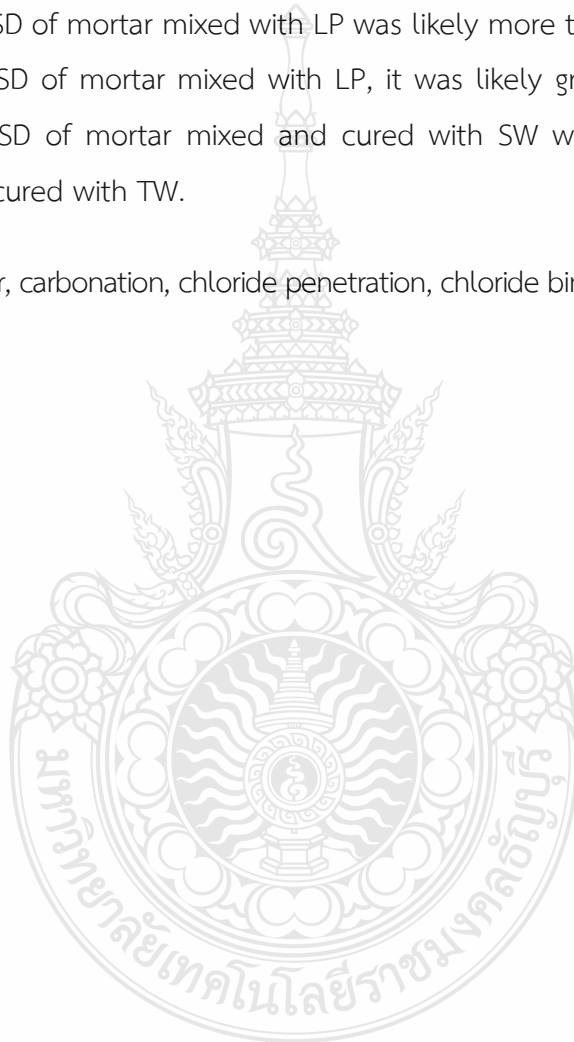
In the concrete industry, using seawater (SW) to mix concrete is another method to solve the problem of water scarcity. The study of the properties of concrete mix with SW is of importance to the study on the feasibility of using SW in the concrete industry.

This thesis aimed to study the effects of SW as mixing water on the durability of concrete by using tap water (TW) and SW as concrete mix and cure, including using fly ash (FA), ground granulated bottom ash (BA) and limestone powder (LP) as partial cement replacement materials in Portland Cement Type I (OPC). It was also focused on the occurrence of carbonation of concrete (CBN), chloride penetration resistance of concrete (CPR), chloride binding capacity of concrete (CLCAP), and the expansion in sodium sulfate solution of mortar (ESD).

The results showed that the CBN in both FA concrete and BA concrete was relatively high while that of LP concrete was not different or tended to be close, when compared to that of OPC concrete. The CBN of concrete with lower water to binder ratio (w/b) was less than that with more w/b. In addition, the CBN of concrete using SW in mixing and curing was lower than that of the TW mixed and cured concrete. It was also revealed that the CPR of both FA concrete and BA concrete was better while that of LP concrete was inferior, when compared to that of OPC concrete. Moreover, the CPR of concrete with less w/b was better than that with more w/b. The CPR of concrete using SW for mixing and curing was inferior to that of the TW mixed and cured concrete. Besides, it was found that the chloride binding ratio (CLRA) of FA concrete, BA concrete and FA mixed together with LP concrete was higher whereas that of LP

concrete was less when compared to that of OPC concrete. Regarding to CLRA of concrete, CLRA of concrete with less w/b was greater than the one with more w/b. Additionally, CLRA of concrete using SW for mixing and curing was greater than that of the TW mixed and cured concrete. Finally, it was shown that the ESD of mortar mixed with a small amount of FA tended to be more whereas, in contrast, when substituting it in a large amount, the value turned to be relatively small, when compared to that of OPC mortar. The ESD of mortar mixed with LP was likely more than that of OPC mortar. Regarding to the ESD of mortar mixed with LP, it was likely greater than that of OPC mortar. Similarly, ESD of mortar mixed and cured with SW was greater than that of mortar mixed and cured with TW.

**Keywords:** seawater, carbonation, chloride penetration, chloride binding, sulfate resistance



## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษา ค้นคว้า ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบและกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยรวมทั้งเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา แสงสร้อย กรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความกรุณาเสียสละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในด้านต่างๆ อันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อวีระ ฉิมพลี คุณแม่สุรีย์ อยู่หน้าค นางสาวนันทวรรณ ฉิมพลี นางรุ่งอรุณ ฉิมพลี คณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดมา และเพื่อน ๆ สาขาวิศวกรรมโครงสร้างทุกคนที่เป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากการค้นคว้าในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นิวัต ฉิมพลี



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(6)
สารบัญ.....	(7)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	18
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	19
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	40
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	40
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	40
3.3 สัดส่วนของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	50
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิเคราะห์.....	53
4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etail etail บดละเอียดและผงหินปูน.....	53
4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล.....	56
4.3 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์.....	56
4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต.....	58
4.5 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต.....	61
4.6 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	68
4.7 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต.....	72

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ทาร์.....	106
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุป.....	111
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	112
บรรณานุกรม.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	115



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	23
ตารางที่ 2.2	สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	24
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5... ..	25
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแหล่งต่างๆ .....	30
ตารางที่ 2.5	ผลการวิเคราะห์น้ำทะเล.....	34
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนใช้ทดสอบค่าการไหลแผ่และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟต โดยใช้ $w/b = 0.60$ .....	50
ตารางที่ 3.2	สัดส่วนใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น ความต้านทานการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยใช้ $w/b = 0.55$ .....	51
ตารางที่ 3.3	สัดส่วนใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น ความต้านทานการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยใช้ $w/b = 0.65$ .....	52
ตารางที่ 4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้ากั้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา.....	53
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้ากั้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา.....	55
ตารางที่ 4.3	ค่าความเป็นกรด - ด่าง ปริมาณซิลเฟตและคลอไรด์ของน้ำทะเลจากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี.....	56
ตารางที่ 4.4	ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เมื่อใช้ $w/b = 0.60$ .....	57
ตารางที่ 4.5	เมื่อน้ำประปาใช้ผสมและน้ำทะเลใช้ผสม โดย $w/b = 0.55$ .....	59
ตารางที่ 4.6	เมื่อน้ำประปาใช้ผสมและน้ำทะเลใช้ผสม โดย $w/b = 0.65$ .....	60
ตารางที่ 4.7	ความถี่การเกิดคาร์บอนขึ้น โดยใช้ $w/b = 0.55$ สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่อายุ 28 และ 56 วัน.....	62
ตารางที่ 4.8	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับโดย $w/b = 0.55$ (ระยะเวลา 91 วัน).....	72
ตารางที่ 4.9	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับโดย $w/b = 0.65$ (ระยะเวลา 91 วัน).....	76

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.10	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับโดย $w/b = 0.55$ (ระยะเวลา 182 วัน).....	79
ตารางที่ 4.11	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับโดย $w/b = 0.65$ (ระยะเวลา 182 วัน).....	82



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1	เครื่องผสมมอร์ตาร์.....	41
รูปที่ 3.2	ชุดทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (ASTM C230).....	41
รูปที่ 3.3	การหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต.....	42
รูปที่ 3.4	การวัดความลึกคาร์บอนเนชัน.....	43
รูปที่ 3.5	แบบหล่อและตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์.....	43
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดเสร็จแล้ว.....	44
รูปที่ 3.7	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และที่เติมสารละลาย.....	44
รูปที่ 3.8	การหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์.....	44
รูปที่ 3.9	กรองผ่านกระดาษกรองด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ.....	46
รูปที่ 3.10	นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม.....	47
รูปที่ 3.11	นำตัวอย่างไปต้มให้เดือด.....	47
รูปที่ 3.12	เติมกรดไนตริก ร่วมกับ $H_2O_2$ .....	48
รูปที่ 3.13	การทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ.....	48
รูปที่ 3.14	แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวในละลายละลายโซเดียมซัลเฟต.....	49
รูปที่ 3.15	การวัดค่าการขยายตัวในแนวแกนของตัวอย่างมอร์ตาร์.....	49
รูปที่ 4.1	ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,000 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก่ลอย แก่กันเตาบดละเอียด และผงหินปูน.....	54
รูปที่ 4.2	การไหลแผ่เมื่อใช้ $w/b = 0.60$ .....	57
รูปที่ 4.3	ค่าการยุบตัว $w/b = 0.55$ และ $0.65$ .....	61
รูปที่ 4.4	เมื่อใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมและบ่ม.....	64
รูปที่ 4.5	เมื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อายุ 28 และ 56 วัน.....	65
รูปที่ 4.6	เมื่อน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม อายุ 28 และ 56 วัน.....	67
รูปที่ 4.7	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมและบ่ม.....	69
รูปที่ 4.8	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมและบ่มที่อายุ 42 และ 210 วัน.....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อใช้ $w/b = 0.55$ และ $0.65$ ที่อายุ 42 และ 210 วัน.....	71
รูปที่ 4.10 เมื่อใช้น้ำประปาผสมคอนกรีตโดยใช้ $w/b = 0.55$ .....	83
รูปที่ 4.11 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีตโดยใช้ $w/b = 0.65$ .....	85
รูปที่ 4.12 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีตโดยใช้ $w/b = 0.55$ .....	86
รูปที่ 4.13 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีตโดยใช้ $w/b = 0.65$ .....	88
รูปที่ 4.14 เมื่อใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต โดยใช้ $w/b = 0.55, 0.65$ .....	89
รูปที่ 4.15 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต โดยใช้ $w/b = 0.55, 0.65$ .....	91
รูปที่ 4.16 เมื่อใช้ $w/b = 0.55$ โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมคอนกรีต.....	94
รูปที่ 4.17 เมื่อใช้ $w/b = 0.65$ โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมคอนกรีต.....	98
รูปที่ 4.18 เมื่อใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต.....	100
รูปที่ 4.19 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต.....	101
รูปที่ 4.20 เมื่อใช้ $w/b 0.55$ และ $0.65$ โดยใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต.....	102
รูปที่ 4.21 เมื่อใช้ $w/b 0.55$ และ $0.65$ โดยใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต.....	103
รูปที่ 4.22 เมื่อใช้ $w/b 0.55$ และ $0.65$ โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมคอนกรีต.....	105
รูปที่ 4.23 เมื่อใช้น้ำประปาผสมและบ่ม และ $w/b = 0.60$ .....	107
รูปที่ 4.24 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมและบ่ม และ $w/b = 0.60$ .....	108
รูปที่ 4.25 เมื่อใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมและบ่ม และ $w/b = 0.60$ .....	109

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พื้นผิวโลกถูกปกคลุมด้วยน้ำกว่าร้อยละ 70 ทำให้คิดว่ามนุษย์และสัตว์มีน้ำใช้อย่างเหลือเฟือ แต่น้ำจืดซึ่งใช้เพื่อการอุปโภค บริโภค เพาะปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์นั้นมีอยู่น้อยมาก น้ำจืดบนพื้นผิวโลกมีเพียงร้อยละ 3 เท่านั้น โดยสองในสามของปริมาณน้ำจืดยังอยู่ในสภาพของภูเขาและธารน้ำแข็งจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ การเข้าถึงน้ำดื่มสะอาดได้เปลี่ยนแปลงไปในช่วงหลายศตวรรษที่ผ่านมาในเกือบทุกส่วนของโลก ประชากรประมาณ 1,100 ล้านคนทั่วโลกเข้าไม่ถึงน้ำจืด และประมาณ 2,700 ล้านคน ขาดน้ำจืดอย่างน้อยหนึ่งเดือนในหนึ่งปี การขาดสุขาภิบาลที่ดีก็เป็นปัญหาที่ทำให้ประชากร 2,700 ล้านคน สามารถประสบกับโรค เช่น อหิวาตกโรค และไข้ไทฟอยด์ รวมทั้งโรคอื่นๆ ที่มากับน้ำที่ไม่สะอาด มีเด็กที่ต้องเสียชีวิตทุกปีจากโรคอหิวาตกโรค บางท่านประมาณไว้ว่าภายในปี ค.ศ. 2025 ประชากรโลกมากกว่าครึ่งหนึ่งจะประสบปัญหาความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับน้ำ [1] มีรายงานว่าภายในปี ค.ศ. 2030 พื้นที่ประเทศที่กำลังพัฒนาจะมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเกินปริมาณน้ำที่มีกว่าร้อยละ 50 น้ำจึงมีบทบาทสำคัญในเศรษฐกิจโลก เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายของสารเคมีหลากหลายชนิดและอำนวยความสะดวกในเรื่องการให้ความเย็นในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคม น้ำจืดประมาณร้อยละ 70 มนุษย์ใช้ไปกับเกษตรกรรม [2]

โครงสร้างของระบบน้ำหลายแห่งทั่วโลกที่มีหน้าที่รักษาระบบนิเวศน์ตลอดถึงการพัฒนาประชากรถูกกดดันอย่างหนัก แม่น้ำ ทะเลสาบ และแหล่งน้ำจืดกำลังเหือดแห้งหรือปนเปื้อนด้วยมลพิษจนไม่สามารถใช้ได้ มากกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่ชุ่มน้ำบนโลกได้สาบสูญไป การเกษตรมีการใช้น้ำเป็นจำนวนมากและเป็นการใช้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศได้เปลี่ยนแปลงรูปแบบของภูมิอากาศรวมทั้งน้ำจืดทั่วโลก ก่อให้เกิดน้ำท่วมและฝนแล้งในพื้นที่ต่างๆ หากยังคงใช้น้ำดังเช่นปัจจุบัน สถานการณ์จะเลวร้ายขึ้นเรื่อยๆ ภายใน ค.ศ. 2025 สองในสามของประชากรโลกจะขาดแคลนน้ำมากยิ่งขึ้น

น้ำมีความสำคัญต่อชีวิตและเป็นทรัพยากรที่หมดไปได้โดยเฉพา น้ำจืดมีปริมาณลดลงจากปัจจัยต่างๆ มากมาย ทั้งการพัฒนาเมืองที่มากขึ้นไป มลพิษที่มนุษย์สร้างขึ้นและโลกร้อนดังนั้นจึงควรลดมลพิษ เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้น้ำรวมทั้งปกป้องพื้นที่ธรรมชาติให้คงอยู่ เพื่อให้มั่นใจได้ว่ามนุษย์

โลกจะมีน้ำจืดได้อย่างเพียงพอ น้ำจืดยังมีส่วนสำคัญในการผลิตอาหาร เสื้อผ้า คอมพิวเตอร์ ช่วยชะล้างมลพิษต่างๆ และรักษาระบบนิเวศน์ให้คงอยู่ การใช้น้ำในการผลิตอาหารเป็นไปอย่างขาดประสิทธิภาพ การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Climate change) ได้ส่งผลกระทบต่อประชากรโลกในการเข้าถึงแหล่งน้ำจืด ก่อให้เกิดทั้งปัญหาน้ำท่วมและแห้งแล้ง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกเป็นจุดเริ่มต้นของปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศมีผลต่อวงจรของน้ำ (Water Cycle) โดยมีผลต่อการกำหนดเวลาสถานที่ และจำนวนของฝนที่ตกลงมา การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำในปริมาณมาก ทำให้ฝนตกหนักในหลายพื้นที่ เกิดปัญหาน้ำท่วมเนื่องจากต้นไม้และพื้นดินไม่สามารถดูดซับน้ำฝนในปริมาณมากได้ น้ำส่วนเกินเหล่านี้จะไหลไปตามทางน้ำและนำพาสสิ่งปนเปื้อนต่างๆ รวมทั้งปุ๋ยไปตลอดทางที่ผ่านและไหลไปรวมกันในทะเลสาบ แม่น้ำ และมหาสมุทร ทำให้แหล่งน้ำจืดเกิดการปนเปื้อน และจำกัดปริมาณน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้ เมื่อปุ๋ยต่างๆ จากแปลงเกษตรกรรมถูกชะล้างสู่แหล่งน้ำและมหาสมุทร จะทำให้เกิดการขยายตัวของสาหร่าย (Algae) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Algae blooms ซึ่งจะปกคลุมขวางทางเดินของน้ำ การรวมตัวของสาหร่ายเหล่านี้จะทำให้แสงแดดไม่สามารถทะลุลงไปได้พื้นผิวน้ำ ส่งผลให้ลดปริมาณออกซิเจนในน้ำ สาหร่ายจากการรวมตัวของสาหร่ายสามารถฆ่าปลาและสัตว์น้ำต่างๆ และทำให้มนุษย์ที่บริโภคน้ำเหล่านี้ป่วยและเสียชีวิตได้ สาหร่ายเหล่านี้สามารถผ่านขบวนการกรองน้ำทำให้น้ำประปาในชุมชนไม่สามารถใช้ได้ Algae blooms ก็ยิ่งทวีความรุนแรงส่งผลให้ปริมาณน้ำจืดที่สามารถใช้ได้ลดลง เมื่อน้ำทะเลอุ่นขึ้น ธารน้ำแข็งซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดทั่วโลก จะเริ่มละลายในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้น้ำทะเลสูงขึ้นน้ำจืดจากธารน้ำแข็งเหล่านี้สุดท้ายจะไหลลงสู่ทะเล การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลจะทำให้เกิดน้ำเกลือปนเปื้อนน้ำใต้ดินซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืด ทำให้ไม่สามารถนำน้ำจืดจากใต้ดินมาใช้ได้

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของโลกและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกในปัจจุบันนี้ น้ำก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์และเป็นตัวขับเคลื่อนเศรษฐกิจอย่างหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการใช้น้ำในภาคการเกษตร ภาคอุตสาหกรรม ใช้ในการอุปโภค บริโภคและใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น โดยบนพื้นโลกของเราจะมีน้ำครอบคลุมพื้นที่ 2 ใน 3 ของพื้นที่รวมทั้งหมด แต่กลับปรากฏว่ามีประชากรโลกจำนวน 1 ใน 5 กำลังประสบภาวะปัญหาขาดแคลนน้ำและทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกปี ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจและความเป็นอยู่ของประชาชนเหล่านี้เป็นอย่างมาก ซึ่งสภาวะการขาดแคลนน้ำของโลกนี้เป็นมหันตภัยร้ายแรงของมวลมนุษยชาติที่ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก หากต้องเผชิญกับปัญหานี้จะต้องเร่งรีบหาทางแก้ไขโดยเร่งด่วน

ในอุตสาหกรรมงานคอนกรีตการนำน้ำทะเลมาใช้ผสมคอนกรีตได้นั้น ถือเป็นแนวทางอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาคขาดแคลนน้ำจืดได้อย่างมาก เราจึงควรที่จะมีศึกษาสมบัติเบื้องต้น



และความคงทนของคอนกรีตผสมกับน้ำทะเลเนื่องจากในน้ำทะเลจะมีเกลือเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยเกลือคลอไรด์ร้อยละ 90 และเกลือซัลเฟตอีกประมาณร้อยละ 10 เกลือซัลเฟตที่พบอยู่ในธรรมชาติโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสารจำพวกโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลเฟต เกลือเหล่านี้จะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย ทั้งแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ได้ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตบวมตัวและแตกร้าว ส่วนคลอไรด์ไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลโดยส่วนใหญ่เกิดจากสารประกอบจำพวกเกลือโซเดียมคลอไรด์ และเกลือแคลเซียมคลอไรด์ โดยเกลือที่มีมากที่สุดกว่าร้อยละ 70 คือเกลือโซเดียมคลอไรด์ เช่นเดียวกับเกลือซัลเฟต เกลือเหล่านี้จะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างเหล็กเสริมก็ต่อเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายและแตกตัวเป็นไอออนเท่านั้น คลอไรด์ไอออนมิได้กัดกร่อนเนื้อคอนกรีตโดยตรงเหมือนกับซัลเฟตไอออน แต่คลอไรด์ไอออนจะแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปเกิดปฏิกิริยากับเหล็กเสริม ส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมดันให้คอนกรีตแตกร้าว (ปริมาตรของสนิมมากกว่าเหล็กตั้งต้น ราว 6-8 เท่า) นอกจากนี้หน้าตัดเหล็กยังถูกกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริกกัดกร่อนของคลอไรด์ในเหล็กเสริม ซึ่งอาจใช้วัสดุทดแทนเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการเกิดสนิมได้ เช่น ถนอมเสริมไม้ไผ่ โครงสร้างเสริมแรง GFRP (Glass Fiber Reinforce Polymer) ผลิตภัณฑ์คอนกรีตล้วน เป็นต้น

ปัจจุบันอุตสาหกรรมคอนกรีตได้มีการนำเอาวัสดุทดแทนมาใช้ในการผลิตคอนกรีตเป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากร ลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงน้อยลง ช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้นทุนในการผลิตน้อยลง โดยเฉพาะวัสดุทดแทนที่เป็นสิ่งเหลือใช้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยวัสดุทดแทนดังกล่าวอาจสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น วัสดุทดแทนที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ได้แก่ วัสดุปอซโซลาน โดยวัสดุปอซโซลานที่ใช้แพร่หลาย เช่น ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด ถ้ำกลบ ถ้ำลอย และถ้ำปาล์มน้ำมัน เป็นต้น วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ช่วยเพิ่มความทนทานและปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดให้ทำงานง่ายขึ้น โดยวัสดุปอซโซลานบางชนิดสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟต ที่มาจากน้ำทะเลได้ [3]

ถ้ำลอย ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในถ้ำลอยมีออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ และเนื่องจากถ้ำลอยมีขนาดทรงมน ทรงกลม คละก้นและขนาดค่อนข้างเล็ก จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้ำซึมผ่านได้ยาก นอกจากนี้ยังส่งผลให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้นมีส่วนช่วยในเรื่องการเทเข้าแบบหล่อของคอนกรีตได้

ง่ายยิ่งขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ส่วนผสมมีความเป็นต่างสูง และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยจะเกิดฟิล์มบาง ๆ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ป้องกันของคลอไรด์ สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ คลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตและเมื่อมีปริมาณสูงกว่าระดับวิกฤต จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม การใช้เกลือสามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และการใช้เกลือที่ละเอียดสามารถต้านทานการซึมผ่านของสารคลอไรด์ได้ดีขึ้น [3]

เถ้าก้นเตา เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่และมีความพรุนมากกว่าเถ้าลอย [3]

ผงหินปูน เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยนำบางส่วนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น ทำให้เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟต และอาจส่งผลต่อคุณสมบัติในการรับแรงต่างๆของซีเมนต์เพสต์ได้ [4]

คอนกรีตถือเป็นวัสดุหลักที่สำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยทั่วไป การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตทั้งที่เสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจะคำนึงถึงแค่คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด เป็นต้น โดยประเมินรวบรวมจากผลการทดลองในห้องทดสอบคอนกรีตในช่วงของอายุใดอายุหนึ่งของตัวอย่างคอนกรีตเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างคอนกรีตอาจจะเผชิญสภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและถูกสิ่งแวดล้อมทำลายอยู่ตลอดเวลา เช่น สิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนของซัลเฟต ระดับความรุนแรงก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต อุณหภูมิ และความชื้น ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชัน ระดับความรุนแรงก็จะขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เป็นต้น [5] ทำให้กำลังการรับแรงในระยะยาวต่ำลง จึงต้องมีการซ่อมแซมเพื่อให้โครงสร้างสามารถรับแรงต่อไปได้ ดังนั้นควรพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตตามกาลเวลาในการออกแบบทั้งจากสิ่งแวดล้อมหรือโดยตัวคอนกรีตเอง ก็จะสามารถช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมงานคอนกรีตได้ดีขึ้น ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงได้ โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุยาวนานนั้น ต้องพิจารณาด้านของความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตกับการออกแบบบนพื้นฐานการรับแรงช่วงอายุหนึ่ง คอนกรีตจะคงทนก็ต่อเมื่อการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง โดยเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานและสภาวะแวดล้อม รวมทั้งควบคุมการก่อสร้างให้ได้ตามที่ออกแบบไว้

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรงและอยู่อย่างยาวนานแต่จะเสื่อมสภาพค่อนข้างรวดเร็วเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมของน้ำทะเล สาเหตุของการเสื่อมสภาพเกิดจากการเกิดสนิมและฟูก่อนของเหล็กที่ยึดโครงสร้างไว้ ทำให้คอนกรีตหมดสภาพไป ดังนั้นการคัดเลือกวัสดุในการทำคอนกรีต วิธีการ

ผสมคอนกรีต รวมทั้งการเสริมความแข็งแรงที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตคอนกรีตที่ทนน้ำทะเลได้

ความคงทนของคอนกรีต (Durability of Concrete) คือ ความสามารถที่จะต้านทานจากผลและอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมรอบคอนกรีตนั้น และยังคงใช้งานได้อย่างปกติ [6] ลักษณะทางเคมีที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพจากน้ำทะเลเป็นหัวข้อที่นักวิจัยด้านคอนกรีตให้ความสนใจในหลายทศวรรษ แม้จะค้นพบสาเหตุต่างๆ แต่ก็ยังมีการศึกษาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง องค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำทะเลได้แก่ ไอออนของคลอไรด์ โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียมและโบแทสเซียมในน้ำทะเลจะประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 35,000 ppm. ซึ่งเป็นร้อยละ 88 ของจำนวนเกลือทั้งหมด [7] ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำทะเลมีค่าระหว่าง 7.4-8.4 การฟุ่ร่อนของเหล็กที่ใช้เสริมแรงในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 11 ดังนั้นในกรณีที่คอนกรีตอยู่ภายใต้สภาพของน้ำเค็มจะต้องใช้คอนกรีตที่ปลดปล่อยความเป็นต่างได้ ปฏิกริยาทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO<sub>4</sub>) เรียกปฏิกริยานี้ว่า Crystallisation โบแทสเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ MgSO<sub>4</sub>) ที่อยู่ในน้ำเค็มจะปลดปล่อยส่วนของซัลเฟตเพื่อทำลายคอนกรีตได้ เพราะมันสามารถทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca (OH)<sub>2</sub>) ซึ่งมีอยู่ในซีเมนต์ซึ่งเกิดจากการทำให้ไดแคลเซียมซิลิเกต (C2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) เปียกน้ำ แมกนีเซียมซัลเฟตจากน้ำทะเลนี้ส่งผลเสียต่อคอนกรีตเนื่องจากก่อให้เกิดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)<sub>2</sub>) และจะทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) ขึ้นมา [8] ไอออนคลอไรด์สามารถผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ และไอออนของซัลเฟตและแมกนีเซียมมีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสียหายจากปฏิกริยาของคลอไรด์ที่มีผลต่อเหล็กโครงสร้างและการสะสมของเกลือ [9]

มีงานวิจัยหลายครั้งที่แสดงผลของการผสมและบ่มน้ำทะเลลงในปูนทราย และผลต่อคอนกรีตที่ใช้ซึ่งงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าน้ำทะเลไม่เหมาะที่จะนำมาผสมหรือบ่มทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมแรงที่ใช้ในสภาพแวดล้อมของทะเล อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมน้ำทะเลจะมีความแข็งแรงในช่วงแรกมากกว่าคอนกรีตปกติ และการลดความแข็งแรงของคอนกรีตตามอายุการใช้งานสามารถชดเชยได้ด้วยการลดสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water-cement ratio) [10] [11] รายงานว่า การใส่ดินเหนียวในคอนกรีตผสมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตในสภาพปกติและเพิ่มความสามารถของคอนกรีตต่อเกลือจากน้ำทะเล จากการศึกษาพบว่าซีเ้ได้จากเตาหลอม (Ground pumice) มีประโยชน์ในการลดอิทธิพลของน้ำทะเล นอกจากนี้การใช้ค่า Water-cement ratios ที่ต่ำจะทำให้คอนกรีตทนทานต่อการทำลายของซัลเฟตมากขึ้น

ฉะนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อความคงทนของคอนกรีต โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต พร้อมทั้งใช้ถ้ำลอย ถ้ำกั้นเตาบาดละเอียดและผงหินปูน แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชัน ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำน้ำทะเลมาใช้อุตสาหกรรมคอนกรีตในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้ำลอย ถ้ำกั้นเตาบาดละเอียด ผงหินปูน และน้ำทะเลที่ใช้

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความต้านทานการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแทนที่ถ้ำลอย ถ้ำกั้นเตาบาดละเอียด และผงหินปูน บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมน้ำทะเล

1.3.3 ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมน้ำทะเล

1.3.4 ทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตผสมน้ำทะเล

1.3.5 ทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมน้ำทะเล

1.3.6 การผสมมอร์ตาร์และคอนกรีต จะใช้น้ำจืดกับน้ำทะเล ในการผสม

1.3.7 วิเคราะห์ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอย แก้วกั้นตา บดละเอียด ผงหินปูน และน้ำทะเลที่ใช้

1.4.2 ทราบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต

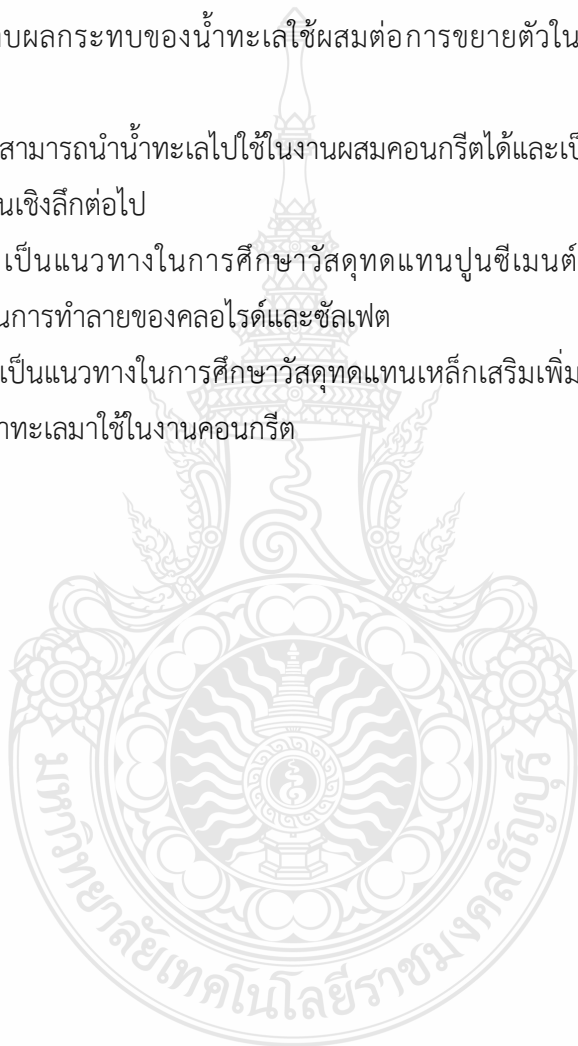
1.4.3 ทราบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความต้านทานการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

1.4.4 ทราบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

1.4.5 เพื่อสามารถนำน้ำทะเลไปใช้ในงานผสมคอนกรีตได้และเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยคอนกรีตผสมน้ำทะเลในเชิงลึกต่อไป

1.4.6 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆเพิ่มขึ้น ในด้านคุณสมบัติในการป้องกันการทำลายของคลอไรด์และซัลเฟต

1.4.7 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวัสดุทดแทนเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันการทำลายของคลอไรด์ กรณีนำน้ำทะเลมาใช้ในงานคอนกรีต



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบของการนำน้ำทะเลที่ใช้ผสมคอนกรีตในครั้งนี้ ทำการศึกษาโดยการนำตัวอย่าง แก้วกันเตาบดละเอียด และผงหินปูนมาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนโดยทำการศึกษาทั้งคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ความละเอียดโดยวิธีของเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี และได้ศึกษาสมบัติถึงความคงทนของคอนกรีตผสมน้ำทะเล ได้แก่ การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยจะนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

##### 2.1.1 ปูนซีเมนต์

###### 2.1.1.1 วัตถุดิบ

1) วัสดุธาตุปูน (Calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (Calcium) ได้แก่ หินปูน (Limestone) และหินชอล์ก (Chalk)

2) วัสดุอะซิลลาเซียส (Argillaceous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (Silicon) และอลูมิเนียม (Aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว หินดินดาน (Shale) และหินชนวน (Slate)

###### 2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นมีขั้นตอนดังนี้

1) น้ำระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง  $\text{CaO}$

3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง  $\text{CaO}$  จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึก เมื่อทำให้เย็นตัวลง

โดยปูนซีเมนต์ประกอบด้วย 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดนี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor oxide) ซึ่งได้แก่ MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) อยู่ในรูปของสารประกอบ สารประกอบหลักที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่างคือ

- 1) Tricalcium silicate องค์ประกอบทางเคมีคือ 3CaO.SiO<sub>2</sub> ชื่อย่อ C<sub>3</sub>S
- 2) Dicalcium silicate องค์ประกอบทางเคมีคือ 2CaO.SiO<sub>2</sub> ชื่อย่อ C<sub>2</sub>S
- 3) Tricalcium aluminate องค์ประกอบทางเคมีคือ 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ชื่อย่อ

C<sub>3</sub>A

- 4) Tetracalcium aluminoferrite องค์ประกอบทางเคมีคือ 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ชื่อย่อ C<sub>4</sub>AF

#### 2.1.1.3 วิธีคำนวณปริมาณสารประกอบ

การคำนวณปริมาณสารประกอบ C<sub>3</sub>S C<sub>2</sub>S C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ของปูนซีเมนต์นิยมใช้วิธีของ อาร์ เอช โบก (R. H. Bogue) ดังนี้

กรณีที่ 1 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 0.64

$$C_3S = 4.071CaO - 7.600SiO_2 - 6.718Al_2O_3 - 1.430Fe_2O_3 - 2.852SO_3 \quad (2.1)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2 - 0.7544C_3S \quad (2.2)$$

$$C_3A = 2.650718Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3 \quad (2.3)$$

$$C_4AF = 3.043 Fe_2O_3 \quad (2.4)$$

กรณีที่ 2 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0.64

$$C_3S = 4.071CaO - 7.600SiO_2 - 4.479 Al_2O_3 - 2.859 Fe_2O_3 - 2.852 SO_3 \quad (2.5)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2 - 0.7544 C_3S \quad (2.6)$$

$$C_3A = 0 \quad (2.7)$$

$$C_4AF = 2.100 Al_2O_3 + 1.702 Fe_2O_3 \quad (2.8)$$

#### 2.1.1.4 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ให้กำลังความแข็งแรงแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากในปัจจุบันคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่ใช้ สารประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ชื่อย่อ  $\text{C}_3\text{S}$ )

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม สีเทาแก่หรือมีสีอ่อนกว่า  $\text{C}_2\text{S}$  สมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์คือเมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 7 วันแรก โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละของ  $\text{C}_3\text{A}$  เพิ่มขึ้น

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ชื่อย่อ  $\text{C}_2\text{S}$ )

มีหลายรูปแบบโดยที่อุณหภูมิปกติ  $\text{C}_2\text{S}$  จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ) มีรูปร่างเม็ดกลม ในช่วงต้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและช้ากว่า  $\text{C}_3\text{S}$  มากแต่กำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุมากกว่า 7 วัน และในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ  $\text{C}_3\text{S}$  ภายหลังจากที่ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณ ร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ชื่อย่อ  $\text{C}_3\text{A}$ )

รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีและทำให้ก่อตัวทันที (F lash set) และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก การป้องกัน flash set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไปในช่วงขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเปิดปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  และจะพัฒนา กำลังอัด 1-2 วัน แต่กำลังอัดจะต่ำลง โดยไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ที่มี  $\text{C}_3\text{A}$  ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ชื่อย่อ  $\text{C}_4\text{AF}$ )

เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา  $\text{C}_4\text{AF}$  มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า  $\text{C}_3\text{A}$

2.1.1.5 คุณสมบัติของสารประกอบรอง

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ทั้ง 4 อย่าง คือ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ปูนขาวอิสระ แมกนีเซียมออกไซด์ และออกไซด์ของอัลคาไล ถึงจะมีอยู่จำนวนน้อย แต่สารบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วและยังไม่แข็งตัว อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ จะพิจารณาในส่วนเฉพาะสมบัติของปูนขาวอิสระและแมกนีเซียมออกไซด์



### 1) ปูนขาวอิสระ

ปูนขาวอิสระ (free lime, free CaO) เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่งเกิดจากวัตถุดิบมีปริมาณปูนขาว (CaO) มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้หมดในเตาเผา หรือกรณีที่สอง เกิดขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวมีไม่มาก แต่การทำปฏิกิริยากับ oxide เป็นปูนเม็ดไม่สมบูรณ์ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ

### 2) แมกนีเซียมออกไซด์

วัตถุดิบสำหรับผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) ผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัตถุดิบ  $\text{MgCO}_3$  จะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนกลายเป็นผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำได้ช้ามากใช้เวลานานปีเช่นเดียวกับปูนขาวอิสระการรวมตัวกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว

## 2.1.1.6 ประเภทของปูนซีเมนต์

### 1) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ แคลเซียมออกไซด์ และ แมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันจึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [3]

สารประกอบประเภทออกไซด์	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
แคลเซียมออกไซด์	CaO	60.0 - 67.0
ซิลิกอนออกไซด์	$\text{SiO}_2$	17.0 - 25.0
อลูมิเนียมออกไซด์	$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.0 - 8.0
ไอออนออกไซด์	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5 - 6.0
แมกนีเซียมออกไซด์	MgO	0.1 - 0.4
อัลคาไลต์	$\text{Na}_2\text{O}$	0.2 - 1.3
ไททาเนียมออกไซด์	$\text{K}_2\text{O}$	0.2 - 1.3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	$\text{SO}_3$	1.0 - 3.0

ตารางที่ 2.2 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

สมบัติ	สารประกอบ			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที่)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังอัดประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

ตาม มอก. 15 เล่ม 1 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

1) ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับงานคอนกรีตโดยทั่วไป เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ถนน สะพาน ถึงกักเก็บน้ำ อ่างเก็บน้ำ ท่อน้ำ และผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น

2) ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ความร้อนปานกลาง เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำให้ความร้อนไม่สูงมากนักความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่า ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับ ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตที่สูงกว่าปกติแต่ไม่ถึงระดับรุนแรง เช่นงานก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสียหรือโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง เป็นต้น

3) ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid hardening portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรกให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมี C<sub>3</sub>S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากเหมาะสำหรับคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น มักใช้ในงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปชนิดต่างๆ เช่นแผ่นพื้นอัดแรง เสาเข็มอัดแรง เสาไฟฟ้า เสาและคานสำเร็จรูปสำหรับอาคาร คานสะพานสำเร็จรูป และหมอนรางรถไฟ เป็นต้น

4) ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำมากเพราะมีปริมาณ C<sub>3</sub>S ต่ำ แต่มีปริมาณ C<sub>2</sub>S ที่ค่อนข้างสูงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตมวล (Mass concrete) เช่น เขื่อนคอนกรีตฐานรากและเสาตอม่อขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่า

ปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking)

5) ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ  $C_3A$  ต่ำมากดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตอย่างรุนแรงจากดินหรือน้ำที่มีปริมาณซัลเฟตสูง เช่น งานก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง และโครงสร้างใต้ดิน

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [3]

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ )	49	46	56	25	30
ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ )	25	29	15	50	46
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )	12	6	12	5	5
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ )	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบลน (ชม. <sup>2</sup> /กรัม)	3000	3000	4500	3000	3000
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก./ชม. <sup>2</sup> )	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ: \* กำลังอัดวัดจากลูกบาศก์มอร์ตาร์ ขนาด 50 มม.

## 2) ปูนซีเมนต์ประเภทอื่น

นอกจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 5 ประเภทที่ประกอบไปด้วย  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในปริมาณที่ต่างกัน ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ทำมาจากการผสมสารอื่นบดกับปูนเม็ดหรือโดยการเพิ่มสารประกอบอื่นระหว่างการเผา เพื่อให้มีคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ เหมาะสมกับความต้องการใช้งานมากที่สุด เช่น

- ปูนซีเมนต์ผสม (Mixed cement หรือ Silica cement) มอก. 80 กำหนดปูนซีเมนต์ผสม หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเติมวัสดุอื่นใดลงไปบด พร้อมกันกับการบดปูนเม็ดที่จะทำปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือได้จากการผสมสม่ำเสมอ ระหว่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับวัสดุอื่นใดที่บดเป็นผงแล้ว

- ปูนซีเมนต์ขาว (White cement) สีเทาในปูนซีเมนต์เกิดจาก สารออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ดังนั้นการผลิตปูนซีเมนต์ขาว ทำได้โดยการลดปริมาณสารดังกล่าว ให้ต่ำลง ซึ่งอาจใช้ดินขาวจีน (China clay) กับดินสอพองหรือหินปูนที่ไม่มีออกไซด์ของธาตุเหล็ก เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยทั่วไปกำหนดให้ออกไซด์ของเหล็กในปูนซีเมนต์ขาวต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ทำให้ มีปริมาณของสารเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 0.5 เท่านั้น ดังนั้นปูนซีเมนต์ขาว จึงมีส่วนประกอบของ  $C_3A$  สูงและแทบจะไม่มี  $C_4AF$  และในการเผาจะใช้น้ำมันเพราะถ่านหิน จะมีออกไซด์ของธาตุเหล็กและแมงกานีสปนอยู่สูง การใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงทำให้ปูนซีเมนต์ขาว มีต้นทุนราคาที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ขาวให้กำลังอัดไม่สูงมากนักจึงเหมาะกับงาน โครงสร้างที่รับแรง แต่เหมาะกับงานที่ต้องการความสวยงาม เช่น งานหินล้าง งานหินขัด เป็นต้น

- ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland pozzolana cement) ได้จากการเผาปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา ที่ละเอียด โดยตัวเองจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะได้สารที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน วัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ดินเหนียวเผา ถ่านหินหรือถ่านลอย (Fly ash) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) และ ถ่านกลบละเอียด เป็นต้น การผสมวัสดุปอซโซลานลงในปูนซีเมนต์ส่วนมากแล้วจะทำให้ความร้อน จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง กำลังระยะแรกลดลงเพิ่มความสามารถในการต้านทานซัลเฟต ลดปฏิกิริยา อัลคาไลซิลิกา (Alkali-silica Reaction) ปริมาณปอซโซลานที่ใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้วัสดุปอซโซลานนอกจากจะเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม แล้วยังทำให้ปูนซีเมนต์ราคาถูกลงด้วย

- ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุง เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบด ตะกรันเตาถลุงเหล็กกับปูนเม็ด ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการถลุงเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย  $CaO$   $SiO_2$  และ  $Al_2O_3$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ส่วนมากแล้วจะใช้ตะกรัน เตาถลุงเหล็กในช่วงร้อยละ 25 ถึง 70 ของวัสดุซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กเมื่อทำปฏิกิริยาจะให้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเหมือนกับผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  แต่ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะช้า กว่า ดังนั้นการรับกำลังในระยะแรกจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และความร้อนจากปฏิกิริยา ไฮเดรชันก็ต่ำกว่า และการต้านทานซัลเฟตของ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะดีขึ้น เพราะปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เหมาะกับงานคอนกรีตหยาบและนิยมใช้ กับงานโครงสร้างคอนกรีตในทะเล

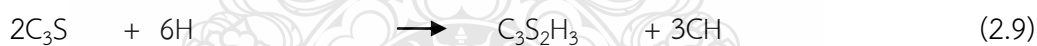
- ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง (Supersulfated cement) ทำจากการบดตะกอนเตาถลุงเหล็กประมาณร้อยละ 80 ถึง 85 กับสารแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซั่มที่ผ่านการเผาขจัดน้ำ) ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 และปูนเม็ดประมาณร้อยละ 5 ปูนชนิดนี้มีความร้อยจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าและทนต่อสารซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ตะกอนเตาถลุงเหล็ก สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความคงทนต่อการกัดกร่อน เช่น ใช้ทำท่อคอนกรีตสำหรับน้ำทิ้ง เป็นต้น

### 2.1.2 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัว และแข็งตัวของปูนซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกันทำให้ปฏิกิริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวกับน้ำ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและในสภาพที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นในการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบกับน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญและสามารถนำไปอธิบายปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี

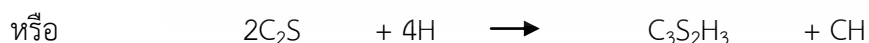
#### 2.1.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ )

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate,  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide :  $Ca(OH)_2$ )



#### 2.1.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ )

จะทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่าเพราะไดแคลเซียมซิลิเกตไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างของไดแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำจึงน้อยกว่ากรณีของไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกัน คือ CSH และ CH ดังสมการที่ (2.10)



### 2.1.2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A)

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (2.11)



ใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูนเพื่อหน่วงปฏิกิริยาให้ช้าลง (Clinker) โดย Gypsum : CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบาง ๆ ของเอทริงไจท์ (Ettringite : 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Ca·SO<sub>4</sub>·31H<sub>2</sub>O) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ (2.12)



### 2.1.2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C<sub>4</sub>AF)

มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C<sub>3</sub>A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าโดยการทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้นโดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ (2.13)



### 2.1.3 วัสดุปอซโซลาน

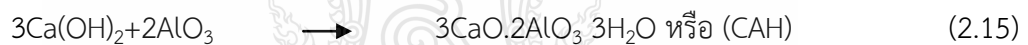
จัดเป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral Admixture) ชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C618 เป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) หรือ วัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติยึดประสานได้ แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหนัและความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุดมภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน สัดส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนัก วัสดุปอซโซลานทำให้คอนกรีตที่มีการขยายตัว มีความทึบน้ำสูงให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาดำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ธรรมดา จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลามีอัตราการพัฒนากำลังอัดช้า เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ แต่ให้กำลังอัดในระยะหลังเท่ากันหรืออาจมากกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา โดยบ่มความชื้นให้นานกว่าปกติ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของสารจำพวกซัลเฟตได้ดีอีกด้วย วัสดุปอซโซลานจะเชื่อมประสาน

หรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ปูนซีเมนต์กับน้ำทำปฏิกิริยากันจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า (CSH) และ (CAH) ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ (2.14) และ (2.15)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (2.14)



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ (2.15)



ซึ่งสารประกอบทั้ง 2 ตัว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดที่ดีขึ้น

เถ้าลอย (Fly ash) นิยมนำไปใช้มากในงานคอนกรีตกว่างานชนิดอื่น เนื่องจากเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นโดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและใช้ในปริมาณที่เหมาะสม รวมทั้งเถ้าลอยมีขนาดค่อนข้างเล็กเป็นเม็ดกลมเมื่อใช้ผสมกับคอนกรีตจะช่วยให้อุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดทำให้คอนกรีตจึงมีลักษณะแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยนี้ทำให้คอนกรีตมีความลื่นไหลเทลงแบบหล่อได้ง่ายขึ้นช่วยการทำงานคอนกรีตได้สะดวกและมีความง่ายขึ้นทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงได้ ยังช่วยลดปริมาณน้ำผสมคอนกรีตได้อีกด้วย การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตนั้นมีข้อดีคือ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น

## 1) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

จะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบไปด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก และ  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับลักษณะการเผาและแหล่งที่มา ถ่านหิน ตัวอย่างเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ มีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแหล่งต่าง ๆ [12]

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.66	2.93	1.43	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	0.47	0.66	3.63	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	0.30	3.08	3.34	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	0.61	2.38	10.56	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	0.72	0.28	19.68	3.65

## 2) คุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

### 2.1) ความต้องการน้ำ

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานง่ายขึ้น และต้องการน้ำลดลงเมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน นอกจากสามารถลดปริมาณน้ำแล้ว ในหลายกรณีพบว่ายังเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์และคอนกรีตโดยได้คงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่มีอัตรา w/b 0.45 มีค่าเท่ากับร้อยละ 125, 135, และ 145

### 2.2) ระยะเวลาก่อตัว

ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มในการก่อตัวช้าลง

### 2.3) การเย็นน้ำ

การผสมเถ้าลอยทำให้ปริมาตรของวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทำให้การเย็นน้ำของเพสต์และมอร์ตาร์ลดลง การเย็นน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าเพสต์และมอร์ตาร์เนื่องจากมีปริมาณเพสต์ต่ำกว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีการเย็นน้ำลดลงเช่นกัน คอนกรีตจะมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นเนื่องจากมีน้ำอิสระ (Free water) มากทำให้การ



เยี่ยมน้ำเพิ่มขึ้นได้ การผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ยังทำให้ส่วนผสมเกาะตัวได้ดีเป็นผลให้อโอกาสในการเกิดการแยกตัว (Segregation) ของคอนกรีตน้อยลงด้วย

#### 2.4) โพรง

การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ขนาดและโครงสร้างของโพรงเปลี่ยนไปปฏิกิริยาในช่วงต้นขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การใส่เถ้าลอยทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง เป็นผลให้โพรงของเพสต์มีมากขึ้นเมื่อเทียบกับเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ทั้งนี้การกระจายตัวของโพรงจะดีขึ้นเพราะเถ้าลอยมีลักษณะทรงกลมทำให้การกระจายตัวได้ดีในซีเมนต์เพสต์ และทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงเล็กลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของเพสต์ยังคงมีต่อไป ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานเข้าไปแทรกตามโพรงทำให้ปริมาตรลดลง สำหรับเถ้าลอยที่พอเหมาะประมาณร้อยละ 20 การลดปริมาณของโพรงจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอยมากกว่า

#### 3) การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตสามารถใช้เพื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานหรือแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากเถ้าลอยมีทรงกลมจึงทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น และความต้องการน้ำที่ลดลง การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้กำลังอัดที่อายุต้นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย แต่จะมีกำลังสูงกว่าเมื่อมีอายุมากขึ้น นอกจากนี้การบ่มคอนกรีตที่มีเถ้าลอยก็มีความสำคัญมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยต้องอาศัยต่างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดต้องการความชื้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

#### 2.1.4 น้ำประปา

น้ำมีสูตรเคมีคือ  $H_2O$  โมเลกุลของน้ำประกอบด้วยออกซิเจน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 2 อะตอม เชื่อมติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ น้ำเป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่โปร่งใส ไม่มีรส ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น เป็นองค์ประกอบหลักของลำธาร แม่น้ำและมหาสมุทร นอกจากนี้น้ำยังเป็นของเหลวในสิ่งมีชีวิต น้ำที่พบบนพื้นผิวโลกยังอยู่ในสถานะของแข็ง เช่น หิมะ ธารน้ำแข็ง ภูเขาน้ำแข็ง และสถานะแก๊ส (ไอน้ำ) เช่น ก้อนเมฆ หมอก น้ำค้าง อีกทั้งยังพบในชั้นหินอุ้มน้ำและความชื้นในบรรยากาศ

น้ำเป็นส่วนผสมสำคัญในการทำคอนกรีตนอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญต่องานคอนกรีตด้วย ปัญหาเรื่องคุณภาพน้ำมักจะไม่เกิดขึ้นบ่อยนักเนื่องจากน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่มีคุณภาพอยู่ในชั้นดี เช่นน้ำประปา เป็นต้น กฎทั่วไปสำหรับน้ำในงานคอนกรีต คือควรเป็นน้ำจืดที่สะอาดหรือน้ำจืดที่ดื่ม

ได้ อย่างไรก็ตามหากไม่แน่ใจว่าน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตมีคุณภาพดีพอหรือไม่ ก็ต้องทดสอบก่อน น้ำอาจมีผลกระทบต่อสีผิวของคอนกรีต และเหล็กเสริมในคอนกรีต หากแบ่งประเภทของน้ำตามสภาพการใช้งาน จะได้แก่ (ก) น้ำสำหรับผสมคอนกรีตให้มีความชื้นเหลวทำงานได้ง่าย (ข) น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ขึ้น และให้แข็งตัวและมีกำลังรับแรงได้ตามความต้องการของวิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง และ (ค) น้ำสำหรับล้างวัสดุผสมในกรณีที่มีมวลรวมมีความสกปรกจะใช้น้ำล้างมวลรวมให้มีความสะอาดพอสำหรับนำไปใช้ผสมทำคอนกรีตเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีต่อไป

น้ำที่ใช้สำหรับผสมทำคอนกรีตถ้ามีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มากเกินไปอาจก่อปัญหาได้้น ระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัวของคอนกรีต การมีรอยคราบเกลือ (Efflorescence) อยู่ที่ผิวของคอนกรีตกำลังที่ต่ำลง ตลอดความคงทนของคอนกรีตลดลง สารแปลกปลอมเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสารแขวนลอย สารละลายอนินทรีย์ และสารละลายอินทรีย์

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm ปราศจากกรด ต่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยปกติน้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำเสียจากอาคารบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม ถือว่ามีคุณภาพดีสำหรับคอนกรีต ในกรณีสงสัยให้ทำแห่งทดสอบโดยใช้น้ำที่สงสัยและเปรียบเทียบกับด่างอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์ที่ทำจากน้ำที่มีคุณภาพดี (อาจใช้น้ำกลั่น) หากแห่งทดสอบที่ใช้น้ำที่สงสัยผสมให้กำลังอย่างน้อยร้อยละ 90 ก็ถือว่าน้ำนั้นมีคุณภาพพอ

หน้าที่หลักของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต คือ

1. ทำหน้าที่เข้าผสมกับปูนซีเมนต์และทำปฏิกิริยาทางเคมีแล้วเกิดความร้อนที่เรียกว่า heat of hydration ทำให้ผงซีเมนต์กลายเป็นวุ้น และเป็นซีเมนต์เหนียวซึ่งเป็นตั้งประสานผิวระหว่างเม็ดของวัสดุผสม เกาะยึดแน่นเมื่อแข็งตัว
2. ทำหน้าที่เคลือบผิวของหินและทรายให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าไปเกาะโดยรอบและแข็งตัวยึดติดกันแน่น
3. ทำหน้าที่หล่อลื่นให้วัสดุทั้ง 3 อย่างนี้ เกิดความเหลว สามารถเทและกระทุ้ง หรือเขย่าเข้าแบบหล่อให้เป็นรูปต่างๆได้

สารเจือปนอยู่ในน้ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังตลอดจนความทนทานของคอนกรีตได้แก่ ฝุ่นหรือผง (Silt) น้ำมัน กรด ต่าง เกลือต่าง สารอินทรีย์ต่างๆ น้ำเสียจากบ้านเรือนโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น สารต่างๆเหล่านี้ยอมให้เจือปนอยู่ในน้ำได้ไม่เกินกว่าปริมาณที่กำหนด หากมีสารเจือปนเป็นปริมาณมากกว่าที่กำหนด ให้ทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนกำลังของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ผสมคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับส่วนผสมและคุณสมบัติของหิน ทราย และซีเมนต์ คอนกรีตจะแข็งแกร่งทนทาน มีรูพรongหรือแน่นทึบก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใส่ลงไป ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตโดยมากจะบอกเป็นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักถ้าใส่มากเกินไปคุณสมบัติของคอนกรีตจะเลวลง เนื่องจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์จะระเหยออกไปเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต จึงมีกำลังความแข็งแรงในด้านต่างๆน้อยลง ส่วนน้ำสำหรับบ่มคอนกรีต น้ำที่มีสารเจือปน เช่น ฟุน น้ำมัน หรือเกลือ ผสมอยู่พอสมควรอาจใช้ในการบ่มคอนกรีตได้โดยไม่ทำให้เกิดรอยเปื้อนหรือสีบนผิวคอนกรีตมากนัก น้ำที่มีกรดหรือสารอินทรีย์เจือปนจะต้องได้รับการตรวจสอบก่อนนำไปใช้ และจะต้องระวังสารอินทรีย์พวกกรดแทนนิก (tannic acid) เกลือของแร่เหล็ก เพราะอาจก่อให้เกิดรอยเปื้อนประอบบนผิวคอนกรีตได้

#### 2.1.5 น้ำทะเล

ทะเล เป็นแหล่งน้ำเค็มที่ล้อมรอบด้วยพื้นดินบางส่วนหรือทั้งหมด การเชื่อมกันระหว่างผืนน้ำเค็มถือเป็นมหาสมุทร แบ่งเป็นมหาสมุทรหลาย ๆ แห่ง ทะเลแบ่งได้ 5 ส่วน รวมถึงมหาสมุทร 4 แห่ง ที่ตั้งชื่อโดยองค์การอุทกศาสตร์สากล คือ มหาสมุทรแอตแลนติก มหาสมุทรแปซิฟิก มหาสมุทรอินเดีย มหาสมุทรอาร์กติก และมหาสมุทรใต้ ทะเลที่มีขนาดเล็กกว่า และอยู่ในระดับรองลงมา เช่น ทะเลเมดิเตอร์เรเนียน น้ำทะเลมีรสเค็ม เนื่องจากมีเกลือซึ่งประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆปะปนอยู่ในรูปของสารละลาย ในน้ำทะเลมีความเข้มข้นของเกลือละลายอยู่ไม่เกิน 35,000 ppm. (ส่วนมากจะพบในรูปของไอออนโซเดียมคลอไรด์ (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>) น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจืด เพราะน้ำทะเลมีความหนักของเกลือและ Electrostriction (ไฟฟ้าที่ไม่นำกระแส แต่อยู่ในเรื่องของสนามไฟฟ้า) จุดเยือกแข็งของน้ำทะเลอยู่ที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าน้ำจืด [15] แม้ว่าน้ำทะเลส่วนใหญ่จะมีปริมาณเกลืออยู่ระหว่างร้อยละ 3.1-3.8 ในบริเวณที่น้ำทะเลมีอุณหภูมิสูง เช่น ใจกลางมหาสมุทรบริเวณเส้นศูนย์สูตรแสงแดดมีความเข้มข้นสูงทำให้น้ำในมหาสมุทรระเหยเป็นไอน้ำทิ้งแร่ธาตุที่ตกค้างไว้ในทะเล น้ำทะเลจึงมีความเค็มมาก แต่ในที่หนาวเย็นที่บริเวณขั้วโลก แสงแดดกระทำพื้นผิวโลกเป็นมุมเฉียง พลังงานที่ตกกระทบน้อยปริมาณการระเหยของน้ำทะเลย่อมน้อยลงตามไปด้วย จึงมีความเค็มไม่มาก ในบริเวณใกล้ปากแม่น้ำมีความเค็มไม่มากเนื่องจากอิทธิพลของน้ำจืดจากแม่น้ำ ลำคลองทำให้น้ำทะเลเจือจางลงเกลือในมหาสมุทรมีกำเนิดมาจากแร่ธาตุบนพื้นโลก ทะเลเปิดที่มีความเค็มมากที่สุด คือ ทะเลแดง น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี น้ำฝนละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ น้ำที่อยู่บนพื้นโลกละลายแร่ธาตุในหินและดิน ไหลรวมกันเป็นแม่น้ำลำธารไปสะสมกันในมหาสมุทร สารละลายเกลือเหล่านี้อยู่เป็นประจุโซเดียมและประจุคลอไรด์ เมื่อน้ำระเหยออกไปประจุเหล่านี้รวมตัวกันเป็นสารประกอบได้แก่ เกลือแกง และเกลืออื่นๆ มวลน้ำในมหาสมุทร มี 3 ระดับ คือ น้ำชั้นบน เทอร์โมไคลน์ และน้ำชั้นล่าง (1) น้ำชั้นบน (Surface water) ได้รับอิทธิพลจาก

แสงอาทิตย์และบรรยากาศจึงมีน้ำฝนและน้ำท่า (น้ำจากแม่น้ำลำคลอง) ปนอยู่จึงมีความหนาแน่นต่ำ (2) เทอร์โมไคลน์ (Thermocline) อยู่ใต้อุณหภูมิชั้นบน เป็นเขตที่อุณหภูมิของน้ำทะเลลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ความเค็มเพิ่มขึ้นตามความลึก (3) น้ำชั้นล่าง (Deep water) มีอุณหภูมิต่ำ ความเค็มและความหนาแน่นอยู่สูงมาก ส่วนน้ำในบริเวณพื้นผิวมหาสมุทร ได้รับอิทธิพลจากแสงอาทิตย์และบรรยากาศ จึงมีน้ำฝนและน้ำในแม่น้ำลำคลองปะปนอยู่ จึงมีความเจือจางและมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำชั้นล่าง ซึ่งมีความเค็มสูงและอุณหภูมิต่ำกว่า ได้ระดับผิวน้ำลงไปอุณหภูมิลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเรียกว่า “เทอร์โมไคลน์” (Thermocline) ได้ระดับผิวน้ำลงไปความเค็มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกว่า “แฮโลไคลน์” (Halocline) อุณหภูมิและความเค็มคือปัจจัยที่ทำให้ น้ำทะเลมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก น้ำทะเลสามารถใช้ผสมทำคอนกรีตได้แต่จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตลดลง ร้อยละ 30 โดยคอนกรีตจะให้กำลังรับแรงเร็วในระยะแรกและจะลดลงเมื่อมีอายุได้ 28 วัน ถ้าสามารถหาน้ำจืดมาใช้ผสมคอนกรีตได้ ก็ไม่ควรใช้น้ำทะเลในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งนี้เพราะเหล็กเสริมจะเป็นสนิมเร็ว ในงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในน้ำทะเล ควรมีคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหนาไม่น้อยกว่า 7 ซม. ในงานคอนกรีตอัดแรงไม่ควรใช้น้ำทะเล หรือน้ำที่มีสารคลอไรด์ผสมคอนกรีตเพราะเหล็กเสริมที่ใช้เป็นสนิมได้ง่ายถ้าถูกกับสารคลอไรด์ สำหรับคอนกรีตที่ต้องการจะอวดผิวหน้า หรือจะทาสีหรือฉาบปูนทับหรือจะทำงานประดับอื่นๆอีก ไม่ควรใช้น้ำทะเลเป็นส่วนผสม เพราะจะทำให้ผิวหน้ามีความชื้น และขึ้นเกลือขึ้นได้ (Efflorescence) ตารางที่ 2.8 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำทะเล จ.ชลบุรี พบว่าน้ำทะเลมีสีใส แต่มีสีขุ่นในช่วงเดือนสิงหาคม โดยปริมาณคลอไรด์อยู่ระหว่าง 16,200-18,800 มก./ล. และซัลเฟตอยู่ระหว่าง 2,200-2700 มก./ล. และมีค่า (PH) อยู่ระหว่าง 7.9-8.2 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล ที่พบว่าบริเวณชายฝั่งทะเลศรีราชา มีค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 7.86-8.63

**ตารางที่ 2.5** ผลการวิเคราะห์น้ำทะเล

เวลา	มกราคม 2545	พฤษภาคม 2545	สิงหาคม 2545	ธันวาคม 2545
พารามิเตอร์				
pH	8.2	8.2	7.9	8.2
คลอไรด์ (มก./ล.)	18,035	16,210	17,125	18,820
ซัลเฟต (มก./ล.)	2,240	2,500	2,230	2,680

### 2.1.6 ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต

การเสื่อมสภาพสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

- 1) สาเหตุทางกายภาพ
- 2) สาเหตุทางเคมี
- 3) สาเหตุทางกล
- 4) สาเหตุทางชีวภาพ
- 5) สาเหตุรวม

### 2.1.7 การเกิดคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนผลิตภัณฑ์บางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งโดยปกติ มักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนต โดยจะเกิดได้นั้นจะต้องมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้น

#### 2.1.7.1 กลไกของการเกิดคาร์บอนเนชัน

เกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยา  $\text{Ca(OH)}_2$  หรือ (C-S-H) บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ดังนี้



#### 2.1.7.2 ผลของคาร์บอนเนชัน

- 1) ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
- 2) ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
- 3) ทำให้เกิดการหดตัว

### 2.1.8 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมนั้นลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว จะเกิดสนิมถ้ามีปริมาณน้ำและออกซิเจนเพียงพอ

#### 2.1.8.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์สามารถอยู่ในคอนกรีตเองได้ เช่น น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หินทราย (โดยเฉพาะทรายที่ได้มาจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด มีมาตรฐานกำหนดปริมาณของคลอไรด์รวมที่ละลายในน้ำ โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่ามาตรฐาน

ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลเค็ม จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในสารละลายในน้ำแข็ง ในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีต่อไปนี้

- 1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary suction)
- 2) การแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต

- 3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน จะไม่มีการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

#### 2.1.8.2 สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) โดยกลไกดังต่อไปนี้

- 1) Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในรูปของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Fidel's Salt) หรือ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$

- 2) Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือผงหินปูน ได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่าคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

- 3) การเพิ่มของความเข้มข้นของคลอไรด์

บริเวณใกล้ผิวและบริเวณผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม เช่น คอนกรีตที่อยู่ในทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

- ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวของคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียกน้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะแห้งและเปียกสลับไปในหลายๆรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

- ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือในน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าเนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตไฮดรอกไซด์

#### 2.1.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

โดยปกติเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต เนื่องจากไม่สามารถทำปฏิกิริยาอะโนดิกได้ กล่าวคือเหล็กจะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนของเหล็ก และอิเล็กตรอนได้ ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 จนถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

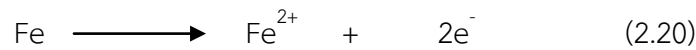
##### กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

1) ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างจะมีค่า pH ต่ำกว่า 9 ถึง 10 ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงมีสาเหตุดังต่อไปนี้ คือ การเกิดคาร์บอนเนชัน การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต และการชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก

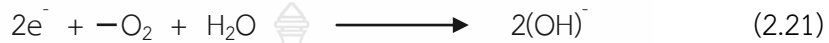
2) ความชื้นที่เหมาะสมของการเกิดสนิมของเหล็ก อีออน ( $Fe^{2+}$ ) เปลี่ยนรูปเป็นสารละลายจนพอที่จะทำให้เกิดสนิมเหล็กเกิดขึ้นได้

3) มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม โดยออกซิเจนจะแพร่เข้าสู่เหล็กเสริมทางช่องว่างที่ไม่อิมมิดด้วยน้ำ นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนในช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำ จะเป็นไปได้ยาก

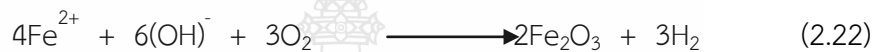
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเริ่มต้นที่ความเป็นด่างของคอนกรีตบริเวณที่หุ้มเหล็กเสริมลดลงจนถึงระดับวิกฤต และเมื่อเจอความชื้นที่เพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังสมการที่ (2.20)



โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) สูสภาพสารละลาย และอิเล็กตรอนวิ่งไปบนผิวเหล็ก (อะโนดิก) ต่อจากนั้น  $2\text{e}^-$  จะรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ดังสมการที่ (2.21)



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการคะโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้น ดังสมการที่ (2.22)



โดยที่  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  คือสนิมนั่นเอง ปฏิกิริยาสมการที่ (2.22)

#### 2.1.10 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

สภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) โดยเฉพาะ โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) เมื่อสารละลายซัลเฟตเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตทำให้เกิดการกัดกร่อน ผุกร่อน พองตัว และ แตกร้าว โครงสร้างจึงใช้งานตามนี้ออกแบบไว้ไม่ได้ เช่น โครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน โครงสร้างที่อยู่ในน้ำทะเลหรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยทั่วไปในสารละลายซัลเฟตที่พบในสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถแบ่งประเภทได้ตามปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Adiwijaya, Daisuka Yamamoto และคณะ [14] พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด และสัมประสิทธิ์ความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลมีค่าดีกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด

Nurazuwa Md Noor และ Asali, M.F [13] พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด และการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด



นุชจิรา ท่ามาตา และคณะ [12] ศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 แล้วนำไปบ่ม 28 วัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยวิธีการไตเตรทแบบจุดยุติทางศักย์ไฟฟ้า พร้อมหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ซึ่งพบว่าการแทรกซึมของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นและระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลมากขึ้น การใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีตนั้น ช่วยลดสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ แต่เมื่อใช้ผงหินปูนรวมกันกับเถ้าลอยเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ยังแปรผกผันกับกำลังอัดของคอนกรีตอีกด้วย



## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- 3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 หรือ มอก.80-2517
- 3.1.2 แก้วลอย ใช้แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และจากโรงไฟฟ้า BLCF จังหวัดระยอง
- 3.1.3 แก้วกันเตาบดละเอียด ใช้แก้วกันเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยทำการบดให้ละเอียดเท่ากับหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์มาตรฐาน
- 3.1.4 ผงหินปูน มีสิ่งเจือปนน้อย มีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 ไมโครเมตร
- 3.1.5 ททราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดและการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- 3.1.6 หิน เลือกว่าที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและร่อนค้ำตะแกรงเบอร์ 4
- 3.1.7 น้ำจืด ใช้น้ำประปา มีค่า pH ในช่วง 7 ถึง 8
- 3.1.8 น้ำทะเล ใช้น้ำทะเลจากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี

#### 3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

- 3.2.1 สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอย แก้วกันเตาบดละเอียด และผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - 1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188
  - 2) ความละเอียดโดยวิธีเบลน (Air permeability apparatus) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204
  - 3) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของลักษณะอนุภาคโดยวิธี Scanning Electric Microscope: SEM
  - 4) องค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF
- 3.2.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล
  - 1) การทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ ด้วยวิธีซิลเวอร์ไนเตรต (Argentometric method)
  - 2) การทดสอบเพื่อหาปริมาณซัลเฟต ด้วยวิธีแกรวิเมทรี (Gravimetric analysis)
  - 3) การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัดด้วยเครื่องมือพี เอช มิเตอร์ (pH meter)

### 3.2.3 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

โดยขีดผิวบนของแผ่นทดสอบการไหลให้แห้ง เอาแบบหล่อวางตรงกลาง ใช้ช้อนตักมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อเป็นชั้นๆ ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งให้ทั่วด้วยแท่งกระทุ้ง 20 ครั้ง เพื่อให้มอร์ตาร์กระจายทั่วแบบหล่อ เดิมมอร์ตาร์ให้เต็มแบบหล่อโดยให้มอร์ตาร์สูงเหนือขอบบนแบบหล่อประมาณ 20 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งให้ทั่วด้วยแท่งกระทุ้งอีก 20 ครั้ง เหมือนชั้นแรก จากนั้นใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ให้เรียบเสมอขอบแบบ ขีดผิวแทนทดสอบการไหลแผ่ให้สะอาดและแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งขีดน้ำมอร์ตาร์ตามขอบด้านล่างแบบหล่อให้หมด เมื่อครบ 1 นาที หลังจากผสมมอร์ตาร์ให้ยกแบบหล่อออก แล้วปล่อยให้แทนทดสอบการไหลแผ่ตกกระทบจำนวน 10 ครั้ง ตามข้อกำหนด ASTM C230/C230M ค่าการไหลแผ่คือค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น โดยวัดด้วย คาลิเปอร์ 4 ตำแหน่ง ซึ่งห่างเป็นระยะเท่าๆ กัน มีค่าเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น ให้ทดสอบหลายๆ ครั้ง โดยเปลี่ยนปริมาณน้ำที่ใช้ผสมมอร์ตาร์ จนกระทั่งได้ค่าการไหลแผ่ตามที่กำหนด โดยทุกครั้งที่ทำค่าการไหลแผ่ต้องใช้มอร์ตาร์ที่ผสมใหม่ โดยรูปที่ 3.1 แสดงเครื่องผสมมอร์ตาร์ และรูปที่ 3.2 แสดงโต๊ะการไหล

รูปที่ 3.1 เครื่องผสมมอร์ตาร์



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (ASTM C230)

### 3.2.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

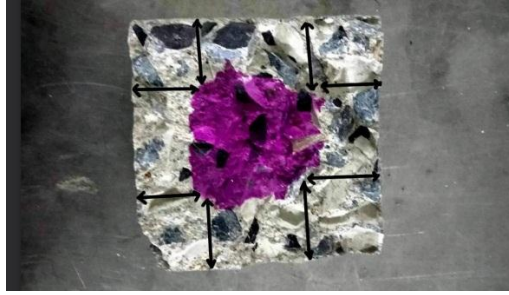
การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump test) ทำตามมาตรฐาน ASTM C143 ด้วยเครื่องมือกรวยเหล็กสำหรับวัดค่าการยุบตัว (Mold for slump test or slump cone)



### รูปที่ 3.3 การหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

#### 3.2.5 การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต

การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 856 ตัวอย่างขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร เมื่อหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสร็จ ทำการปิดซีลผิวให้มิดชิด และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ของบ่มในน้ำจืดและน้ำทะเล เป็นระยะเวลา 28 วัน นำตัวอย่างดังกล่าวไปอบในตู้เร่งการเกิดคาร์บอนเนชัน (อุณหภูมิ  $30 \pm 5$  °C) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 โดยระยะเวลาที่เผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 56 วัน จากนั้น นำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชัน โดยแบ่งก้อนตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 2 ชั้น จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ ที่ก้อนตัวอย่างซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชัน แต่จะไม่มีสีในส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชัน ใช้เวอร์เนียร์วัดความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชัน) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อคอนกรีตแต่ละซีก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แล้วนำค่าเฉลี่ยทำการวิเคราะห์ผลต่อไป



### รูปที่ 3.4 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่น

#### 3.2.6 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ในส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride Penetration Resistance) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C1202 ด้วยชุดเครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เมื่อหล่อเสร็จปิดซีลผิวให้มิดชิด และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแยกของการบ่มในน้ำจืดและน้ำทะเล เป็นระยะเวลา 28 และ 56 วัน (รูปที่ 3.5) หลังจากครบกำหนด (42 และ 210 วัน) เพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ต่อไป (รูปที่ 3.6)



(ก) แบบหล่อ



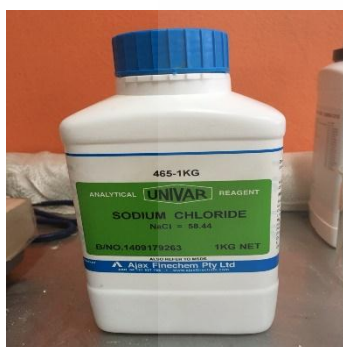
(ข) ตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำตามอายุ

### รูปที่ 3.5 แบบหล่อและตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

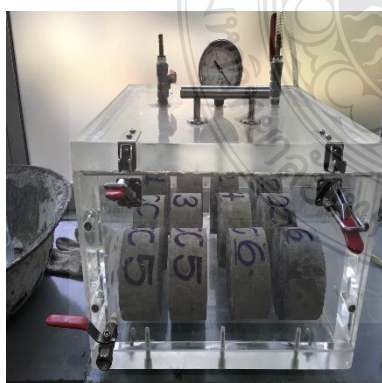




รูปที่ 3.6 ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.7 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และที่เตรียมสารละลาย

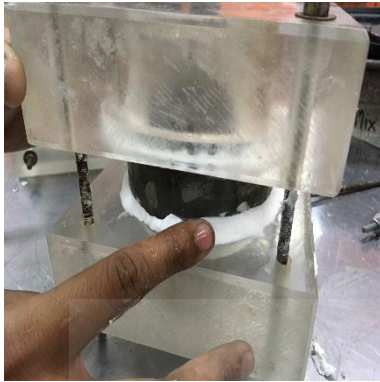


(ก) เริ่มเปิดเครื่องดูดอากาศ



(ข) เตรียมเซลล์

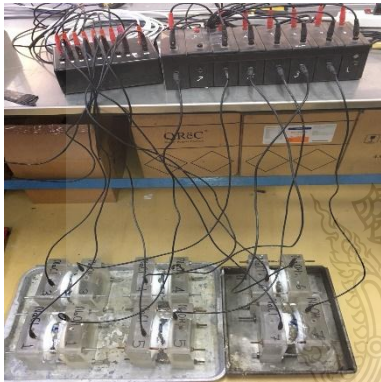
รูปที่ 3.8 การหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์



(ค) ประกอบเซลล์และทาสีลิโคลนปิด



(ง) ต่อวงจรของเครื่องทดสอบ



(จ) ต่อวงจรเข้ากับเซลล์ตัวอย่าง



(ฉ) เทสารละลายลงในเซลล์ตัวอย่าง



(ช) เปิดกระแสไฟฟ้าขนาด  $60 \pm 0.1$  โวลต์



(ซ) ทำการบันทึกค่าด้วยเครื่อง Data logger

รูปที่ 3.8 การหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (ต่อ)

### 3.2.7 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

หล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร นำตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อเสร็จ ทำการปิดซีลผิวให้มิดชิด และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแยกของการบ่มในน้ำจืดและน้ำทะเล เป็นระยะเวลา 28 วัน เคลือบผิวด้วย Epoxy ยกเว้น 1 ด้านเพื่อให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึมเข้าทางด้านเดียว แล้วนำไปแช่น้ำเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) เป็นเวลา 28 และ 56 วัน หลังจากตัวอย่างเผชิญคลอไรด์ครบกำหนด (91 และ 182 วัน) จึงตัดตัวอย่างที่ระยะความลึก 1 2 3 4 และ 5 เซนติเมตร แล้วนำไปบดหลังจากนั้นจึงนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เก็บผงทดสอบปริมาณ 20 กรัม จากนั้นนำผงทดสอบไปหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และปริมาณคลอไรด์อิสระต่อไป

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1152

- 1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม โดยชั่งใส่ปิកเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในปิกเกอร์
- 3) เติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในปิกเกอร์
- 4) นำไปต้มให้เดือดให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว
- 5) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ปิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร



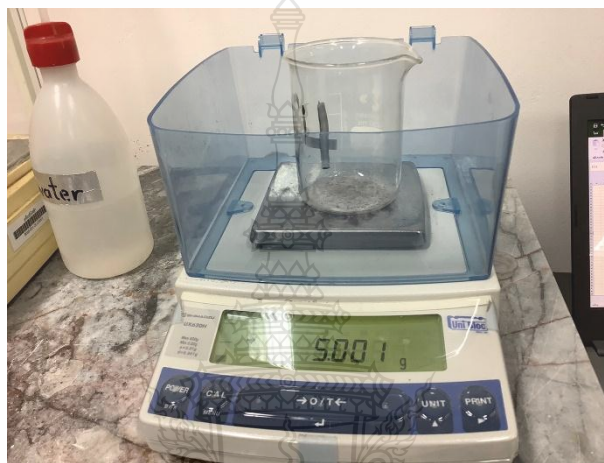
รูปที่ 3.9 กรองผ่านกระดาษกรองด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ



6) นำตัวอย่างที่กรองแล้วเอาไปไทเทรตด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติที่ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) จะได้ร้อยละของคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต ที่ระดับความลึกต่างๆ

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตาม ASTM C 1218

1) นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ไปชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.10 นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม

2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ นำไปต้มให้เดือดประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.11 นำตัวอย่างไปต้มให้เดือด

- 3) นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง และเอาใส่ในปิ๊กเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) เติม กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 3 มิลลิลิตร รวมกับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  (สารละลาย 30%) ปริมาณ

3 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.12 เติมกรดไนตริก รวมกับ  $\text{H}_2\text{O}_2$

- 5) นำตัวอย่างที่กรองและเติมสารแล้วใส่แก้วไทเทรตปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร จำนวน 2 แก้ว เอาไปไทเทรตที่ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ที่มีสารละลาย 0.05 ได้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์อิสระที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ



รูปที่ 3.13 การทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

### 3.2.8 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์

ตามมาตรฐาน ASTM C1012 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ใช้แบบหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 25.4 x 25.4 x 285 มิลลิเมตร โดยใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อสัดส่วนผสม (รูปที่ 3.14) ปิดซีลผิวตัวอย่างให้มิดชิด และทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแยกของการบ่มในน้ำจืดและน้ำทะเล เป็นระยะเวลา 28 เมื่อบ่มครบกำหนดนำตัวอย่างไปวัดความยาว (รูปที่ 3.15) ซึ่งคือค่าเริ่มต้น ต่อจากนั้นนำตัวไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยให้ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 5 วัดความยาวอายุ 1 3 5 30 45 60 75 90 วัน และทุก เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต



(ก) แบบหล่อมอร์ต้าร์



(ข) ตัวอย่างมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.14 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวในสายละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 3.15 การวัดค่าการขยายตัวในแนวแกนของตัวอย่างมอร์ต้าร์

### 3.3 สัดส่วนของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

เมื่อใช้น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีการแทนที่เถ้าลอย และผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้  $w/b = 0.60$  โดยน้ำหนัก ดังตารางต่อไปนี้

**ตารางที่ 3.1** สัดส่วนใช้ทดสอบค่าการไหลแผ่และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต โดยใช้

$w/b = 0.60$

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสม (กรัม)						
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอยระยอง	ผงหินปูน	ทราย	น้ำประปา	น้ำทะเล
1	TMC	1.00	-	-	-	2.75	0.60	-
2	TMC-20FM	0.80	0.20	-	-	2.75	0.60	-
3	TMC40FM	0.60	0.40	-	-	2.75	0.60	-
4	TMC-20FB	0.80	-	0.20	-	2.75	0.60	-
5	TMC-5LP	0.95	-	-	0.05	2.75	0.60	-
6	TMC-10LP	0.90	-	-	0.10	2.75	0.60	-
7	TMC-15FM-5LP	0.80	0.15	-	0.05	2.75	0.60	-
8	TMC-15FB-5LP	0.80	-	0.15	0.05	2.75	0.60	-
9	SMC	1.00	-	-	-	2.75	-	0.60
10	SMC-20FM	0.80	0.20	-	-	2.75	-	0.60
11	SMC-40FM	0.60	0.40	-	-	2.75	-	0.60
12	SMC-20FB	0.80	-	0.20	-	2.75	-	0.60
13	SMC-5LP	0.95	-	-	0.05	2.75	-	0.60
14	SMC-10LP	0.90	-	-	0.10	2.75	-	0.60
15	SMC-15FM-5LP	0.80	0.15	-	0.05	2.75	-	0.60
16	SMC-15FB-5LP	0.80	-	0.15	0.05	2.75	-	0.60

#### หมายเหตุ

TMC หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม และใช้  $w/b$  เท่ากับ 0.60

TMC-20FM หมายถึง มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 โดยน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม และใช้  $w/b$  เท่ากับ 0.60

TMC-20FB หมายถึง มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย BLC ร้อยละ 20 โดยน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม และใช้  $w/b$  เท่ากับ 0.60

TMC-10LP หมายถึง มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม และใช้  $w/b$  เท่ากับ 0.60

SMC หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และใช้  $w/b$  เท่ากับ 0.60

SMC-40FM หมายถึง มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40 โดยน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และ  $w/b$  เท่ากับ 0.60

SMC-15FM-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และใช้

$w/b$  เท่ากับ 0.60

### 3.3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชัน ความต้านทานการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์เมื่อผสมน้ำประปากับน้ำทะเล เมื่อใช้น้ำประปาและทะเลใช้ผสมและบ่มคอนกรีต โดยใช้  $w/b = 0.55$  และ  $0.65$  โดยน้ำหนัก สำหรับคอนกรีตที่ใช้น้ำประปานั้นจะบ่มตัวอย่างด้วยน้ำประปา ส่วนคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมนั้นจะบ่มตัวอย่างด้วยน้ำทะเล โดยมีรายละเอียดดังนี้

**ตารางที่ 3.2** สัดส่วนใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน ความต้านทานการแทรกซึมและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยใช้  $w/b = 0.55$

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)								
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอยระยอง	ผงหินปูน	เถ้ากั้นเตาบลดละเอียด	ทราย	หิน	น้ำประปา	น้ำทะเล
		CC	FM	FB	LP	BA	SAND	ROCK	TAP WATER	SEA WATER
1	TCC-0.55	330					736	1080	182	
2	TCC-20FM-0.55	264	66				736	1060	182	
3	TCC-40FM-0.55	198	132				736	1040	182	
4	TCC-20FB-0.55	264		66			736	1060	182	
5	TCC-20BA-0.55	264				66	736	1031	182	
6	TCC-5LP-0.55	313			17		736	1078	182	
7	TCC-10LP-0.55	297			33		736	1075	182	
8	TCC-15FM-5LP-0.55	264	49		17		736	1063	182	
9	TCC-15FB-5LP-0.55	264		49	17		736	1063	182	
10	TCC-15BA-5LP-0.55	264			17	49	736	1042	182	
11	SCC-0.55	330					736	1080		182
12	SCC-20FM-0.55	264	66				736	1060		182
13	SCC-40FM-0.55	198	132				736	1040		182
14	SCC-20FB-0.55	264		66			736	1060		182
15	SCC-20BA-0.55	264				66	736	1031		182
16	SCC-5LP-0.55	313			17		736	1078		182
17	SCC-10LP-0.55	297			33		736	1075		182
18	SCC-15FM-5LP-0.55	264	49		17		736	1063		182
19	SCC-15FB-5LP-0.55	264		49	17		736	1063		182
20	SCC-15BA-5LP-0.55	264			17	49	736	1042		182

**ตารางที่ 3.3** สัดส่วนใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน ความต้านทานการแทรกซึมและ  
ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ โดยใช้  $w/b = 0.65$

		ส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)								
ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอยระยอง	ผงหินปูน	เถ้ากั้นเตาบลละเอียด	ทราย	หิน	น้ำประปา	น้ำทะเล
		ประเภทที่ 1	CC	FM	FB	LP	BA	SAND	ROCK	TAP WATER
1	TCC-0.65	330					736	980	215	
2	TCC-20FM-0.65	264	66				736	959	215	
3	TCC-40FM-0.65	198	132				736	941	215	
4	TCC-20FB-0.65	264		66			736	959	215	
5	TCC-20BA-0.65	264				66	736	931	215	
6	TCC-5LP-0.65	313			17		736	978	215	
7	TCC-10LP-0.65	297			33		736	975	215	
8	TCC-15FM-5LP-0.65	264	49		17		736	965	215	
9	TCC-15FB-5LP-0.65	264		49	17		736	965	215	
10	TCC-15BA-5LP-0.65	264			17	49	736	944	215	
11	SCC-0.65	330					736	980		215
12	SCC-20FM-0.65	264	66				736	959		215
13	SCC-40FM-0.65	198	132				736	941		215
14	SCC-20FB-0.65	264		66			736	959		215
15	SCC-20BA-0.65	264				66	736	931		215
16	SCC-5LP-0.65	313			17		736	978		215
17	SCC-10LP-0.65	297			33		736	975		215
18	SCC-15FM-5LP-0.65	264	49		17		736	965		215
19	SCC-15FB-5LP-0.65	264		49	17		736	965		215
20	SCC-15BA-5LP-0.65	264			17	49	736	944		215

**หมายเหตุ**

- 1) TCC-0.55 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต โดย  $w/b$  เท่ากับ 0.55
- 2) TCC-15FB-5LP-0.55 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอย BLCF ร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) และผสมผงหินปูนร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) เมื่อน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต โดย  $w/b$  เท่ากับ 0.55
- 3) TCC-15BA-5LP-0.65 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบลละเอียดร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) และผสมผงหินปูนร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) เมื่อน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต โดย  $w/b$  เท่ากับ 0.65
- 4) SCC-0.65 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต โดย  $w/b$  เท่ากับ 0.65



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์

#### 4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอยแก้วกันเตาบดละเอียดและผงหินปูน

การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอยแม่เมาะ แก้วลอย BLCP แก้วกันเตาบดละเอียดและผงหินปูนซึ่งได้ศึกษาความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

##### 4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอยแม่เมาะ แก้วลอย BLCP แก้วกันเตาบดละเอียด และผงหินปูน มีค่าเท่ากับ 3.10 2.57 2.17 2.63 และ 2.87ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 4.1

##### 4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลน

ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอยแม่เมาะ แก้วลอย BLCP แก้วกันเตาบดละเอียด และผงหินปูนมีค่าเท่ากับ 3,100 2,977 2,723 3,403 และ 5,210 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมตามลำดับแสดงดังตารางที่ 4.1

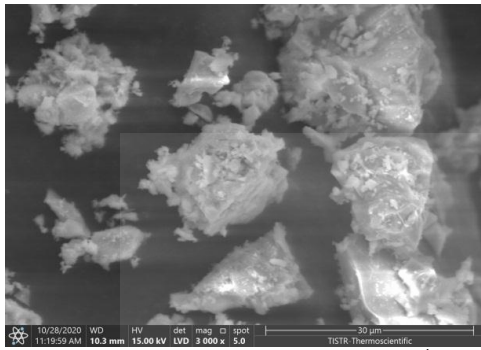
#### ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอย แก้วกันเตาบดละเอียดและผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แก้วลอยแม่เมาะ	แก้วลอย BLCP	แก้วกันเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.10	2.57	2.17	2.65	2.87
ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ซม. <sup>2</sup> /ก.)	3,100	2,977	2,723	3,403	5,210

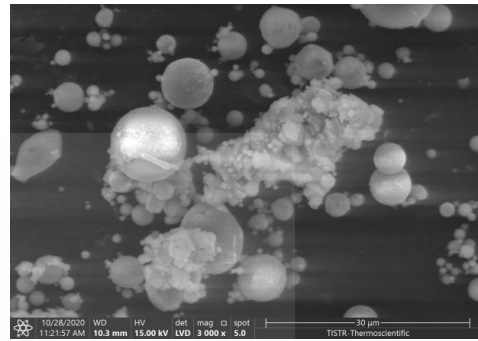
##### 4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ ก) มีลักษณะรูปร่างขรุขระ มีขนาดไม่แน่นอนเป็นเหลี่ยมมุม แก้วลอยแม่เมาะ (รูปที่ ข) กลมมนและตันมีขนาดไม่แน่นอน แก้วลอย BLCP (รูปที่ ค) มีกลมมนและตัน เป็นโพรงมีรูพรุนมากขนาดไม่แน่นอน แก้วกันเตาบดละเอียด

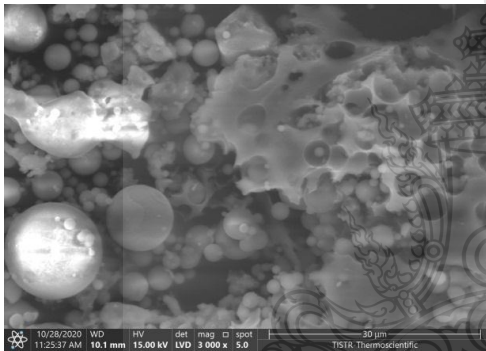
(รูปที่ ง) มีขนาดไม่แน่นอนแตกกระจายอยู่ทั่วไป ขรุขระเป็นเหลี่ยมคม และผงหินปูน (รูปที่ จ) มีลักษณะคล้ายกันกับเถ้าก้นเตาบดละเอียด



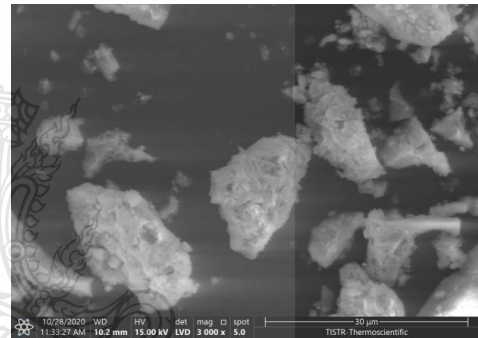
(ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



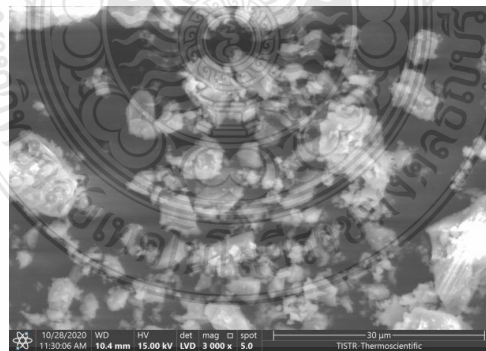
(ข) เถ้าลอยแม่เมาะ



(ค) เถ้าลอย BLCP



(ง) เถ้าก้นเตาบดละเอียด



(จ) ผงหินปูน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,000 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน



#### 4.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-Ray Fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอย BLCP เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผง แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ของเถ้าลอย BLCP มีค่าสูงกว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียด เถ้าลอยแม่เมาะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนตามลำดับ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ของเถ้าลอย BLCP มีค่าสูงกว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียด เถ้าลอยแม่เมาะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละ 20.27 20.11 13.60 5.51 และ 0.05 ตามลำดับ ส่วนเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ของเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าสูงกว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียด เถ้าลอย BLCP ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน ตามลำดับ สำหรับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่าผงหินปูน เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าก้นเตาบดละเอียด และเถ้าลอย BLCP ตามลำดับ โดยมีค่า 65.53 55.20 24.97 16.65 และ 1.73 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.2** องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

ออกไซด์(ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอย BLCP	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน (8 µm)
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	18.93	26.61	61.46	41.35	0.45
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.51	13.60	20.27	20.11	0.05
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.31	18.34	5.56	13.24	0.03
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.53	24.97	1.73	16.65	55.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	2.33	0.96	2.37	0.34
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	2.88	8.53	0.38	2.68	<0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	<0.01	1.75	0.73	0.29	<0.01
โปแตสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.31	1.77	1.36	2.51	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.24	0.53	5.38	-	43.12
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO)	1.00	3.93	0.03	-	-

## 4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟต และคลอไรด์ของน้ำทะเล จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี โดยเก็บตัวอย่างน้ำทะเล เป็นเวลา 3 เดือนติดต่อกัน พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟต และปริมาณคลอไรด์ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในรอบเวลา 3 เดือน

ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟตและคลอไรด์ของน้ำทะเล จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี

วันที่เก็บตัวอย่าง	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ปริมาณซัลเฟต (ppm)	ปริมาณคลอไรด์ (ppm)
กันยายน พ.ศ.2563	7.6	1,132	22,093
ตุลาคม พ.ศ. 2563	7.8	1,168	22,193
พฤศจิกายน พ.ศ. 2563	7.8	1,096	20,293

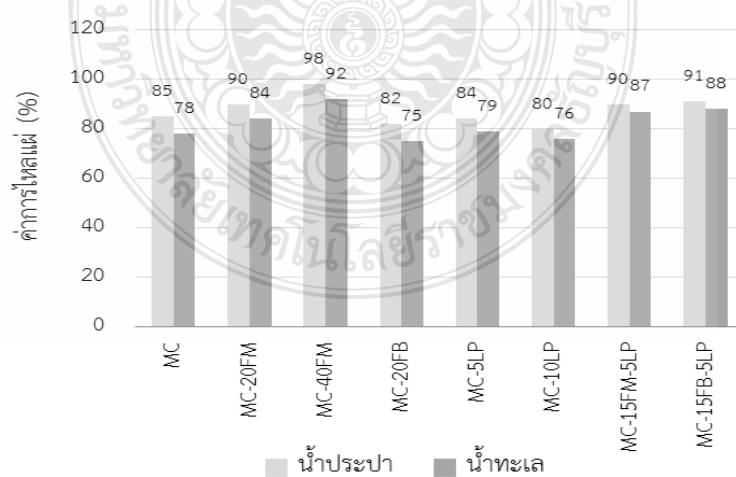
## 4.3 ค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.60 พบว่าค่าการไหลผ่านน้ำประปาใช้ผสม และน้ำทะเลใช้ผสม ให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อผสม FM มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะ FM มีผิวกลมและค่อนข้างเรียบ ไม่มีรูพรุนทำให้มีความต้องการน้ำน้อย มอร์ตาร์จึงเกิดสภาพการไหลมาก เมื่อผสม FB มีค่าที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะอนุภาคของ FB มีลักษณะเป็นเหลี่ยมไม่เรียบผิวขรุขระ คล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ ทำให้มีความต้องการน้ำมากกว่า มอร์ตาร์จึงมีสภาพการคงตัวที่มากกว่า ส่วนค่าการไหลของมอร์ตาร์ผสม LP มีค่าที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคของผงหินปูนมีความละเอียดมากกว่า และลักษณะที่เป็นเหลี่ยม รูปร่างหยาบและละเอียดคละกัน แต่อนุภาคโดยรวมมีขนาดไม่ต่างกันมาก จึงต้องการน้ำมาก นอกจากนี้ค่า MC-15FM-5LP, MC-15FB-5LP พบว่าจะให้ค่าการไหลผ่านไปในทิศทางเดียวกับคอนกรีต FM, FB และ LP ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

ส่วนน้ำทะเลใช้ผสมมอร์ตาร์นั้น พบว่าน้ำทะเลใช้ผสมน้อยกว่าของน้ำประปาใช้ผสม เพราะน้ำทะเลมีสารประกอบหลากหลายชนิดมากกว่าของน้ำประปา ทำให้มอร์ตาร์น้ำทะเลใช้ผสมมีสภาพคงตัว

ตารางที่ 4.4 ค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์เมื่อใช้  $w/b = 0.60$

ลำดับ	สัญลักษณ์	ร้อยละค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์
1	TMC	85
2	TMC-20FM	90
3	TMC-40FM	98
4	TMC-20FB	82
5	TMC-5LP	84
6	TMC-10LP	80
7	TMC-15FM-5LP	90
8	TMC-15FB-5LP	91
9	SMC	78
10	SMC-20FM	84
11	SMC-40FM	92
12	SMC-20FB	75
13	SMC-5LP	79
14	SMC-10LP	76
15	SMC-15FM-5LP	87
16	SMC-15FB-5LP	88



รูปที่ 4.2 การไหลผ่านเมื่อใช้  $w/b = 0.60$

#### 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

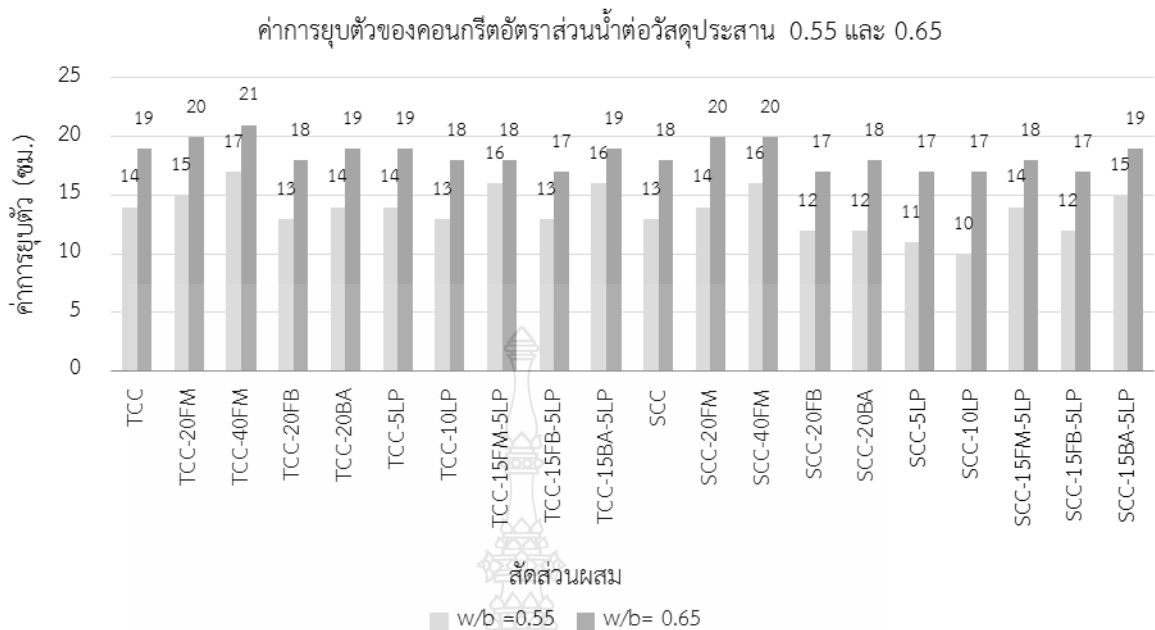
จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 และรูปที่ 4.3 แสดงค่ายุบตัวของน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสม w/b 0.55 และ 0.65 โดยการศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอย BLCP เถ้ากั้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน พบว่าทั้งคอนกรีตน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสม ที่ใช้ w/b = 0.55 และ 0.65 นั้น ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ FM มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะแทนที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะ FM เป็นทรงกลมและผิวเรียบ ไม่มีรูพรุนทำให้มีการแทรกซึมของน้ำได้น้อย คอนกรีตจึงเกิดสภาพการไหลมาก ส่วน FB มีน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยระยง มีลักษณะเป็นเหลี่ยมไม่เรียบผิวขรุขระ ทำให้มีการแทรกซึมของน้ำได้มากกว่า คอนกรีตจึงมีสภาพการคงตัวที่มากกว่า ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคของผงหินปูนมีลักษณะเหลี่ยมคมผิวขรุขระขนาดไม่แน่นอนแตกกระจายอยู่ทั่วไป จึงทำให้มีการแทรกซึมของน้ำได้มาก คอนกรีตจึงมีสภาพการคงตัวที่มาก นอกจากนี้ค่าการยุบตัวของ CC-15FM-5LP, CC-15FB-5LP พบว่าจะให้ค่าการยุบตัวไปในทิศทางเดียวกับคอนกรีตผสม FM, FB และ LP ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และในส่วนของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสม พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสม มีค่าน้อยกว่าของน้ำประปาใช้ผสม ทั้งคอนกรีตที่ใช้ w/b ทั้ง 0.55 และ 0.65 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำทะเลมีสารประกอบหลากหลายชนิดมากกว่าของน้ำประปา ทำให้การผสมน้ำทะเลในคอนกรีตมีสภาพคงตัวมากกว่าการผสมน้ำประปาในคอนกรีต ส่วน w/b มากกว่า (0.65) จะได้ค่าที่มากกว่าของ ที่ใช้ w/b ที่น้อยกว่า (0.55)

ตารางที่ 4.5 เมื่อน้ำประปาใช้ผสมและน้ำทะเลใช้ผสม โดย  $w/b = 0.55$

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ค่าการยุบตัว(ชม.)	
		น้ำประปา	น้ำทะเล
1	TCC-0.55	14	-
2	TCC-20FM-0.55	15	-
3	TCC-40FM-0.55	17	-
4	TCC-20FB-0.55	13	-
5	TCC-20BA-0.55	14	-
6	TCC-5LP-0.55	14	-
7	TCC-10LP-0.55	13	-
8	TCC-15FM-5LP-0.55	16	-
9	TCC-15FB-5LP-0.55	13	-
10	TCC-15BA-5LP-0.55	16	-
11	SCC-0.55	-	13
12	SCC-20FM-0.55	-	14
13	SCC-40FM-0.55	-	16
14	SCC-20FB-0.55	-	12
15	SCC-20BA-0.55	-	12
16	SCC-5LP-0.55	-	11
17	SCC-10LP-0.55	-	10
18	SCC-15FM-5LP-0.55	-	14
19	SCC-15FB-5LP-0.55	-	12
20	SCC-15BA-5LP-0.55	-	15

ตารางที่ 4.6 เมื่อน้ำประปาใช้ผสมและน้ำทะเลใช้ผสม โดย  $w/b = 0.65$

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ค่าการยุบตัว(ชม.)	
		น้ำประปา	น้ำทะเล
1	TCC-0.65	19	-
2	TCC-20FM-0.65	20	-
3	TCC-40FM-0.65	21	-
4	TCC-20FB-0.65	18	-
5	TCC-20BA-0.65	19	-
6	TCC-5LP-0.65	19	-
7	TCC-10LP-0.65	18	-
8	TCC-15FM-5LP-0.65	18	-
9	TCC-15FB-5LP-0.65	17	-
10	TCC-15BA-5LP-0.65	19	-
11	SCC-0.65	-	18
12	SCC-20FM-0.65	-	20
13	SCC-40FM-0.65	-	20
14	SCC-20FB-0.65	-	17
15	SCC-20BA-0.65	-	18
16	SCC-5LP-0.65	-	17
17	SCC-10LP-0.65	-	17
18	SCC-15FM-5LP-0.65	-	18
19	SCC-15FB-5LP-0.65	-	17
20	SCC-15BA-5LP-0.65	-	19



รูปที่ 4.3 ค่าการยุบตัว w/b = 0.55 และ 0.65

#### 4.5 การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต

การศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลที่ใช้ผสมคอนกรีตต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในครั้งนี้ มีรายละเอียดดังนี้

##### 4.5.1 จากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.4 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตเมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 ทั้งที่น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม พบว่า FM, FB และ BA มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 56 วัน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอย/เถ้าก้นเตาบดละเอียด เป็นการลดปูนซีเมนต์ลงรวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) จึงทำให้เกิดคาร์บอนเนชันมากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อแทนที่มากขึ้น ส่วนความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมผงหินปูนพบว่ามีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ LP ในปริมาณที่ไม่มาก ลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้น้อย ส่วนกรณีคอนกรีต CC-15FM-5LP, CC-15FB-5LP พบว่าให้ค่าของความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันไปในทิศทางเดียวกันกับการแทนที่ผสม FM, FB และ LP ส่วนคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่นานกว่า (56 วัน) ส่งผลให้มีค่าที่มากกว่าเมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า (28 วัน) ทั้งนี้เพราะการเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่นาน ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้มากกว่า

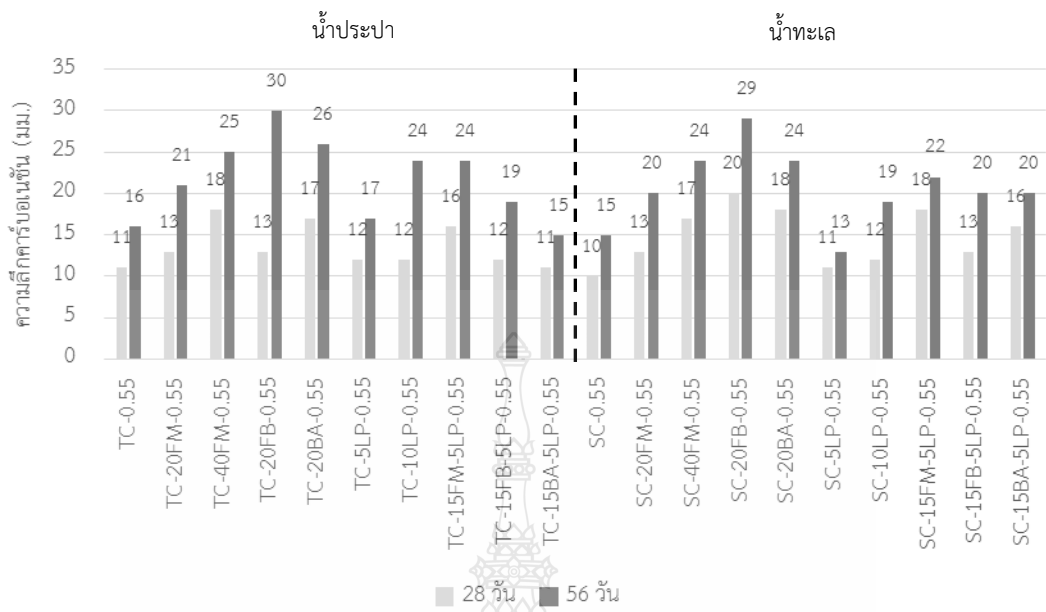
ตารางที่ 4.7 ความถี่การเกิดคาร์บอนชั้น โดยใช้  $w/b = 0.55$  สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )  
ที่อายุ 28 และ 56 วัน

ลำดับ	สัญลักษณ์	สัมผัส ( $CO_2$ ) ที่อายุ 28 วัน (มม.)		สัมผัส ( $CO_2$ ) ที่อายุ 56 วัน (มม.)	
		น้ำประปาใช้ผสม และบ่ม	น้ำทะเลใช้ ผสมและบ่ม	น้ำประปาใช้ผสม และบ่ม	น้ำทะเลใช้ ผสมและบ่ม
1	TCC-0.55	11	-	16	-
2	TCC-20FM-0.55	13	-	21	-
3	TCC-40FM-0.55	18	-	25	-
4	TCC-20FB-0.55	13	-	30	-
5	TCC-20BA-0.55	17	-	26	-
6	TCC-5LP-0.55	12	-	17	-
7	TCC-10LP-0.55	12	-	24	-
8	TCC-15FM-5LP-0.55	16	-	24	-
9	TCC-15FB-5LP-0.55	12	-	19	-
10	TCC-15BA-5LP-0.55	11	-	15	-
11	SCC-0.55	-	10	-	15
12	SCC-20FM-0.55	-	13	-	20
13	SCC-40FM-0.55	-	17	-	24
14	SCC-20FB-0.55	-	20	-	29
15	SCC-20BA-0.55	-	18	-	24
16	SCC-5LP-0.55	-	11	-	13
17	SCC-10LP-0.55	-	12	-	19
18	SCC-15FM-5LP-0.55	-	18	-	22
19	SCC-15FB-5LP-0.55	-	13	-	20
20	SCC-15BA-5LP-0.55	-	16	-	20

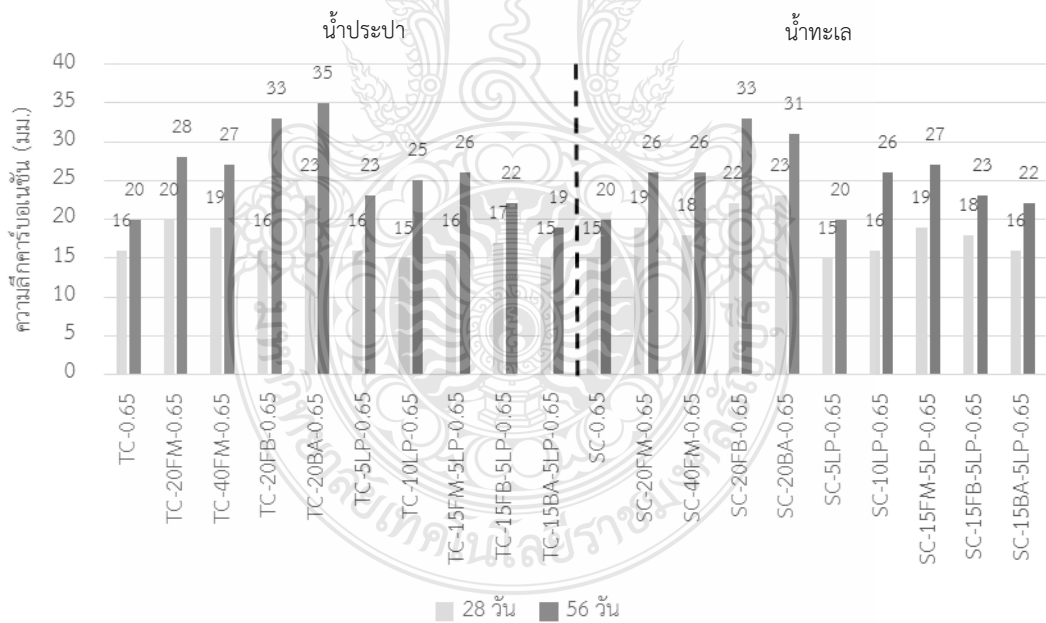


ตารางที่ 4.7 ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยใช้  $w/b = 0.55$  สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่อายุ 28 และ 56 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	สัมผัส ( $CO_2$ )		สัมผัส ( $CO_2$ )	
		ที่อายุ 28 วัน (มม.)		ที่อายุ 56 วัน (มม.)	
		น้ำประปาใช้ผสม และบ่ม	น้ำทะเลใช้ ผสมและบ่ม	น้ำประปาใช้ผสม และบ่ม	น้ำทะเลใช้ ผสมและบ่ม
1	TCC-0.65	16	-	20	-
2	TCC-20FM-0.65	20	-	28	-
3	TCC-40FM-0.65	19	-	27	-
4	TCC-20FB-0.65	16	-	33	-
5	TCC-20BA-0.65	23	-	35	-
6	TCC-5LP-0.65	16	-	23	-
7	TCC-10LP-0.65	15	-	25	-
8	TCC-15FM-5LP-0.65	16	-	26	-
9	TCC-15FB-5LP-0.65	17	-	22	-
10	TCC-15BA-5LP-0.65	15	-	19	-
11	SCC-0.65	-	15	-	20
12	SCC-20FM-0.65	-	19	-	26
13	SCC-40FM-0.65	-	18	-	26
14	SCC-20FB-0.65	-	22	-	33
15	SCC-20BA-0.65	-	23	-	31
16	SCC-5LP-0.65	-	15	-	20
17	SCC-10LP-0.65	-	16	-	26
18	SCC-15FM-5LP-0.65	-	19	-	27
19	SCC-15FB-5LP-0.65	-	18	-	23
20	SCC-15BA-5LP-0.65	-	16	-	22



(ก) w/b = 0.55

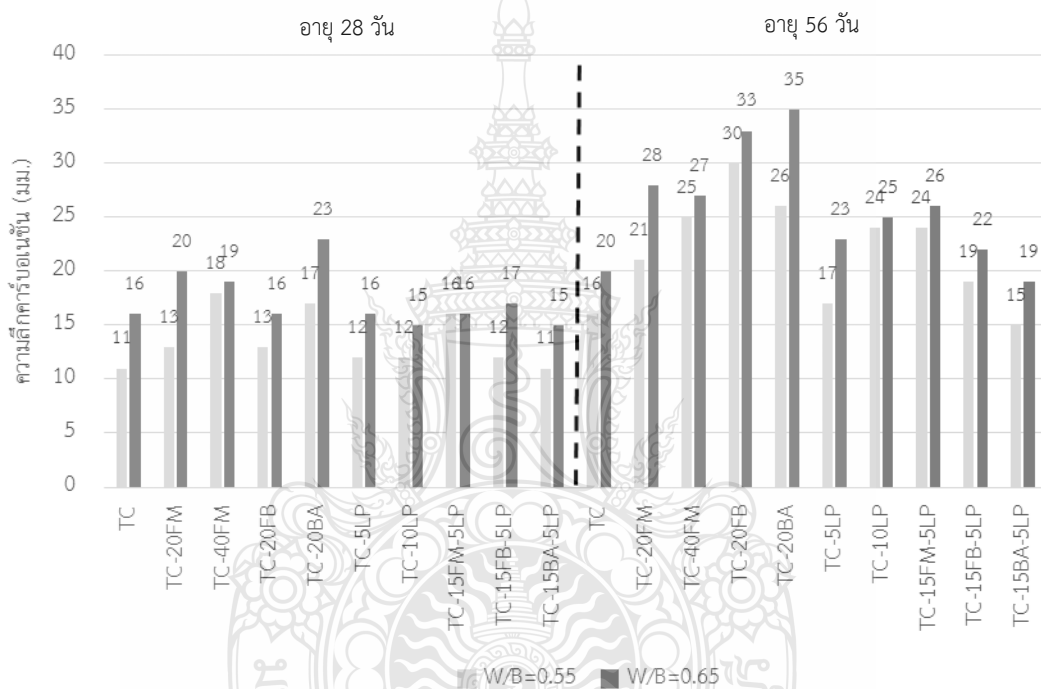


(ข) w/b = 0.65

รูปที่ 4.4 เมื่อใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมและบ่ม

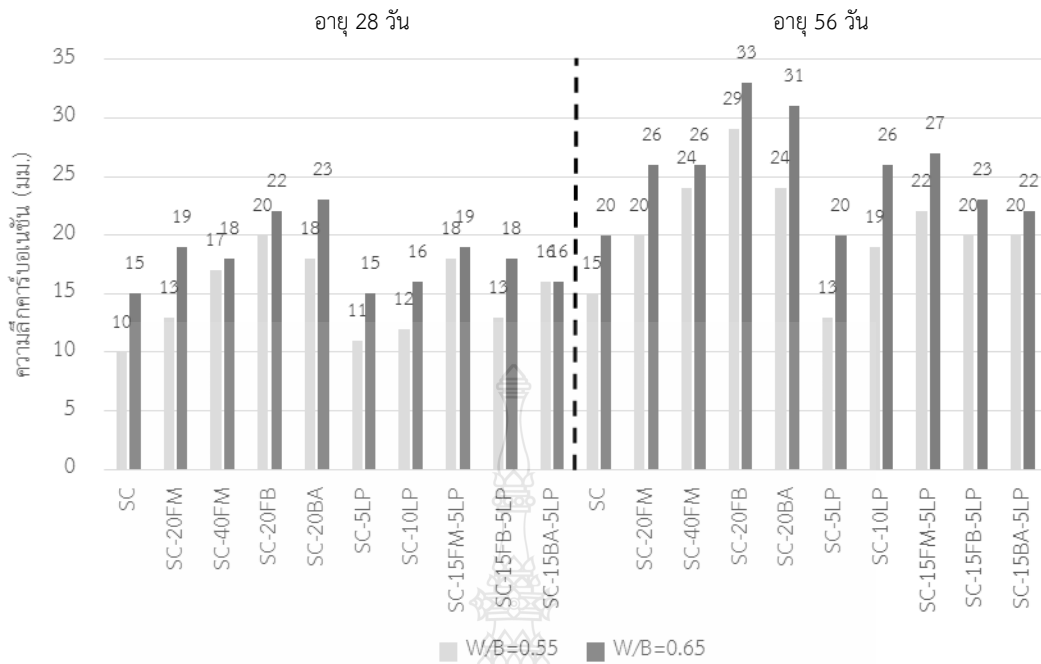
#### 4.5.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.5 (ก) น้ำประปาใช้ผสมและบ่ม เมื่อใช้ w/b 0.55, 0.65 เมื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าค่าความลึกคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่ใช้ w/b ที่น้อยกว่า (0.55) น้อยกว่า w/b ที่มากกว่า (0.65) ทั้งนี้เพราะคอนกรีตที่ใช้ w/b ที่มากมีความพรุนมาก ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้มาก ส่งผลให้เกิดมากกว่า ส่วนรูปที่ 4.5 (ข) เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม เมื่อใช้ w/b = 0.55 และ 0.65 ให้ผลเป็นไปทิศทางเดียวกันกับของคอนกรีตที่ผสมและบ่มน้ำประปา ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



(ก) น้ำประปาใช้ผสมและบ่ม

รูปที่ 4.5 เมื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อายุ 28 และ 56 วัน

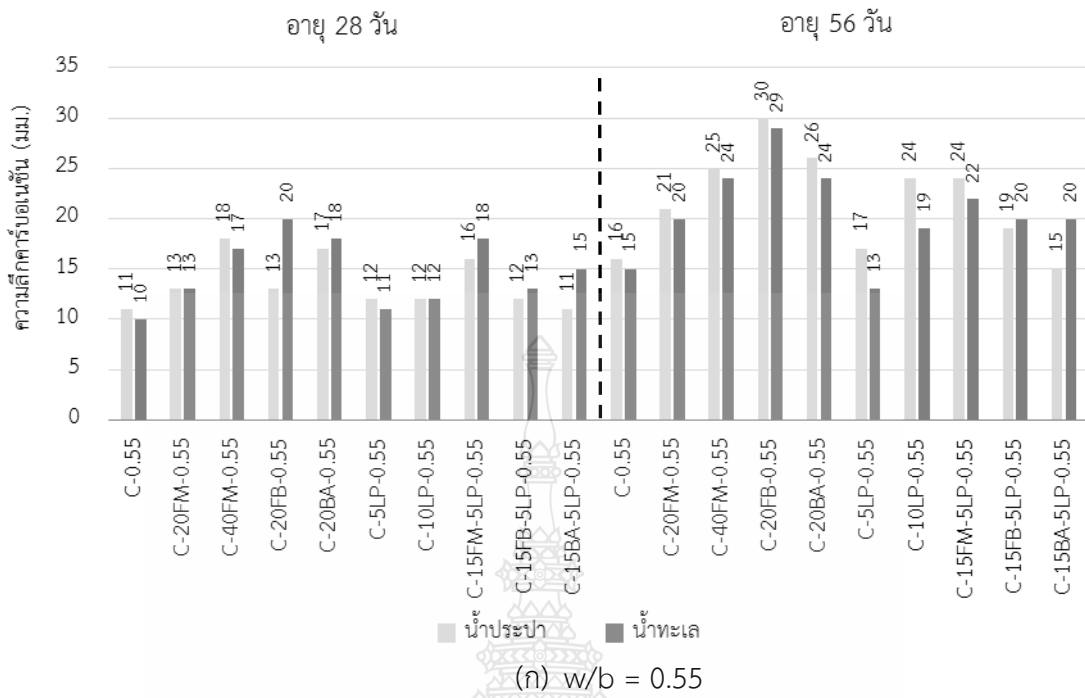


(ข) น้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม

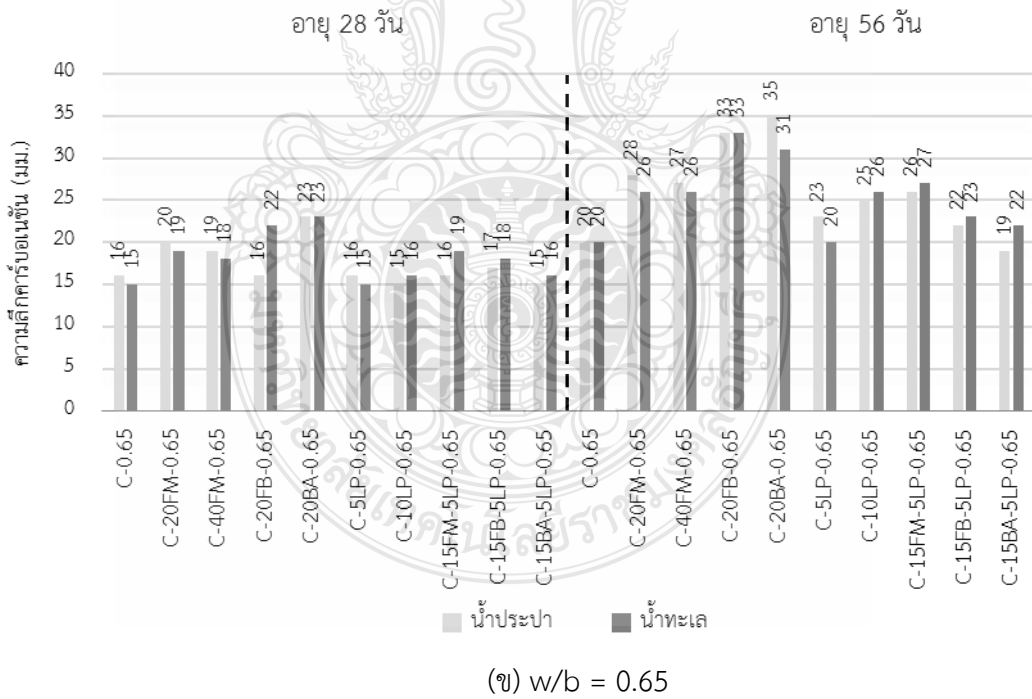
รูปที่ 4.5 เมื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อายุ 28 และ 56 วัน (ต่อ)

#### 4.5.3 ผลกระทบจากน้ำทะเลที่ใช้ผสมและบ่ม

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตทั้งที่น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม เมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 เมื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อายุ 28 เป็นเพราะคอนกรีตที่น้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้นทำให้มีกำลังอัดมากขึ้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันที่น้อยกว่าซึ่งสอดคล้องการศึกษาของ Nurazuwa a Md Noor, Asali and M.F. [13]



(ก) w/b = 0.55



(ข) w/b = 0.65

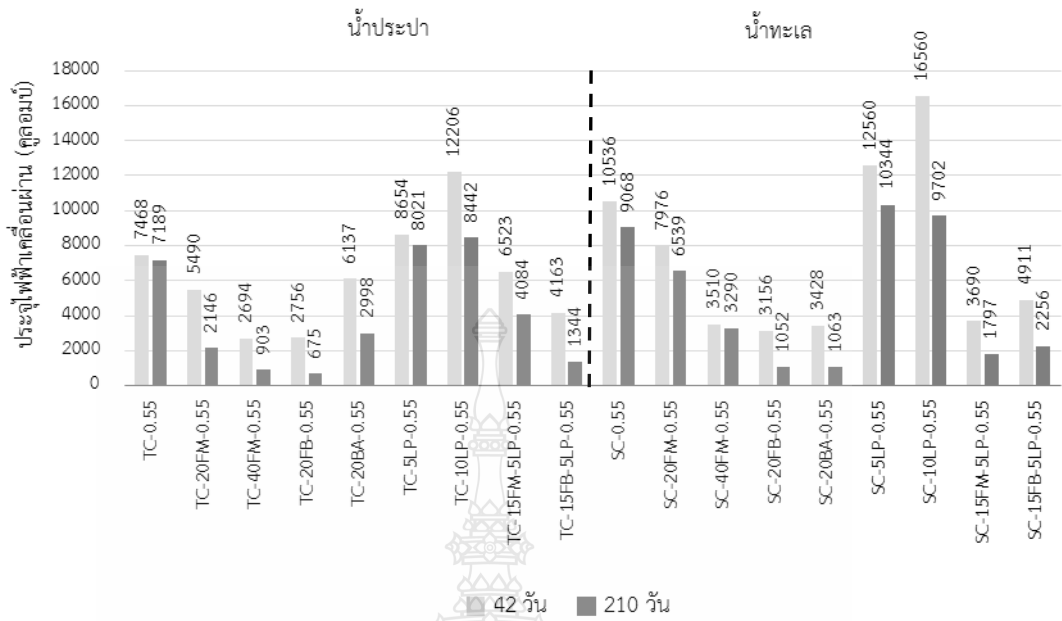
รูปที่ 4.6 เมื่อน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 28 และ 56 วัน

#### 4.6 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

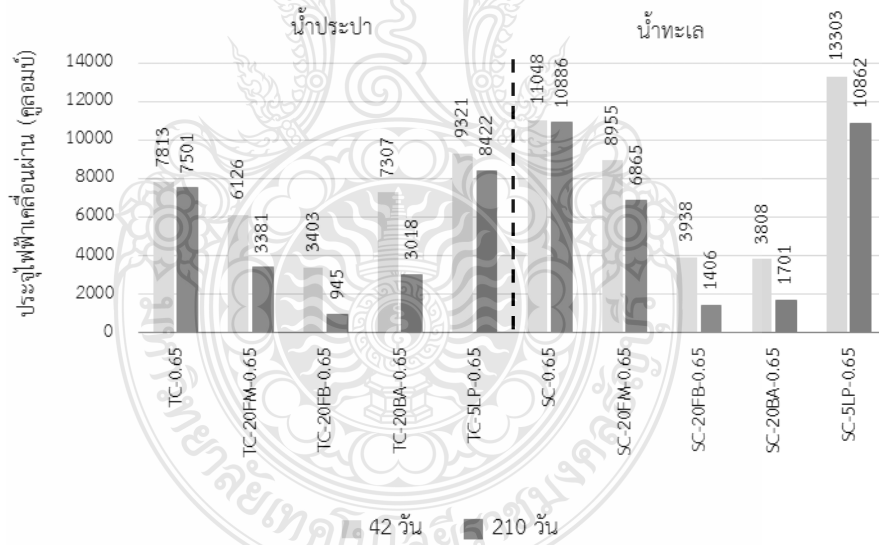
การศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

##### 4.6.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมบ์) w/b 0.55, 0.65 ทั้งที่น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 42 วัน และ 210 วัน พบว่า ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง FM, FB และ BA น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและความละเอียดของเถ้าลอย คอนกรีตจึงมีความแน่นขึ้น ทำให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านน้อยลง ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูน มีแนวโน้มประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ LP เป็นวัสดุเติมเต็ม เมื่อลดปูนซีเมนต์ลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง จึงพูนมากประจุไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น ส่วน CC-15FM-5LP, CC-15FB-5LP พบว่าให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านไป ในทิศทางเดียวกันกับการแทนที่ของ FN, FB และ LP อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์จากผลของปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 (ตารางที่ 2.1) พบว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (ร้อยละ 20) คอนกรีตผสมผงหินปูน (ร้อยละ 5 และ 10) และคอนกรีตที่ CC-15FM-5LP, CC-15FB-5LP มีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน มากกว่า 4,000 ซึ่งจัดอยู่ระดับการซึมผ่านได้สูง ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (ร้อยละ 40) คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยระยอง (ร้อยละ 20) และคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (ร้อยละ 20) ที่มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 2,000 ถึง 4,000 ซึ่งจัดอยู่ระดับปานกลาง



(ก) w/b = 0.55

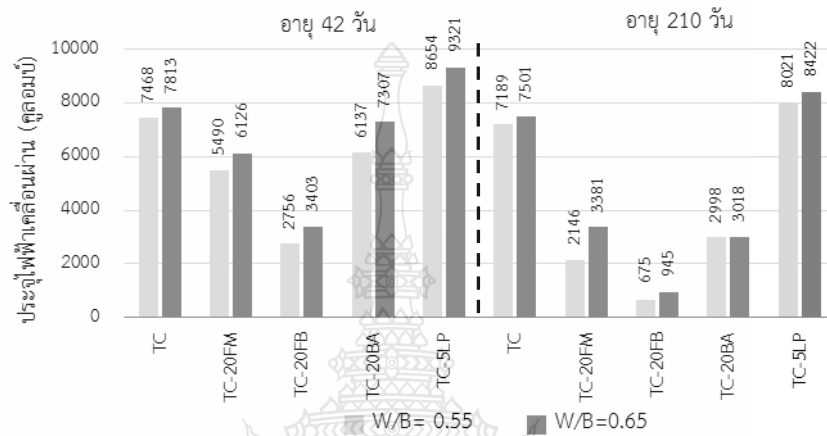


(ข) w/b = 0.65

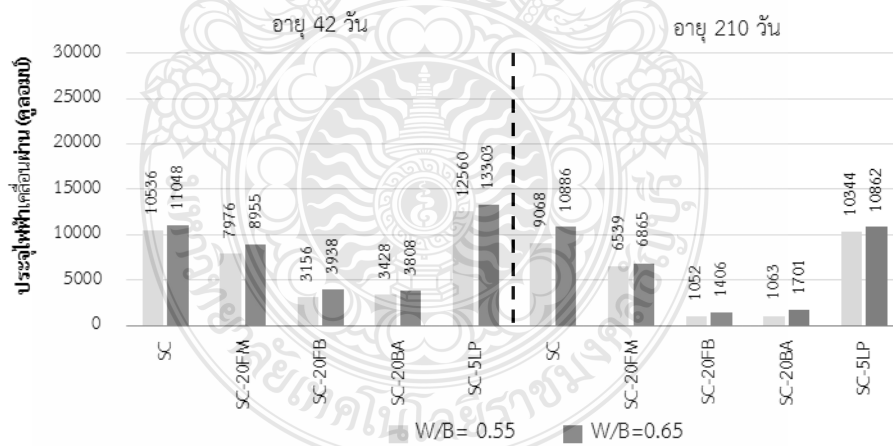
รูปที่ 4.7 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม

#### 4.6.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน w/b 0.55, 0.65 ทั้งที่น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 42 และ 210 วัน พบว่าค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน คอนกรีตที่ใช้ w/b ที่มากกว่า (0.65) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ w/b ที่น้อยกว่า (0.55) ทั้งนี้เพราะคอนกรีตที่ใช้ w/b มากมีความพรุนมากประจุไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ผ่านได้มากกว่า



(ก) น้ำประปาใช้ผสมและบ่ม



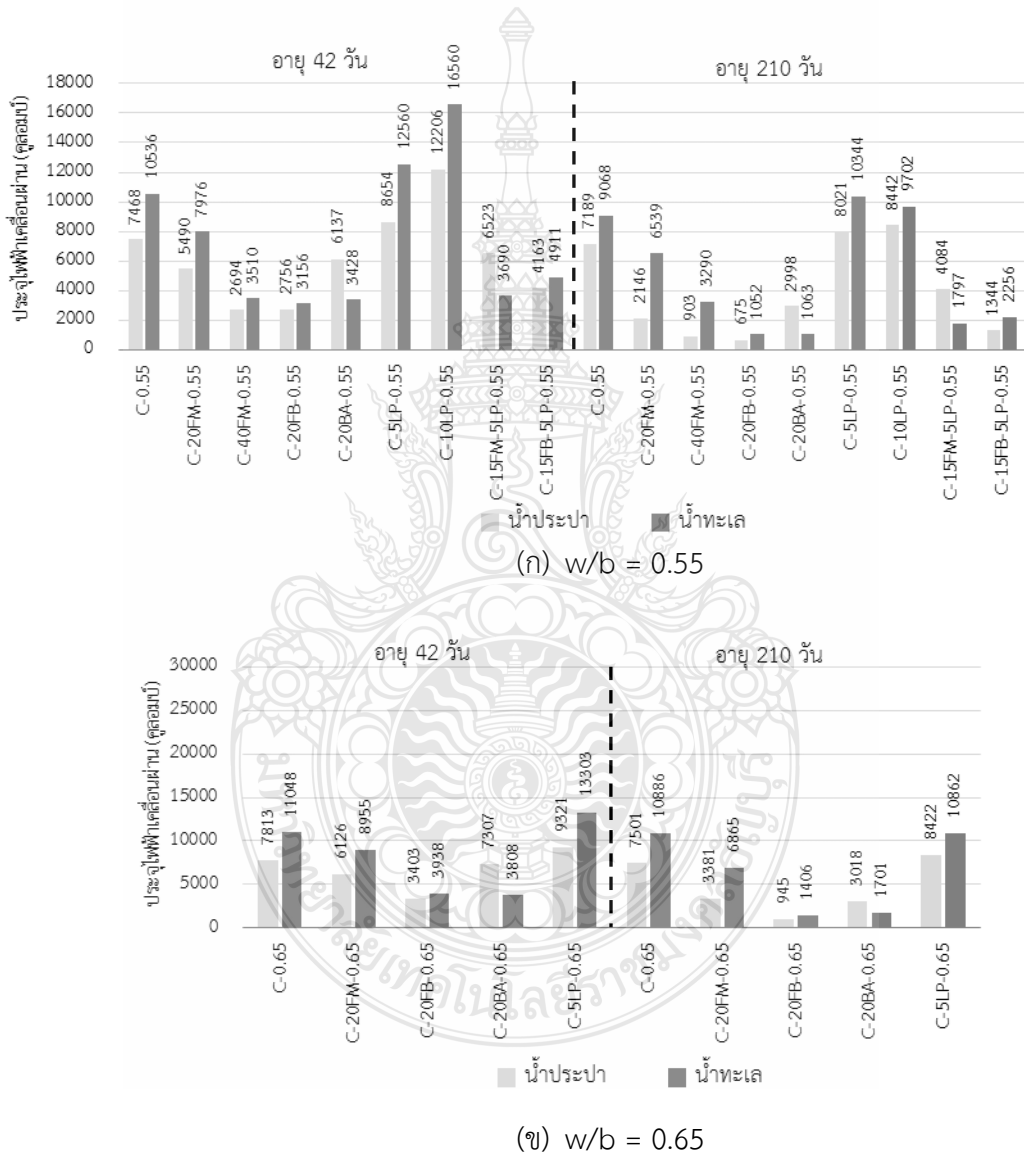
(ข) น้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม

รูปที่ 4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 42 และ 210 วัน



### 4.6.3 ผลกระทบจากน้ำทะเลที่ใช้ผสม

รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้า ใช้ w/b 0.55, 0.65 ที่อายุ 42 และ 210 วัน พบว่าค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมและบ่มน้ำทะเล มีค่ามากกว่าของคอนกรีตใช้ผสมและบ่มน้ำประปา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำทะเลมีสารประกอบหลายชนิด สารประกอบเหล่านี้จะส่งผลให้องค์ประกอบของคอนกรีตไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นคอนกรีตที่น้ำทะเลใช้ผสมและบ่มจึงมีความคงทนลดลง ทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านมากกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มน้ำประปา



รูปที่ 4.9 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 ที่อายุ 42 และ 210 วัน

#### 4.7 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

ได้ผลการทดสอบประกอบด้วย ปริมาณคลอไรด์ และคลอไรด์อิสระ ส่วนคลอไรด์ยึดจับ ได้มาจากผลต่างของคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ และในกรณีอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride Ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ยึดจับต่อคลอไรด์ทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถึง 4.11

**ตารางที่ 4.8** ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย w/b = 0.55 (ระยะเวลา 91 วัน)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์		คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ยึด จับ
				ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอไรด์ ทั้งหมด				
1	TCC-0.55	5		13.93	13.93	6.16	7.77	0.56	0.50
		15		6.21	6.21	3.10	3.11	0.50	
		25	0	2.41	2.41	1.20	1.20	0.50	
		35		1.53	1.53	0.74	0.78	0.51	
		45		1.20	1.20	0.26	0.94	0.79	
2	TCC-20FM-0.55	5		11.25	11.25	5.56	5.69	0.51	0.58
		15		4.95	4.95	1.54	3.41	0.69	
		25	0	1.54	1.54	0.70	0.84	0.55	
		35		0.45	0.45	0.33	0.12	0.26	
		45		0.36	0.36	0.28	0.07	0.21	
3	TCC-40FM-0.55	5		8.44	8.44	3.25	5.19	0.61	0.65
		15		2.11	2.11	0.73	1.38	0.65	
		25	0	0.40	0.40	0.13	0.27	0.67	
		35		0.21	0.21	0.10	0.11	0.52	
		45		0.15	0.15	0.09	0.06	0.39	

**ตารางที่ 4.8** ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย  $w/b = 0.55$  (ระยะเวลา 91 วัน) (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์ ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอ ไรด์ ทั้งหมด	คลอ ไรด์ อิสระ	คลอ ไรด์ยึด จับ	อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึด จับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
4	TCC-20FB-0.55	5		9.14	9.14	4.00	5.14	0.56	0.62
		15		2.44	2.44	1.00	1.44	0.59	
		25	0	0.40	0.40	0.16	0.24	0.60	
		35		0.39	0.39	0.15	0.24	0.62	
		45		0.23	0.23	0.14	0.09	0.39	
5	TCC-20BA-0.55	5		7.90	7.90	3.50	4.40	0.56	0.57
		15		1.71	1.71	0.75	0.96	0.56	
		25	0	0.39	0.39	0.17	0.22	0.57	
		35		0.14	0.14	0.06	0.08	0.57	
		45		0.13	0.13	0.06	0.08	0.59	
6	TCC-5LP-0.55	5		12.62	12.62	6.86	5.75	0.46	0.48
		15		5.77	5.77	3.00	2.77	0.48	
		25	0	2.12	2.12	1.12	1.00	0.47	
		35		1.24	1.24	0.65	0.59	0.48	
		45		0.98	0.98	0.60	0.38	0.39	
7	TCC-10LP-0.55	5		11.63	11.63	6.84	4.79	0.41	0.42
		15		4.90	4.90	2.75	2.15	0.44	
		25	0	1.36	1.36	0.80	0.56	0.41	
		35		1.02	1.02	0.70	0.32	0.31	
		45		0.76	0.76	0.60	0.16	0.21	
8	TCC-15FM-5LP-0.55	5		9.49	9.49	4.32	5.17	0.54	0.55
		15		2.64	2.64	1.18	1.46	0.55	
		25	0	1.05	1.05	0.48	0.57	0.54	
		35		0.32	0.32	0.32	0.00	0.01	
		45		0.33	0.33	0.31	0.02	0.06	

**ตารางที่ 4.8** ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย w/b = 0.55 (ระยะเวลา 91 วัน) (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์ ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอ ไรด์ ทั้งหมด	คลอ ไรด์ อิสระ	คลอ ไรด์ยึด จับ	อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึด จับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
9	TCC-15FB-5LP-0.55	5		7.90	7.90	3.30	4.60	0.58	0.58
		15		2.18	2.18	0.90	1.28	0.59	
		25	0	0.22	0.22	0.10	0.12	0.57	
		35		0.36	0.36	0.09	0.27	0.75	
		45		0.23	0.23	0.09	0.14	0.63	
10	SCC-0.55	5		19.34	17.23	7.93	11.41	0.59	0.65
		15		9.59	7.48	3.20	6.39	0.67	
		25	2.10	6.80	4.70	2.20	4.60	0.68	
		35		5.42	3.31	2.20	3.22	0.59	
		45		5.36	3.25	2.19	3.17	0.59	
11	SCC-20FM-0.55	5		15.78	13.18	5.00	10.78	0.68	0.76
		15		8.52	5.92	2.41	6.11	0.72	
		25	2.60	5.55	2.95	1.10	4.45	0.80	
		35		5.05	2.45	0.95	4.10	0.81	
		45		4.91	2.31	0.93	3.98	0.81	
12	SCC-40FM-0.55	5		14.37	10.93	3.90	10.47	0.73	0.88
		15		7.06	3.62	1.00	6.06	0.86	
		25	3.45	4.49	1.04	0.50	3.99	0.89	
		35		4.22	0.78	0.40	3.82	0.91	
		45		3.89	0.44	0.00	3.89	1.00	
13	SCC-20FB-0.55	5		12.78	9.85	3.30	9.48	0.74	0.92
		15		4.21	1.28	0.50	3.71	0.88	
		25	2.93	3.26	0.34	0.11	3.15	0.97	
		35		2.94	0.01	0.01	2.93	1.00	
		45		2.94	0.01	0.01	2.93	1.00	

ตารางที่ 4.8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย  $w/b = 0.55$  (ระยะเวลา 91 วัน) (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์ ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอ ไรด์ ทั้งหมด	คลอ ไรด์ อิสระ	คลอ ไรด์ยึด จับ	อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึด จับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
14	SCC-20BA-0.55	5		8.25	5.32	1.80	6.45	0.78	0.85
		15		4.36	1.43	0.51	3.85	0.88	
		25	2.93	3.86	0.93	0.32	3.54	0.92	
		35		3.71	0.78	0.78	2.93	0.79	
		45		3.42	0.49	0.49	2.93	0.86	
15	SCC-5LP-0.55	5		17.89	14.18	6.90	10.99	0.61	0.71
		15		10.25	6.54	3.00	7.25	0.71	
		25	3.71	6.96	3.25	1.60	5.36	0.77	
		35		6.02	2.31	1.59	4.43	0.74	
		45		5.85	2.14	1.53	4.32	0.74	
16	SCC-10LP-0.55	5		16.62	13.38	6.51	10.11	0.61	0.75
		15		8.82	5.57	2.73	6.09	0.69	
		25	3.24	5.66	2.41	1.20	4.46	0.79	
		35		4.98	1.73	0.83	4.15	0.83	
		45		4.77	1.52	0.80	3.97	0.83	
17	SCC-15FM-5LP-0.55	5		14.17	10.44	4.21	9.96	0.70	0.84
		15		7.73	4.00	1.50	6.23	0.81	
		25	3.73	5.27	1.54	0.50	4.77	0.91	
		35		4.92	1.19	0.50	4.42	0.90	
		45		4.57	0.84	0.49	4.08	0.89	
18	SCC-15FB-5LP-0.55	5		13.87	10.23	3.00	10.87	0.78	0.82
		15		6.95	3.31	1.11	5.84	0.84	
		25	3.64	5.31	1.67	0.90	4.41	0.83	
		35		4.92	1.28	0.90	4.02	0.82	
		45		4.61	0.96	0.89	3.72	0.81	

ตารางที่ 4.9 ปริมาณคอรไรต์ทั้งหมด คอรไรต์อิสระ คอรไรต์ยึดจับ และอัตราส่วนคอรไรต์ยึดจับ โดย w/b = 0.65 (ระยะเวลา 91 วัน)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คอรไรต์ ตั้งต้น	คอรไรต์ ทั้งหมด (รวมคอรไรต์ ตั้งต้น)	คอรไรต์ ทั้งหมด	คอรไรต์ อิสระ	คอรไรต์ยึด จับ	อัตรา ส่วนคอรไรต์ยึด จับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คอรไรต์ ยึดจับ
1	TCC-0.65	5		18.05	18.05	10.58	7.47	0.41	
		15		7.26	7.26	3.97	3.29	0.45	
		25	0	2.99	2.99	1.60	1.39	0.47	0.45
		35		1.25	1.25	0.70	0.56	0.44	
		45		1.11	1.11	1.11	0.00	0.00	
2	TCC-20FM-0.65	5		14.33	14.33	7.33	7.00	0.49	
		15		6.42	6.42	3.35	3.06	0.48	
		25	0	2.15	2.15	1.02	1.13	0.52	0.50
		35		0.57	0.57	0.47	0.10	0.18	
		45		0.37	0.37	0.20	0.17	0.46	
3	TCC-20FB-0.65	5		9.04	9.04	3.11	5.93	0.66	
		15		2.25	2.25	1.00	1.25	0.56	
		25	0	0.86	0.86	0.33	0.53	0.62	0.61
		35		0.61	0.61	0.50	0.11	0.18	
		45		0.34	0.34	0.34	0.00	0.01	
4	TCC-20BA-0.65	5		8.98	8.98	4.28	4.70	0.52	
		15		2.14	2.14	1.03	1.11	0.52	
		25	0	0.45	0.45	0.20	0.25	0.55	0.53
		35		0.24	0.24	0.20	0.04	0.17	
		45		0.23	0.23	0.22	0.01	0.05	
5	TCC-5LP-0.65	5		13.04	13.04	7.05	5.99	0.46	
		15		6.32	6.32	4.19	2.13	0.34	
		25	0	2.88	2.88	1.50	1.37	0.48	0.42
		35		1.80	1.80	1.70	0.10	0.05	
		45		1.55	1.55	1.53	0.02	0.01	

**ตารางที่ 4.9** ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย  $w/b = 0.65$  (ระยะเวลา 91 วัน) (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์ ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอ ไรด์ ทั้งหมด	คลอ ไรด์ อิสระ	คลอ ไรด์ยึด จับ	อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึด จับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
6	SCC-0.65	5		23.07	21.14	7.11	15.96	0.69	0.54
		15		10.31	8.38	4.20	6.11	0.59	
		25	1.93	6.70	4.77	3.10	3.60	0.54	
		35		6.00	4.08	3.00	3.00	0.50	
		45		5.25	3.32	3.31	1.94	0.37	
7	SCC-20FM-0.65	5		21.00	18.37	7.50	13.50	0.64	0.67
		15		9.46	6.83	2.90	6.56	0.69	
		25	2.63	6.49	3.86	2.00	4.49	0.69	
		35		5.74	3.11	1.92	3.82	0.67	
		45		5.24	2.62	1.81	3.43	0.65	
8	SCC-20FB-0.65	5		14.93	12.81	5.29	9.64	0.65	0.82
		15		4.81	2.69	1.10	3.71	0.77	
		25	2.12	3.08	0.97	0.30	2.78	0.90	
		35		2.94	0.82	0.29	2.65	0.90	
		45		2.85	0.74	0.28	2.57	0.90	
9	SCC-20BA-0.65	5		19.01	15.02	6.99	12.02	0.63	0.79
		15		8.85	4.86	2.30	6.55	0.74	
		25	3.99	5.98	2.00	0.83	5.15	0.86	
		35		5.71	1.72	0.80	4.91	0.86	
		45		5.55	1.56	0.79	4.76	0.86	
10	SCC-5LP-0.65	5		19.07	14.71	7.83	11.24	0.59	0.63
		15		12.10	7.74	4.10	8.00	0.66	
		25	4.36	7.40	3.04	1.67	5.73	0.77	
		35		5.98	1.63	1.62	4.36	0.73	
		45		5.55	1.19	1.19	4.36	0.79	

ตารางที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย w/b = 0.55 (ระยะเวลา 182 วัน)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์				อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ยึด จับ
				ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ		
1	TCC-0.55	5		15.77	15.77	3.70	12.07	0.77	0.43
		15		3.41	3.41	0.40	3.01	0.88	
		25	0	1.08	1.08	0.41	0.66	0.62	
		35		0.52	0.52	0.32	0.19	0.38	
		45		0.44	0.44	0.32	0.12	0.28	
2	TCC-20FM-0.55	5		15.33	15.33	6.58	8.75	0.57	0.57
		15		3.32	3.32	1.38	1.94	0.58	
		25	0	0.65	0.65	0.23	0.42	0.64	
		35		0.31	0.31	0.11	0.20	0.65	
		45		0.27	0.27	0.11	0.17	0.61	
3	TCC-40FM-0.55	5		13.81	13.81	8.06	5.74	0.42	0.49
		15		1.44	1.44	1.20	0.24	0.17	
		25	0	0.79	0.79	0.30	0.50	0.62	
		35		0.42	0.42	0.15	0.27	0.64	
		45		0.25	0.25	0.09	0.15	0.62	
4	TCC-20FB-0.55	5		10.08	10.08	5.09	4.99	0.49	0.54
		15		1.56	1.56	0.69	0.88	0.56	
		25	0	0.23	0.23	0.16	0.07	0.29	
		35		0.19	0.19	0.13	0.06	0.30	
		45		0.14	0.14	0.06	0.08	0.56	
5	TCC-20BA-0.55	5		8.39	8.39	6.63	1.76	0.21	0.51
		15		2.78	2.78	1.79	0.99	0.36	
		25	0	1.09	1.09	0.54	0.55	0.51	
		35		0.36	0.36	0.30	0.06	0.18	
		45		0.21	0.21	0.22	-0.01	-0.07	
6	TCC-5LP-0.55	5		7.27	7.27	6.93	0.34	0.05	0.27
		15		3.17	3.17	3.05	0.11	0.04	
		25	0	1.47	1.47	1.21	0.26	0.18	
		35		1.05	1.05	0.68	0.37	0.36	
		45		0.56	0.56	0.63	-0.06	-0.11	



ตารางที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย w/b = 0.55 (ระยะเวลา 182 วัน) (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์				อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ยึด จับ
				ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ		
7	TCC-10LP-0.55	5	0	6.29	6.29	4.79	1.50	0.24	0.36
		15		2.57	2.57	1.85	0.71	0.28	
		25		1.47	1.47	0.81	0.66	0.45	
		35		0.93	0.93	0.52	0.42	0.45	
		45		0.46	0.46	0.28	0.18	0.39	
8	TCC-15FM-5LP- 0.55	5	0	4.16	4.16	3.23	0.94	0.22	0.47
		15		1.38	1.38	0.94	0.44	0.32	
		25		0.41	0.41	0.09	0.32	0.78	
		35		0.16	0.16	0.08	0.08	0.51	
		45		0.14	0.14	0.07	0.08	0.53	
9	TCC-15FB-5LP- 0.55	5	0	10.55	10.55	2.22	8.32	0.79	0.46
		15		3.20	3.20	0.16	3.04	0.95	
		25		0.63	0.63	0.08	0.55	0.87	
		35		0.09	0.09	0.07	0.02	0.24	
		45		0.09	0.09	0.06	0.03	0.36	
10	SCC-0.55	5	2.11	15.18	13.07	7.14	8.04	0.53	0.60
		15		10.45	8.34	3.76	6.69	0.64	
		25		6.49	4.38	2.57	3.92	0.60	
		35		4.97	2.86	1.93	3.04	0.61	
		45		4.23	2.12	1.61	2.62	0.62	
11	SCC-20FM-0.55	5	2.60	13.33	10.73	8.34	4.99	0.37	0.65
		15		9.95	7.35	4.29	5.66	0.57	
		25		6.47	3.87	2.69	3.78	0.58	
		35		4.85	2.25	1.74	3.11	0.64	
		45		4.78	2.18	1.67	3.11	0.65	
12	SCC-40FM-0.55	5	3.45	10.55	7.11	9.61	0.94	0.09	0.60
		15		9.46	6.01	4.18	5.28	0.56	
		25		6.58	3.13	2.68	3.90	0.59	
		35		5.97	2.53	2.37	3.60	0.60	
		45		5.69	2.24	2.24	3.45	0.61	

ตารางที่ 4.10 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย w/b = 0.55 (ระยะเวลา 182 วัน) (ต่อ)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์		อัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ยึด จับ		
				ทั้งหมด (รวมคลอ ไรด์ตั้งต้น)	คลอไรด์ ทั้งหมด				
13	SCC-20FB-0.55	5		8.95	6.02	4.90	4.05	0.45	
		15		3.87	0.94	1.80	2.07	0.53	
		25	2.93	2.93	0.00	0.89	2.04	0.70	0.75
		35		2.93	0.00	0.87	2.06	0.70	
		45		2.93	0.00	0.73	2.20	0.75	
14	SCC-20BA-0.55	5		7.71	4.78	5.79	1.92	0.25	
		15		2.98	0.06	2.12	0.86	0.29	
		25	2.93	2.93	0.00	1.26	1.67	0.57	0.55
		35		2.93	0.00	1.16	1.77	0.60	
		45		2.93	0.00	1.10	1.83	0.62	
15	SCC-5LP-0.55	5		9.14	5.43	4.99	4.15	0.45	
		15		4.81	1.10	3.03	1.78	0.37	
		25	3.71	3.71	0.00	2.31	1.40	0.38	0.42
		35		3.71	0.00	2.15	1.56	0.42	
		45		3.71	0.00	1.87	1.84	0.50	
16	SCC-10LP-0.55	5		12.74	9.49	11.09	1.65	0.13	
		15		8.01	4.77	7.06	0.95	0.12	
		25	3.25	5.68	2.43	4.20	1.48	0.26	0.22
		35		3.94	0.69	3.09	0.85	0.22	
		45		3.58	0.34	2.93	0.65	0.18	
17	SCC-15FM-5LP- 0.55	5		5.87	2.14	5.75	0.12	0.20	
		15		3.73	0.00	3.63	0.10	0.26	
		25	3.73	3.73	0.00	3.50	0.23	0.06	0.20
		35		3.73	0.00	3.20	0.53	0.14	
		45		3.73	0.00	2.47	1.26	0.34	
18	SCC-15FB-5LP- 0.55	5		8.22	4.58	7.15	1.07	0.13	
		15		3.64	0.00	2.94	0.70	0.19	
		25	3.64	3.64	0.00	1.89	1.75	0.48	0.54
		35		3.64	0.00	1.70	1.94	0.53	
		45		3.64	0.00	1.46	2.18	0.60	

ตารางที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ โดย  $w/b = 0.65$  (ระยะเวลา 182 วัน)

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คลอไรด์ ตั้งต้น	คลอไรด์ ทั้งหมด (รวมคลอไรด์ ตั้งต้น)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ยึด จับ	อัตรา ส่วนคลอไรด์ยึด จับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ
1	TCC-0.65	5		6.95	6.95	7.76	-0.81	-0.12	0.28
		15		2.96	2.96	2.57	0.39	0.13	
		25	0	1.23	1.23	0.71	0.52	0.42	
		35		0.35	0.35	0.69	-0.34	-0.98	
		45		0.18	0.18	0.62	-0.44	-2.49	
2	TCC-20FM-0.65	5		10.24	10.24	6.78	3.46	0.34	0.30
		15		3.27	3.27	2.42	0.85	0.26	
		25	0	0.68	0.68	0.78	-0.11	-0.16	
		35		0.17	0.17	0.44	-0.27	-1.60	
		45		0.17	0.17	0.10	0.07	0.41	
3	TCC-20FB-0.65	5		6.02	6.02	3.11	2.91	0.48	0.48
		15		0.81	0.81	1.00	-0.19	-0.23	
		25	0	0.18	0.18	0.33	-0.15	-0.79	
		35		0.18	0.18	0.50	-0.32	-1.76	
		45		0.17	0.17	0.34	-0.17	-0.97	
4	TCC-20BA-0.65	5		6.44	6.44	6.28	0.16	0.03	0.49
		15		3.14	3.14	1.62	1.52	0.49	
		25	0	2.39	2.39	0.79	1.60	0.67	
		35		2.31	2.31	0.20	2.11	0.91	
		45		0.22	0.22	0.22	1.99	0.90	
5	TCC-5LP-0.65	5		8.41	8.41	7.05	1.36	0.16	0.16
		15		3.04	3.04	4.19	-1.15	-0.38	
		25	0	1.23	1.23	1.50	-0.27	-0.22	
		35		0.31	0.31	1.70	-1.39	-4.46	
		45		0.16	0.16	1.53	-1.38	-8.85	

ตารางที่ 4.11 ปริมาณคอลลอยด์ทั้งหมด คอลลอยด์อิสระ คอลลอยด์ยึดจับ และอัตราส่วนคอลลอยด์ยึดจับ โดย w/b = 0.65 (ระยะเวลา 182 วัน) (ต่อ)

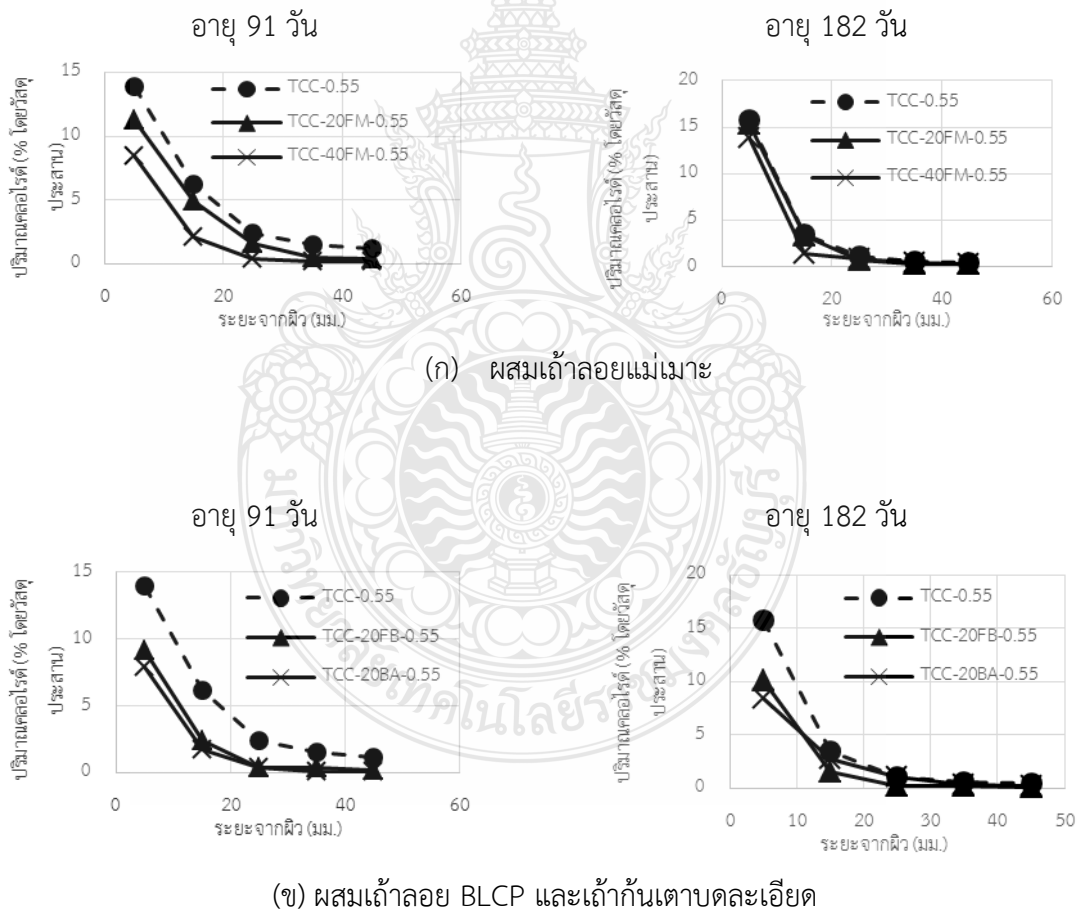
ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ระยะจาก ผิว (มม.)	คอลลอยด์ ตั้งต้น	คอลลอยด์ ทั้งหมด (รวมคอลลอยด์ ตั้งต้น)	คอลลอยด์ ทั้งหมด	คอลลอยด์ อิสระ	คอลลอยด์ ยึดจับ	อัตรา ส่วนคอลลอยด์ ยึดจับ	เฉลี่ย อัตราส่วน คอลลอยด์ ยึดจับ
6	SCC-0.65	5		11.78	9.85	6.74	5.04	0.43	
		15		5.35	3.42	3.83	1.52	0.28	
		25	1.93	4.15	2.23	2.73	1.42	0.34	0.39
		35		3.09	1.17	2.63	0.46	0.15	
		45		2.87	0.94	2.87	0	0	
7	SCC-20FM-0.65	5		11.01	8.38	9.02	1.99	0.18	
		15		5.70	3.07	4.26	1.44	0.25	
		25	2.63	4.08	1.45	1.63	2.45	0.60	0.43
		35		2.57	0.12	1.55	1.02	0.40	
		45		2.63	0.00	1.44	1.19	0.45	
8	SCC-20FB-0.65	5		6.07	3.95	4.92	1.15	0.19	
		15		2.40	0.28	0.73	1.67	0.70	
		25	2.12	2.12	0.00	0.30	1.82	0.86	0.70
		35		2.12	0.00	0.07	2.05	0.97	
		45		2.12	0.00	0.07	2.05	0.97	
9	SCC-20BA-0.65	5		7.85	3.86	4.65	3.20	0.41	
		15		3.99	0.00	1.98	2.01	0.50	
		25	3.99	3.99	0.00	1.08	2.91	0.73	0.45
		35		3.99	0.00	1.06	2.93	0.73	
		45		3.99	0.00	1.05	2.94	0.74	
10	SCC-5LP-0.65	5		9.73	5.38	7.75	1.98	0.20	
		15		6.18	1.83	4.83	1.35	0.22	
		25	4.36	4.40	0.04	2.95	1.45	0.33	0.30
		35		4.36	0.00	2.45	1.91	0.44	
		45		4.36	0.00	1.65	2.71	0.62	

#### 4.7.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

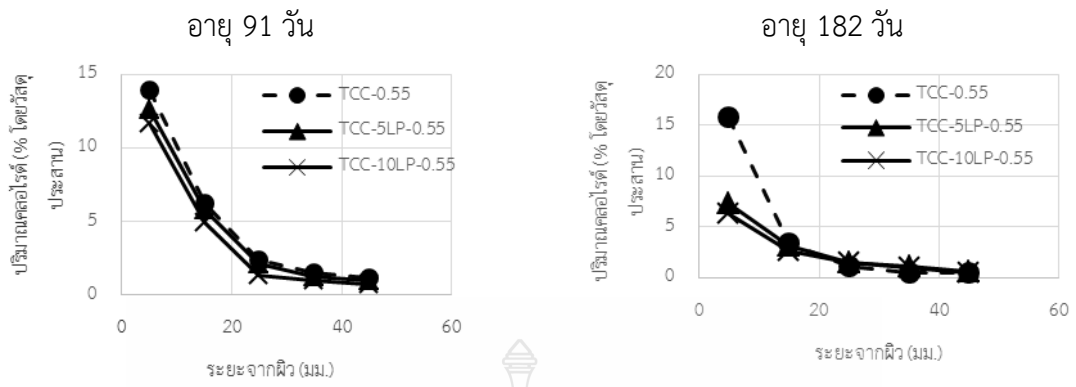
##### 4.7.1.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

###### 1) กรณีของน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต

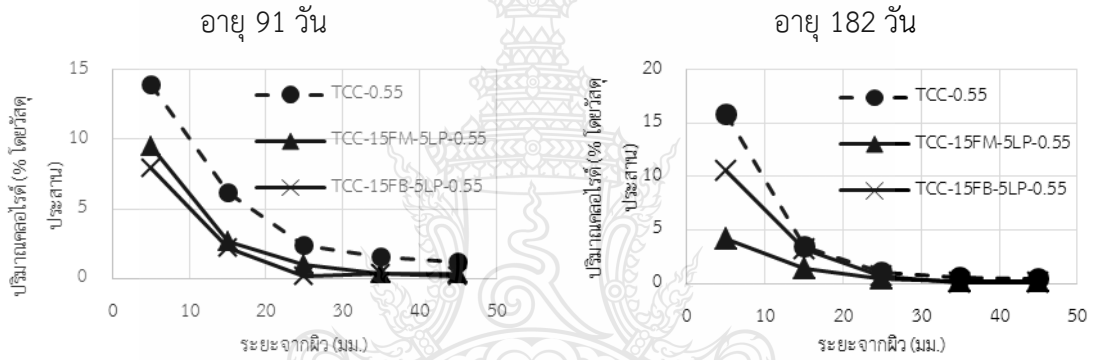
จากรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.11 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับความลึกจากผิวคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP,FB-LP พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตทั้งที่ใช้ w/b 0.55 และ 0.65 นั้น ให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสม FM, FB, BA, LP, FM-LP,FB-LP มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่มากขึ้น เพราะการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของ FM, FB, BA ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความที่บวมมากขึ้น



รูปที่ 4.10 เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีตโดยใช้ w/b = 0.55

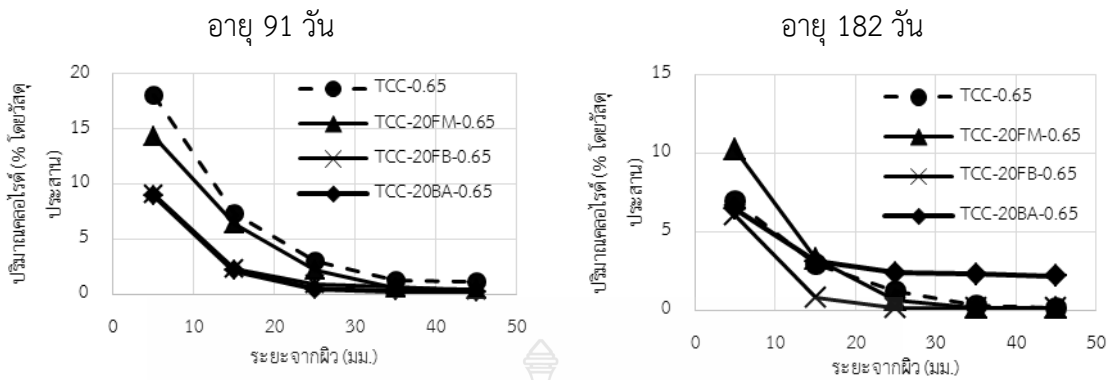


(ค) ผสมผงหินปูน

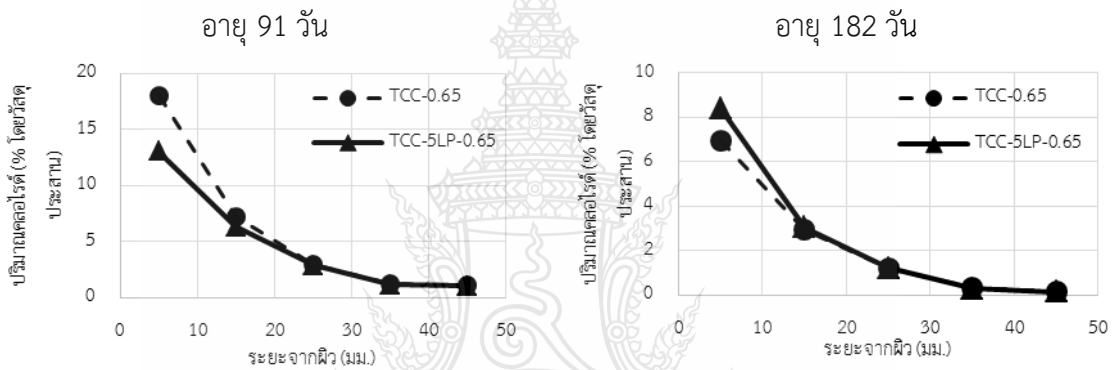


(ง) ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.10 เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีตโดยใช้  $w/b = 0.55$  (ต่อ)



(ก) ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด

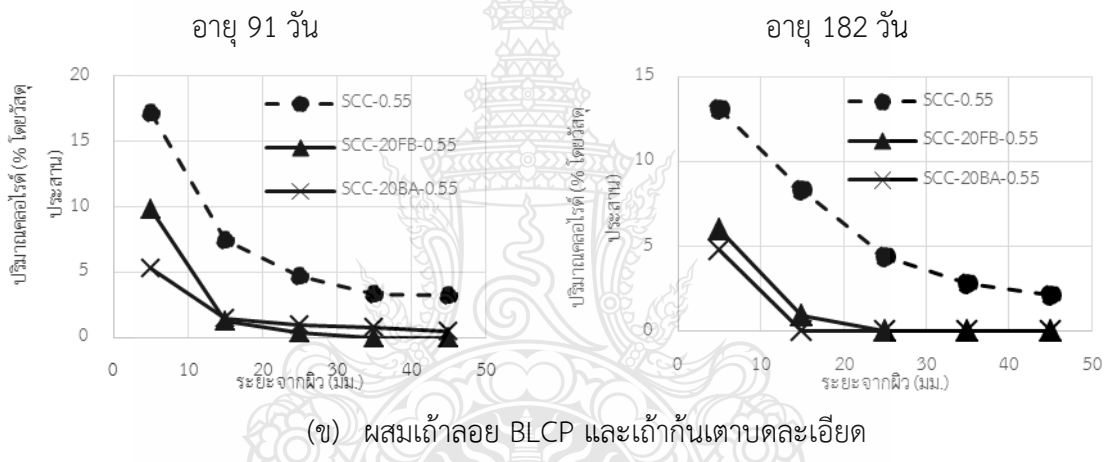
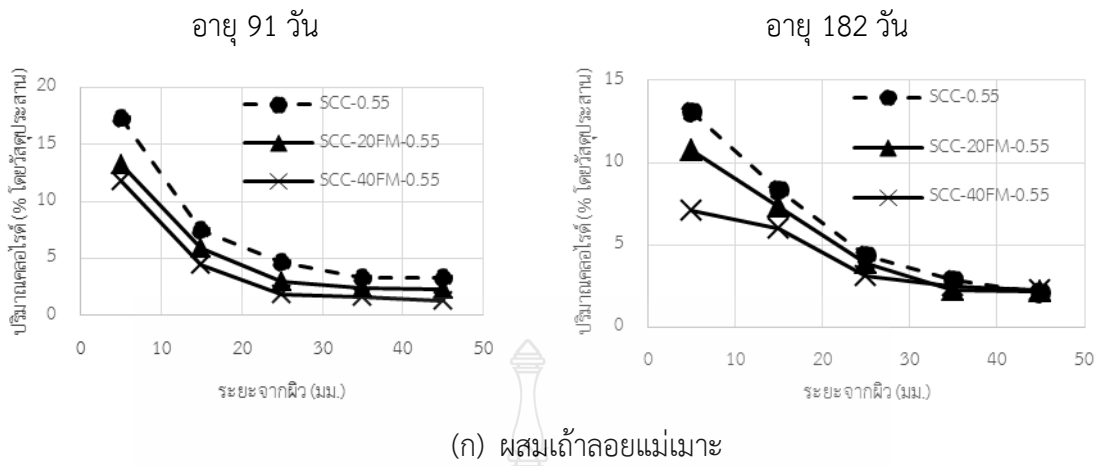


(ข) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.11 เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีตโดยใช้  $w/b = 0.65$

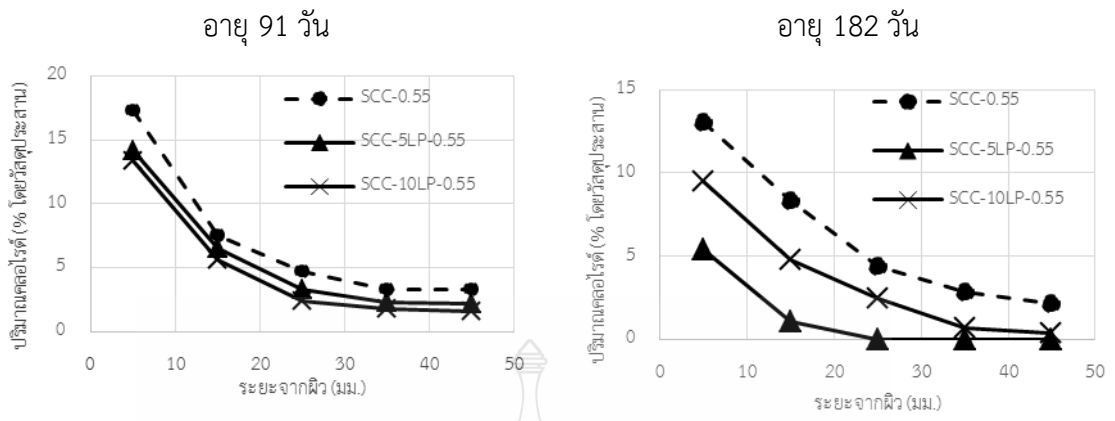
2) กรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต

กรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต จากรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.13 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP,FB-LP พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตทั้งที่ใช้  $w/b$  0.55 และ 0.65 นั้นให้ผลทิศทางเดียวกันและในกรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตนั้น ให้ผลทิศทางเดียวกับกรณีของน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต กล่าวคือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสม FM, FB, BA, LP, FM-LP,FB-LP น้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่มากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

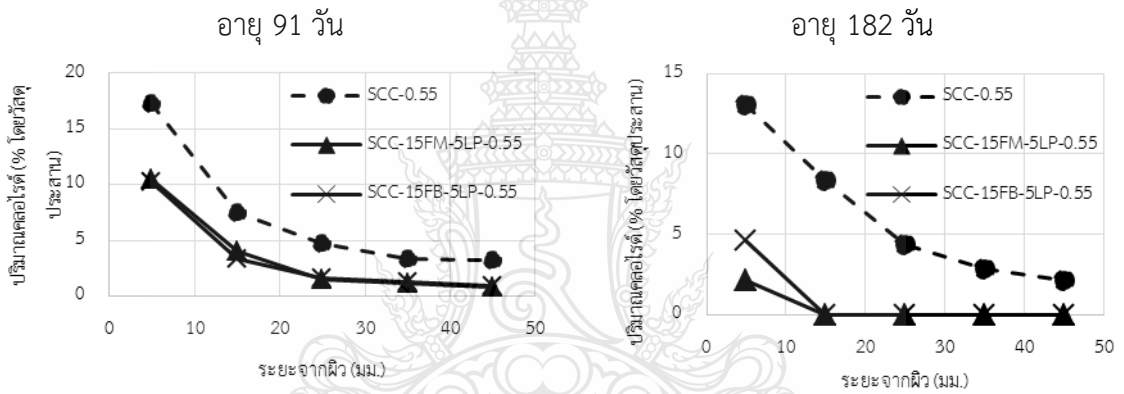


รูปที่ 4.12 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตโดยใช้  $w/b = 0.55$



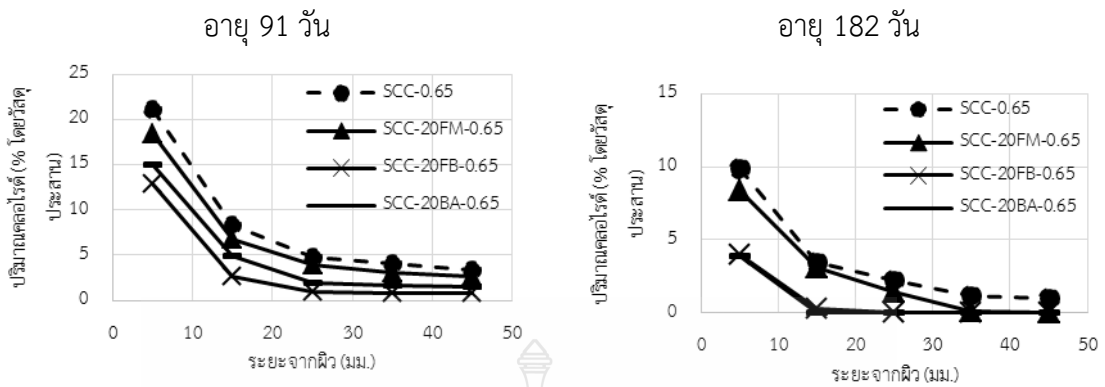


(ค) ผสมผงหินปูน

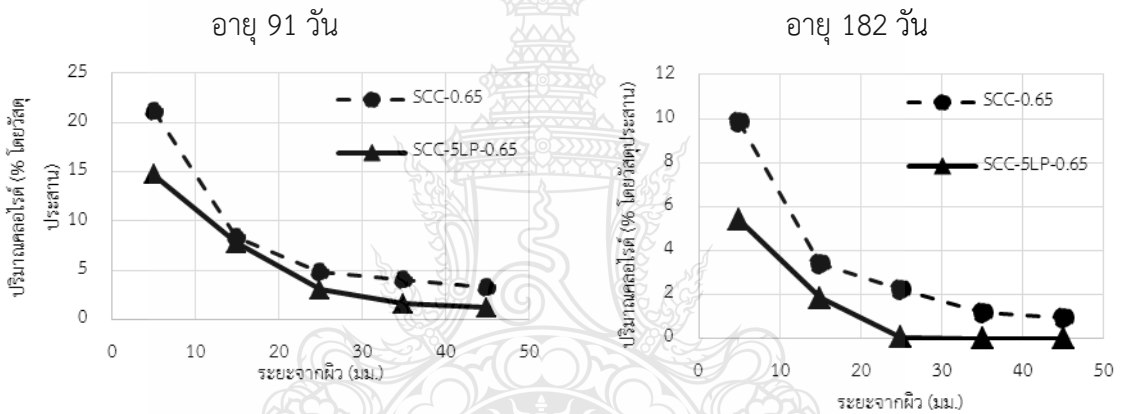


(ง) FM, FB -LP

รูปที่ 4.12 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตโดยใช้  $w/b = 0.55$  (ต่อ)



(ก) ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด



(ข) ผสมผงหินปูน

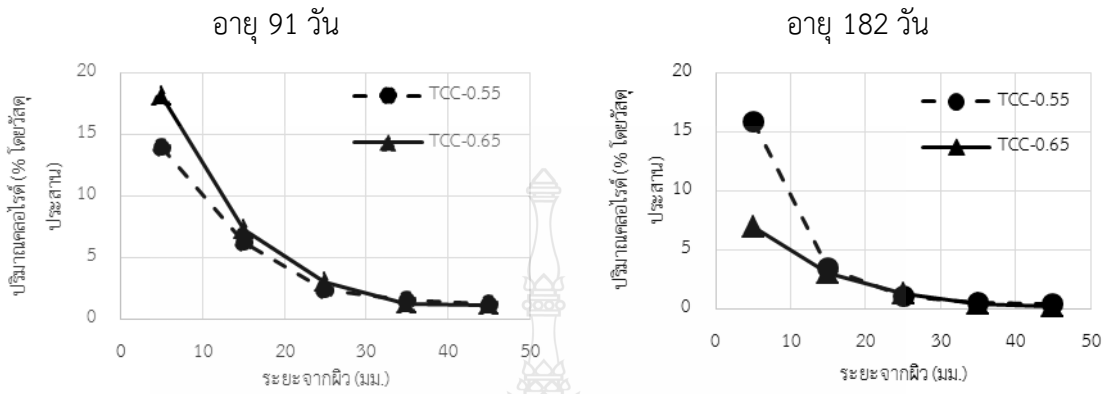
รูปที่ 4.13 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตโดยใช้  $w/b = 0.65$

4.7.1.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

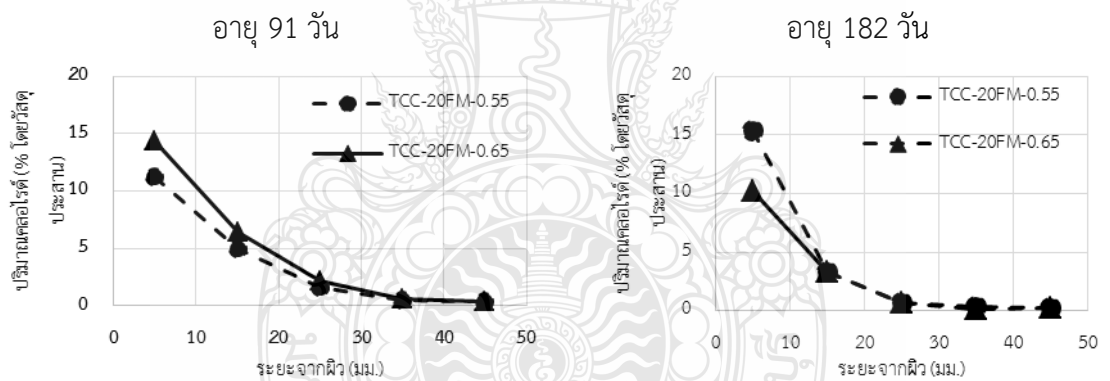
1) กรณีของน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กรณีของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม จากรูปที่ 4.14 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม ที่มี  $w/b$  ที่ต่ำกว่า ในช่วงอายุ 91 วัน น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก  $w/b$  ที่มากขึ้น จะพรุนมาก คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ค่อนข้างง่าย แต่เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น (ที่ 182 วัน) นั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีต ที่มี  $w/b$  ที่มากกว่า

กลับให้ค่าน้อยกว่าเล็กน้อยหรือมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทั้งอาจเป็นเพราะอายุของคอนกรีตที่มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นคอนกรีตจึงมีความหนาแน่นมากขึ้น สามารถช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์มากขึ้น

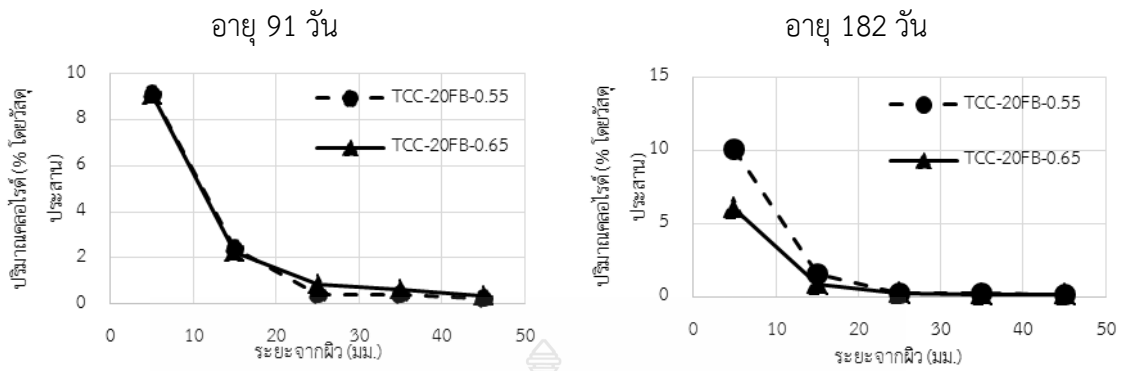


(ก) คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภที่ 1 ล้วน

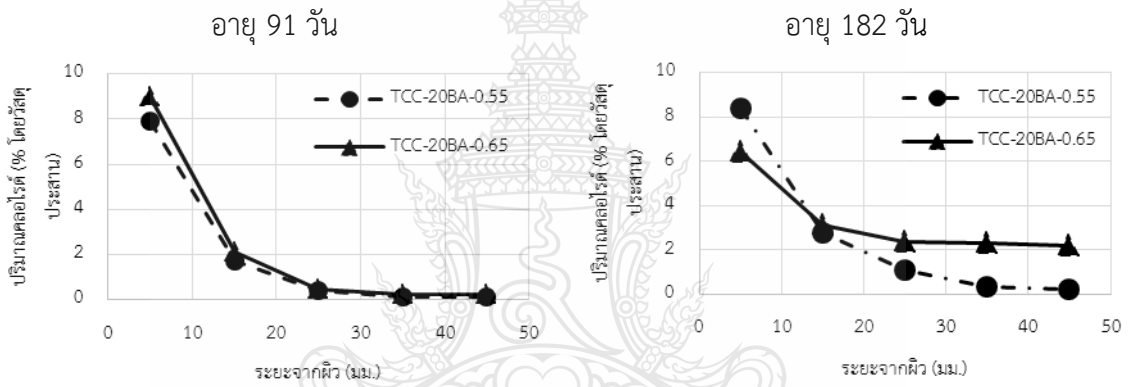


(ข) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.14 เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต โดยใช้  $w/b = 0.55, 0.65$

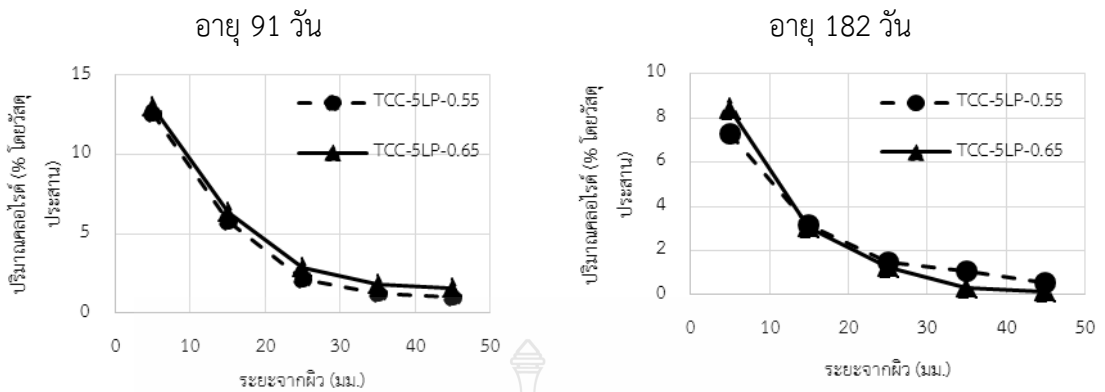


(ข) ผสมเถ้าลอย BLCP



(ง) ผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด

รูปที่ 4.14 เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต โดยใช้ w/b = 0.55, 0.65 (ต่อ)

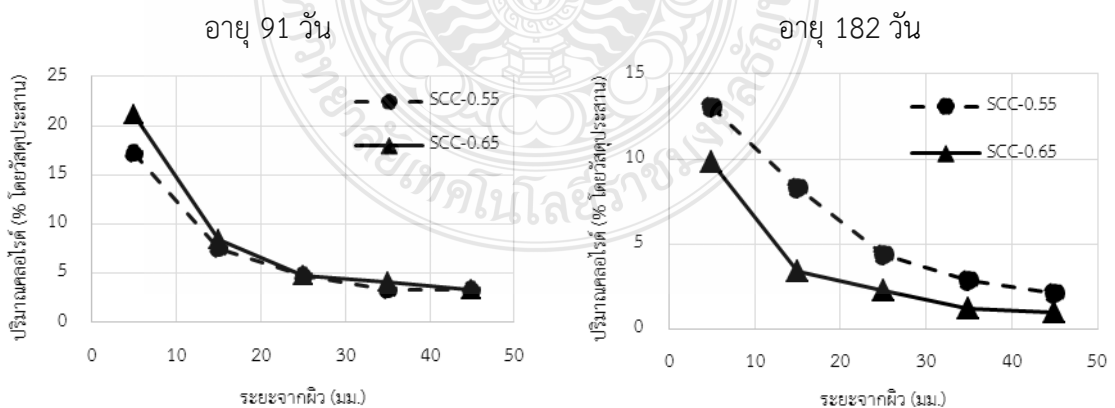


(จ) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.14 เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต โดยใช้ w/b 0.55, 0.65 (ต่อ)

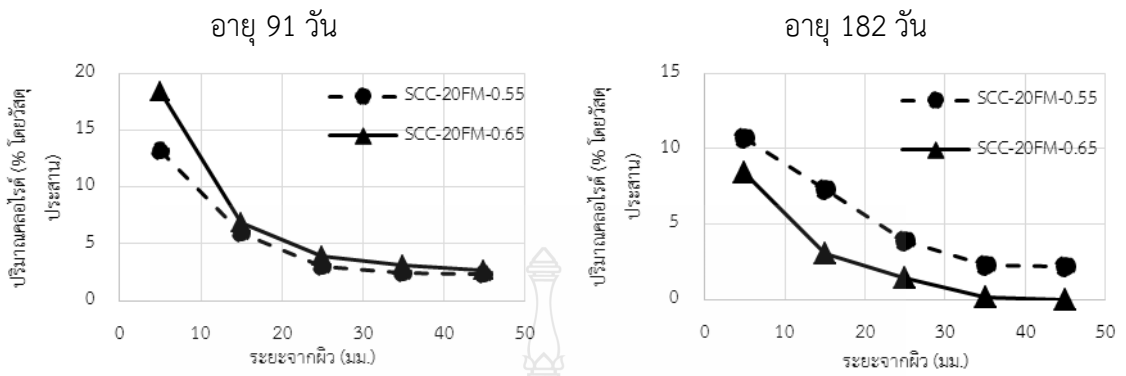
2) กรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กรณีของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่มี w/b ที่ต่ำกว่า ในช่วงอายุ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าให้ผลทิศทางเดียวกับกรณีของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มี w/b ที่เพิ่มขึ้น คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ค่อนข้างง่าย แต่เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด w/b ที่มากกว่า กลับให้ค่าน้อยกว่าเล็กน้อยหรือมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

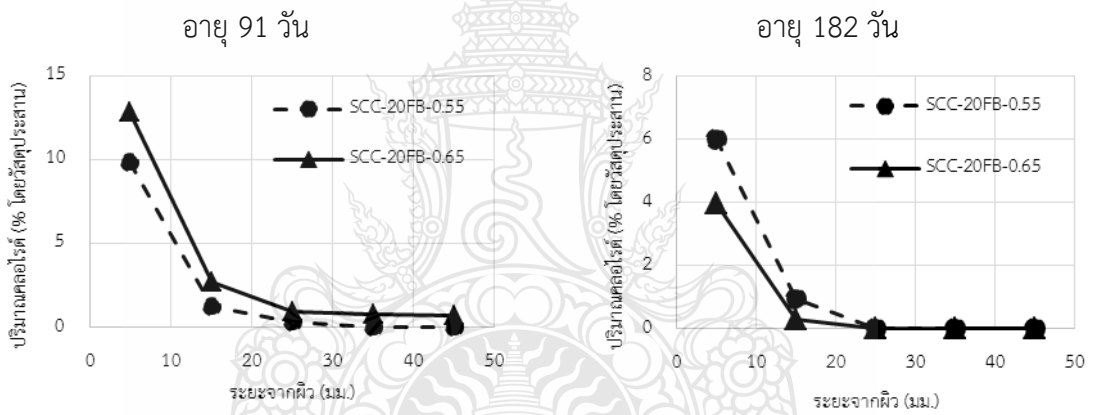


(ก) คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

รูปที่ 4.15 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต โดยใช้ w/b = 0.55, 0.65

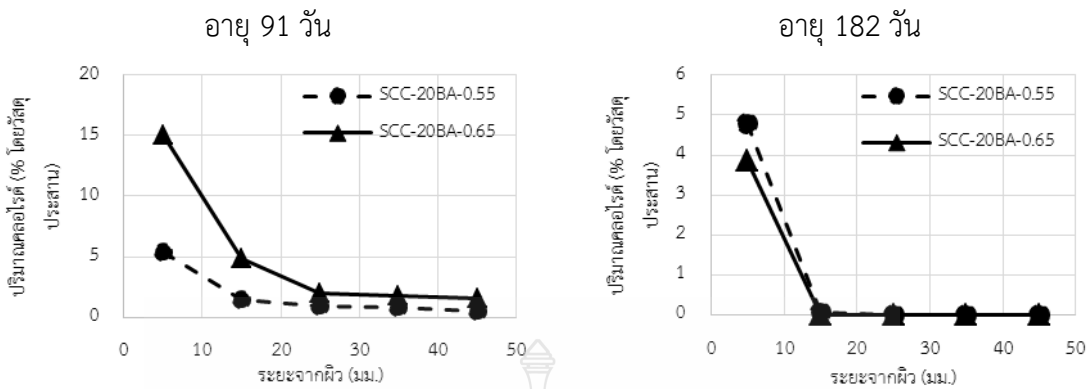


(จ) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

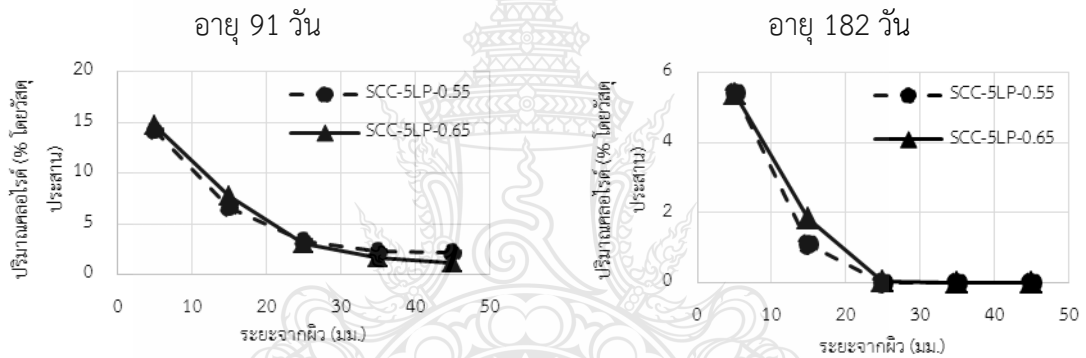


(ข) ผสมเถ้าลอย BLCP

รูปที่ 4.15 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต โดย  $w/b = 0.55, 0.65$  (ต่อ)



(ง) ผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด



(จ) ผสมผงหินปูน

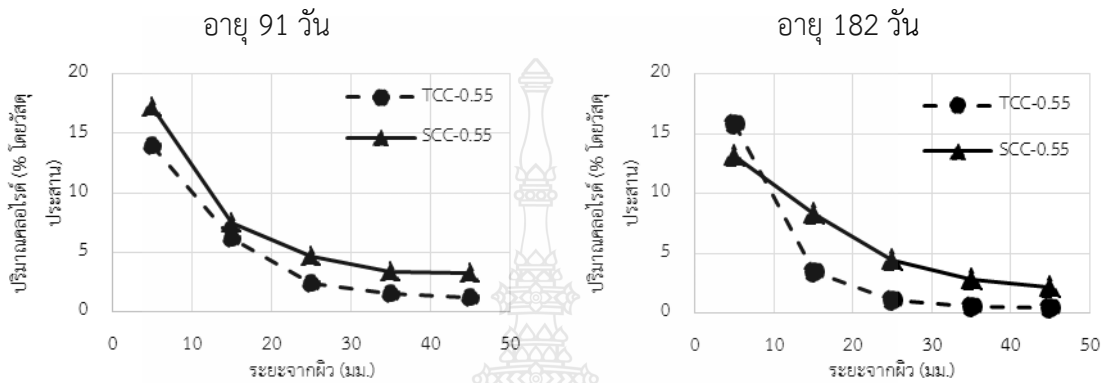
รูปที่ 4.15 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต โดย  $w/b = 0.55, 0.65$  (ต่อ)

#### 4.7.1.3 ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต

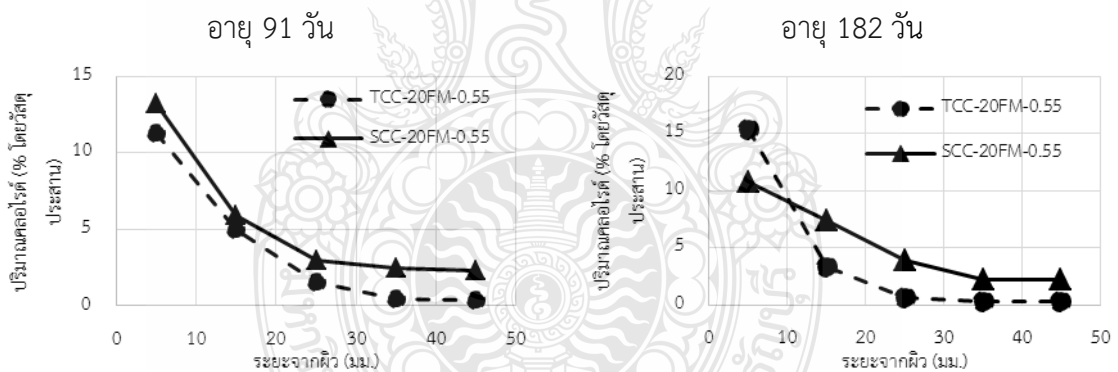
##### 1) กรณี $w/b = 0.55$

เมื่อพิจารณาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต กรณี  $w/b$  0.55 จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ในช่วงอายุ 91 วัน นั้นมีค่ามากกว่าของน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำทะเลมีสารประกอบหลากหลายชนิดทำปฏิกิริยากับเพสต์ผลผลิตมีปริมาตรเพิ่มขึ้นหรือมีการสูญเสียปริมาตร ทำให้มีความพรุนและปริมาณช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์สามารถเข้าไปได้ค่อนข้างง่าย แต่เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น (ที่ 182 วัน)

นั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม กลับให้ค่าน้อยกว่าเล็กน้อยหรือมีค่าไม่ต่างกันมากนัก คอนกรีตจึงมีความสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารประกอบบางชนิดในน้ำทะเลทำปฏิกิริยากับเพสต์ได้ผลผลิตในทางที่ดีขึ้น ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไป



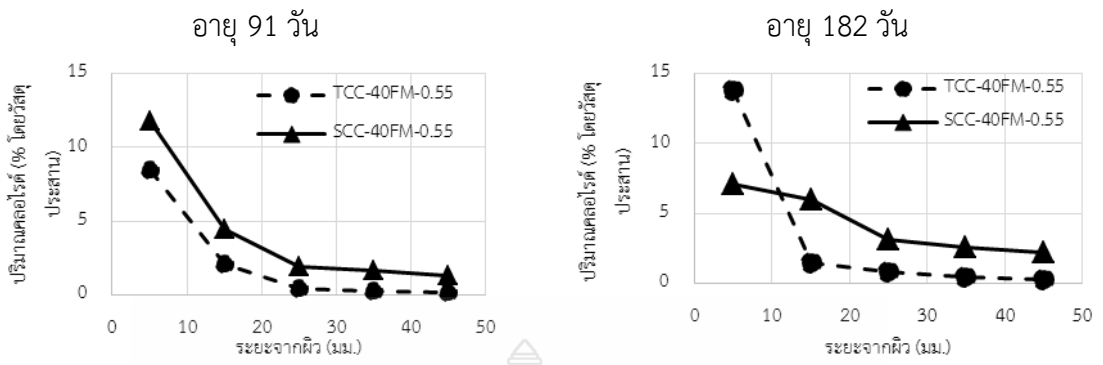
(ก) คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน



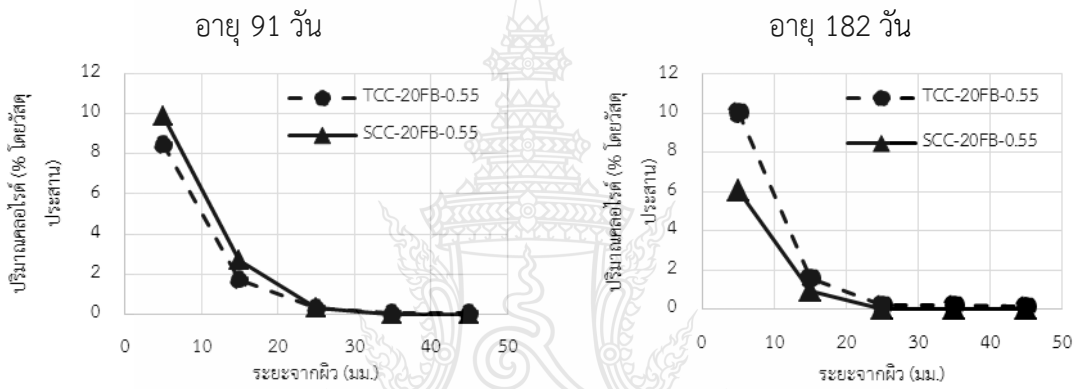
(ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ร้อยละ 20

รูปที่ 4.16 เมื่อใช้  $w/b = 0.55$  โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมคอนกรีต



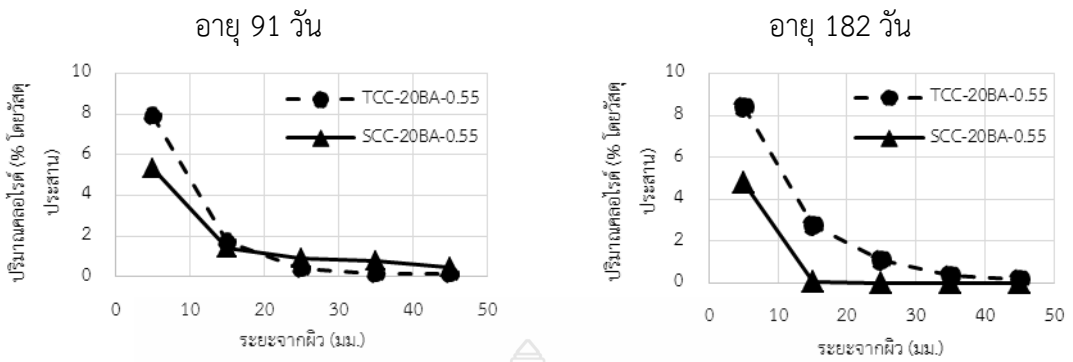


(ค) ผสมแก้าลอยแม่เมาะ ร้อยละ 40

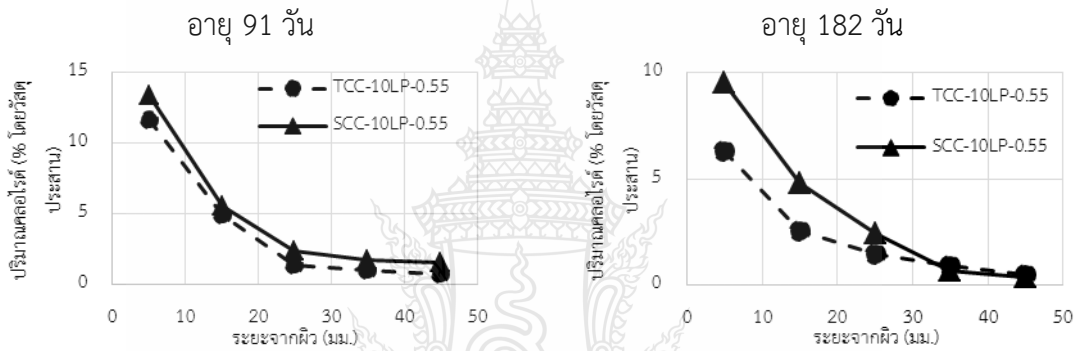


(ง) ผสมแก้าลอย BLCF

รูปที่ 4.16 เมื่อใช้  $w/b = 0.55$  โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต (ต่อ)

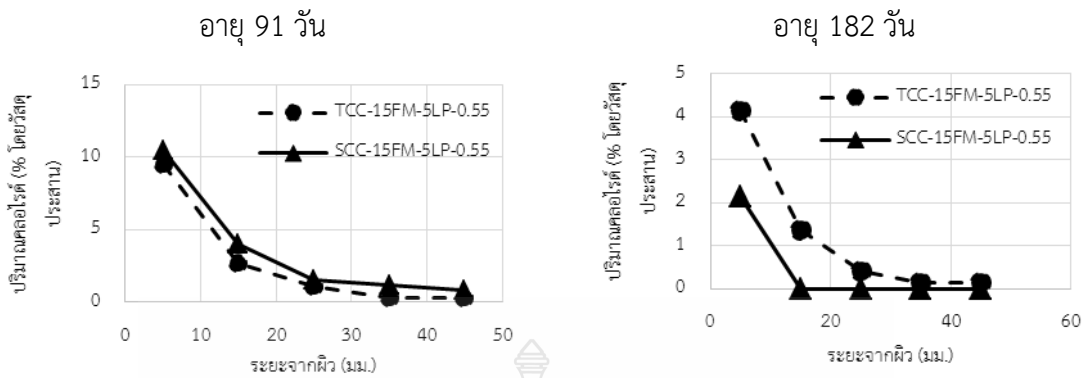


(จ) ผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด

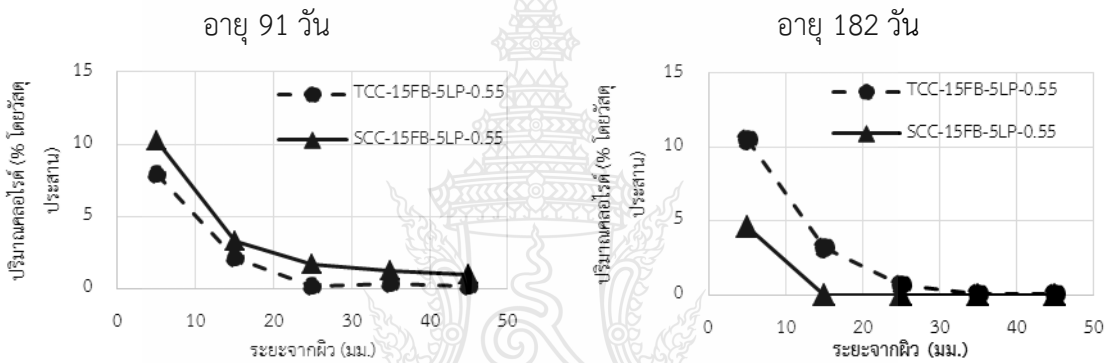


(ข) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.16 เมื่อใช้  $w/b = 0.55$  โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต (ต่อ)



(ข) FM -LP

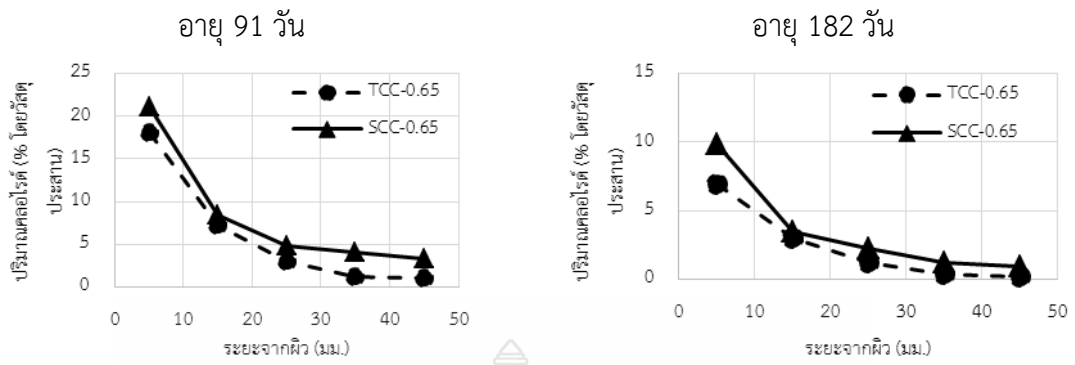


(ข) ผสมเถ้าลอย BLCP และผงหินปูน

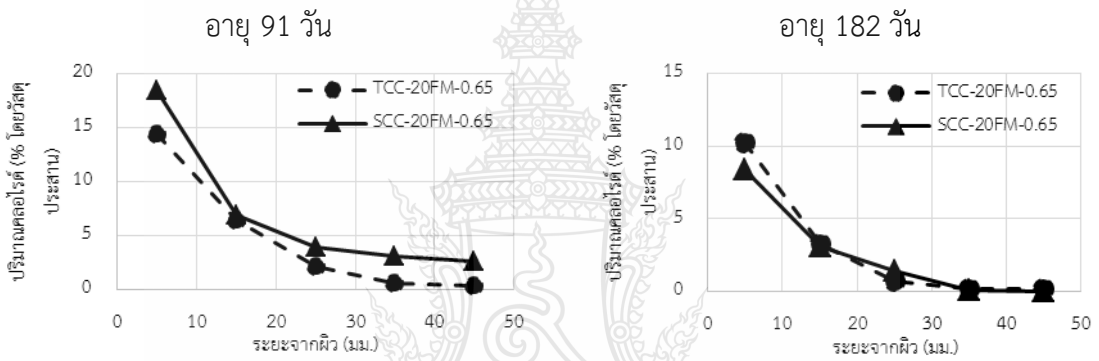
รูปที่ 4.16 เมื่อใช้  $w/b = 0.55$  โดยใช้ น้ำประปา และ น้ำทะเล ใช้ผสมคอนกรีต (ต่อ)

2) กรณี  $w/b = 0.65$

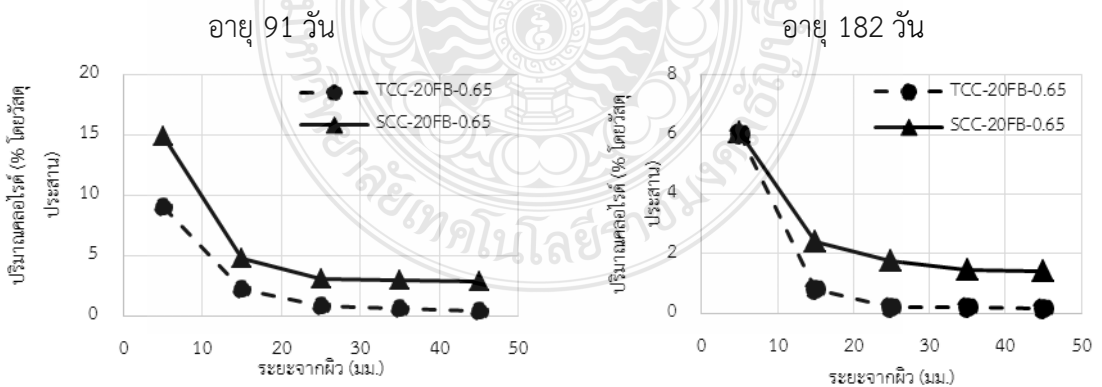
เมื่อพิจารณาผลกระทบของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม กรณี  $w/b = 0.65$  จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตกรณี  $w/b = 0.65$  ให้ผลทิศทางเดียวกับคอนกรีตกรณี  $w/b = 0.55$  กล่าวคือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ในช่วงอายุ 91 วัน นั้นมีค่ามากกว่าของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม เป็นตามเหตุผลเดิมแต่ ที่อายุ 182 วัน นั้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม กลับให้ค่าน้อยกว่าเล็กน้อยหรือมีค่าไม่ต่างกันมากนัก คอนกรีตจึงมีความสามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



(ก) คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

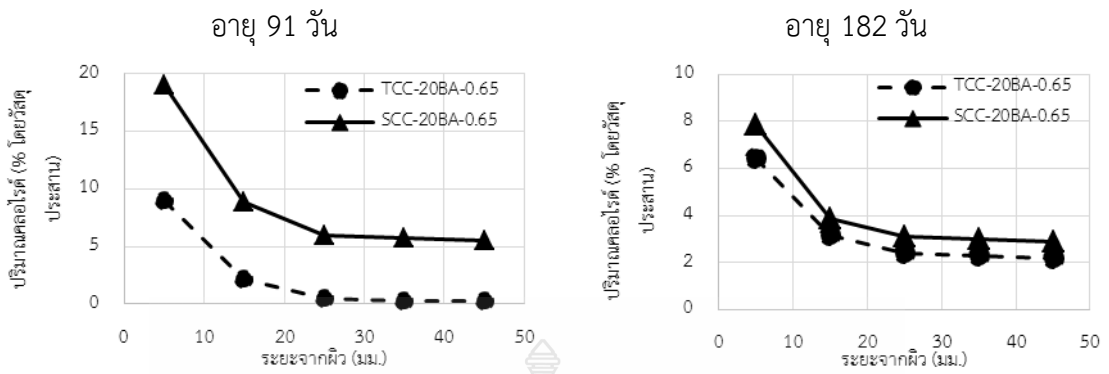


(ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ

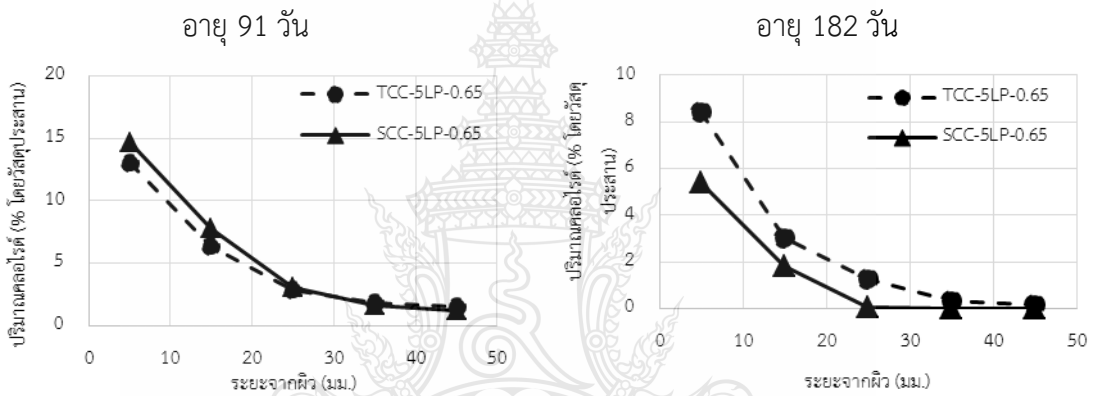


(ค) ผสมเถ้าลอย BLCP

รูปที่ 4.17 เมื่อใช้  $w/b = 0.65$  โดยใช้ น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต



(ง) ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด



(จ) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 4.17 เมื่อใช้  $w/b = 0.65$  โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต (ต่อ)

#### 4.7.2 อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ

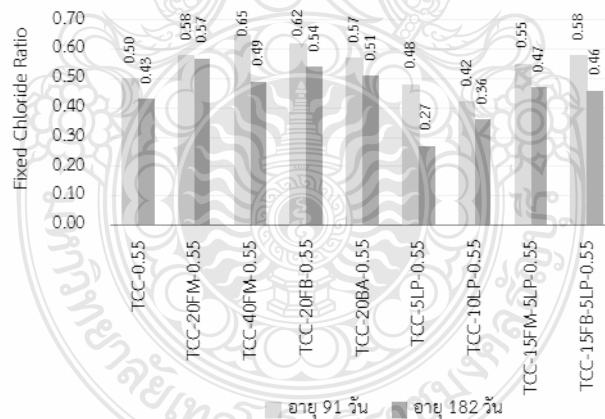
อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ยึดจับต่อคลอไรด์ทั้งหมด ซึ่งจะพิจารณาได้ดังนี้

##### 4.7.2.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

###### 1) กรณีของน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต

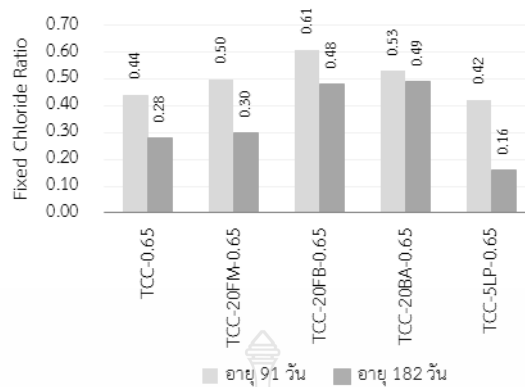
จากรูปที่ 4.18 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ  $w/b = 0.55, 0.65$  เมื่อใช้น้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสม FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP

มากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แทนที่มากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะผล  
 เนื่องจากปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยและ  
 เถ้าก้นเตาบดละเอียด และความละเอียดของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด จึงสามารถเกิดปฏิกิริยา  
 ปอซโซลานได้ดี โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  
 ปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไตรออกไซด์  
 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-  
 H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ทำให้ได้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ  
 แคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต  
 ซึ่งเป็นการกักเก็บคลอไรด์ทางกายภาพ (Physical Binding) เพิ่มมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณา  
 อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมผงหินปูน พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสม  
 LP น้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณ  
 ปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ด้วย LP ทำให้  $\text{C}_3\text{A}$  ลดลง การยึดจับคลอไรด์ได้น้อยลง (การยึดจับทาง  
 เคมี) โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น



(ก)  $w/b = 0.55$

รูปที่ 4.18 เมื่อใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต

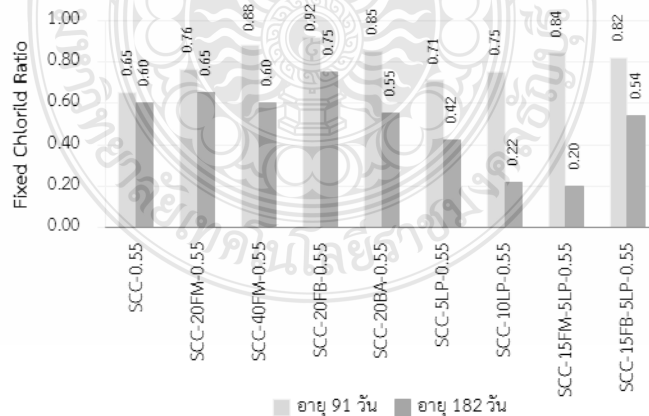


(ข) w/b = 0.65

รูปที่ 4.18 เมื่อใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต (ต่อ)

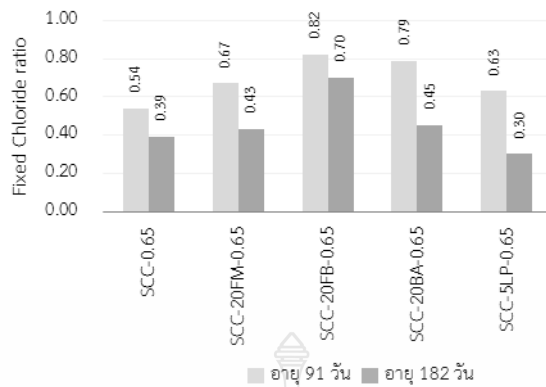
2) กรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต

จากรูปที่ 4.19 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ w/b = 0.55, 0.65 เมื่อใช้น้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับที่ใช้น้ำทะเลผสมให้ผลทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่ใช้น้ำประปาผสม กล่าวคือ อัตราส่วนส่วนคลอไรด์ยึดจับผสม FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่มากขึ้น และพบว่าอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ ผสม LP น้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



(ก) w/b = 0.55

รูปที่ 4.19 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต



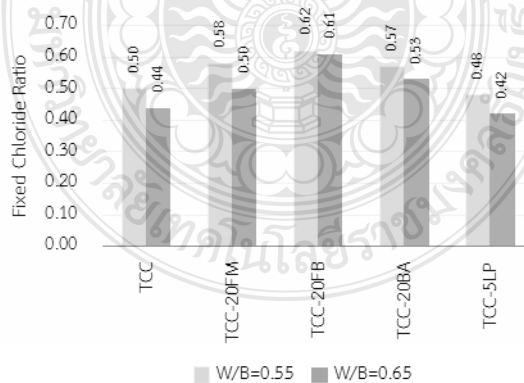
(ข)  $w/b = 0.65$

รูปที่ 4.19 เมื่อใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต (ต่อ)

#### 4.7.2.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

##### 1) กรณีของน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต

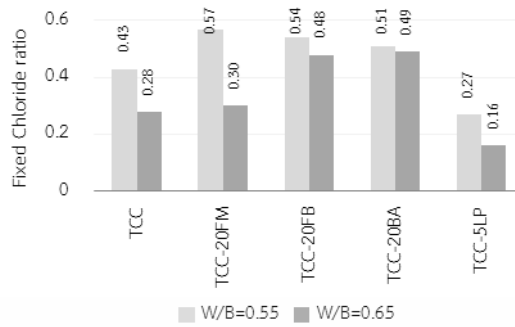
จากรูปที่ 4.20 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ  $w/b = 0.55, 0.65$  โดยน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ  $w/b$  น้อยกว่า (0.55) สูงกว่าของคอนกรีตที่มี  $w/b$  มากกว่า (0.65) ทั้งนี้เป็นเพราะผลจากการที่คอนกรีตใน  $w/b$  ที่สูงนั้น จะความพรุนที่มากและขนาดความพรุนจะใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพในการยึดจับคลอไรด์ด้อยกว่าใน  $w/b$  ที่ต่ำ



(ก) ที่อายุ 91 วัน

รูปที่ 4.20 เมื่อใช้  $w/b$  0.55 และ 0.65 โดยใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต



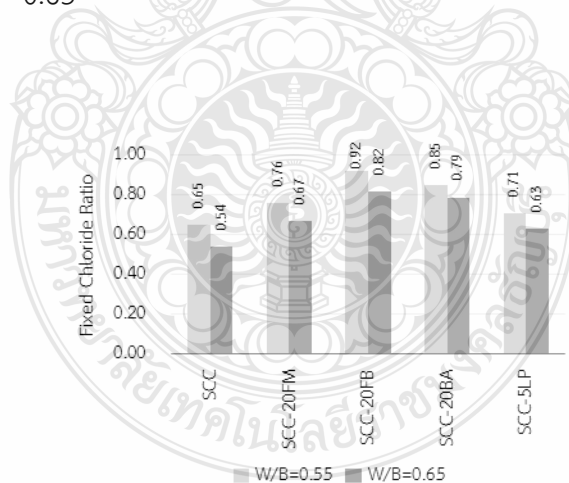


(ข) อายุ 182 วัน

รูปที่ 4.20 เมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 โดยใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต (ต่อ)

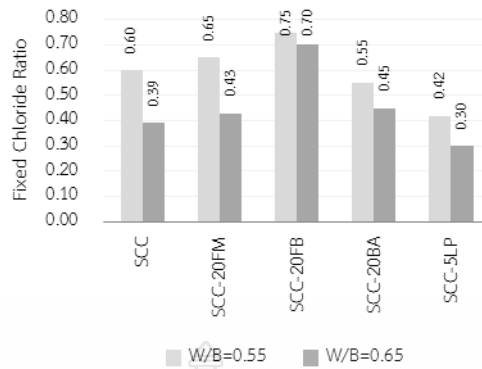
2) กรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต

จากรูปที่ 4.21 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ w/b = 0.55, 0.65 โดยน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีต กรณีของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตให้ทิศทางเดียวกับคอนกรีตกรณีของน้ำประปาใช้ผสมคอนกรีต กล่าวคืออัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ w/b = 0.55 นั้นมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่มี w/b = 0.65



(ก) อายุ 91 วัน

รูปที่ 4.21 เมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 โดยใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต



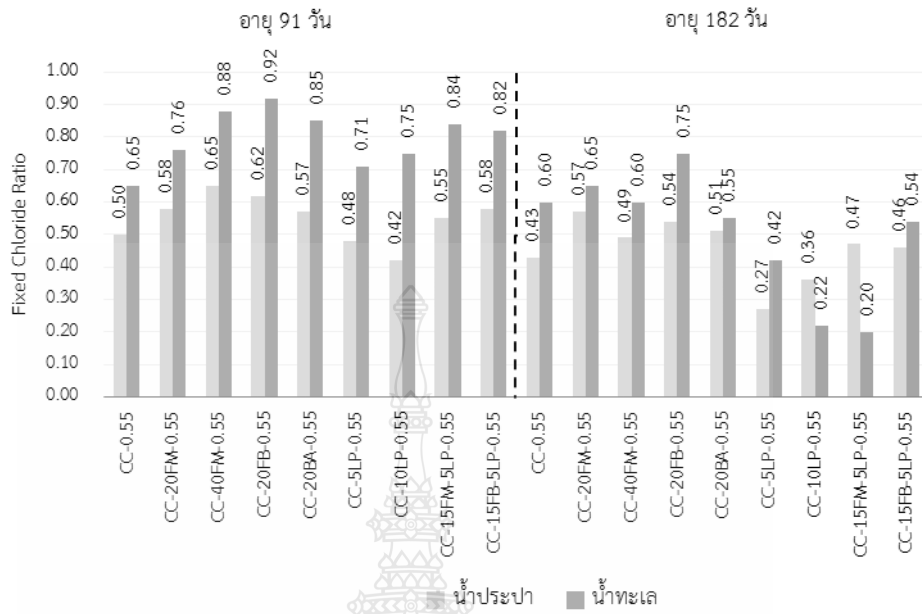
(ข) อายุ 182 วัน

รูปที่ 4.21 เมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 โดยใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีต (ต่อ)

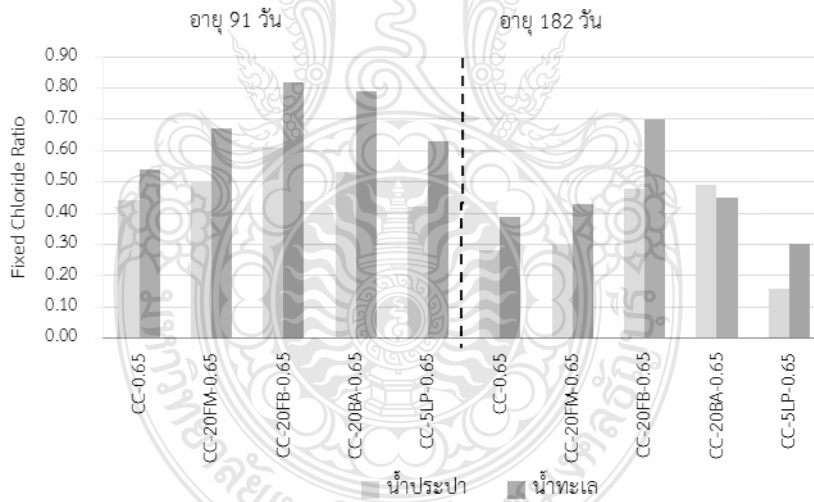
#### 4.7.2.3 ผลกระทบจากน้ำทะเลที่ใช้ผสม

##### 1) กรณี w/b = 0.55

เมื่อพิจารณาของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีต กรณี w/b = 0.55 จากรูปที่ 4.22 (ก) แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ในช่วงอายุ 91 วันและอายุ 182 วัน นั้นมีค่ามากกว่าของน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารประกอบบางชนิดในน้ำทะเลทำปฏิกิริยากับเพสต์ได้ผลผลิตในทางที่ดีขึ้น ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไป



(ก) w/b = 0.55



(ข) w/b = 0.65

รูปที่ 4.22 เมื่อใช้ w/b 0.55 และ 0.65 โดยใช้น้ำประปาและน้ำทะเลผสมคอนกรีต

2) กรณี  $w/b = 0.65$

เมื่อพิจารณาผลกระทบของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม กรณี  $w/b = 0.65$  จากรูปที่ 4.22 (ข) แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย FM, FB, BA, LP, FM-LP, FB-LP พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตกรณี  $w/b = 0.65$  ให้ผลทิศทางเดียวกับคอนกรีตกรณี  $w/b = 0.55$  กล่าวคือปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของ

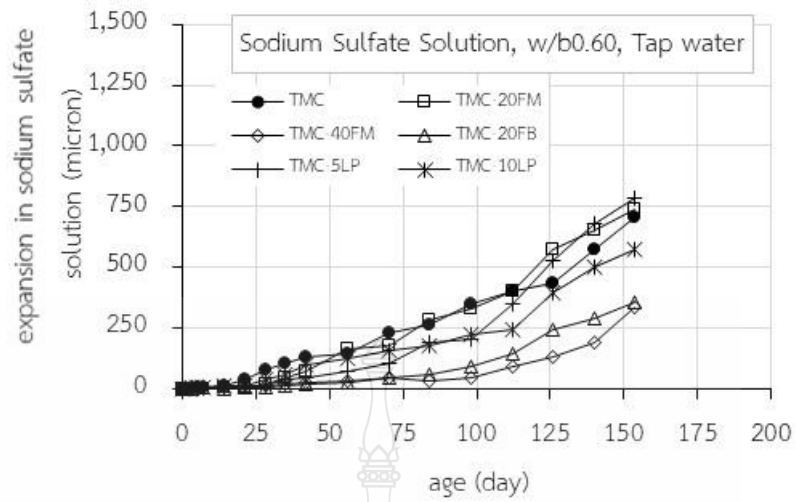
#### 4.8 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

การศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสม FM (ร้อยละ 20 และ 40) ผสม FB (ร้อยละ 20) ผสม LP (ร้อยละ 5 และ 10) และผสม FM, FB (ร้อยละ 15) ร่วมกับ LP (ร้อยละ 5)

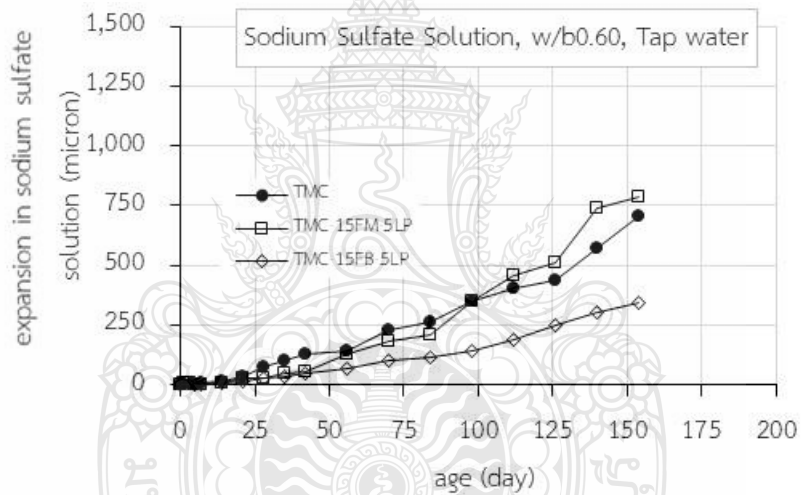
##### 4.8.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

###### 4.8.1.1 เมื่อน้ำประปาใช้ผสมและบ่มมอร์ตาร์

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์น้ำประปาใช้ผสมและบ่ม โดยใช้  $w/b$  0.60 พบว่ามอร์ตาร์ผสม FM ร้อยละ 20 มีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะ FM, มีปริมาณ CaO ที่มากเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย จะทำให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ทำให้เกิดปริมาณแอมorphous trihydrate มาก จะขยายตัวเกิดมาก แต่เมื่อแทนที่ FM มาขึ้น (ร้อยละ 40) กลับทำให้การขยายตัวมีค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ FM ที่มี CaO มาก เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มาก และปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมาก จึงลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้มาก เกิดปริมาณแอมorphous trihydrate น้อย จึงขยายตัวได้น้อย ส่วนเมื่อผสม FB มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ FB เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ทำให้เป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลง เกิดปริมาณแอมorphous trihydrate น้อย การขยายตัวลดน้อยลง ส่วนเมื่อผสม LP พบว่าไม่แตกต่างหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพราะการแทนที่ด้วย LP แม้ว่าจะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง แต่ผลจากการเติมเต็มของ LP ทำให้ซีเมนต์เพสต์ของมอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากขึ้น ส่งผลให้มีช่องว่างสำหรับแอมorphous trihydrate น้อยลง ทำให้การขยายตัวเกิดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายการผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จะให้ผลไปในทิศทางที่เถ้าลอยและผงหินปูน



(ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมผงหินปูน

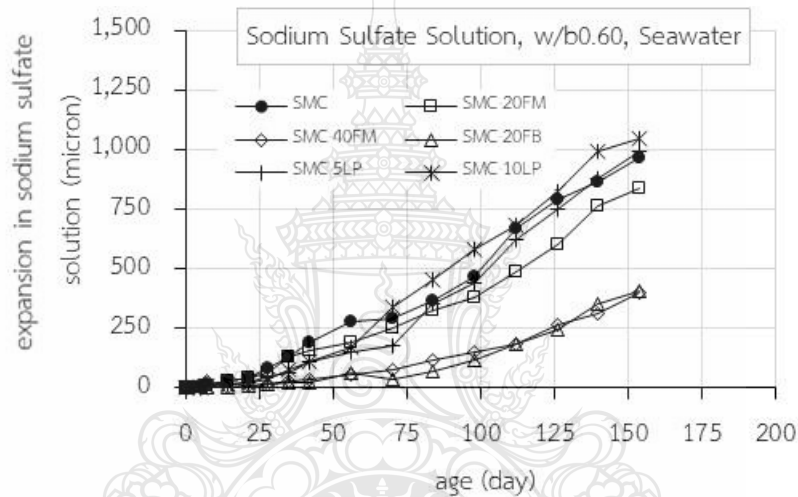


(ค) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสม FM-LP, FB-LP

รูปที่ 4.23 เมื่อใช้น้ำประปาผสมและบ่ม และ  $w/b = 0.60$

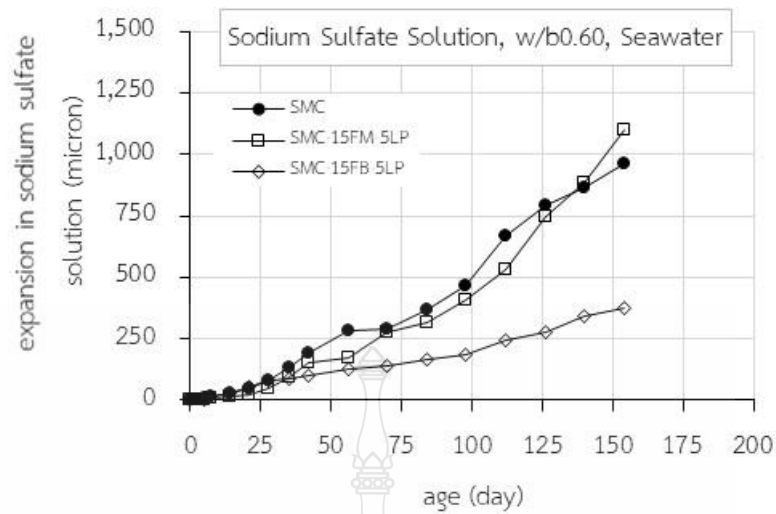
#### 4.8.1.2 เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มมอร์ตาร์

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์น้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม โดยใช้  $w/b$  0.60 พบว่า เมื่อน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม กล่าวคือ ผสม FM ร้อยละ 20 มีค่าไม่แตกต่างหรือมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อผสม FB มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อผสม LP มีค่าไม่ต่างกันมากนักหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อผสม FM-LP, FB-LP จะให้ผลไปในทิศทางที่ FM, FB, LP เหตุผลเคยกล่าวมาแล้ว



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมผงหินปูน

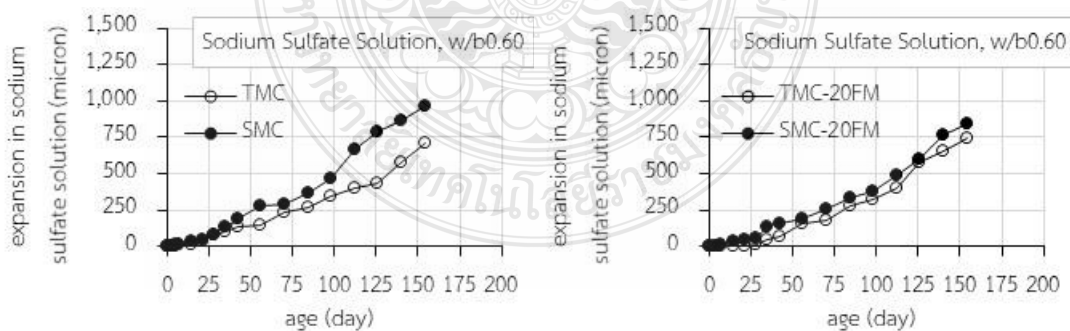
รูปที่ 4.24 เมื่อน้ำทะเลผสมและบ่ม และ  $w/b = 0.60$



ข) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสม FM-LP, FB-LP  
**รูปที่ 4.24** เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และ  $w/b = 0.60$  (ต่อ)

#### 4.8.2 ผลกระทบจากน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มมอร์ตาร์

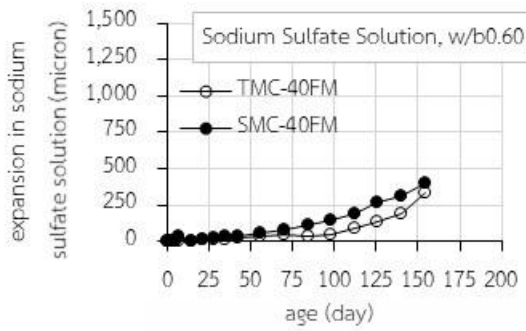
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์น้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม โดยมอร์ตาร์ใช้  $w/b$  0.60 พบว่า ทุกสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์นั้น เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์น้ำประปาใช้ผสมและบ่ม ทั้งนี้เพราะในน้ำทะเลมีแร่ธาตุหรืออินทรีย์สารที่หลายชนิดปะปน โดยเฉพาะสารละลายซัลเฟต ซึ่งทำให้เกิดปริมาณแอททริงเจนต์มากขึ้น การขยายตัวเกิดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ใช้น้ำประปาผสมและบ่ม



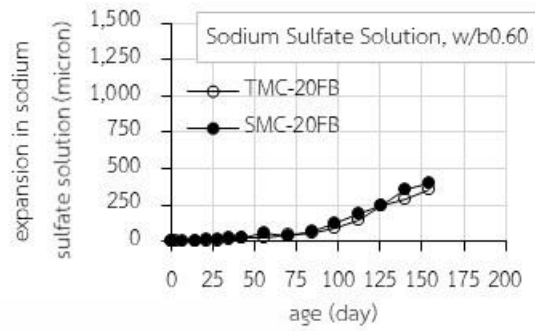
(ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

(ข) ผสม FM ร้อยละ 20

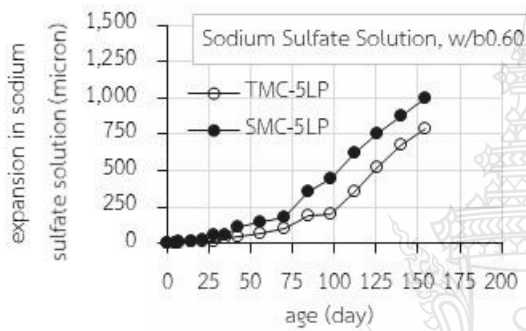
**รูปที่ 4.25** เมื่อน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และ  $w/b = 0.60$



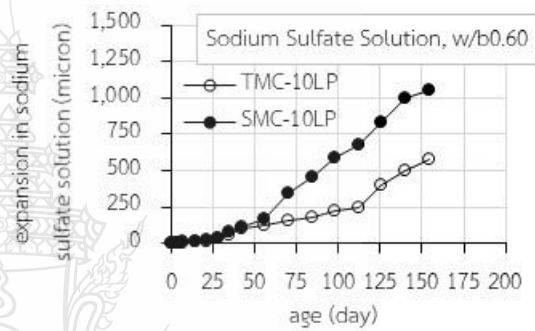
(ค) ผสม FM ร้อยละ 40



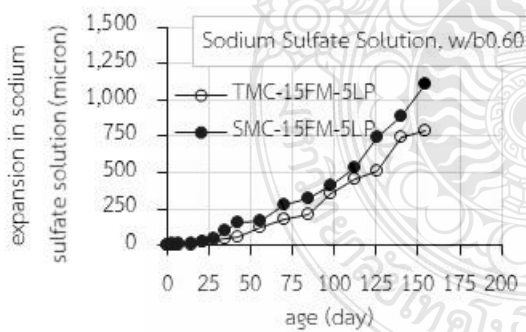
(ง) ผสม FB ร้อยละ 20



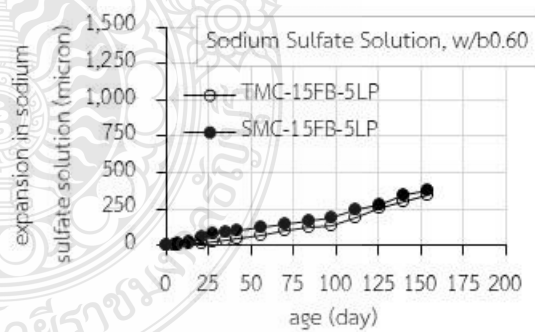
(จ) ผสม LP ร้อยละ 5



(ฉ) ผสม LP ร้อยละ 10



(ช) ผสม 15FM-5LP



(ছ) ผสม 15FB-5LP

รูปที่ 4.25 เมื่อน้ำประปาและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และ w/b = 0.60 (ต่อ)



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อความคงทนของคอนกรีต โดยใช้ น้ำประปาและน้ำทะเลเป็นส่วนผสมในคอนกรีต พร้อมทั้งใช้ถ้ำลอย ถ้ำกั้นเตาบดละเอียด และผง หินปูน แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชัน ความ ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัว ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมถ้ำลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า ในขณะที่ค่าการไหลผ่านของ มอร์ตาร์ผสมถ้ำลอย BLCF และผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์และค่ายุบตัวของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมนั้นมี ค่าน้อยกว่าของน้ำประปาใช้ผสม

2) ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมถ้ำลอยและผสมถ้ำกั้นเตาบดละเอียดมี ค่าค่อนข้างมาก ในขณะที่ของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อ เปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานที่มากกว่า และความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มให้ค่าน้อยกว่า ของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม

3) ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมถ้ำลอยและผสม ถ้ำกั้นเตาบดละเอียดดีกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสมผงหินปูนด้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยกว่า ให้ค่าดีกว่าของเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน ที่มากกว่า และความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ด้อยกว่าของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม

4) อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมถ้ำลอย ผสมถ้ำกั้นเตาบดละเอียด และผสม ถ้ำลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่ามากกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อ เปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่ามีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

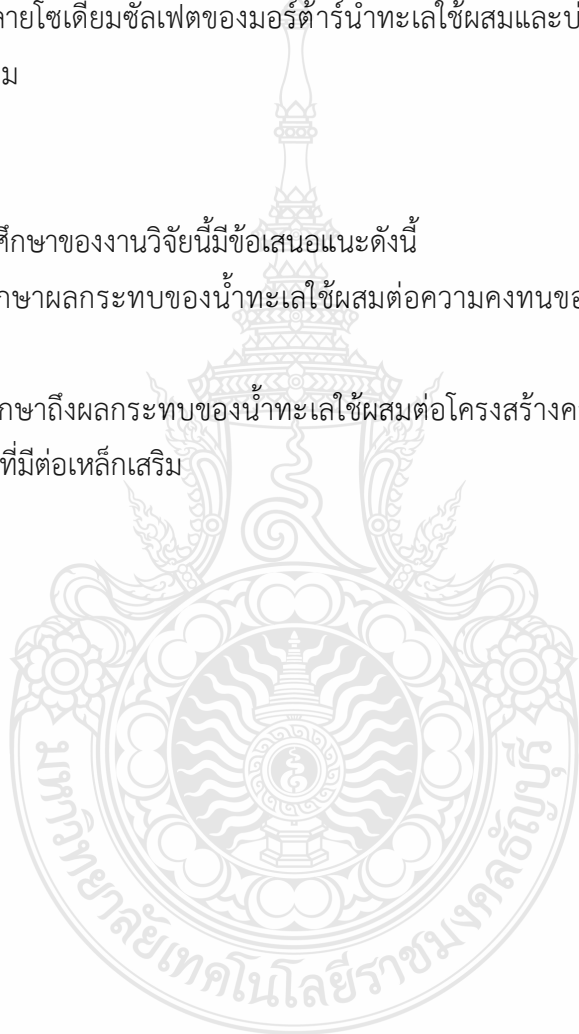
มากกว่า และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มมีค่ามากกว่าของคอนกรีตน้ำประปาใช้ผสมและบ่ม

5) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่ปริมาณน้อย (ร้อยละ 20) มีแนวโน้มมากกว่า ในขณะที่เมื่อแทนในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) กลับให้ค่าค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีแนวโน้มที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์น้ำทะเลใช้ผสมและบ่มมีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์น้ำประปาใช้ผสมและบ่ม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษางานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะดังนี้

- 1) ควรศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อความคงทนของคอนกรีต ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น
- 2) ควรศึกษาถึงผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อได้ดูผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อเหล็กเสริม

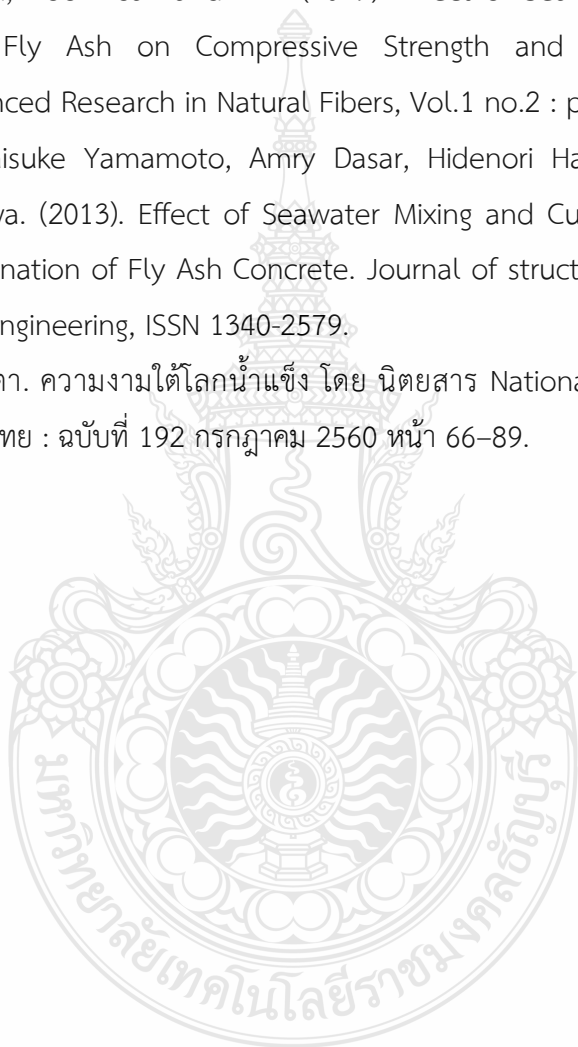


## บรรณานุกรม

- [1] Kulshreshtha, S.N. (1998). "A Global Outlook for Water Resources to the Year 2025". *Water Resources Management*. 12 (3): 167–184.
- [2] Baroni, L. (2007). Evaluating the environmental impact of various dietary patterns combined with different food production systems. *European Journal of Clinical Nutrition*. 61(2): 279–286.
- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [4] ปิติศานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ฟูนหินปูน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3. 24-26 ตุลาคม 2550.
- [5] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. (2543). ความคงทนคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [6] Hoff, Q. Durability of offshore and marine concrete structures. 2<sup>nd</sup> International conference (ACISP-127), Montreal, Canada Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, pp 33-64.
- [7] MoCoy, W.J. Mixing and curing water for concrete. Significance of tests and properties of concrete-making materials, STP 169-A. pp. 515-521. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- [8] Swamy, R.N. (1991). *The alkali-silica reaction in concrete*, London: Spon Press.
- [9] Aburawi, M. and Swamy, R.N. (2008). Influence of salt weathering on the properties of concrete. *The Arabia journal for science and engineering*, no. 33: 105-115.
- [10] Shayan, A. (2010). Effects of seawater on AAR expansion of concrete. *Cement and concrete Research*, no. 40(4): 563-568.
- [11] Naghoj, N.M. and Abdel-Rahma, N. Enhancing the performance of concrete subjected to Salty water. *Admixtures-enhancing concrete performance*, the international conference, Dundee, Scotland, U.K. London: PP: 35-40.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] นุชจิรา ทำมาตา, ทวีชัย สำราญวานิส, สนธยา ทองอรุณศรี และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2556). ผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18 เชียงใหม่.
- [13] Nurazuwa Md, Noor Asali and M.F. (2019). Effect of Seawater-Mixed Concrete with Fly Ash on Compressive Strength and Carbonation Depth. Advanced Research in Natural Fibers, Vol.1 no.2 : p.1-5.
- [14] Adiwijaya, Daisuke Yamamoto, Amry Dasar, Hidenori Hamada and Yasutaka Sagawa. (2013). Effect of Seawater Mixing and Curing on Strength and Carbonation of Fly Ash Concrete. Journal of structures and materials in civil engineering, ISSN 1340-2579.
- [15] โลรอง บาเลสตา. ความงามใต้โลกน้ำแข็ง โดย นิตยสาร National Geographic ฉบับภาษาไทย : ฉบับที่ 192 กรกฎาคม 2560 หน้า 66-89.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย นิวัต นิมพลี
วัน เดือน ปีเกิด	12 กันยายน 2522
ที่อยู่	58/55 ถ.คูบอน แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ปัจจุบันทำงาน บริษัท เดอะ เบสท์ เฮ้าส์ จำกัด วิศวกรโยธา
เบอร์โทรศัพท์	084- 0969428
อีเมล	homeniwat.ch@hotmail.com

