

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย  
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

Chloride Binding Capacity of Concrete Using Fly Ash,  
Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Silica Fume, Limestone Powder  
and Bottom Ash

นรา รักษาพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ถ้ำลอย  
ตะแกรงเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา



นรา รักษาพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรัน  
เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา  
Chloride Binding Capacity of Concrete Using Fly Ash, Ground  
Granulated Blast –Furnace Slag, Silica Fume, Limestone Power and  
Bottom Ash

ชื่อ - นามสกุล

นายนรา รักษาพล

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.

ปีการศึกษา

2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีชัย สำราญวานิช, ปร.ด.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์วีระศักดิ์ ละอองจันทร์, D.Eng.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 10 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา
ชื่อ - นามสกุล	นายนรา รักษาพล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ซึ่งเป็นวัสดุจากอุตสาหกรรม นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีต

สำหรับการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตในครั้งนี้โดยศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ยึดจับ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าก้นเตาในทรายเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน มีอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดน้อยกว่า และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ยึดจับมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน สุดท้ายพบว่า คอนกรีตที่แทนที่เถ้าก้นเตาในทรายกรณีบ่มในน้ำให้ค่าการปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดน้อยกว่า และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ยึดจับมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการบ่มในอากาศ

คำสำคัญ: คอนกรีต คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์ยึดจับ อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ

<b>Thesis Title</b>	Chloride binding capacity of concrete using fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, limestone powder and bottom ash
<b>Name - Surname</b>	Mr. Nara Raksaphon
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2014

## ABSTRACT

This study aims to study the chloride binding capacity of concrete using fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, limestone powder and bottom ash. The results will lead to develop a guideline of utilizing industrial wastes in concrete.

In this study the chloride binding capacity (consist of total chloride, fixed chloride and fixed chloride ratio) of concrete using fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, limestone powder and bottom ash compared with Ordinary Portland Cement (OPC) concrete. While concrete using the bottom ash replaced in sand compared with those of concrete without bottom ash.

The results show that the total chloride of concrete using fly ash, ground granulated blast-furnace slag and limestone powder was less than that of OPC concrete. The fixed chloride of concrete using fly ash, ground granulated blast-furnace slag and limestone powder was more than that of OPC concrete. Additionally, concrete using fly ash, ground granulated blast-furnace slag and limestone powder had more fixed chloride ratio than OPC concrete. Furthermore, concrete using the bottom ash replaced in sand had less significant total chloride and more fixed chloride ratio when compared with those of OPC concrete. Finally, concrete using the bottom ash replaced in sand which cured in water had less significant total chloride, and more fixed chloride ratio when compared to the concrete cured in air.

Keywords: concrete, total chloride, fixed chloride, fixed chloride ratio

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสาคดิ์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช และ ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณวิทยาลัยเทคนิคบ้านค่าย อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง และวิทยาลัยเทคนิคชุมพร อำเภอเมืองชุมพร จังหวัดชุมพร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนนักเรียนและนักศึกษาจากวิทยาลัยดังกล่าว จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุวรรณ และคุณแม่ประชด รักษาพล ที่อดทนด้วยความยากลำบากในการเลี้ยงดู ต่งเสียและคอยอบรมสั่งสอนให้ลูกคนนี้ได้เล่าเรียนตลอดจนให้แง่คิดที่ดีในการดำเนินชีวิต และขอบคุณคุณบุญมา อินทโก ที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด จนมีโอกาจบการศึกษาถึงระดับนี้

นรา รักษาพล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2    วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	16
1.3    ขอบเขตของการศึกษา.....	16
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1    งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.2    ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	47
3.1    วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	47
3.2    รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	47
3.3    สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	55
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	58
4.1    สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	58
4.2    ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต.....	61
4.3    ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต.....	69

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	101
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	119





## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของแก้วลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	26
ตารางที่ 2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของแก้วลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545.....	27
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยจากแหล่งต่างๆ.....	27
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและ แคนาดา.....	29
ตารางที่ 2.5	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้.....	33
ตารางที่ 2.6	สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ.....	36
ตารางที่ 2.7	มาตรฐานของคุณภาพคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตาม ASTM C1202.....	44
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์ เมตร ที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55.....	56
ตารางที่ 3.2	สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์ เมตร เมื่อใช้แก้วกั้นเตาแทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55.....	57
ตารางที่ 4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน.....	58
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้.....	60
ตารางที่ 4.3	ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของแก้วกั้นเตา.....	61
ตารางที่ 4.4	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่า กับ 0.55 โดยน้ำหนัก.....	62
ตารางที่ 4.5	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้แก้วกั้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก.....	64
ตารางที่ 4.6	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน.....	66

## สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4.7	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เหล็กกันแตงแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน.....	68
ตารางที่ 4.8	คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน.....	70
ตารางที่ 4.9	คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เหล็กกันแตงแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน.....	74
ตารางที่ 4.10	คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เหล็กกันแตงแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน.....	77
ตารางที่ 4.11	คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน.....	79
ตารางที่ 4.12	คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เหล็กกันแตงแทนที่ทราย โดยตัวอย่างบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน.....	83
ตารางที่ 4.13	คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เหล็กกันแตงแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน.....	86

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต..... 35
รูปที่ 2.2	กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก..... 37
รูปที่ 2.3	กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล.. 37
รูปที่ 2.4	ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 38
รูปที่ 2.5	โครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล..... 39
รูปที่ 2.6	แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต..... 42
รูปที่ 2.7	เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ..... 43
รูปที่ 2.8	ชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง..... 44
รูปที่ 3.1	ขบวนการฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์..... 48
รูปที่ 3.2	เครื่องมือหาความละเอียด โดยวิธีแอร์เพอร์มิอะบิลิตีของเบลน..... 48
รูปที่ 3.3	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าการกักเก็บน้ำในวัสดุพูน..... 49
รูปที่ 3.4	ภาพแสดงแนวคิดการหาค่าความกักเก็บน้ำของแก้วกันตา..... 50
รูปที่ 3.5	กรวยทดสอบค่าการยุบตัว..... 51
รูปที่ 3.6	เครื่อง Universal testing machine (UTM)..... 51
รูปที่ 3.7	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา..... 52
รูปที่ 3.8	การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต..... 53
รูปที่ 3.9	การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ..... 55
รูปที่ 4.1	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยใช้เครื่อง SEM..... 59
รูปที่ 4.2	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของแก้วกันตา..... 61
รูปที่ 4.3	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก..... 63
รูปที่ 4.4	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้แก้วกันตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก..... 65

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.5	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน.....	67
รูปที่ 4.6	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน.....	69
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	89
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้ว ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	89
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต ผสมซิลิกาฟูม เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอ ไรด์ 28 และ 91 วัน.....	90
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต ผสมผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอ ไรด์ 28 และ 91 วัน.....	90
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้ว ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีต ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน กรณี บ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	92
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทราย ล้วนและใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอ ไรด์ 28 และ 91 วัน.....	93
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้ากั้น เตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน	93
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วน และใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	94
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้ากั้น เตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน	94
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้ากั้น เตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน	95
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้เถ้ากั้น เตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญ คลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	96

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	96
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตา แทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอ ไรด์ 28 วัน และ 91 วัน.....	97
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	97
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิว คอนกรีตของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	98
รูปที่ 4.23	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	99
รูปที่ 4.24	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ในทราย กรณี บ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน.....	100

# บทที่ 1

## บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์และงานคอนกรีตอยู่หลายชนิด เป็นสิ่งที่สมควรให้การสนับสนุน เพราะไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องของราคาวัสดุ ค่าขนส่ง การใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด แต่ยังสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตซึ่งจะช่วยลดมลพิษจากการปล่อยก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ลงได้ เพราะวัสดุทดแทนเหล่านี้เป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมสามารถใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ได้เลย ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะให้สมบัติทางเคมีที่ต่างกันไป อย่างไรก็ตาม ความต้องการที่จะใช้วัสดุทดแทนที่มีคุณภาพดีในเชิงพาณิชย์มีมากขึ้นส่งผลให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะใช้และราคาก็สูงมากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาวัสดุปอชโซลานอื่นที่หาได้ง่ายและมีปริมาณมากในประเทศ จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลมากขึ้น

วัสดุทดแทนที่สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเถ้าลอย (fly ash) เป็นวัสดุปอชโซลานที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุต่างๆ นี้ สามารถทำปฏิกิริยาปอชโซลานได้ดี ซึ่งเถ้าลอยมีขนาดค่อนข้างเล็ก เมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจะเข้าไปอุดในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างซีเมนต์และหินหรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนของคอนกรีต เพิ่มกำลังอัดและกำลังแรงดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และลักษณะอนุภาคทรงกลมทำให้คอนกรีตลื่นไหลได้ดี เพิ่มความสามารถในการเทได้ [1] แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยมีข้อเสียคือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น [2] ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blastfurnaceslag) เกิดจากกระบวนการถลุงเหล็กแล้วนำตะกรันเตาถลุงเหล็กมาบดให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว และยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุง

เหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา [3] ในขณะที่ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ไม่เป็นผลึก และมีรูปร่างกลม จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีต คือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น [4] แต่ส่วนใหญ่การใช้ซิลิกาฟุ้งมักใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและใช้เพิ่มความต้านทานของคอนกรีตเป็นหลัก เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ [3] สำหรับผงหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหิน มีความละเอียดหลายขนาดที่จำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุงคุณภาพบางประการของคอนกรีตได้ ซึ่งมีจุดเด่นแตกต่างจากเถ้าลอย คือทำให้การก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้นกำลังในระยะต้นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดการเยิ้ม น้ำ ลดการหดตัว เพิ่มความต้านทานซัลเฟต และความต้านทานกรด เป็นต้น จากจุดเด่นดังกล่าวนี้ปัจจุบันได้มีการนำผงหินปูนมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตผสมเสร็จกันมากขึ้น [5]

เถ้าก้นเตา (bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตาเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนสูงกว่าเถ้าลอยมาก ลักษณะโดยรวมของอนุภาคของเถ้าก้นเตาจะมีรูพรุน มีความเปราะ ขนาดละเอียดใกล้เคียงกับทราย แต่ละเอียดกว่าทราย มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทราย และมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าทราย เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดจึงมีสมบัติความเป็นสารปอซโซลานต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปแบบของวัสดุบ่มภายใน [6,7]

สิ่งก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่มักจะพบปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยเฉพาะคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล เนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ และซัลเฟตละลายอยู่ ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กประสบความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิม จึงส่งผลเสียต่อความสามารถด้านกำลังรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลงด้วย ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไข จึงเป็นปัญหาอย่างมากด้านความคงทนของคอนกรีต ในปัจจุบันพบว่าปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น มีการศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของคอนกรีต แนวทางการป้องกันและแก้ไขการเสื่อมสภาพของคอนกรีต



ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย เพื่อช่วยลดผลกระทบเนื่องจาก คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งเป็นการเพิ่มฐานข้อมูลในการ พัฒนาการใช้วัสดุทดแทนนี้ในงานคอนกรีตต่อไปตลอดจนใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบ ส่วนผสมคอนกรีต ให้สามารถทนทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล ภายใต้การนำวัสดุ ทดแทนที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ให้มากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตา ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิ ลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิ ลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยแทนที่เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย โดยปริมาตร

1.3.3 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตา ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.3.4 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.3.5 ทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.3.6 ทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ร้อยละ 5 (50 กรัม/ลิตร) ซึ่งใช้ระยะเวลาในการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

1.3.7 วิเคราะห์ผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 ทราบค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.4.3 ทราบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.4.4 ทราบผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.4.5 ได้องค์ความรู้ใหม่สำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ให้มีความทนทานใน  
สิ่งแวดล้อมคลอไรด์



## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้กล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอชโซลาน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลาย โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการสืบค้นงานวิจัยและสรุปรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพียงบางส่วน ดังนี้

Mahdi et al. [8] ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 เปรียบเทียบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์กับคอนกรีตทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณอ่าวเปอร์เซียเป็นระยะเวลา 9 เดือน โดยวางตัวอย่างในบริเวณใต้ชั้นทรายบนชายหาด บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง บริเวณที่โดนคลื่นสาด และบริเวณที่สัมผัสกับอากาศใกล้ทะเลจากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไปอย่างมาก และคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง มีการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด

อุดมพร กุลมงคล [9] ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และปริมาณการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายเป็นร้อยละ 10 คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม อีกทั้งพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีประสิทธิภาพในการบ่มภายในดีกว่าคอนกรีตทั่วไปอีกด้วย

กิริติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี [10] ได้ศึกษาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน โดยใช้คอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหมือนกับคอนกรีตควบคุม หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.<sup>3</sup> เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยบ่มคอนกรีตในน้ำจืดมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งครบ 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ได้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำลาย จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต สามารถหาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเลต่างๆ ได้ ผลการวิจัยพบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจนนอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ตลอดจนกำลังอัดที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถใช้ป้องกันการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดี เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (กำลังอัดสูง) ควบคู่กับคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี (ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ)

Chalee, et al. [11] ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างถึงระยะเวลา 7 ปี ซึ่งผลการศึกษาพบว่า เถ้าถ่านหินมีศักยภาพในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ มีค่าลดลง และชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อพิจารณาข้อมูลถึง 7 ปี คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เมื่อผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ

ละ 25-50 เพราะให้ผลในการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Ann et al. [12] ในงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงปริมาณคลอไรด์ไอออนบนผิวหน้าของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่สภาวะต่างๆ เช่น สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง สภาวะละอองคลื่น และสภาวะบรรยากาศ โดยปริมาณคลอไรด์ไอออนจะสะสมที่ผิวหน้ามากขึ้นตามอายุการใช้งาน และในการทำนายอัตราการเพิ่มขึ้นของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะต้องอยู่ในรูปแบบของสมการที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน และจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การใช้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวเป็นค่าคงที่ จะส่งผลทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีค่ามากเกินไป ซึ่งเมื่อมีรูปแบบของสมการปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวขึ้นอยู่กับเวลาในรูปแบบต่างๆ จะทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคลอไรด์นี้จะมีผลต่อความเสี่ยงของการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

Song et al. [13] ศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ ( $D_u$ ) และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ( $C_s$ ) ในคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์มีค่าลดลงและปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนผสมของคอนกรีต ปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต วิธีการบ่ม ลักษณะการเผชิญกับน้ำทะเล และฤดูกาล เป็นต้น ส่วนในคอนกรีตที่ใช้วัสดุอื่นๆแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุประสาน จะมีประโยชน์ในการทำสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ลดลง และจะส่งผลทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นจะไปเติมโพรงช่องว่างของคอนกรีต และช่วยในการยึดจับเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

วิเชียร ชาลี [14] ศึกษาถึงผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณต่างๆ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีต โดยใช้กฎข้อที่ 2 ของ ฟิค (Fick's second law) พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตทุกส่วนอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น และ

สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น

Dhir et al. [15] ในงานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยชนิดที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำในการศึกษา ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์และเพิ่มความสามารถในการยึดจับคลอไรด์อออน รวมถึงศึกษาถึงปริมาณการใช้เถ้าลอยในการใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต โดยปริมาณการใช้เถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและสรุปรายละเอียดของทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าถ่านหิน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

### 2.2.1 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

#### 2.2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate,  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1



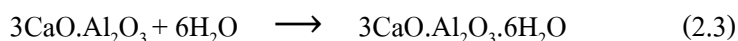
#### 2.2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2



### 2.2.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

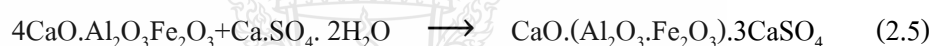


เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum :  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆของเอทริงไทท์ (Ettringite :  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{SO}_4\cdot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



### 2.2.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

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



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_3\text{S}$  กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  ด้วยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของเอทริงไทท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  และ  $\text{C}_4\text{AF}$  ทำให้เอทริงไทท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอไรท์แคลเซียมซัลไฟเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

## 2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และหรือเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้



แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนี้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

#### 2.2.2.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

##### 1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) ภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งานจะต้องนำมาบดก่อน

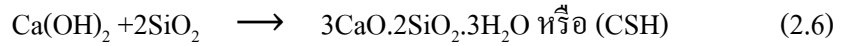
##### 2) ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบัน ปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะ อัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

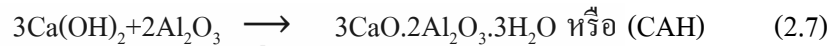
#### 2.2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทาง

เคมีได้ ดังสมการที่ (2.6) ถึง (2.7) ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ปฏิกิริยาปอซโซลาน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



### 2.2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์ หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่งเป็นผลพลอยได้ (By product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า [3]

#### 2.2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Alumina : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO<sub>2</sub> มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO<sub>2</sub> สูง

2) เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO<sub>2</sub> ต่ำแล้วยังมี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [16]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และ ไอออนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า $\text{Na}_2\text{O}$ , ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ดังกล่าวมาแล้วยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์ มากกว่าเพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก. 2135-2545) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [17]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้น	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้น
	คุณภาพ 1	ชนิด ก	ชนิด ข	คุณภาพ 3
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> ) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อยละ	-	< 10.0	<10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะ การเผาถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็มีความเสี่ยงที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [18]

ตัวอย่าง เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

### 2.2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ไอออนออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) และ

ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H<sub>2</sub>O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOD) SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80 ถึง 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเม็ดถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของเม็ดลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

#### 2.2.3.2 ปฏิกิริยาทางเคมีของเม็ดลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเม็ดลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub> หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี่คือเม็ดลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.6 และ/หรือสมการที่ 2.7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

#### 2.2.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast-furnace slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกันกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิมตัว (hydrated lime) ยิปซัม หรือแอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีต มีข้อดี 2 ประการคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

องค์ประกอบทางเคมีตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูน

และหินโคลไลไม่ต้องประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่า ร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ ที่ติดมาเช่น  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{MnO}$  อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดาใน ค.ศ. 1988 [19] แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 2.4 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่า มีค่าแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา [19]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
$\text{SiO}_2$	32-40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7-16
$\text{CaO}$	32-45
$\text{MgO}$	5-15
$\text{SO}_3$	0.7-2.2
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.1-1.5
$\text{MnO}$	0.2-1.0

### 2.2.5 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันควอร์ตที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอของ  $\text{SiO}$  ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้ง ทำให้พื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย [4]

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี  $\text{SiO}_2$  มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และออกไซด์อื่นๆอีกร้อยละ 1 หรือ 2

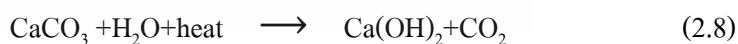
คุณสมบัติทางกายภาพที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทาดำหรือเทาอมขาว ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตรมีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

## 2.2.6 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

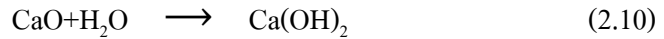
### 2.2.6.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยในการลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันก็อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้น ก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9



### 2.2.6.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10



โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

### 2.2.7 ถ้ำก้นเตา

ถ้ำก้นเตา (Bottom Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับถ้ำลอย แต่ถ้ำก้นเตาเกิดจากการรวมตัวกันของถ้ำถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นถ้ำก้นเตาจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนสูงกว่าถ้ำถ่านหินมาก [3] โดยทั่วไปของถ้ำก้นเตานั้นจะมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับถ้ำลอย แต่ถ้ำก้นเตาไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่อเทียบกับถ้ำลอย ซึ่งถ้ำลอยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามาก จึงถือได้ว่าถ้ำก้นเตาสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เพียงบางส่วน เนื่องจากลักษณะโดยรวมของอนุภาคของถ้ำก้นเตาจะมีรูพรุน มีความเปราะ ขนาดคละไใกล้เคียงกับทราย แต่ละเอียดกว่าทราย มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทราย และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย ถ้ำก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดจึงมีสมบัติความเป็นสารปอซโซลานต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากถ้ำก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำถ้ำก้นเตามาใช้ในรูปแบบของวัสดุบ่มภายใน

คุณสมบัติเชิงกลของถ้ำก้นเตา

- 1) การต้านทานการสึกหรอและความคงทนนั้นถ้ำก้นเตามีความต้านทานการสึกหรอและความทนน้อยเนื่องจากเป็นวัสดุเม็ดละเอียด
- 2) การดูดซึมน้ำของถ้ำก้นเตา เนื่องจากถ้ำก้นเตามีขนาดเม็ดวัสดุขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากจึงมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมโดยทั่วไป
- 3) ความถ่วงจำเพาะของถ้ำก้นเตาเมื่อเทียบกับวัสดุมวลรวมจะมีค่าน้อยกว่าแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำมาใช้งานจะทำให้มีน้ำหนักที่ลดลง
- 4) ความเหนียวของวัสดุ เนื่องจากถ้ำก้นเตาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจาก การเผาไหม้ของถ่านหิน ดังนั้น ถ้ำก้นเตาจึงเป็นวัสดุประเภท Non-Plastic



5) ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเก้าอี้เตาะจะน้อยกว่าวัสดุมวลรวม โดยทั่วไปทั้งรูปแบบการบดอัดแบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

6) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) จะสูงกว่าวัสดุมวลรวม โดยทั่วไปทั้งรูปแบบการบดอัดแบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

#### 2.2.8 ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต [20]

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตนั้นสามารถเกิดได้ในทุกช่วงอายุของคอนกรีต ตั้งแต่ในสภาวะพลาสติกไปจนถึงคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว ซึ่งลักษณะความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพนั้นจะแตกต่างกันไปตามช่วงอายุ อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภทตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

1) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (physical deterioration) เช่น การรับน้ำหนักที่มากเกินไป

2) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (chemical deterioration) เช่น คาร์บอนेशन การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม

3) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (mechanical deterioration) เช่น การขีดสี การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ

4) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (biological deterioration) เช่น การเสื่อมสภาพโดยตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรียบางชนิด

5) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (mixed process) เช่น การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น ลักษณะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่างๆกันนั้นจะมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพนั้นจึงทำได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางโครงสร้างอาจจะเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุหลักมากกว่าหนึ่งสาเหตุ หรืออาจจะได้รับความเสียหายจากการรับแรงที่มากเกินไป หรืองานก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

เนื่องจากลักษณะการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ค่อนข้างหลากหลาย ดังที่แสดงไว้ข้างต้น การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมและปัญหาทางด้านความคงทนที่มีความเสี่ยงสูงในแต่ละสภาวะจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น

## 2.2.9 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวกลางที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลงและหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

### 2.2.9.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หินทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.5

### ตารางที่ 2.5 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้ [20]

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้สูงสุดในคอนกรีต (ร้อยละของน้ำหนักวัสดุประสาน)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (sea-retaining walls)	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

หมายเหตุ : โดยการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1218/C 1218M

อย่างไรก็ตามปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (de-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี ดังต่อไปนี้

1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบ (Capillary Suction)

2) การแพร่ของอออนคลอไรด์ (Chloride diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าไปสู่ความเข้มข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต

3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ

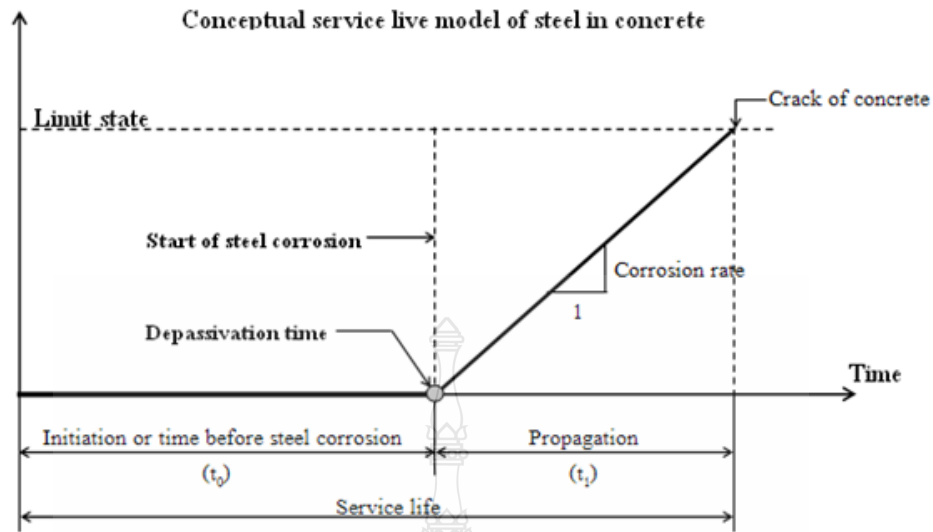
โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวสัมผัส กับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่าง ของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation เกิดใน 2 ลักษณะดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยน้ำทะเลในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่ภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม สามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวกสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้ไม่มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีต จะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย [20]

2.2.9.2 กระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของคลอไรด์อออน

โดยกระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของคลอไรด์อออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ Initial period และ Propagation period ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต [20]

1) Initial period หรือ ระยะเวลาดังแรก ( $t_0$ ) หมายถึง ระยะเวลาดังตั้งแต่นั้นคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ซึ่งระยะเวลาดังแรก ( $t_0$ ) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

2) Propagation period หรือ ระยะเวลาดังขยายตัวต่อเนื่อง ( $t_p$ ) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งานจะเห็นได้ว่าคลอไรด์ไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยนั้นจะมีผลกระทบต่อการกระตุ้นให้เกิดสนิมบนเหล็กเสริมได้ แต่สนิมเหล็กเองกลับไม่มีคลอไรด์ไอออนเป็นส่วนประกอบเลย

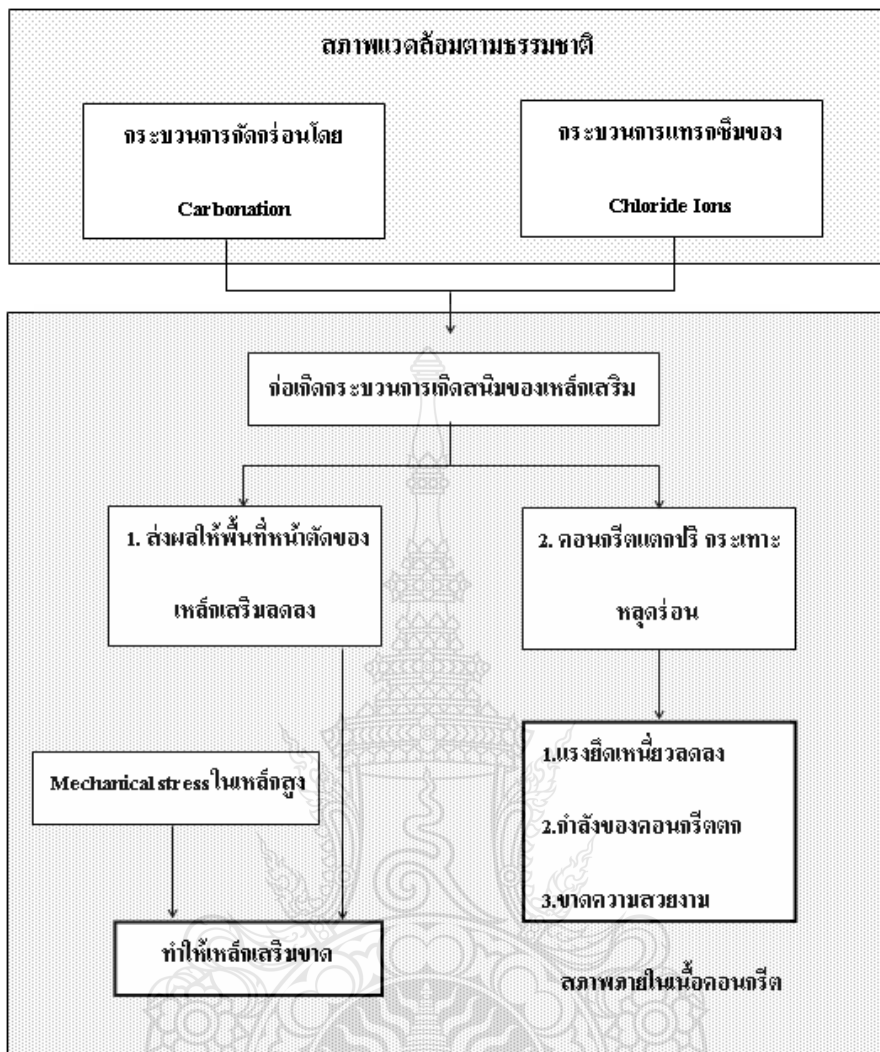
โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบลูกกัดกร่อนทำให้เหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นนี้ จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ประมาณ 4-6 เท่า ดันให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กะทะาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากยิ่งขึ้น คอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้น ๆ (Delamination) ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็ก

เสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลัง ในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ลดลง อัตราการพัฒนาก่อเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบโครงสร้างนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือแผนภาพแสดงกระบวนการ กัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และรูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการเกิด สนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

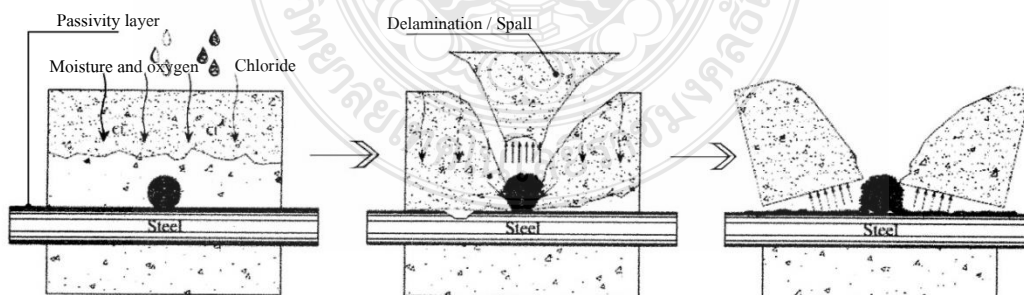
นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ปฏิริยาการบอบเนชันยังเป็นอีก สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งปฏิริยาการบอบเนชันนี้จะลดความเป็นต่าง ของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นต่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิม โดย ปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต รวมทั้งมี น้ำและออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามี โอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ [21]

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมภายในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (ฟิล์มที่ผิวยังไม่หาย)
8.0	ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กหายไป
ต่ำกว่า 7.0	เกิดสนิมอย่างรุนแรงที่ตัวของเหล็กเสริม



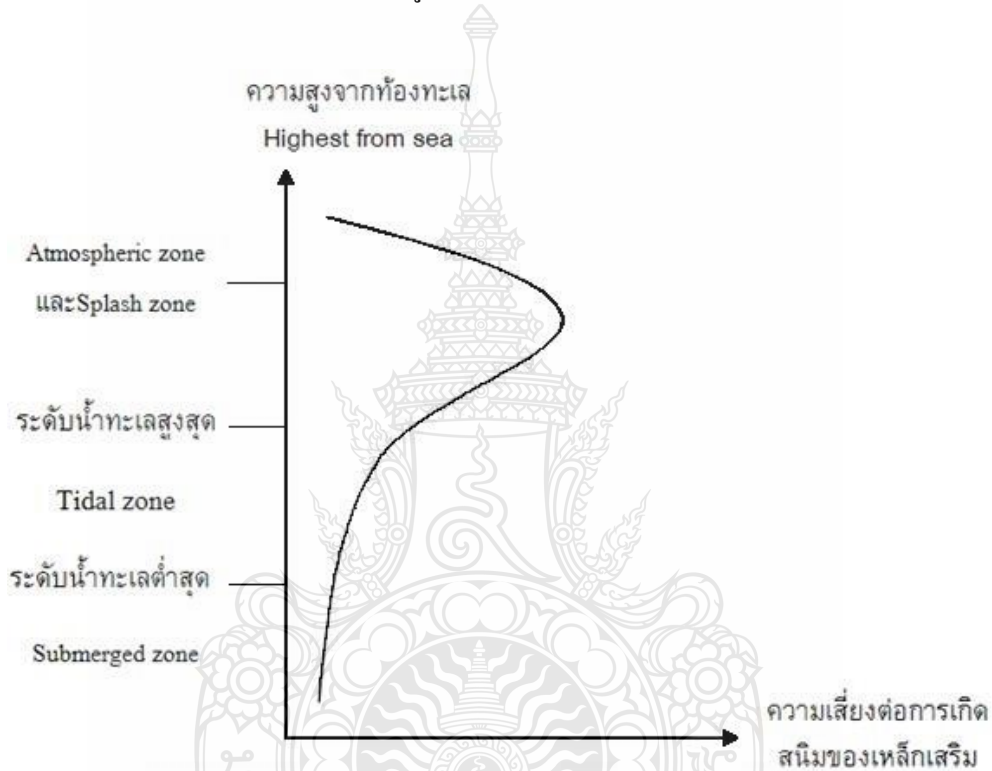
รูปที่ 2.2 กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [20]



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล [20]

### 2.2.9.3 ความเสี่ยงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีมากที่สุด ในบริเวณ โครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ รongลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างได้น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.4

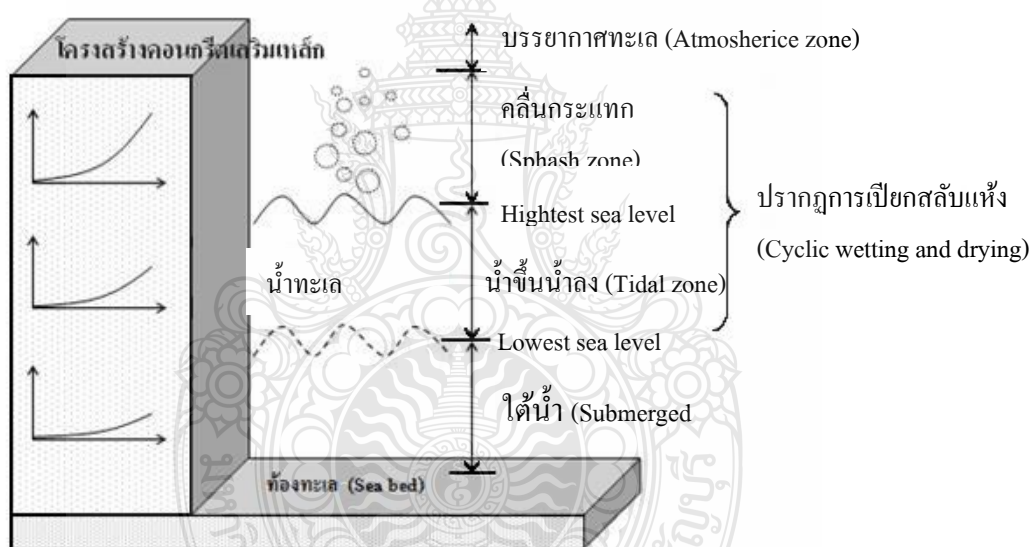


รูปที่ 2.4 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [20]

การที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำ เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยมาก เป็นผลทำให้อัตราการแพร่ในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นก็ถูกจำกัดไปด้วย อัตราการแพร่ของออกซิเจนที่ต่ำ ผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง น้ำที่ผิวที่ผิวของคอนกรีตจะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์ไอออนที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์ไอออนในสภาพเปียกสลับแห้งดังแสดงในรูปที่ 2.5 แบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล [20]

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปคอนกรีตจะมีสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกจะเร่งให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น จะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิม



ของเหล็กเสริมได้มากกว่า และสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้

#### 2.2.9.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครง สร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไก และธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1) การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของไอออน โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ

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

3) การดูดคลอไรด์ไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดคลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

4) แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออน

เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูง ไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำและเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่ง แวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์ เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

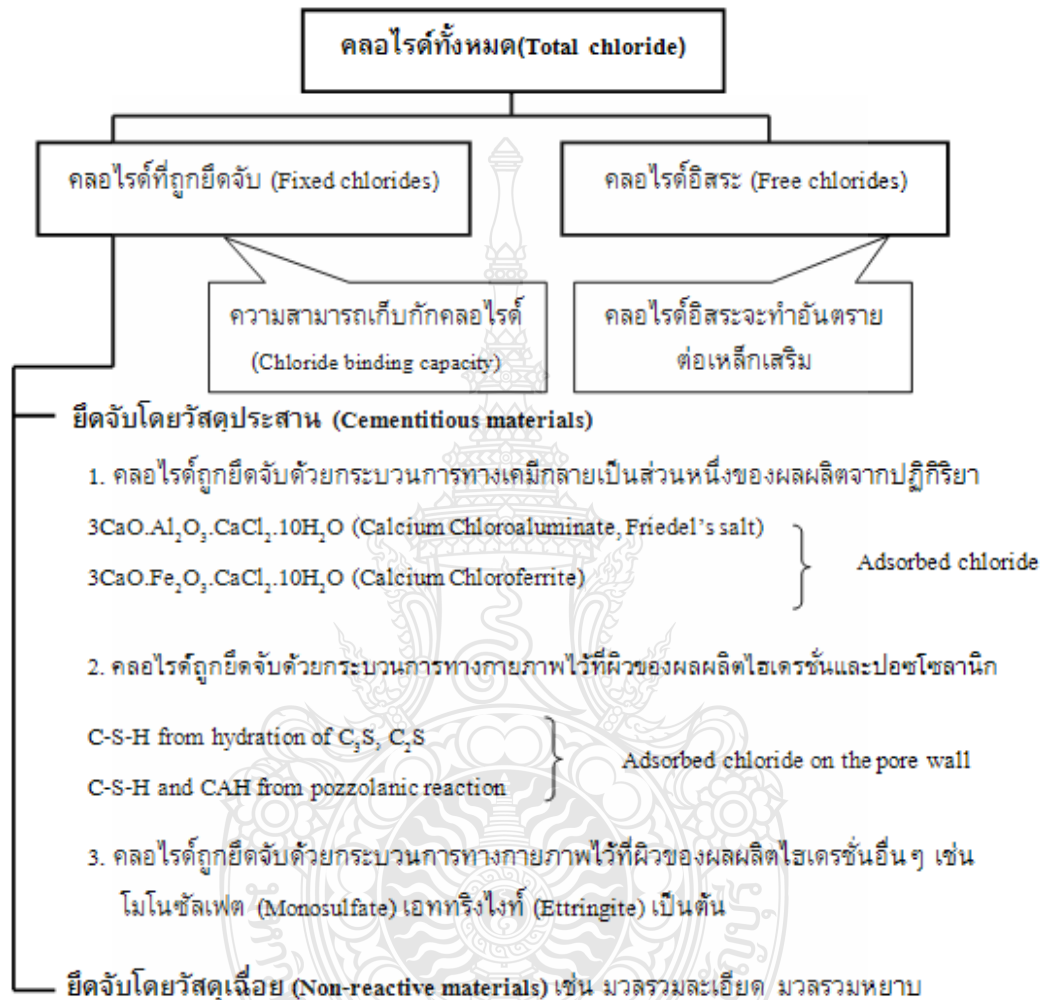
#### 2.2.9.5 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต [20]

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ชนิดของแอกติวอน ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้น จะเป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท (Total chloride) ได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในรูปของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Friedal's salt) หรือ  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium chloroferrite) และเกิดปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium chloro-aluminate hydrate ที่เรียกว่า Friedel's salt หรือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของ Gel pores และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic production) ของเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราช หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2) คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลาย ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ซึ่งถ้ามีคลอไรด์ประเภทนี้ในปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เปียกสลับแห้ง เช่น บริเวณคลื่นละอองน้ำ (Splash zone) หรือ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง

(Tidal zone) จะได้รับผลกระทบจากการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อ่อนแอที่ค่อนข้างรุนแรงกว่า โครงสร้างที่อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เช่น บริเวณใต้ทะเล (Submerged zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่เป็นแผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต



รูปที่ 2.6 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต [20]

### 2.2.9.6 วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์

วิธีการทดสอบที่นิยมใช้มีดังนี้

#### 1) การไทเทรต

การไทเทรต (Titration test) เป็นการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะเวลาสั้นๆ โดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียด และวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในการแทรกซึมของคลอไรด์มี 2 ลักษณะคือ

วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด (Total chloride content) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 หลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometer titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (รูปที่ 2.7)



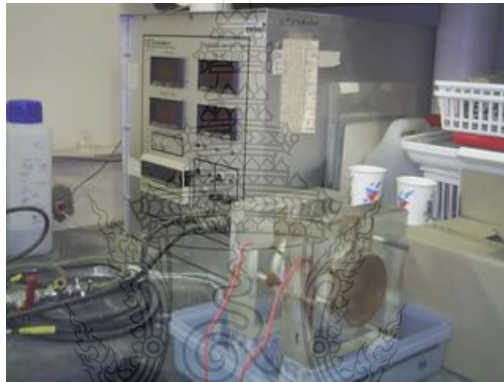
รูปที่ 2.7 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ [22]

## 2) ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง

การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยวิธีเร่ง (Rapid chloride penetration test) ทำได้โดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM C1202 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านชั้นคอนกรีต ระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ปริมาณ ประจุไฟฟ้าวัดเป็นคูลอมป์ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ วิธีนี้สามารถบอกผลได้อย่างรวดเร็ว ว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมได้มากน้อยเพียงใด โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8 แสดงชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง โดยการทดลองใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. หนา 50 มม. และ เคลือบอีพอกซี ที่ขอบของตัวอย่าง จากนั้นทำการดูดอากาศออกจากโพรงในเนื้อตัวอย่างเป็นเวลา 3 ชม. และทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงได้นำตัวอย่างเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบ Rapid Chloride โดยจะวัดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในรูปของประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total Charge) ที่ผ่านตัวอย่างในการทดสอบจะใช้เวลา 6 ชั่วโมงต่อหนึ่งชิ้นตัวอย่าง นอกจากการทดลองวัดค่า การซึมผ่านของคลอไรด์ดังกล่าวแล้วยังสามารถคำนวณหาค่าความพรุน (Porosity) ของตัวอย่างได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.7 มาตรฐานของคุณภาพคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตาม ASTM C1202

จำนวนประจุที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์	คุณภาพคอนกรีต
>4000	สูง (High)	แย่มาก (Poor)
2000-4000	ปานกลาง (Moderate)	ปานกลาง (Moderate)
1000-2000	ต่ำ (Low)	ดี (Good)
100-1000	ต่ำมาก (Very low)	ดีมาก (Very good)
<100	ไม่ซึมผ่าน (Negligible)	ดีเยี่ยม (Excellence)



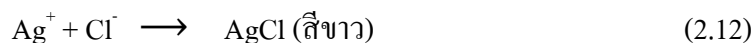
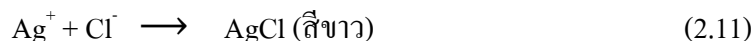
รูปที่ 2.8 ชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีแรง [22]

3) ทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี

สี

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธีสี (Colorimetric technique) สามารถใช้วัดระดับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration depth) ในคอนกรีต และเป็นวิธีการทดสอบที่สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว โดยการฉีด ฟอสฟอรัสละลายซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ ) บนตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นเป็นสีขาว และสีน้ำตาล โดยส่วนที่เป็นสีขาวเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลเวอร์ไอออน ( $\text{Ag}^+$ ) และคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ซิลเวอร์คลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาว ซึ่งบริเวณที่ปรากฏเป็นสีขาวหลังฉีด ฟอสฟอรัสละลายซิลเวอร์ไนเตรทแสดงว่ามีการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าถึง ส่วนบริเวณที่ไม่มีเกลือคลอไรด์จะปรากฏเป็นสีน้ำตาลซึ่งเป็นสารประกอบซิลเวอร์ไฮดรอกไซด์

ไฮดรอกไซด์ (AgOH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลเวอร์ไอออน (Ag<sup>+</sup>) กับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) จาก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ในคอนกรีต ซึ่ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.11 และ 2.12



#### 2.2.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยทั่วไปการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ( $D_c$ ) สามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะให้ค่าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จากเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) นิยมใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) [23,24] เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายและรวดเร็ว

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) โดยหลักที่ถูกต้องแล้ว การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตต้องเป็นลักษณะของการแพร่ที่เป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งในกรณีของการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไม่ได้อยู่ในลักษณะของการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง คาпилลารี (Capillary suction) ของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น การประยุกต์ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าว จะไม่นิยมเรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) แต่จะเรียกเป็น สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) หรือ สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏของคลอไรด์ (Apparent diffusion coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้เส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ เริ่มจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังสมการ (2.13)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.13)$$

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ 2.13 สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.14 ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0 \quad (2.14)$$

เมื่อ  $C_{(x,t)}$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก  $x$  จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์  $t$  (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

$C_s$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

$C_0$  คือ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่บริเวณผิวเหล็กเสริม โดยเป็นคลอไรด์ส่วนที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตตั้งแต่แรก (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

$D_a$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ซม.<sup>2</sup>/วัน)

$X$  คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

$t$  คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

$\operatorname{erf}$  คือ ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function) ดังสมการที่ 2.15

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + \dots \right) \quad (2.15)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตทำได้โดยการปรับค่า  $D_a$  และ  $C_s$  ในสมการที่ 2.14 เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

สำหรับในส่วนของวิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517

3.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.3 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast-furnace slag)

3.1.4 ซิลิกาฟูม (Silica fume)

3.1.5 ผงหินปูน (Limestone powder) ขนาด 8 ไมโครเมตร

3.1.6 เถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.7 ทรายใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆ ออก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.1.8 หินที่ใช้ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4

3.1.9 น้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต และบ่มคอนกรีต เป็นน้ำประปา

3.1.10 สารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

#### 3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษา สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.2.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้

สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดของวัสดุประสาน ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้น



เตา ลักษณะอนุภาคของวัสดุ และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียด ดังนี้

### 3.2.1.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 โดยขุดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ขุดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์

### 3.2.1.2 ความละเอียดของวัสดุประสาน

การหาค่าความละเอียดของวัสดุประสาน ได้ทำการศึกษาโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนค์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204-00 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนค์ (air permeability apparatus) (รูปที่ 3.2)



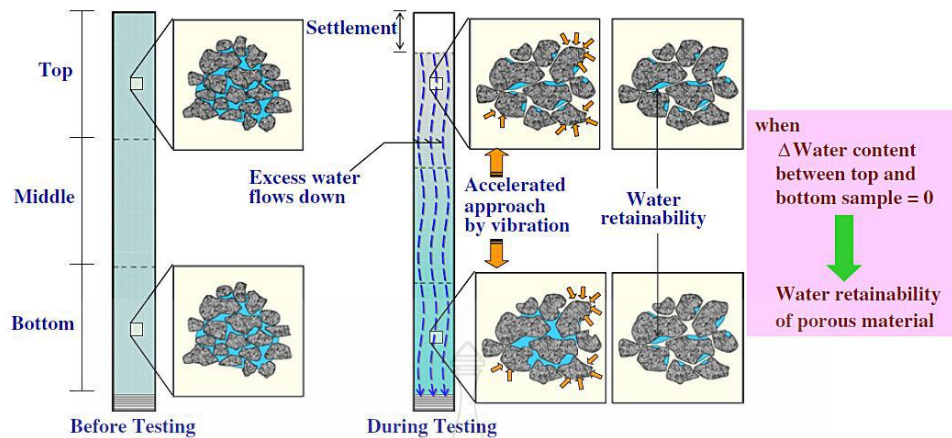
รูปที่ 3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน

### 3.2.1.3 ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเก้าอี้กันเตา

ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเก้าอี้กันเตา กระทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri and Tangtermsirikul [25] คือทดสอบหาค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของเก้าอี้กันเตา เปรียบเทียบกับวิธีการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C128 โดยใช้เก้าอี้กันเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 10 และ 20 และเก็บรักษาความชื้นให้ทั่วถึงกันก่อนการทดสอบ ประมาณ  $24 \pm 4$  ชั่วโมง โดยการทดสอบใช้ท่อ PVC ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ยาว 750 มิลลิเมตร คลุมด้วยพลาสติกด้านบนและด้านล่างของท่อ เพื่อป้องกันความชื้น จากนั้นนำกระบอกทดสอบที่ได้เข้าเครื่องเขย่า และเปิดเครื่องเขย่าด้วยความเร็วคงที่เป็นระยะเวลา 24 นาที่ ซึ่งใช้เก้าอี้กันเตาประมาณ 3-5 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นนำเก้าอี้กันเตาจากกระบอกทดสอบไปอบ โดยในการนำไปอบนั้นต้องแยกระหว่างส่วนบนและส่วนล่างส่วนละ  $500 \pm 10$  กรัม ใส่ตู้อบที่ อุณหภูมิ  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเก้าอี้กันเตาออกจากตู้อบ และคำนวณค่าการดูดซึมน้ำหรือค่าการกักเก็บน้ำ สำหรับแนวคิดของการทดสอบ พบว่า น้ำจะเข้าไปเติมเต็มในรูของเก้าอี้กันเตาและอิมตัวที่ผิวด้านนอก เมื่อเกิดการเขย่าขึ้นน้ำส่วนเกินจะไหลลงจากบนลงล่างของท่อทรงกระบอกทดสอบ ดังนั้นค่าความชื้นของเก้าอี้กันเตาทั้งบนและล่างของกระบอกทดสอบต้องมีค่าเท่ากันและค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของเก้าอี้กันเตาจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนมวลที่มากที่สุดของน้ำต่อมวลรวมที่แห้ง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าการกักเก็บน้ำในวัสดุพูน [26]



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงแนวคิดการหาค่าความกักเก็บน้ำของเถ้ากั้นเตา [26]

### 3.2.1.4 ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตา

ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยหาความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสถานะแห้งด้วยเตาอบจากการกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 โดยขอมาตรฐานเลอชาเตอรัลียเอร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.1) ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสถานะค่าการกักเก็บน้ำ หาได้จากการกระทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri and Tangtermsirikul ดังที่กล่าวมาแล้ว

$$\rho_{WR} = \rho_{OD} (1 + WR) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\rho_{WR}$  คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสถานะค่าการกักเก็บน้ำ

$\rho_{OD}$  คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสถานะแห้งด้วยเตาอบ

WR คือ ค่าการกักเก็บน้ำ (%)

### 3.2.1.5 ลักษณะอนุภาคของวัสดุที่ใช้

ลักษณะอนุภาคของวัสดุที่ใช้ กระทำโดยใช้เครื่องโดย Scanning Electronic Microscope (SEM) ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาค

### 3.2.1.6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้นั้นได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบ โดยใช้วิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

### 3.2.2 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ในการทดสอบหาค่าการยุบตัว และการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.2.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump test) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Cone) (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 กรวยทดสอบค่าการยุบตัว

#### 3.2.2.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (compressive strength) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 109 ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine (UTM)

### 3.2.3 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (chloride binding capacity) ของคอนกรีต มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

#### 3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

- 1) ทำความสะอาดแบบหล่อแบบหล่อกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร และทาน้ำมันป้องกันผิวคอนกรีตติดกับแบบหล่อโดยใช้จำนวน 3 แบบต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม
- 2) ชั่งตวงวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ตามสัดส่วนผสมของคอนกรีตดังตารางที่ 3.1
- 3) ผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสม
- 4) เทคอนกรีตที่ผสมตามอัตราส่วนผสมลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้งจำนวน 3 ชั้น ใช้ค้อนตีข้างแบบในแต่ละชั้นเพื่อไล่ฟองอากาศและทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น
- 5) ชั้นสุดท้ายให้ใส่คอนกรีตให้เกินแบบเล็กน้อย แล้วปาดผิวหน้าให้เรียบ
- 6) ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งเขียนชื่อตัวอย่างหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีต และบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 3.7 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.2.3.2 การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บตัวอย่างคอนกรีต

- 1) บ่มในน้ำ 28 วัน นำขึ้นมาจากน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงให้ผิวตัวอย่างแห้ง
- 2) เคลือบผิวคอนกรีตด้านข้างและด้านล่างให้รอบโดยอีพอกซี Epoxy (1:2) เว้นผิวด้านบนหนึ่งด้านจำนวน 3 รอบทิ้งระยะห่างในการเคลือบผิวประมาณ 4-6 ชั่วโมง ต้องมั่นใจว่าไม่มีรูหรือรอยให้น้ำซึมเข้าได้ที่ผิวเคลือบ ทิ้งให้สารเคลือบผิวคอนกรีตแห้งระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3) การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ความเข้มข้นของคลอไรด์ ไอออนร้อยละ 5 (50 กรัม/ลิตร) แฉะในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตามระยะเวลาการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน

4) เมื่ออายุการทดสอบ นำตัวอย่างคว่ำผิวนกลงให้น้ำระบายออก 24 ชั่วโมง

5) เก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยการเจาะเอาผงตัวอย่างชั้นละ 10 มิลลิเมตร ชั้นละ 20 กรัมทุกๆ ชั้น โดยวัดจากผิวหน้าของคอนกรีตที่คลอไรด์ซึมผ่านจำนวน 5 ชั้น นำไปไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตต่อไป



รูปที่ 3.8 การแฉะสารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต

3.2.3.3 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบโดยมีรายละเอียดวิธีการเตรียม

1) การเตรียมสาร 5M NaNO<sub>3</sub> : ISA24 Contents : 42.5% Sodium Nitrate (7631-99-4) 57.5% Water (7732-18-5)

2) การเตรียมสาร 1000 ppm. Chloride Standard : ISC24 Contents : 0.20% Sodium Chloride (7647-14-5) 99.8% Water (7732-18-5)

3) การเตรียมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เจือจาง (1:1)

วิธีทำ ผสมกรดไนตริกกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ในอัตราส่วน 1:1 โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อนแล้วเติมกรดไนตริกทีหลังคนให้เข้ากัน

4) การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 100 ppm

วิธีทำ ผสมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 15 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่นปริมาตร 135 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อนแล้วเติมโซเดียมคลอไรด์ทีหลังคนให้เข้ากัน

5) การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10 ppm

วิธีทำ ผสมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 15 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่นปริมาตร 135 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อน แล้วเติมโซเดียมคลอไรด์ทีหลังคนให้เข้ากัน

3.2.3.4 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

- 1) ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ใส่น้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำกลั่นประมาณ 75 มิลลิลิตร และเติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แล้วคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที
- 3) ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น

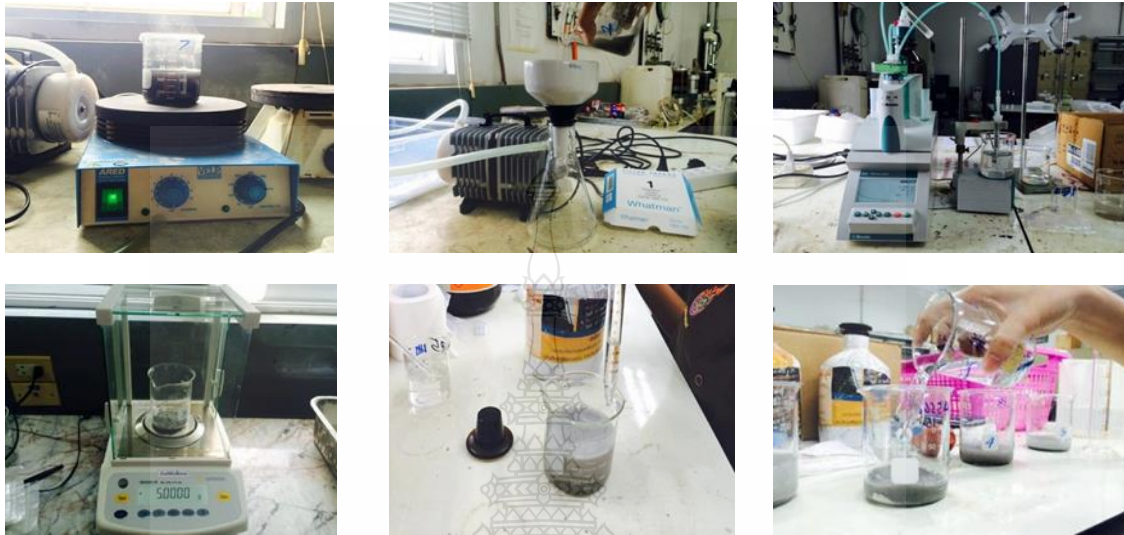
3.2.3.5 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย (Water soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

- 1) ชั่งตัวอย่าง ประมาณ 5 กรัม ใส่น้ำกลั่นในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แล้วคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที
- 3) ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัวนำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น

3.2.3.6 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ

- 1) ตั้งค่าเครื่องวัดคลอไรด์ โดยเลือกค่าสอบเทียบในเครื่องวัดเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 100 ppm และสารละลายโซเดียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 10 ppm

2) บีบเปิดตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ไปใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ทำการวัดปริมาณคลอไรด์โดยเครื่องอ่านอัตโนมัติ ซึ่งจะได้ข้อมูลเป็นหน่วยความจูนในล้านส่วน (ppm)



รูปที่ 3.9 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ

### 3.2.3.7 การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์

- 1) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด Total Chloride ได้จากการทดสอบโดยใช้กรด
- 2) ปริมาณคลอไรด์อิสระ Free Chloride ได้จากการทดสอบโดยใช้น้ำกลั่น
- 3) ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึด Fixed Chloride เท่ากับ Total Chloride – Free

Chloride

### 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2



ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้า ลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	C	332	-	-	-	-	970	1080	182
2	C-20FA	266	67	-	-	-	970	1080	182
3	C-40FA	200	132	-	-	-	970	1080	182
4	C-30SL	232	-	100	-	-	970	1080	182
5	C-50SL	166	-	166	-	-	970	1080	182
6	C-5SF	315	-	-	17	-	970	1080	182
7	C-10SF	298	-	-	34	-	970	1080	182
8	C-5LP	315	-	-	-	17	970	1080	182
9	C-10LP	298	-	-	-	34	970	1080	182
10	C-15FA-5LP	264	49	-	-	17	970	1080	182
11	C-10FA-10LP	264	34	-	-	34	970	1080	182
12	C-35FA-5LP	199	116	-	-	17	970	1080	182
13	C-30FA-10LP	199	99	-	-	34	970	1080	182
14	C-25SL-5LP	232	-	83	-	17	970	1080	182
15	C-20SL-10LP	232	-	66	-	34	970	1080	182
16	C-45SL-5SF	166	-	149	17	-	970	1080	182
17	C-40SL-10SF	166	-	132	34	-	970	1080	182

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้  
 ใ้กั้กั้เตาแทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
 ปรระสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	ตะกรัน				ทราย	หิน	น้ำ	ใ้กั้กั้เตา Volume
			ใ้กั้ ลอย	เตากลุง เหล็กบด ละเอียด	ซึลึกา ฟูม	ฝง หินปูน				
1	C	332	-	-	-	970	1080	182	-	
2	C-10BA	332	-	-	-	873	1080	182	10% Vol.	
3	C-30BA	332	-	-	-	679	1080	182	30% Vol.	
4	C-40FA	200	132	-	-	970	1080	182	-	
5	C-40FA-10BA	200	132	-	-	873	1080	182	10% Vol.	
6	C-40FA-30BA	200	132	-	-	679	1080	182	30% Vol.	
7	C-50SL	166	-	166	-	970	1080	182	-	
8	C-50SL-10BA	166	-	166	-	873	1080	182	10% Vol.	
9	C-50SL-30BA	166	-	166	-	679	1080	182	30% Vol.	
10	C-10SF	298	-	-	34	970	1080	182	-	
11	C-10SF-10BA	315	-	-	17	873	1080	182	10% Vol.	
12	C-10SF-30BA	298	-	-	34	679	1080	182	30% Vol.	
13	C-10LP	298	-	-	-	970	1080	182	-	
14	C-10LP-10BA	298	-	-	-	873	1080	182	10% Vol.	
15	C-10LP-30BA	298	-	-	-	679	1080	182	30% Vol.	

หมายเหตุ

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

FA หมายถึง ใ้กั้ลอย

SL หมายถึง ตะกรันเตากลุงเหล็กบดละเอียด

SF หมายถึง ซึลึกาฟูม

LP หมายถึง ฝงหินปูน

BA หมายถึง ใ้กั้กั้เตา

ตัวเลข 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, และ 50 หมายถึง ร้อยละการแทนที่ของวัสดุนี้ๆ

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ถั่วลอย ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้คือ สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

#### 4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย ในส่วนสมบัติของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถั่วลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) ประกอบด้วยความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ในขณะที่สมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตาประกอบด้วยความถ่วงจำเพาะ ความสามารถในการกักเก็บน้ำ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี โดยผลการศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

##### 4.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

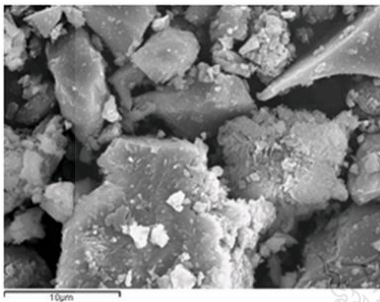
ตารางที่ 4.1 แสดงความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถั่วลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

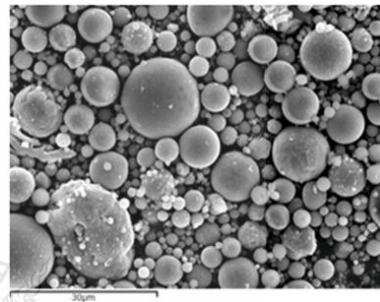
รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1		ชนิดวัสดุ		
	ถั่วลอย	ตะกรันเตา	ถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.53	2.96	2.32	2.69
ความละเอียด (ซม. <sup>2</sup> /ก.)	3,100	2,867	4,600	-	5,210

#### 4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

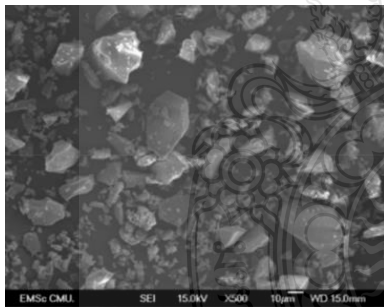
รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ใต้อลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมคม ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน ส่วนรูปร่างของอนุภาคของใต้อลอย มีลักษณะกลมเรียบมีขนาดต่าง ๆ กันกระจายอยู่เห็นได้ชัดเจน ซึ่งคล้ายๆ กับของซิลิกาฟูม แต่ของซิลิกาฟูมจะมีขนาดค่อนข้างละเอียดกว่ามาก



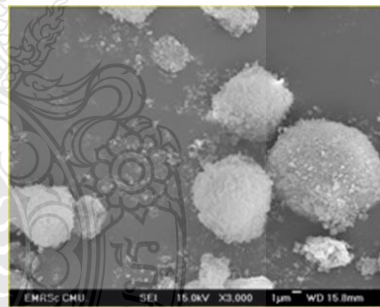
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



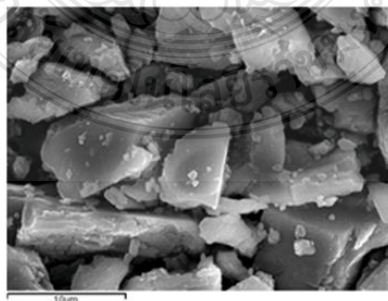
ข) ใต้อลอย



ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ง) ซิลิกาฟูม



จ) ผงหินปูน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยใช้เครื่อง SEM

#### 4.1.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน โดยใช้วิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟุ้ง	ผง หินปูน	เถ้า ก้นเตา
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	18.93	35.71	34.06	92.00	0.45	35.29
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.51	20.44	16.27	0.70	0.05	18.93
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.31	15.54	1.7	1.20	0.03	15.53
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.53	16.52	36.05	0.20	55.2	17.44
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	2.00	7.38	0.20	0.34	1.97
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	0.15	1.15	2.16	-	<0.01	2.02
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.31	2.41	0.21	-	<0.01	0.66
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	2.88	4.26	1.09	1.50	0.01	2.07
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	-	0.49	1.44	-	43.12	4.45
แคลเซียมออกไซด์อิสระ	1.00	1.71	-	-	-	0.17

#### 4.1.2 สมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตา

##### 4.1.2.1 ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำ

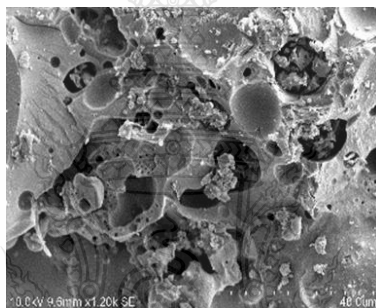
ตารางที่ 4.3 แสดงความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

#### ตารางที่ 4.3 ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา

รายการ	ความถ่วงจำเพาะ	ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (ร้อยละ)
เถ้าก้นเตา	1.76	27

##### 4.1.2.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตา โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า รูปร่างอนุภาคของเถ้าก้นเตามีลักษณะเป็นเหลี่ยมแต่จะมีโพรงและรูพรุนกระจายไปทั่วอนุภาค



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตา

##### 4.1.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา โดยใช้วิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2

## 4.2 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีต และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

### 4.2.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

#### 4.2.1.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหิน ปูน เมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 พบว่า ค่าการยุบตัว

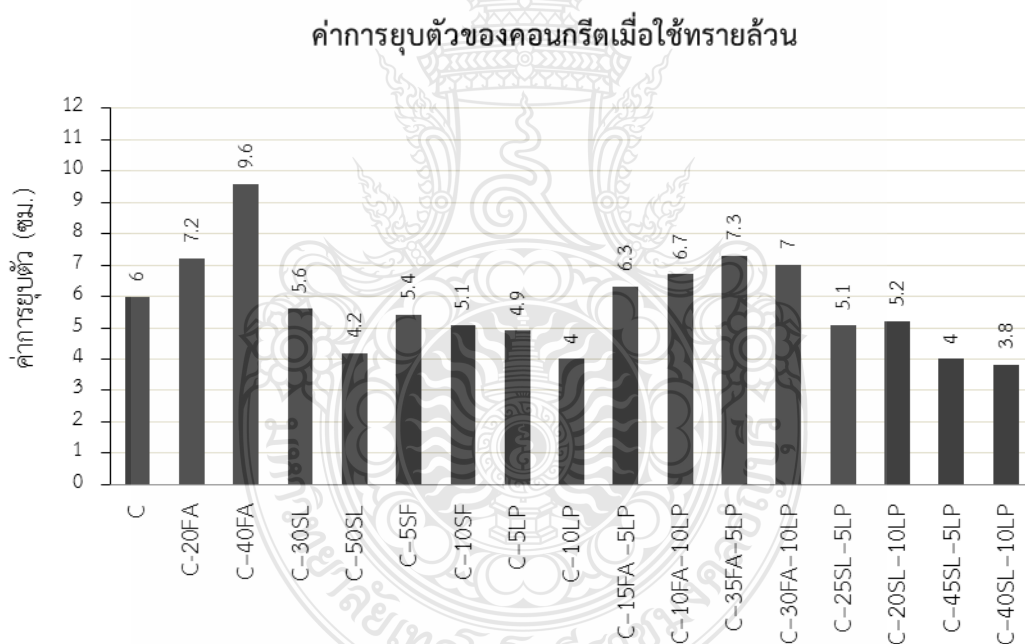
ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคที่กลมของเถ้าลอย ช่วยในการลื่นไหลทำให้ค่าการยุบตัวมากขึ้น ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าความละเอียดของอนุภาคที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมทั้งมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่า (การแทนที่โดยน้ำหนัก) ส่งผลทำให้มีความต้องการน้ำมากกว่า จึงทำให้ค่าการยุบตัวน้อยกว่า ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน พบว่ามีค่าเป็นไปตามการแทนที่เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

ตารางที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ค่าการยุบตัว (ซม.)
1	C	6.0
2	C-20FA	7.2
3	C-40FA	9.6
4	C-30SL	5.6
5	C-50SL	4.2
6	C-5SF	5.4
7	C-10SF	5.1
8	C-5LP	4.9
9	C-10LP	4.0
10	C-15FA-5LP	6.3
11	C-10FA-10LP	6.7

ตารางที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ค่าการยุบตัว (ซม.)
12	C-35FA-5LP	7.3
13	C-30FA-10LP	7.0
14	C-25SL-5LP	5.1
15	C-20SL-10LP	5.2
16	C-45SL-5LP	4.0
17	C-40SL-10LP	3.8



รูปที่ 4.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

#### 4.1.2.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการ

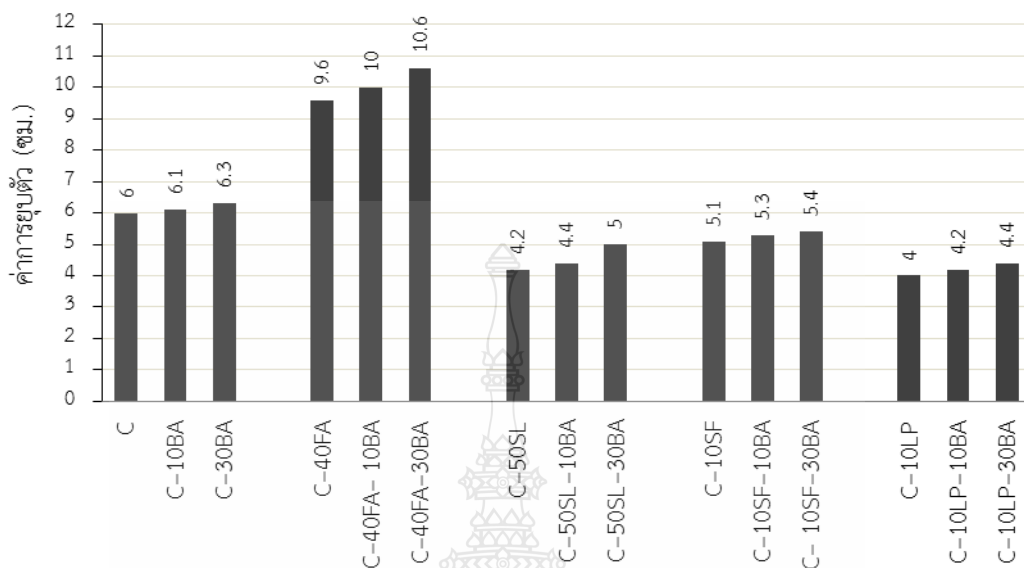


ยูปตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (ทั้งวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่ผสมคอนกรีต หินและทราย อาจเกิดการกระแทกกับเถ้าก้นเตา จนทำให้เถ้าก้นเตาซึ่งเป็นมวลรวมเบาและมีความแข็งแรงต่ำแตก ออกจากกัน ทำให้น้ำที่กักเก็บในเถ้าก้นเตาออกมาเพิ่มเป็นน้ำอิสระในส่วนผสมประกอบด้วยน้ำที่ผิว ของเถ้าก้นเตาซึ่งมีปริมาณที่มาก จึงเป็นการเพิ่มน้ำอิสระอีกส่วนหนึ่ง ส่งผลให้ค่าการยูปตัวมีค่า มากกว่ากับของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน

ตารางที่ 4.5 ค่าการยูปตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ค่าการยูปตัว (ซม.)
1	C	6.0
2	C-10 BA	6.1
3	C-30 BA	6.3
4	C-40FA	9.6
5	C-40FA-10BA	10.0
6	C-40FA-30BA	10.6
7	C-50SL	4.2
8	C-50SL-10BA	4.4
9	C-50SL-30BA	5.0
10	C-10SF	5.1
11	C-10SF-10BA	5.3
12	C-10SF-30BA	5.4
13	C-10LP	4.0
14	C-10LP-10BA	4.2
15	C-10LP-30BA	4.4

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก

#### 4.2.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

##### 4.2.2.1 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

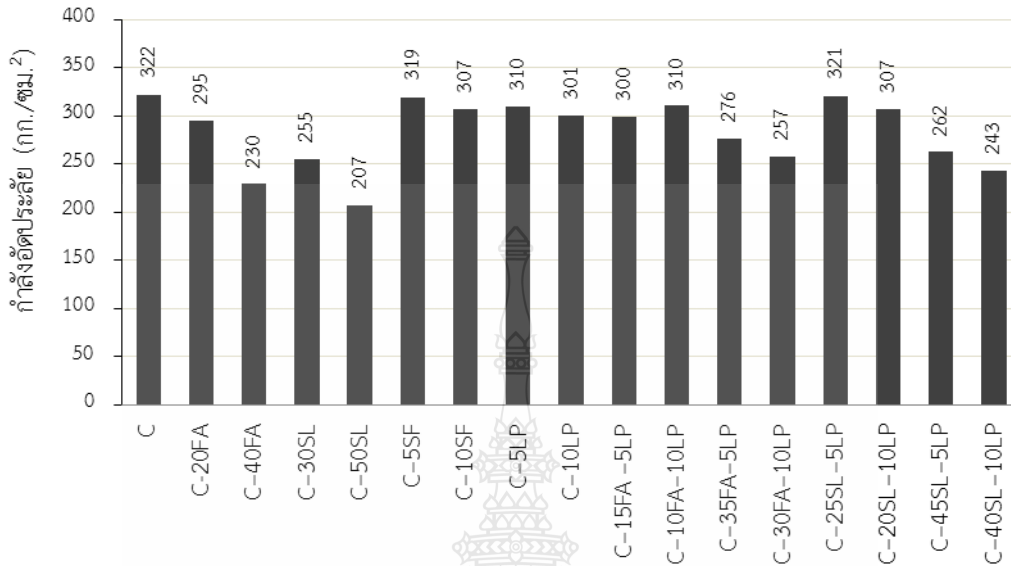
ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะก้นเตาสูงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และตะก้นเตาสูงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ประกอบกับเถ้าลอยและตะก้นเตาสูงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมและผงหินปูน มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้แม้ว่าการแทนที่ซิลิกาฟูม และผงหินปูนเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงก็ตาม แต่อาจเป็นเพราะซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่ละเอียดมาก สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี รวมทั้งสามารถไปเติมเต็มในโพรงทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น

ส่วนผงหินปูนเป็นวัสดุเติมเต็มสามารถไปเติมเต็มให้เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้น ส่วนกำลังอัด  
 ประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผง  
 หินปูน พบว่ามีค่าเป็นไปตามการแทนที่เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผง  
 หินปูน

**ตารางที่ 4.6** กำลังอัดประสิทธิภาพของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน  
 เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	กำลังอัดประสิทธิภาพ (กก./ซม. <sup>2</sup> )
1	C	322
2	C-20FA	295
3	C-40FA	230
4	C-30SL	255
5	C-50SL	207
6	C-5SF	319
7	C-10SF	307
8	C-5LP	310
9	C-10LP	301
10	C-15FA-5LP	300
11	C-10FA-10LP	310
12	C-35FA-5LP	276
13	C-30FA-10LP	257
14	C-25SL-5LP	321
15	C-20SL-10LP	307
16	C-45SL-5LP	262
17	C-40SL-10LP	243

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน  
ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



รูปที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

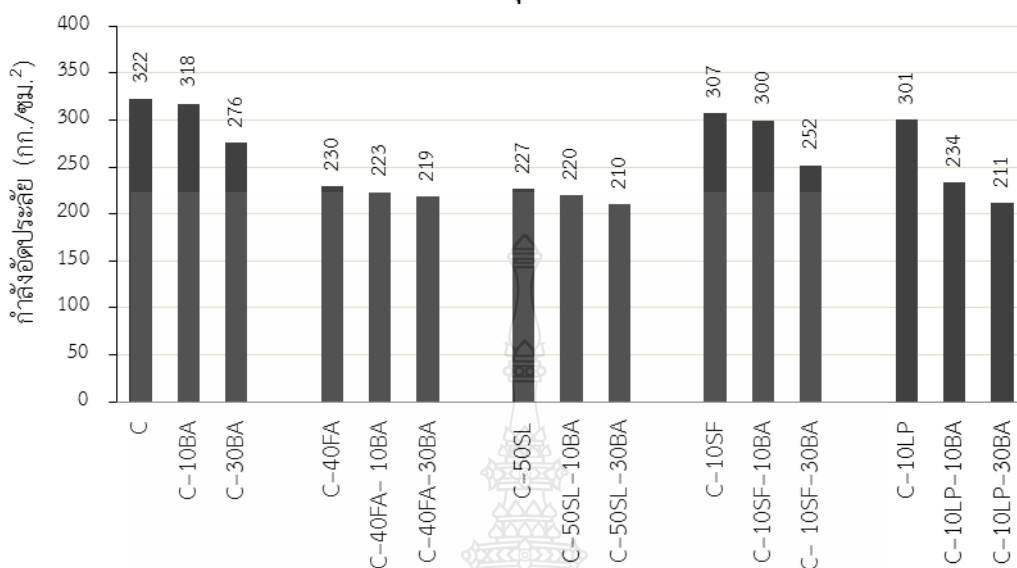
4.2.2.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (ทั้งวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) มีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าต่ำลง

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. <sup>2</sup> )
1	C	322
2	C-10BA	318
3	C-30BA	276
4	C-40FA	230
5	C-40FA-10BA	223
6	C-40FA-30BA	219
7	C-50SL	227
8	C-50SL-10BA	220
9	C-50SL-30BA	210
10	C-10SF	307
11	C-10SF-10BA	300
12	C-10SF-30BA	252
13	C-10LP	301
14	C-10LP-10BA	234
15	C-10LP-30BA	211

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย  
ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



รูปที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

### 4.3 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ (Chloride Binding Capacity) ของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกา ฟูน และผงหินปูน พร้อมทั้งคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยได้บ่มตัวอย่างคอนกรีต 2 วิธี คือ บ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน เมื่อครบอายุการบ่มแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างไปเผชิญคลอไรด์ที่ 28 และ 91 วัน ได้ผลการทดสอบประกอบด้วย ผลของคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride) ได้มาจากผลต่างของคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ และในกรณีอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride Ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ยึดจับต่อคลอไรด์ทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถึง 4.13

ตารางที่ 4.8 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของ  
คอนกรีตทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
1	C	5	6.786	2.831	4.955	0.636	0.668
		15	2.123	0.637	1.486	0.700	
		25	0.637	0.212	0.425	0.667	
		35	0.212	0.000	0.212	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
2	C-20FA	5	9.202	3.539	5.663	0.615	0.608
		15	1.770	0.708	1.062	0.600	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
3	C-40FA	5	9.910	2.831	7.078	0.714	0.714
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
4	C-30SL	5	9.202	3.539	5.663	0.615	0.558
		15	1.416	0.708	0.708	0.500	
		25	1.062	0.000	1.062	1.000	
		35	0.000	0.000	0.000	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
5	C-50SL	5	7.786	2.123	5.663	0.727	0.727
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.354	0.000	0.354	1.000	
		35	0.354	0.000	0.354	1.000	
		45	0.283	0.000	0.283	1.000	

ตารางที่ 4.8 กลอไรด์ทั้งหมด กลอไรด์อิสระ กลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนกลอไรด์ยึดจับของ  
คอนกรีตทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญกลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	กลอไรด์ ทั้งหมด	กลอไรด์ อิสระ	กลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน กลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนกลอ ไรด์ยึดจับ
6	C-5SF	5	7.786	3.539	4.247	0.545	0.548
		15	1.416	0.708	0.708	0.500	
		25	0.354	0.142	0.212	0.600	
		35	0.212	0.071	0.142	0.667	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
7	C-10SF	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.552
		15	3.539	1.416	2.123	0.600	
		25	0.708	0.354	0.354	0.500	
		35	0.212	0.071	0.142	0.667	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
8	C-5LP	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.611
		15	2.123	0.708	1.416	0.667	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
9	C-10LP	5	8.494	3.539	4.955	0.583	0.592
		15	3.539	1.416	2.123	0.600	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.708	0.000	0.708	1.000	
10	C-15FA-5LP	5	7.078	2.123	4.955	0.700	0.600
		15	0.708	0.354	0.354	0.500	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	

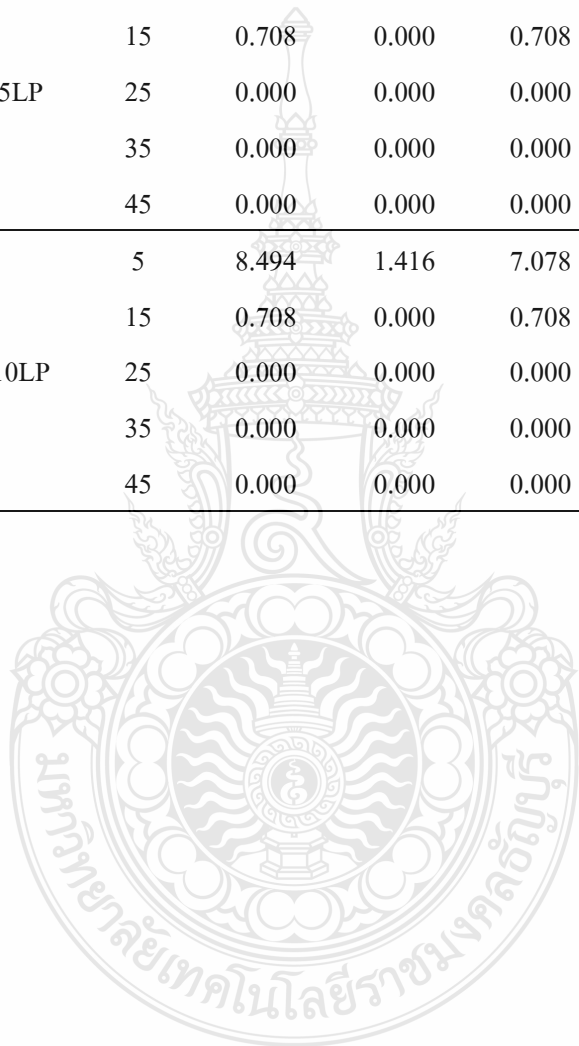


ตารางที่ 4.8 กลอไรด์ทั้งหมด กลอไรด์อิสระ กลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนกลอไรด์ยึดจับของ  
คอนกรีตทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญกลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	กลอไรด์ ทั้งหมด	กลอไรด์ อิสระ	กลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน กลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนกลอ ไรด์ยึดจับ
11	C-10FA-10LP	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.526
		15	2.123	1.416	0.708	0.333	
		25	1.416	0.000	1.416	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
12	C-35FA-5LP	5	9.910	3.539	6.370	0.643	0.643
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.566	0.000	0.566	1.000	
		35	0.354	0.000	0.354	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
13	C-30FA-10LP	5	7.078	2.831	4.247	0.600	0.600
		15	0.708	0.708	0.000	0.000	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.708	0.000	0.708	1.000	
14	C-25SL-5LP	5	10.617	3.539	7.078	0.667	0.667
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
15	C-20SL-10LP	5	7.786	3.539	4.247	0.545	0.682
		15	0.708	0.354	0.354	0.500	
		25	0.566	0.000	0.566	1.000	
		35	0.354	0.000	0.354	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	

ตารางที่ 4.8 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของ  
คอนกรีตทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
16	C-45SL-5LP	5	10.617	2.123	8.494	0.800	0.800
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.000	0.000	0.000	1.000	
		35	0.000	0.000	0.000	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
17	C-40SL-10LP	5	8.494	1.416	7.078	0.833	0.833
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.000	0.000	0.000	1.000	
		35	0.000	0.000	0.000	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	



ตารางที่ 4.9 กลอไรต์ทั้งหมด กลอไรต์อิสระ กลอไรต์ยึดจับ และอัตราส่วนกลอไรต์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เฝ้ากันแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญกลอไรต์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	กลอไรต์ทั้งหมด	กลอไรต์อิสระ	กลอไรต์ยึดจับ	อัตราส่วนกลอไรต์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนกลอไรต์ยึดจับ
1	C	5	7.786	2.831	4.955	0.636	0.668
		15	2.123	0.637	1.486	0.700	
		25	0.637	0.212	0.425	0.667	
		35	0.212	0.000	0.212	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
2	C-10BA	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.519
		15	4.247	2.123	2.123	0.500	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	1.416	0.708	0.708	0.500	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	
3	C-30BA	5	7.078	4.247	2.831	0.400	0.433
		15	5.663	2.831	2.831	0.500	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
4	C-40FA	5	9.91	2.83	7.078	0.714	0.905
		15	0.71	0.00	0.708	1.000	
		25	0.71	0.00	0.708	1.000	
		35	0.71	0.00	0.708	1.000	
		45	0.35	0.00	0.354	1.000	
5	C-40FA-10BA	5	5.663	2.831	2.831	0.500	0.533
		15	2.831	1.416	1.416	0.500	
		25	3.539	1.416	2.123	0.600	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	

ตารางที่ 4.9 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เสี้ยนแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
6	C-40FA-30BA	5	7.078	3.539	3.539	0.500	0.467
		15	3.539	2.123	1.416		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.123	0.708	1.416	0.667	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
7	C-50SL	5	7.79	2.12	5.663	0.727	0.909
		15	0.71	0.00	0.708	1.000	
		25	0.35	0.00	0.354	1.000	
		35	0.35	0.00	0.354	1.000	
		45	0.28	0.00	0.283	1.000	
8	C-50SL-10BA	5	4.247	2.123	2.123	0.500	0.533
		15	3.539	1.416	2.123	0.600	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	1.416	0.708	0.708	0.500	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	
9	C-50SL-30BA	5	3.539	2.123	1.416	0.400	0.522
		15	2.831	1.416	1.416	0.500	
		25	2.123	0.708	1.416	0.667	
		35	0.708	0.212	0.495	0.700	
		45	0.708	0.000	0.708	1.000	
10	C-10SF	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.552
		15	3.539	1.416	2.123	0.600	
		25	0.708	0.354	0.354	0.500	
		35	0.212	0.071	0.142	0.667	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	

ตารางที่ 4.9 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
11	C-10SF-10BA	5	13.449	7.786	5.663	0.421	0.481
		15	5.663	3.539	2.123	0.375	
		25	4.955	2.831	2.123	0.429	
		35	4.247	2.123	2.123	0.500	
		45	3.539	0.000	3.539	1.000	
12	C-10SF-30BA	5	10.617	7.078	3.539	0.333	0.429
		15	4.955	2.831	2.123	0.429	
		25	4.247	2.123	2.123	0.500	
		35	3.539	1.416	2.123	0.600	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
13	C-10LP	5	8.49	3.54	4.955	0.583	0.728
		15	3.54	1.42	2.123	0.600	
		25	0.71	0.00	0.708	1.000	
		35	0.71	0.00	0.708	1.000	
		45	0.71	0.00	0.708	1.000	
14	C-10LP-10BA	5	10.617	7.078	3.539	0.333	0.500
		15	4.955	2.831	2.123	0.429	
		25	4.247	2.123	2.123	0.500	
		35	3.539	1.416	2.123	0.600	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
15	C-10LP-30BA	5	12.033	2.831	9.202	0.765	0.555
		15	4.247	2.123	2.123	0.500	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	

ตารางที่ 4.10 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เสี้ยนแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
1	C-10BA	5	8.069	4.955	3.114	0.386	0.438
		15	4.955	2.831	2.123	0.429	
		25	4.247	2.123	2.123	0.500	
		35	2.123	1.416	0.708	0.333	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	
2	C-30BA	5	8.494	4.955	3.539	0.417	0.394
		15	4.247	3.539	0.708	0.167	
		25	3.539	1.416	2.123	0.600	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	0.708	0.000	0.708	1.000	
3	C-40FA-10BA	5	7.786	5.663	2.123	0.273	0.481
		15	4.955	2.123	2.831	0.571	
		25	3.539	1.416	2.123	0.600	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
4	C-40FA-30BA	5	8.494	4.955	3.539	0.417	0.415
		15	4.955	2.831	2.123	0.429	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
5	C-50SL-10BA	5	7.786	5.663	2.123	0.273	0.285
		15	2.831	2.123	0.708	0.250	
		25	2.123	1.416	0.708	0.333	
		35	1.416	0.708	0.708	0.500	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	

ตารางที่ 4.10 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่  
ใช้เต้ากันแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
6	C-50SL-30BA	5	6.370	4.955	1.416	0.222	0.307
		15	3.539	2.831	0.708	0.200	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.123	0.708	1.416	0.667	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
7	C-10SF-10BA	5	6.370	3.539	2.831	0.444	0.565
		15	4.247	2.123	2.123	0.500	
		25	2.831	0.708	2.123	0.750	
		35	2.123	0.708	1.416	0.667	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
8	C-10SF-30BA	5	5.663	2.831	2.831	0.500	0.467
		15	3.539	2.123	1.416	0.400	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	
9	C-10LP-10BA	5	5.663	2.831	2.831	0.500	0.467
		15	3.539	2.123	1.416	0.400	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	1.416	0.000	1.416	1.000	
10	C-10LP-30BA	5	6.370	4.247	2.123	0.333	0.340
		15	4.955	3.539	1.416	0.286	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	

ตารางที่ 4.11 คลอยไรด์ทั้งหมด คลอยไรด์อิสระ คลอยไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอยไรด์ยึดจับของคอนกรีต  
ทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอยไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอยไรด์ ทั้งหมด	คลอยไรด์ อิสระ	คลอยไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอยไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอย ไรด์ยึดจับ
1	C	5	17.696	8.494	9.202	0.520	0.573
		15	12.033	6.370	5.663	0.471	
		25	7.786	2.123	5.663	0.727	
		35	5.663	0.354	5.309	0.938	
		45	4.247	0.000	4.247	1.000	
2	C-20FA	5	14.157	4.955	9.202	0.650	0.658
		15	2.123	0.708	1.416	0.667	
		25	1.416	0.000	1.416	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
3	C-40FA	5	10.617	2.831	7.786	0.733	0.733
		15	1.416	0.000	1.416	1.000	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
4	C-30SL	5	11.325	4.247	7.078	0.625	0.625
		15	1.416	0.000	1.416	1.000	
		25	0.708	0.071	0.637	0.900	
		35	0.495	0.000	0.495	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
5	C-50SL	5	9.202	2.831	6.370	0.692	0.692
		15	2.123	0.000	2.123	1.000	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.354	0.000	0.354	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	



ตารางที่ 4.11 คลอปไรด์ทั้งหมด คลอปไรด์อิสระ คลอปไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอปไรด์ยึดจับของคอนกรีต  
ทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอปไรด์ 91 วัน (ต่อ)

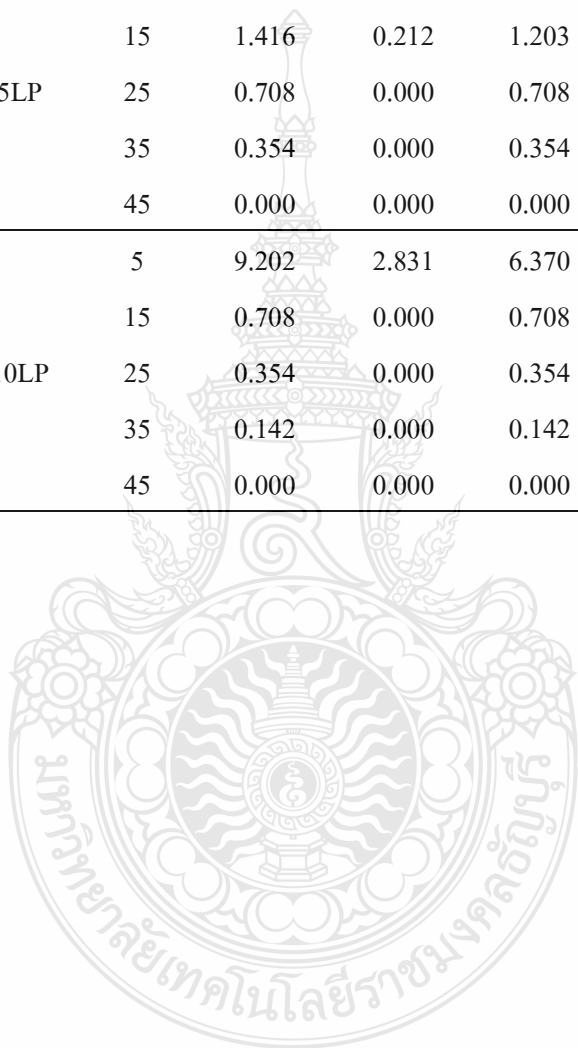
ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอปไรด์ ทั้งหมด	คลอปไรด์ อิสระ	คลอปไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอปไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอป ไรด์ยึดจับ
6	C-5SF	5	16.280	7.786	8.494	0.522	0.556
		15	7.786	3.539	4.247	0.545	
		25	6.370	2.831	3.539	0.556	
		35	4.247	2.123	2.123	0.500	
		45	3.539	0.000	3.539	1.000	
7	C-10SF	5	14.864	7.078	7.786	0.524	0.572
		15	6.370	2.831	3.539	0.556	
		25	4.955	2.123	2.831	0.571	
		35	4.247	0.708	3.539	0.833	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
8	C-5LP	5	12.033	4.247	7.786	0.647	0.647
		15	6.831	0.708	6.123	0.896	
		25	2.507	0.000	2.507	1.000	
		35	2.208	0.000	2.208	1.000	
		45	0.708	0.000	0.708	1.000	
9	C-10LP	5	13.325	4.247	9.078	0.681	0.681
		15	7.651	0.708	6.943	0.907	
		25	3.416	0.000	3.416	1.000	
		35	3.008	0.000	3.008	1.000	
		45	1.354	0.000	1.354	1.000	
10	C-15FA-5LP	5	7.786	3.539	4.247	0.545	0.606
		15	2.123	0.708	1.416	0.667	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.566	0.000	0.566	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	

ตารางที่ 4.11 คลอปไรด์ทั้งหมด คลอปไรด์อิสระ คลอปไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอปไรด์ยึดจับของคอนกรีต  
ทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอปไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอปไรด์ ทั้งหมด	คลอปไรด์ อิสระ	คลอปไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอปไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอป ไรด์ยึดจับ
11	C-10FA-10LP	5	13.449	6.370	7.078	0.526	0.600
		15	2.831	1.416	1.416	0.500	
		25	1.416	0.708	0.708	0.500	
		35	0.708	0.000	0.708	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	
12	C-35FA-5LP	5	12.387	4.247	8.140	0.657	0.657
		15	1.416	0.708	0.708	0.500	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.354	0.000	0.354	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
13	C-30FA-10LP	5	9.910	3.539	6.370	0.643	0.643
		15	1.416	0.708	0.708	0.500	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.283	0.000	0.283	1.000	
		45	0.142	0.000	0.142	1.000	
14	C-25SL-5LP	5	12.033	3.539	8.494	0.706	0.706
		15	1.416	0.000	1.416	1.000	
		25	0.071	0.000	0.071	1.000	
		35	0.212	0.000	0.212	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
15	C-20SL-10LP	5	13.449	4.247	9.202	0.684	0.717
		15	1.416	0.354	1.062	0.750	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.566	0.000	0.566	1.000	
		45	0.354	0.000	0.354	1.000	

ตารางที่ 4.11 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีต  
ทรายล้วน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
16	C-45SL-5LP	5	10.971	2.831	8.140	0.742	0.850
		15	1.416	0.212	1.203	0.850	
		25	0.708	0.000	0.708	1.000	
		35	0.354	0.000	0.354	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	
17	C-40SL-10LP	5	9.202	2.831	6.370	0.692	0.846
		15	0.708	0.000	0.708	1.000	
		25	0.354	0.000	0.354	1.000	
		35	0.142	0.000	0.142	1.000	
		45	0.000	0.000	0.000	1.000	



ตารางที่ 4.12 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เสี้ยนแทนที่ทราย โดยตัวอย่างบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว ( มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
1	C	5	17.696	8.494	9.202	0.520	0.573
		15	12.033	6.370	5.663	0.471	
		25	7.786	2.123	5.663	0.727	
		35	5.663	0.354	5.309	0.938	
		45	4.247	0.000	4.247	1.000	
2	C-10BA	5	14.157	7.786	6.370	0.450	0.465
		15	6.370	3.539	2.831	0.444	
		25	5.663	2.831	2.831	0.500	
		35	3.539	2.123	1.416	0.400	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
3	C-30BA	5	15.572	8.494	7.078	0.455	0.421
		15	7.786	4.955	2.831	0.364	
		25	6.370	3.539	2.831	0.444	
		35	5.663	2.831	2.831	0.500	
		45	4.955	0.000	4.955	1.000	
4	C-40FA	5	10.62	2.83	7.786	0.733	0.733
		15	1.42	0.00	1.416	1.000	
		25	0.71	0.00	0.708	1.000	
		35	0.71	0.00	0.708	1.000	
		45	0.35	0.00	0.354	1.000	
5	C-40FA-10BA	5	6.370	3.539	2.831	0.444	0.500
		15	4.955	2.831	2.123	0.429	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	

ตารางที่ 4.12 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เสี้ยนแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
6	C-40FA-30BA	5	6.370	3.539	2.831	0.444	0.448
		15	4.247	2.123	2.123	0.500	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
7	C-50SL	5	9.20	2.83	6.370	0.692	0.692
		15	2.12	0.00	2.123	1.000	
		25	0.71	0.00	0.708	1.000	
		35	0.35	0.00	0.354	1.000	
		45	0.00	0.00	0.000	1.000	
8	C-50SL-10BA	5	3.539	2.123	1.416	0.400	0.433
		15	3.539	2.123	1.416	0.400	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.123	0.708	1.416	0.667	
		45	2.123	0.708	1.416	0.667	
9	C-50SL-30BA	5	4.247	2.123	2.123	0.500	0.467
		15	3.539	2.123	1.416	0.400	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
10	C-10SF	5	14.86	7.08	7.786	0.524	0.550
		15	6.37	2.83	3.539	0.556	
		25	4.95	2.12	2.831	0.571	
		35	4.25	0.71	3.539	0.833	
		45	2.83	0.00	2.831	1.000	

ตารางที่ 4.12 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เสี้ยนแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
11	C-10SF-10BA	5	16.280	10.617	5.663	0.348	0.404
		15	7.786	4.955	2.831	0.364	
		25	7.078	3.539	3.539	0.500	
		35	7.078	3.539	3.539	0.500	
		45	6.370	0.000	6.370	1.000	
12	C-10SF-30BA	5	19.111	9.910	9.202	0.481	0.421
		15	11.325	3.539	7.786	0.688	
		25	7.078	2.123	4.955	0.700	
		35	5.663	2.831	2.831	0.500	
		45	4.247	0.000	4.247	1.000	
13	C-10LP	5	13.325	4.247	9.078	0.681	0.794
		15	7.651	0.708	6.943	0.907	
		25	3.416	0.000	3.416	1.000	
		35	3.008	0.000	3.008	1.000	
		45	1.354	0.000	1.354	1.000	
14	C-10LP-10BA	5	20.527	11.325	9.202	0.448	0.448
		15	10.617	4.955	5.663	0.533	
		25	9.202	4.247	4.955	0.538	
		35	5.663	3.539	2.123	0.375	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
15	C-10LP-30BA	5	20.527	12.741	7.786	0.379	0.400
		15	10.617	6.370	4.247	0.400	
		25	9.910	4.247	5.663	0.571	
		35	7.786	3.539	4.247	0.545	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	

ตารางที่ 4.13 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เสี้ยนแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
1	C-10BA	5	9.202	4.247	4.955	0.538	0.479
		15	7.078	3.539	3.539	0.500	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
2	C-30BA	5	12.033	4.955	7.078	0.588	0.545
		15	7.786	3.539	4.247	0.545	
		25	4.247	2.123	2.123	0.500	
		35	3.539	1.416	2.123	0.600	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
3	C-40FA-10BA	5	10.617	6.370	4.247	0.400	0.378
		15	4.247	2.831	1.416	0.333	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
4	C-40FA-30BA	5	9.202	5.663	3.539	0.385	0.428
		15	5.663	2.831	2.831	0.500	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
5	C-50SL-10BA	5	9.202	5.663	3.539	0.385	0.462
		15	2.831	1.416	1.416	0.500	
		25	2.831	1.416	1.416	0.500	
		35	2.123	0.708	1.416	0.667	
		45	1.416	0.708	0.708	0.500	

ตารางที่ 4.13 คลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระ คลอไรด์ยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เต้ากันแทนที่ทราย โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน แล้วเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะ จากผิว (มม.)	คลอไรด์ ทั้งหมด	คลอไรด์ อิสระ	คลอไรด์ ยึดจับ	อัตราส่วน คลอไรด์ ยึดจับ	เฉลี่ยอัตรา ส่วนคลอ ไรด์ยึดจับ
6	C-50SL-30BA	5	8.494	6.370	2.123	0.250	0.350
		15	3.539	2.123	1.416	0.400	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	
7	C-10SF-10BA	5	7.786	4.247	3.539	0.455	0.396
		15	4.247	2.831	1.416	0.333	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
8	C-10SF-30BA	5	7.786	4.247	3.539	0.455	0.396
		15	4.247	2.831	1.416	0.333	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	3.539	1.416	2.123	0.600	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
9	C-10LP-10BA	5	7.786	4.955	2.831	0.364	0.350
		15	4.955	3.539	1.416	0.286	
		25	3.539	2.123	1.416	0.400	
		35	2.831	1.416	1.416	0.500	
		45	2.123	0.000	2.123	1.000	
10	C-10LP-30BA	5	9.910	4.955	4.955	0.500	0.461
		15	7.786	4.247	3.539	0.455	
		25	4.955	2.831	2.123	0.429	
		35	3.539	2.123	1.416	0.400	
		45	2.831	0.000	2.831	1.000	



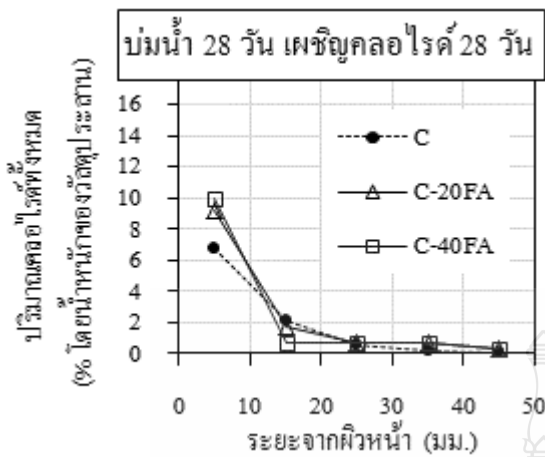
#### 4.3.1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ในการพิจารณาผลของการศึกษาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คือ 1) ผลกระทบจากชนิดของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย และ 3) ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

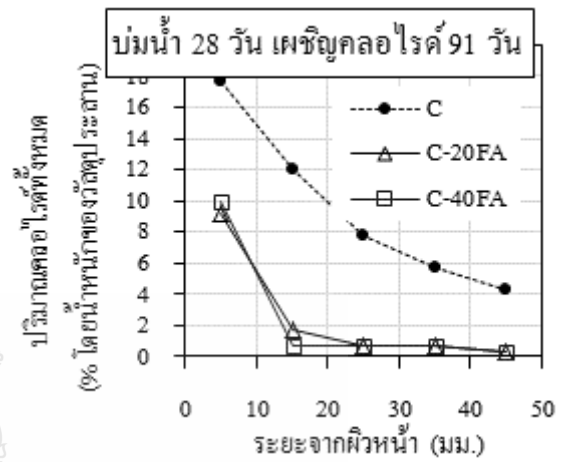
##### 4.3.1.1 ผลกระทบจากชนิดของวัสดุประสาน

###### 1) กรณี 2 วัสดุประสาน

รูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยคอนกรีตใช้ทรายล้วน พบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน (รูปที่ 4.7 ก)) ส่วนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน มีค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่วัสดุประสานดังกล่าวในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม รวมทั้งในส่วนของวัสดุดังกล่าว (โดยเฉพาะอนุภาคที่มีความละเอียดค่อนข้างมาก) ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำหน้าที่ช่วยในการเติมเต็ม เช่นเดียวกับกรณีของผงหินปูนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเติมเต็ม ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น จึงทำให้คลอไรด์เข้าซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น

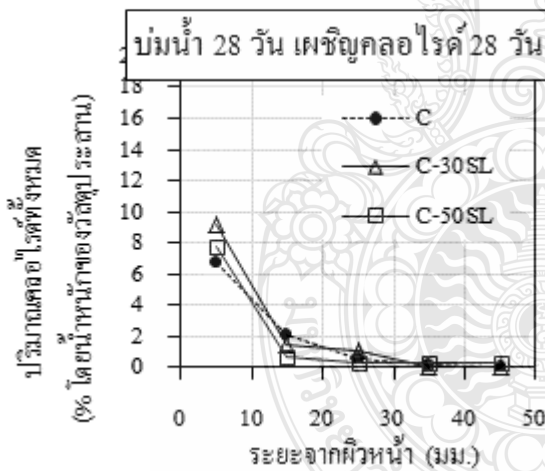


ก) ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 28 วัน

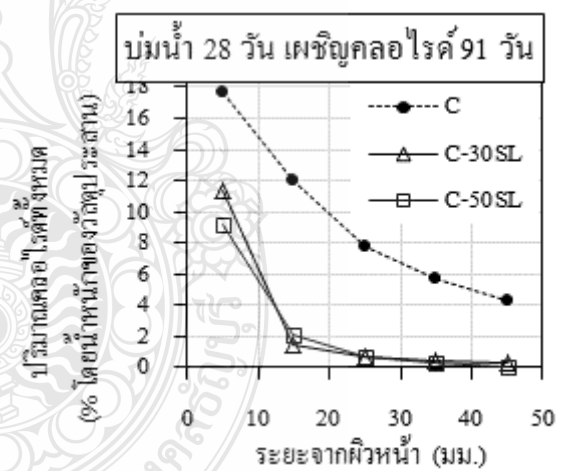


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 91 วัน

**รูปที่ 4.7** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอรีน 28 และ 91 วัน

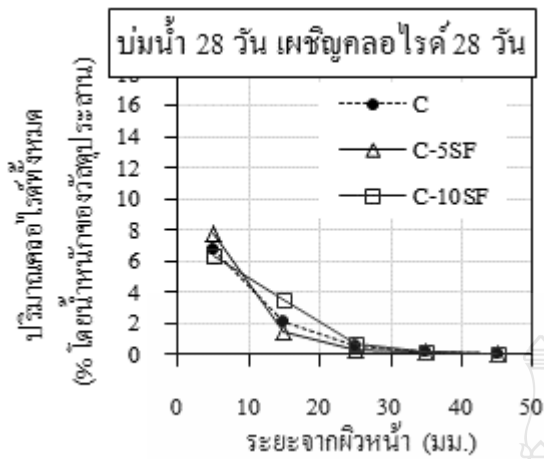


ก) ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 28 วัน

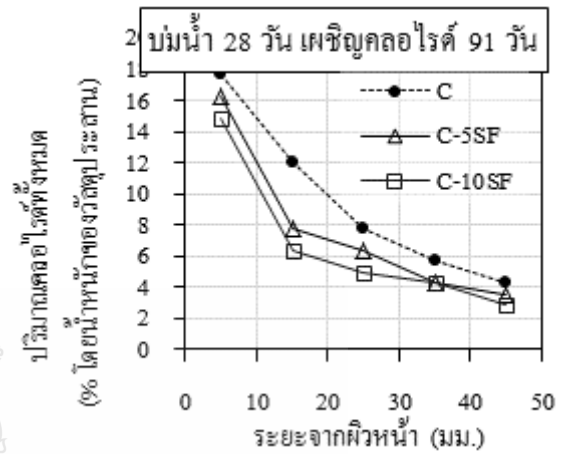


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอรีน 91 วัน

**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอรีน 28 และ 91 วัน

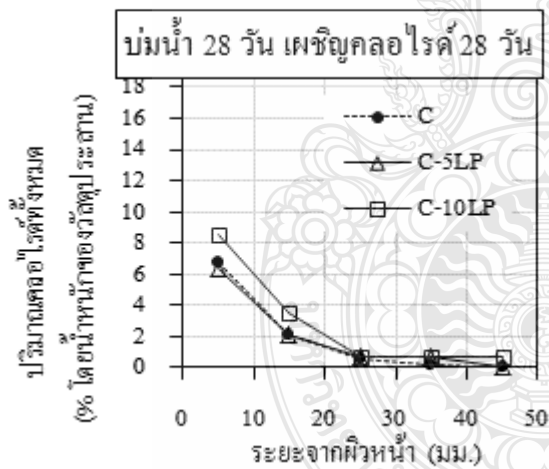


ก) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

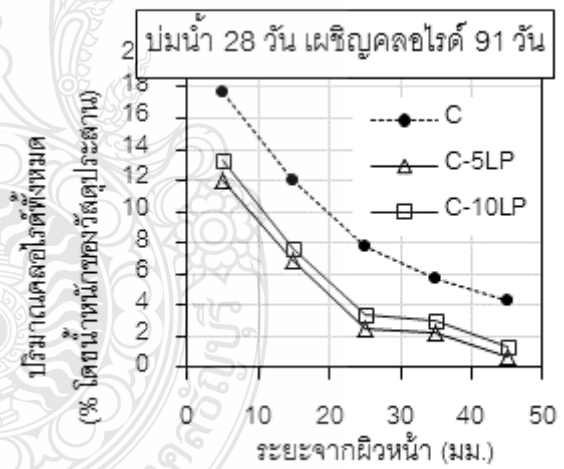


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมซัลโฟนาลูม เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน



ก) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

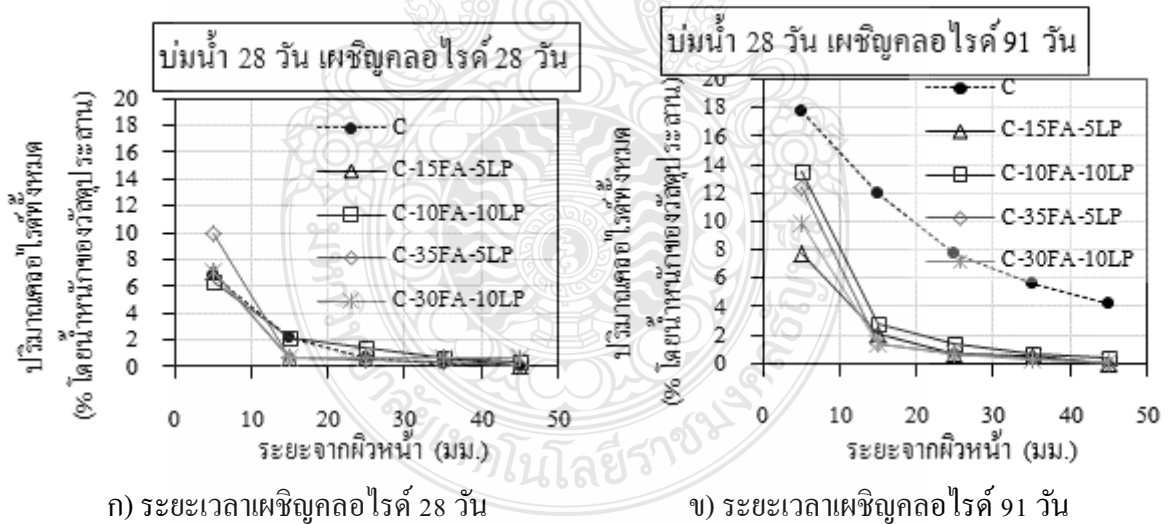


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

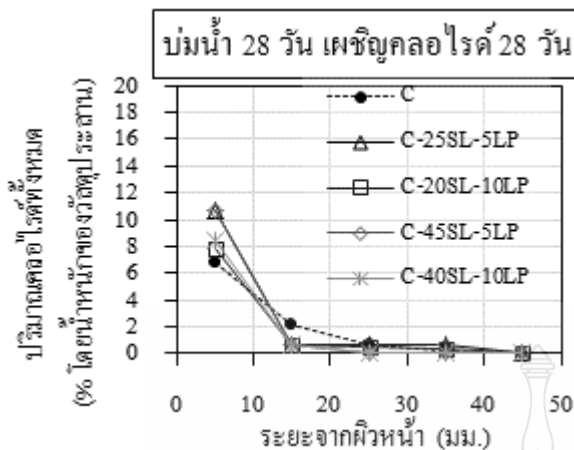
**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

1) กรณี 3 วัสดุประสาน

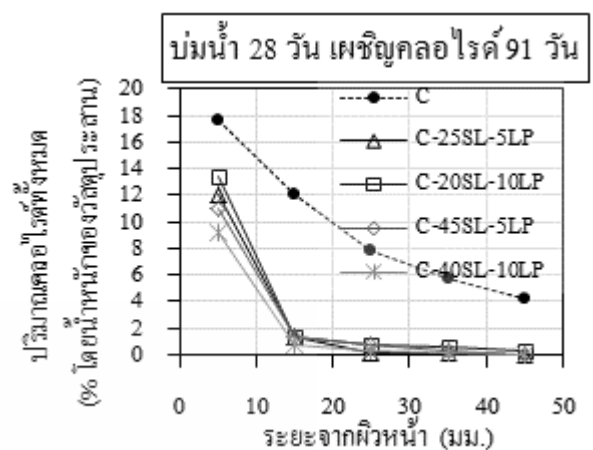
รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผง ซึ่งเป็นกรณี 3 วัสดุประสาน โดยคอนกรีตใช้ทรายล้วน พบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน และของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เช่นเดียวกับกรณี 2 วัสดุประสาน ส่วนที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน และของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผง มีค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว กล่าวคือการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม รวมทั้งในส่วนของวัสดุดังกล่าว (โดยเฉพาะอนุภาคที่มีความละเอียดค่อนข้างมาก) ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำหน้าที่ช่วยในการเติมเต็ม เช่นเดียวกับกรณีของผงหินปูนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเติมเต็ม ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น จึงทำให้คลอไรด์เข้าซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกับผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน



ก) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

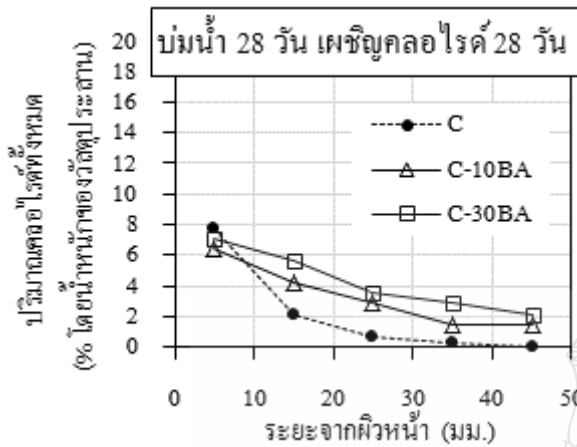


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

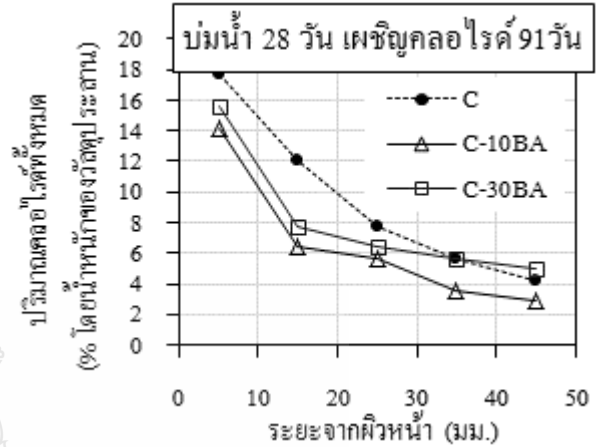
**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

#### 4.3.1.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

รูปที่ 4.13 ถึง 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีต ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่า ทั้งที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน และ 91 วันนั้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าก้นเตามีความพรุนที่มากกว่าทรายทำให้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มากกว่า อย่างไรก็ตามยกเว้นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วันน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน (รูปที่ 4.13 ข) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเวลานานขึ้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายนั่น อนุภาคส่วนที่มีความละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานรวมทั้งบางส่วนช่วยในการเติมเต็ม ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น ส่งผลให้คลอไรด์ทั้งหมดเข้าไปได้น้อย

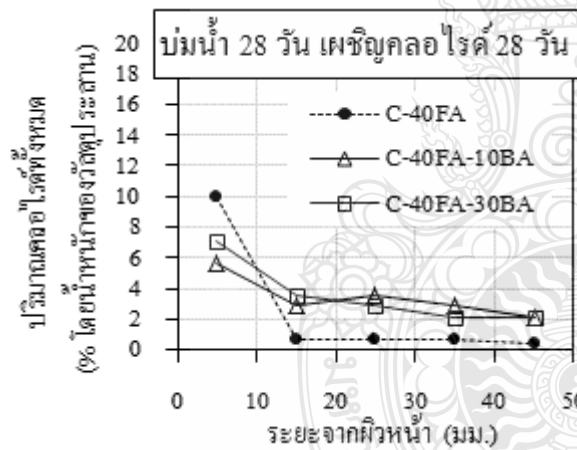


ก) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

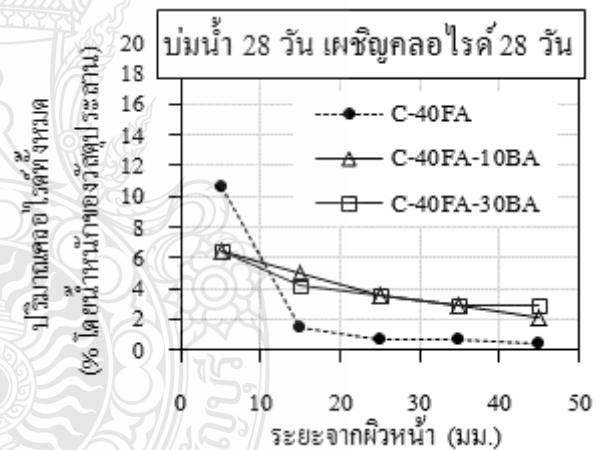


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

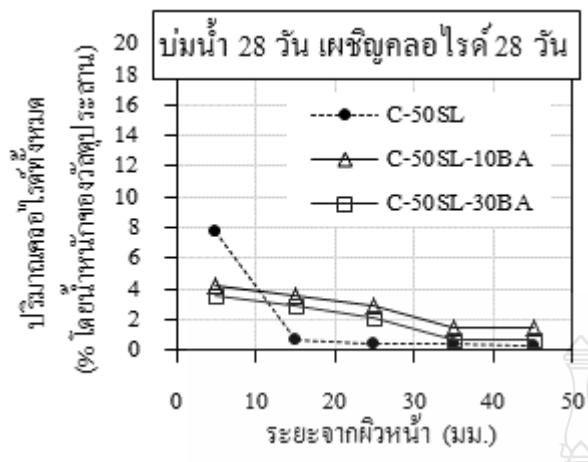


ก) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

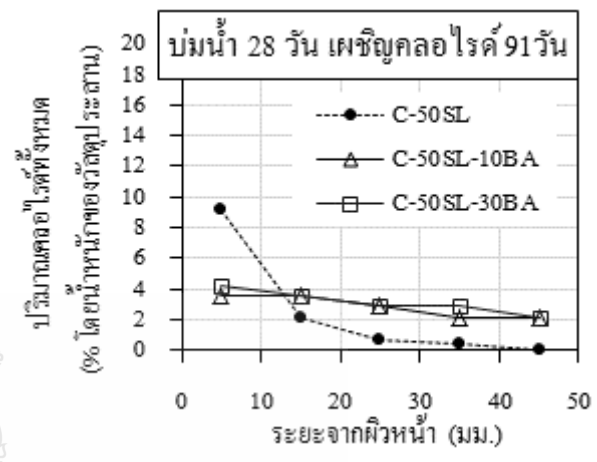


ข) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตผสมถ้ำลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

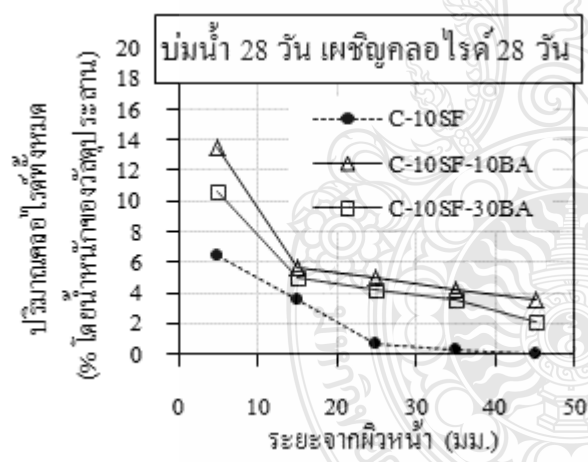


ก) ระยะเวลาเหี่ยวคลอไรต์ 28 วัน

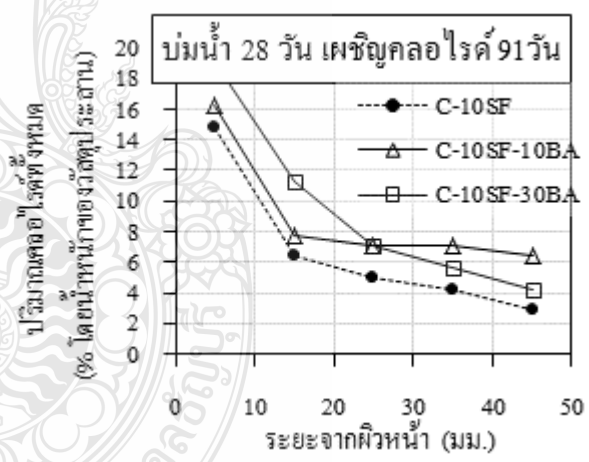


ข) ระยะเวลาเหี่ยวคลอไรต์ 91 วัน

**รูปที่ 4.15** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรต์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเหี่ยวคลอไรต์ 28 และ 91 วัน

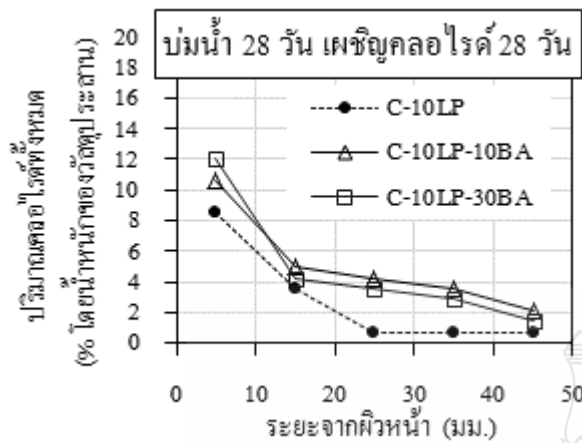


ก) ระยะเวลาเหี่ยวคลอไรต์ 28 วัน

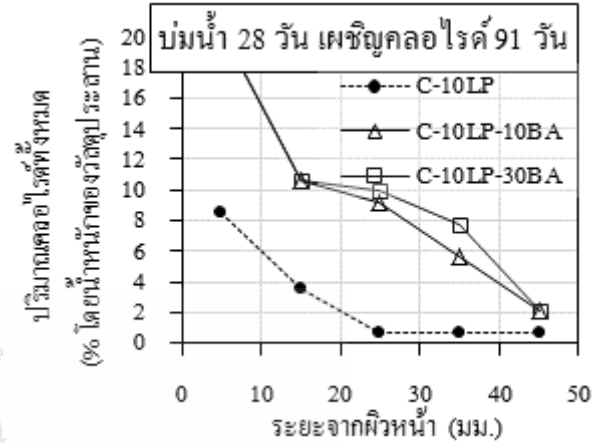


ข) ระยะเวลาเหี่ยวคลอไรต์ 91 วัน

**รูปที่ 4.16** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรต์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตผสมซีเมนต์กาฟูมร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเหี่ยวคลอไรต์ 28 และ 91 วัน



ก) ระยะเวลาแช่โคลไรด์ 28 วัน



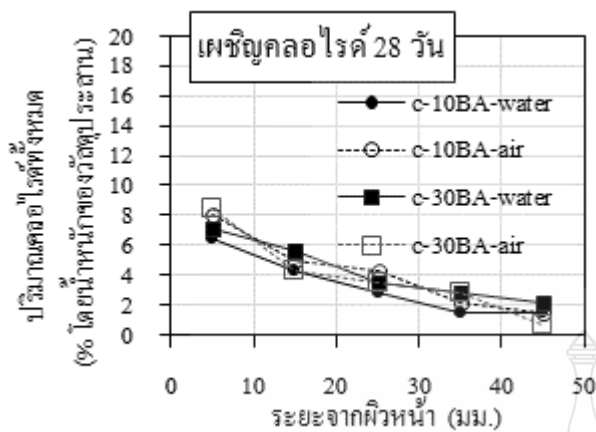
ข) ระยะเวลาแช่โคลไรด์ 91 วัน

**รูปที่ 4.17** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาแช่โคลไรด์ 28 และ 91 วัน

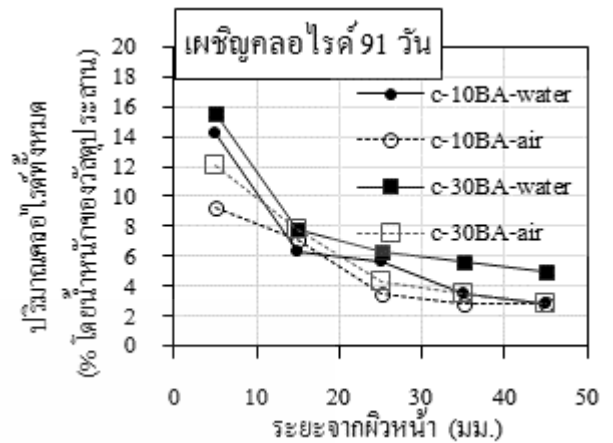
#### 4.3.1.3 ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม

รูปที่ 4.18 ถึง 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาแช่โคลไรด์ 28 และ 91 วัน พบว่าที่ระยะเวลาแช่โคลไรด์ 28 วัน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตกรณีบ่มน้ำมีค่าไม่แตกต่างกับของกรณีบ่มอากาศ ส่วนที่ระยะเวลาแช่โคลไรด์ 91 วัน พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (คอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย) ของคอนกรีตกรณีบ่มอากาศมีแนวโน้มน้อยกว่าของกรณีบ่มน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้ากั้นเตาซึ่งมีความพรุนดังนั้นเมื่อคอนกรีตบ่มน้ำส่งผลให้น้ำอยู่มากซึ่งทำให้คลอไรด์สามารถซึมผ่านโดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา จึงทำให้คลอไรด์เข้าซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มากขึ้น



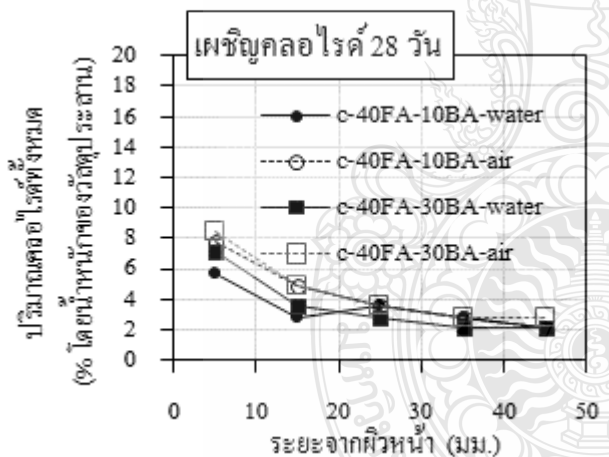


ก) ระยะเวลาเพชฌัญโคลไรต์ 28 วัน

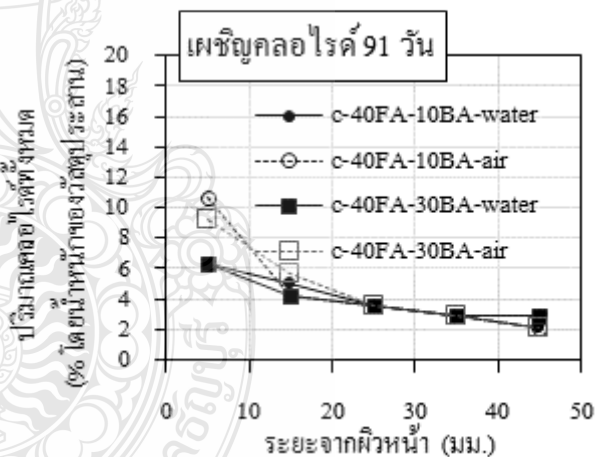


ข) ระยะเวลาเพชฌัญโคลไรต์ 91 วัน

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลไรต์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เมื่อใช้เต้ากันเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเพชฌัญโคลไรต์ 28 และ 91 วัน

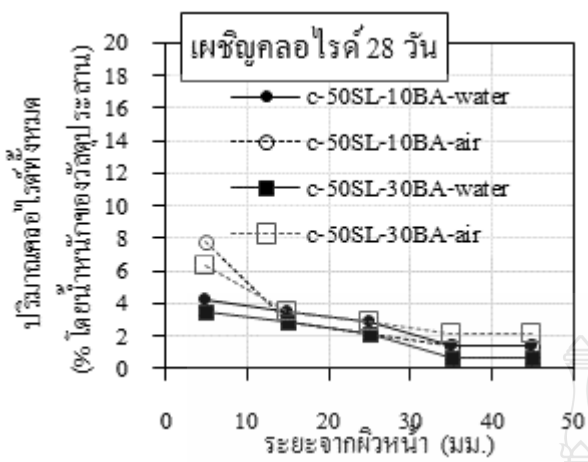


ก) ระยะเวลาเพชฌัญโคลไรต์ 28 วัน

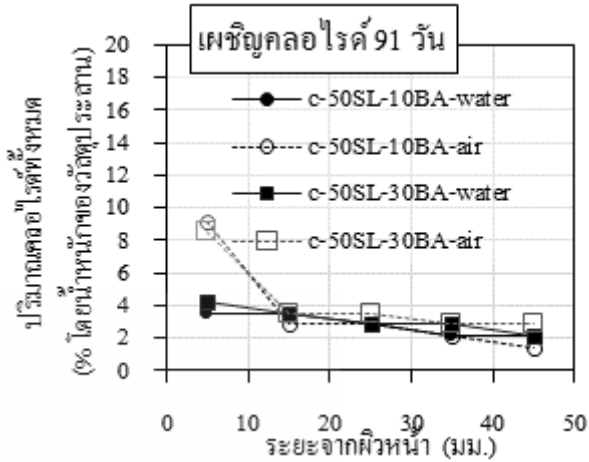


ข) ระยะเวลาเพชฌัญโคลไรต์ 91 วัน

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลไรต์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตผสมถ้ำลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้เต้ากันเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเพชฌัญโคลไรต์ 28 และ 91 วัน

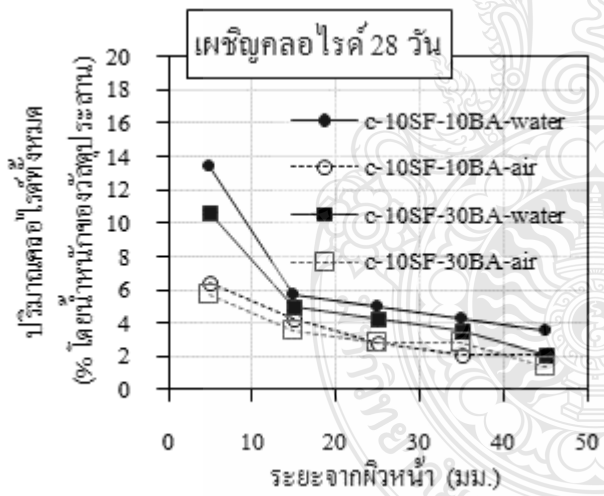


ก) ระยะเวลาเพชฌัญญุคผลไโรค้ 28 วัน

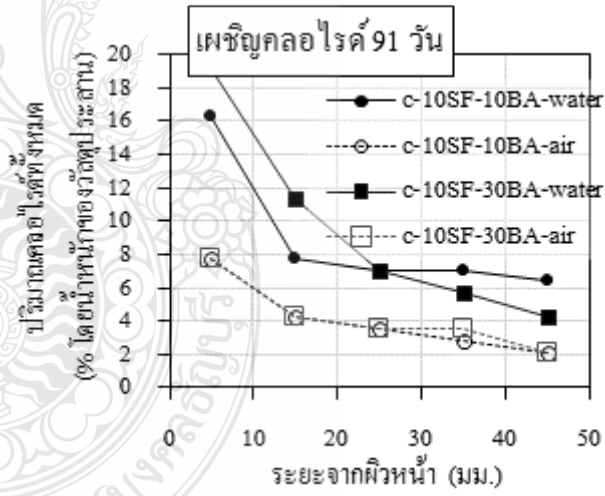


ข) ระยะเวลาเพชฌัญญุคผลไโรค้ 91 วัน

**รูปที่ 4.20** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอโรไค้ทั้งหมดกับระยะความลึกจากคิวนกริตของคอนกรีตผสมเถ้ากันตาบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้เถ้ากันตาแทนที่ทราย กรณีสบมน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเพชฌัญญุคผลไโรค้ 28 วัน และ 91 วัน

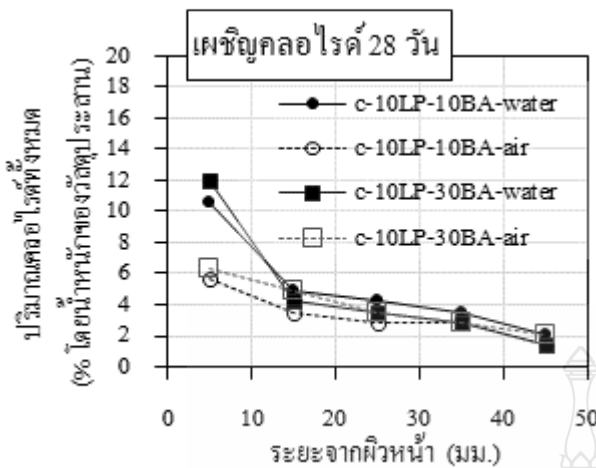


ก) ระยะเวลาเพชฌัญญุคผลไโรค้ 28 วัน

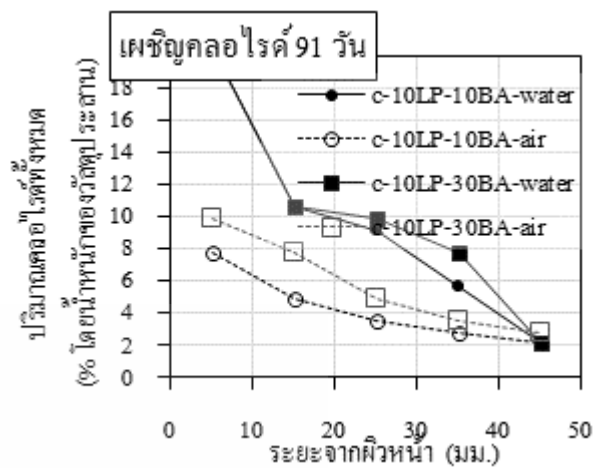


ข) ระยะเวลาเพชฌัญญุคผลไโรค้ 91 วัน

**รูปที่ 4.21** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอโรไค้ทั้งหมดกับระยะความลึกจากคิวนกริตของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 เมื่อใช้เถ้ากันตาแทนที่ทราย กรณีสบมน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเพชฌัญญุคผลไโรค้ 28 และ 91 วัน



ก) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน



ข) ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

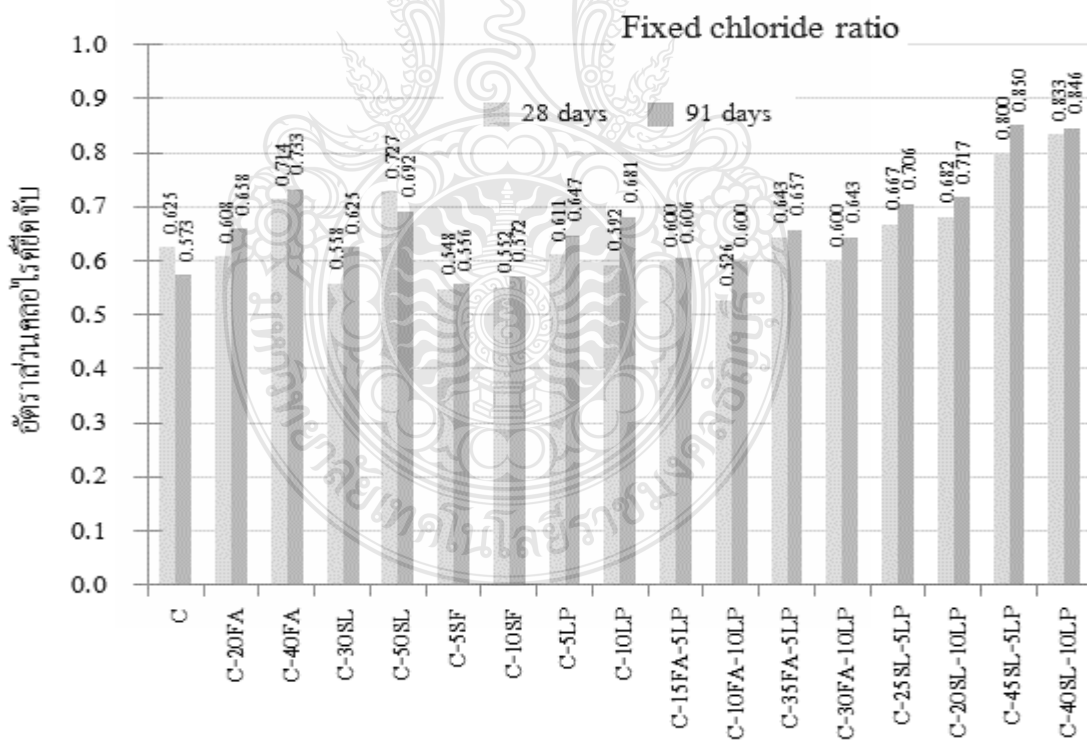
#### 4.3.2 อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ

อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride Ratio) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ยึดจับต่อคลอไรด์ทั้งหมด สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ในการพิจารณาผลของการศึกษาอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คือ 1) ผลกระทบจากชนิดของวัสดุประสาน และ 2) ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.3.2.1 ผลกระทบจากชนิดของวัสดุประสาน

รูปที่ 4.23 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน พบว่าที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ 28 วันนั้น อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มไม่แตกต่างจากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ 91 วัน พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก

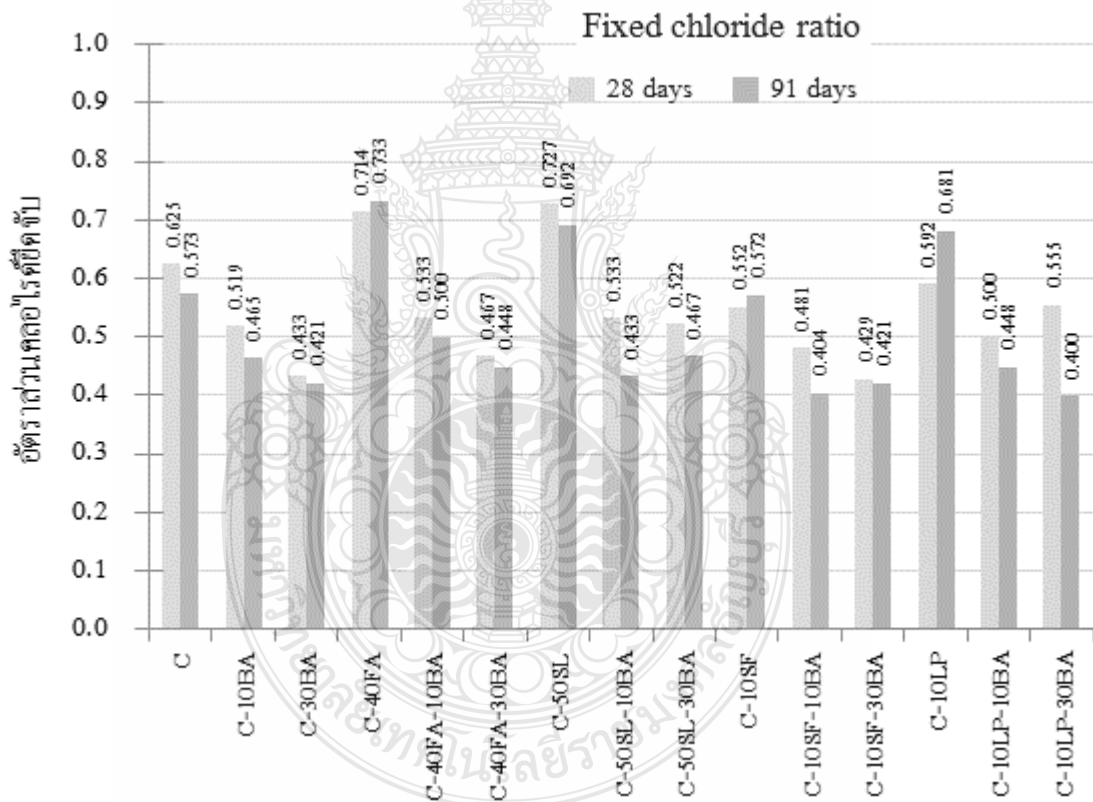
บดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนนี้ อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน (CSH และ CAH) ของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม รวมทั้งอนุภาคในส่วนที่ละเอียดของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน และอนุภาคของผงหินปูน ช่วยยึดจับคลอไรด์ (ยึดจับทางกายภาพ) ส่งผลให้สามารถยึดจับคลอไรด์ได้มากขึ้น นอกจากนี้พบว่า ที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วันนั้น อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน ทั้งนี้ อาจเป็นไปได้เพราะเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ไม่ว่าจะเป็นไฮเดรชันหรือปอซโซลาน) ของคอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้ยึดจับคลอไรด์ได้มากขึ้น ยกเว้นอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน กลับมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเมื่ออายุตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันมีน้อย ส่งผลให้ยึดจับคลอไรด์ได้น้อยลง



รูปที่ 4.23 อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

#### 4.3.2.2 ผลกระทบจากการใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย

รูปที่ 4.24 แสดงอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนและใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน ที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน พบว่า อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่นานขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคุณสมบัติของถั่วกั้นเตามีความพรุน มีความแข็งแรงน้อยกว่าทราย ทำให้มีผลต่อกำลังและความทึบคอนกรีต ส่งผลต่อการซึมผ่านและยึดจับของคลอไรด์ทำให้การยึดจับคลอไรด์ของถั่วกั้นเตาน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน



รูปที่ 4.24 อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตเมื่อใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ในทราย กรณีบ่มน้ำ 28 วัน แล้วระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

สำหรับการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) กรณีคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนนั้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกรณีคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายนั้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน

2) กรณีคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนนั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกรณีคอนกรีตใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายนั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน

3) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์น้อย (28 วัน) นั้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น (91 วัน) นั้น ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าที่น้อยกว่าและมากกว่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

4) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน ในขณะที่อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน

## บรรณานุกรม

- [1] คม บัวคลี่ และ บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, “การผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย,” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2546, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 103-108.
- [2] Lane, R.O. and Best, J.F., “Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete,” **Concrete International : Design & Construction**, Vol. 4, No 7 (1982) : pp 81 - 92.
- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย. 2556.
- [4] American Concrete Institute, “ACI 234R-96 : Guide for the Use of Silica Fume in Concrete,” **ACI Manual of Concrete Practice**, Part 1, Michigan, 2000.
- [5] กฤติยา แก้วมณี และ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, “ผลกระทบคุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>),” วารสารคอนกรีต, ฉบับที่ 2 (2007).
- [6] Andrade, L. B., Rocha, J. C. and Cheriaf, M., “Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete,” **Construction and Building Materials**, vol. 23, (2009) : pp 609-614.
- [7] Kaewmanee K. and Tangtermsirikul S., “Use of bottom ash as a fine aggregate replacing material in concrete,” **Annual Concrete Conference**, 2<sup>nd</sup>. (2006) : pp 104-108.
- [8] Mahdi V., Farhad P., Mohammad S., Sara K. and Masoud M., “metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. Construction and Building Materials,” in **Situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite**, 2013 : pp 63-70.
- [9] อุดมพร กุลมงคล, ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2556.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, “ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3 (2554) : หน้า 522-531.
- [11] Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C., “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis.” **Materials and Design**, Vol. 31, (2010) : pp 1242-1249.
- [12] Ann K.Y., Ahn J.H., Ryou J.S., “The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures.” **Construction and building Materials**, Vol. 23, (2009) : pp 239-245.
- [13] Song H – W, Hong C and Ann K Y., “Factors influencing chloride transport in concrete Structure exposed to marine environment.” **Cement & Concrete Composites**, Vol. 30, (2008) : pp 113-121.
- [14] วิเชียร ชาลี, “สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล.” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 34-26 ตุลาคม 2550, หน้า 103 – 109.
- [15] Dhir R. K., Jones M.R., “Development of chloride – resisting concrete using fly ash.” **Fuel**, Vol. 78, (1999) : pp 137-142.
- [16] American Society for Testing and Materials, “ASTM C618-00. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete,” **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, 2001. pp 310-313.
- [17] กระทรวงอุตสาหกรรม, “กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต,” มาตรฐาน มอก.2135-2545 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546, หน้า 3.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] สหลาก หอมวุฒิวังค์, ดิลก กุรัตนเวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, “การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้านหิน,” การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้านหินในประเทศไทยมาใช้ในการคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [19] American Concrete Institute, “ACI 233R-96 : Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete,” **ACI Manual of Concrete Practice**, Part 1, Michigan, 2000.
- [20] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, **ความคงทนของคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.
- [21] Shamasd A., “Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction,” **Cement & concrete composites**, Vol. 25, (2003) : pp 459-474.
- [22] นายวิเชียร ชาลี, การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี **Bulk diffusion test**. รายงานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2557.
- [23] Chalee, W., and Jaturapitakkul, C., “Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment.” **Materials and Structures**, Vol. 42, (2009) : pp 505 -514.
- [24] Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D., “Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results.” **Cement and Concrete Composites**, Vol. 26, (1), (2004) : pp 5-20.
- [25] Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S., “A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete.” **Construction and Building Materials**, Vol. 21, (6), (2007) : pp 1322-1334.



ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายนรา รักษาพล
วัน เดือน ปี เกิด	7 เมษายน 2517
ที่อยู่	136 หมู่ 6 ถนนทางหลวงระยอง สาย 3191 ตำบลมาบข่า อำเภอเนินขมพัฒนา จังหวัดระยอง 21180
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี 2545
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2542 – 2556 ตำแหน่งครู วิทยาลัยเทคนิคชุมพร พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน ตำแหน่งครู วิทยาลัยเทคนิคบ้านค่าย

