

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และโครงสร้างโพรงของซีเมนต์ผสมเถ้าลอย  
(Chloride binding capacity and pore structure of cement paste with fly ash)

โดย

ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา

01 75852

- 1 ก.ย. 2558

357163

มิถุนายน 2558

AG0110429

เริ่มมาจึ...

สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

29 ส.ค. 2559

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยจากระยอง (เถ้าลอย BLCP Hunter และเถ้าลอย BLCP Hunter Malavan) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.40 และ 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 ทำการแช่ตัวอย่างในน้ำเปล่าเป็นเวลา 28 และ 91 วัน จากนั้นไปแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5.0% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 91 วัน แล้วนำไปกดบีบเอาสารละลายภายในโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ออกมาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ และศึกษาโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 ทำการแช่ตัวอย่างในน้ำเปล่าเป็นเวลา 28 และ 91 วัน แล้วนำตัวอย่างมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างและปริมาตรความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 และอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 ทำการบ่มในน้ำเปล่าเป็นเวลา 28 และ 91 วัน

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ลดลง และเถ้าลอยที่มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์สูงที่สุด คือ เถ้าลอย BLCP Hunter ในส่วนโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ลดลง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความพรุนทั้งหมดลดลง และเถ้าลอยที่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีขนาดเล็กที่สุดคือเถ้าลอย BLCP Hunter ส่วนกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์พบว่า การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลง และเมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น สุดท้ายจากความสัมพันธ์ของผลการทดลองพบว่า เมื่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความพรุนทั้งหมดลดลง

## ABSTRACT

This research aims to study the chloride binding capacity of cement pastes with Mae Moh fly ash and fly ash from Rayong (BLCP Hunter fly ash and BLCP Hunter Malavan fly ash) and use Portland cement type I as main binder. The water to binder ratio was 0.40 and 0.50. The replacement ratio of fly ash to binder was 0.30 and 0.50. The specimen was cured in water for 28 and 91 days, then submerged in salt water of 5% chloride concentration for 91 days. After that, specimen was pressed in order to get pore solution of cement pastes to determine the chloride content. In addition, pore structure of cement pastes was investigated by Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) method. The water to binder ratio was 0.40 and 0.50. The replacement ratio of fly ash to binder was 0.30 and 0.50. The specimen was cured in water for 28 and 91 days. Then, the average pore diameter and total porosity of cement paste was determined. Moreover, the compressive strength of cement paste with water to binder ratio was 0.40 and 0.50. The replacement ratio of fly ash to binder was 0.30 and 0.50. The specimen was cured in water for 28 and 91 days.

From the experimental results, it was found that longer curing period of cement pastes result in higher chloride binding capacity. When water to binder ratio and fly ash to binder ratio increase, the chloride binding capacity of cement paste decreases. The highest chloride binding capacity of cement pastes is from BLCP Hunter fly ash. For the pore structure of cement pastes, it was found that longer curing period of cement pastes result in lower average pore diameter and total porosity. Cement paste with higher water to binder ratio let in average pore diameter and total porosity. The replacement ratio of fly ash to binder have been increased, average pore diameter and total porosity of cement pastes decreased. The smallest average pore diameter of cement pastes is from BLCP Hunter fly ash. For the compressive strength of cement paste, it was found that the water to binder ratio and the replacement ratio of fly ash to binder is increased, the compressive strength decrease. Furthermore, when the curing period is longer, the compressive strength of cement paste increases. Finally, from the relationship of results, it was showed that when the compressive strength increases, the chloride binding capacity increases and the average pore diameter and total porosity decrease.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฅ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยคลอไรด์	4
2.2 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต	6
2.3 ความเสี่ยงของการกัดกร่อนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต	7
2.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต	10
2.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การแทรกซึมของคลอไรด์	13
2.6 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์	15
2.7 โครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต	16
2.7.1 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)	17
2.7.2 Brunauer Emmett and Teller (BET)	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง	25
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 วิธีทำการทดลอง	36
3.3.1 การทดลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี MIP	38
3.3.3 การทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี BET	40
3.3.4 การทดลองกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	44
4.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์	44
4.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์	48
4.2.1 โครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)	48
4.2.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี Brunauer Emmett and Teller (BET)	54
4.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์	54
4.4 ความสัมพันธ์ของผลการทดลอง	60
บทที่ 5 สรุปผล	66
5.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์	66
5.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์	66
5.2.1 โครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)	66
5.2.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี Brunauer Emmett and Teller (BET)	66
5.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์	67
บรรณานุกรม	68

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	กระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล	6
2.2	แผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต	7
2.3	ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต	8
2.4	แบบจำลองโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล	8
2.5	แผนภาพแสดงการดึงตูดแบบคาพิลลารี	11
2.6	แผนภาพแสดงการดึงตูดอออนเข้าไปในคอนกรีต	12
2.7	ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์	14
2.8	ปริมาณของปรอทที่เข้าไปในโพรงขนาดต่าง ๆ	18
2.9	โซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด	19
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	25
3.2	ถ้ำลอยแม่เมาะ (Mae Moh fly ash ,FAMM)	27
3.3	ถ้ำลอยระยอง BLCP Hunter (BLCP Hunter fly ash ,FAH)	27
3.4	ถ้ำลอยระยอง BLCP Hunter Malavan (BLCP Hunter Malavan fly ash ,FAHM)	27
3.5	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซีเมนต์และถ้ำลอย	29
3.6	การกระจายตัวของซีเมนต์และถ้ำลอย	29
3.7	แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบ	30
3.8	ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว	30
3.9	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)	31
3.10	เครื่อง Auto titration และเครื่องกวนแม่เหล็ก	31
3.11	ตู้อบความร้อน	31
3.12	เครื่องกดทำลายขึ้นตัวอย่าง	32
3.13	แบบหล่อตัวอย่างขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร	32
3.14	เครื่องทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโพรงช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี MIP	33
3.15	เพเนโตรมิเตอร์ (Penetrometer)	33
3.16	เครื่องทดสอบขนาดและการกระจายตัวของโพรงช่องว่างด้วยวิธี BET	34
3.17	หลอดทดสอบตัวอย่าง (Tube)	34
3.18	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด	34
3.19	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	35
3.20	ขึ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	36
3.21	การแช่ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	36
3.22	การกดทำลายเพื่อเก็บสารละลายจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ (น้ำภายใน)	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 การชั่งน้ำหนักสารละลายที่จะนำมาไตเตรท	38
3.24 การไตเตรทโดยเครื่อง Auto titration	38
3.25 ชี้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์	39
3.26 ตัวอย่างทดสอบที่แช่ในน้ำประปา	39
3.27 ตัวอย่างทดสอบที่ตัดและผ่านการอบแล้ว	39
3.28 การประกอบเพเนโทรมิเตอร์เข้าเครื่องอัดความดันต่ำ	40
3.29 เพเนโทรมิเตอร์ที่ผ่านการอัดปรอทแล้ว	40
3.30 ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบดและอบแล้ว	41
3.31 การชั่งน้ำหนักหลอดทดสอบและตัวอย่างทดสอบ	41
3.32 การไล่อากาศและความชื้นออกจากหลอดทดลอง (Outgas)	42
3.33 การเติมไนโตรเจนเหลวและติดตั้งหลอดทดสอบ	42
3.34 การหาขนาดและการกระจายตัวของโพรงช่องว่าง	42
3.35 การกดทำลายตัวอย่างเพื่อหาค่าลึงรับแรงอัด	43
4.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เฟสท์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน	45
4.2 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เฟสท์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานแตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน	45
4.3 ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เฟสท์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 91 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน	46
4.4 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เฟสท์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานแตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน	47
4.5 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เฟสท์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 119 และ 182 ตามลำดับ	48
4.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสท์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน	49

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน	50
4.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน	51
4.9 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน	52
4.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน	53
4.11 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน	54
4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และไม่มีการแทนที่วัสดุประสาน ที่อายุ 28 และ 91 วัน	55
4.13 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน	55
4.14 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และไม่มีการแทนที่วัสดุประสาน ที่อายุ 28 และ 91 วัน	56
4.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน	56
4.16 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ระหว่างการทดสอบด้วยวิธี MIP กับการทดสอบด้วยวิธี BET ที่อายุ 28 วัน	57
4.17 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน	58
4.18 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 91 วัน	59
4.19 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91	60
4.20 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	61



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน	61
4.22	ความสัมพันธ์ของความพรุนทั้งหมดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	62
4.23	ความสัมพันธ์ของความพรุนทั้งหมดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน	62
4.24	ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	63
4.25	ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน	63
4.26	ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	64
4.27	ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน	64
4.28	ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน	65
4.29	ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 91 วัน	65

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่างๆ	5
2.2 องค์ประกอบของน้ำทะเล	9
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	26
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly ash)	28
3.3 องค์ประกอบทางกายภาพของเถ้าลอย (Fly ash)	28
3.4 ส่วนผสมตัวอย่างทดสอบ	35

## สารบัญสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	หน่วย	อธิบาย
$C_i(x,t)$	mol/liter	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง $x$ จากผิวด้านนอกที่ ระยะเวลา $t$
$C_f(x,t)$	mol/liter	ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง $x$ จากผิวด้านนอกที่ ระยะเวลา $t$
$D_a$	cm <sup>2</sup> /year	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต
$x$	cm	ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต
$t$	year	ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต
คำย่อ	หน่วย	อธิบาย
FAMM	-	เต้าลอยแม่เมาะ
FAH	-	เต้าลอย BLCP Hunter
FAHM	-	เต้าลอย BLCP Hunter Malavan
MIP	-	Mercury Intrusion Porosimetry
BET	-	Brunauer Emmett and Teller

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตนั้น ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง เป็นต้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว คอนกรีตยังได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา โดยมาจากฝน อากาศและปัจจัยอื่นๆ เมื่อคอนกรีตมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น ก็จะส่งผลทำให้โครงสร้างสูญเสียกำลังต่างๆ ทั้งจากขนาดหน้าตัด รอยแตกร้าวหลุดร่อน จึงทำให้โครงสร้างไม่มีความมั่นคงแข็งแรง และความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีเกลือคลอไรด์มาก เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสโดยตรงกับน้ำทะเล หรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล รวมไปถึงโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เกลือเป็นวัตถุดิบ และในประเทศไทยนั้นก็มีทะเลล้อมรอบอยู่มาก ดังนั้นการศึกษาผลกระทบและแนวทางการป้องกัน การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตจึงมีความสำคัญ และเป็นที่น่าสนใจต่องานทางด้านวิศวกรรมโยธา นอกจากนี้ในปัจจุบัน การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อให้มีความทนทานต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์นั้น ได้มีการใช้วัสดุพอลิไซลาลานมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งจะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ และจะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น

คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตคือ ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ เพราะหากซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์สูง จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เกิดช้าลง ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ก็คือ ความสามารถในการจับคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ให้กลายเป็นคลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) ด้วยกลไกการยึดเหนี่ยวทางกายภาพและทางเคมี โดยคลอไรด์ที่ถูกจับยึดนี้ไม่สามารถจะไปทำอันตรายเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ ทั้งนี้ซีเมนต์เพสต์แต่ละส่วนผสมจะมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ปริมาณวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุการบ่ม และระยะเวลาการเผชิญเกลือคลอไรด์ด้วย เป็นต้น หากซีเมนต์เพสต์ชนิดใดมีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ได้สูงจะส่งผลดีต่อคอนกรีตเสริมเหล็กในการป้องกันปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ เนื่องจากจะลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตให้น้อยลง ทั้งนี้โครงสร้างโพรงภายในซีเมนต์เพสต์ก็มีความสำคัญด้วยเนื่องจากคลอไรด์ที่แพร่เข้าไปในซีเมนต์เพสต์ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างโพรงในซีเมนต์เพสต์นี้ ดังนั้นหากมีความเข้าใจในลักษณะโพรงช่องว่างของซีเมนต์

เพสต์ควมคู่ไปกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ก็จะทำให้สามารถเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เกิดขึ้นช้าลงได้

ดังนั้น จึงมีแนวความคิดในการเพิ่มความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์และลดขนาดโพรงช่องว่างในเพสต์ในเหล็กด้วยการใช้เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) ที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตผสมเสร็จของประเทศไทย โดยเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยการเผาถ่านหินลิกไนต์ ด้วยคุณสมบัติของเถ้าลอยประกอบไปด้วยซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น และด้วยอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่ลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น โดยจะนำมาแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถเก็บกักคลอไรด์และโครงสร้างโพรงของเพสต์ให้ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดต่างๆ
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างโพรงภายในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย การศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride binding capacity) ของซีเมนต์เพสต์ โครงสร้างโพรงช่องว่าง (Pore structure) ของซีเมนต์เพสต์ และกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การศึกษาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ มีส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

1.2 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยระยอง (Rayong fly ash) มีส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยระยองคือ 0.3 และ 0.5 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

2) การศึกษาโครงโพรงช่องว่าง (Pore structure) ของซีเมนต์เพสต์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

2.1 โครงโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ มีส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

2.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยระยอง (Rayong fly ash) มีส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยระยอง คือ 0.3 และ 0.5 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

3) การศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.1 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ มีส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

3.2 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยระยอง (Rayong fly ash) มีส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยระยอง คือ 0.3 และ 0.5 ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วน คือ 0.40 และ 0.50 ตามลำดับ

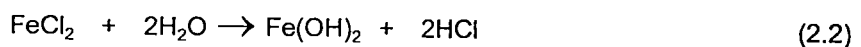
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมและทำให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าวและหลุดออกเป็นเสี่ยงๆ (Delamination) เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมอันเกิดเนื่องจากการก่อตัวของสนิม และเป็นสาเหตุหลักที่ทำลายองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ (Passive film) ที่มีคุณสมบัติเป็นต่างเคลือบผิวเหล็กไว้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมเหล็ก และถ้าคลอไรด์ไอออนสามารถแทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตและสะสมรวมตัวกันที่ผิวเหล็กเสริมจนมีปริมาณมากพอจนถึงจุดคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) จะทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงและฟิล์มนี้ก็จะถูกทำลาย และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอบริเวณที่เหล็กเสริมไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ ทำให้เหล็กเกิดสนิม โดยกระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. ระยะเวลาช่วงแรก (Initial period) คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มหล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงช่วงเวลา queเหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วง นี้ คลอไรด์ไอออนจะเข้ามาสะสมในเนื้อเหล็กจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต และจะไปทำปฏิกิริยากับ  $O_2$  และ  $H_2O$  ที่ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปที่เนื้อเหล็กเสริม



2. ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (Propagation period) คือ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลถูกกัดกร่อนให้มีขนาดหน้าตัดเล็กลงและเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตที่เกิดขึ้นนี้จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ประมาณ 4-6 เท่า ดันให้คอนกรีตที่หุ้มอยู่เกาะเกาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากยิ่งขึ้น เปลือกหุ้มคอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตและทำให้โครงสร้างของอาคารสูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบ ๆ โครงสร้าง

ตารางที่ 2.1 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่างๆ (Shamsad, 2003)

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

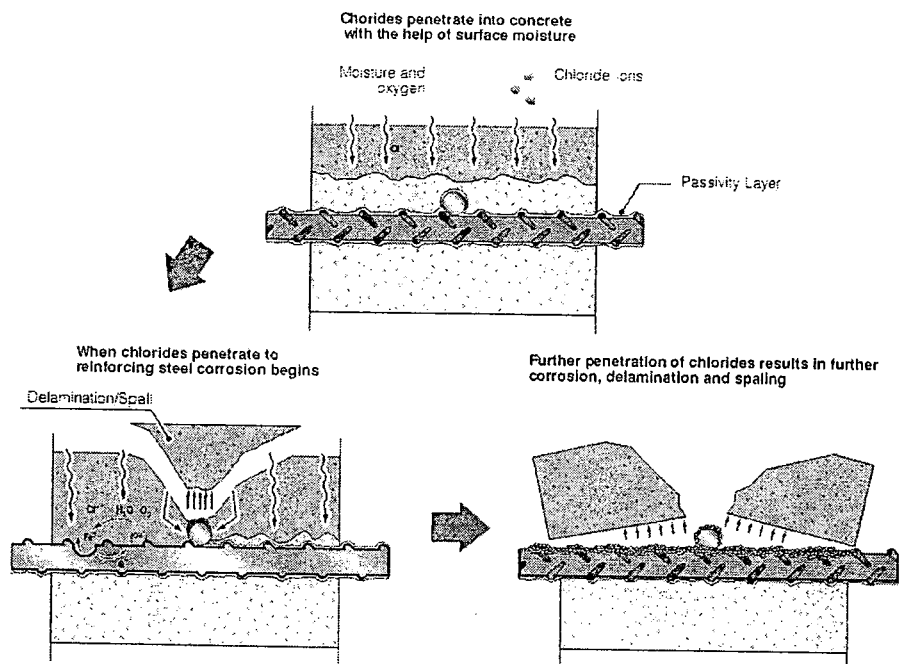
นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ปฏิริยาการบอเนชันยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นเช่นกัน ปฏิริยาการบอเนชันนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิม โดยปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต รวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

Soroka (1993) กล่าวว่า คลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นในน้ำ ดังนั้นจะเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ก็ต่อเมื่อมีน้ำอยู่ในโพรงช่องว่าง กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นทั้งการดูดซึมน้ำแบบคาพิลลารี (Capillary suction) หรือการแพร่อย่างง่ายของไอออนของน้ำในโพรงที่อยู่หนึ่ง ในกรณีแรกจะเกิดกับคอนกรีตที่มีลักษณะค่อนข้างแห้ง น้ำจะพาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต ในกรณีหลังจะเกิดกับคอนกรีตที่อิมตัวหรือค่อนข้างอิมตัว น้ำจะเป็นเสมือนตัวกลางให้คลอไรด์ไอออนแพร่เข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ต้องอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง จะเกิดกลไกขึ้นได้ทั้งสองกรณีซึ่งอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Funahashi M. (1990) กล่าวว่า การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1. Initial period จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบตามผิวเหล็กเสริมเสียหาย โดยมีค่าปริมาณของคลอไรด์ในช่วงตั้งแต่ 0.2 – 1.33 กม/ม<sup>3</sup> หรือตั้งแต่ 75 – 1175 ppm. ของคอนกรีต หลังจากนั้นตามด้วย 2. Propagation period ซึ่งเป็นปฏิริยาทางไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กขึ้นอย่างต่อเนื่อง

สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2543) คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง หรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราาย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt)





รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (ที่มา: CPAC)

## 2.2 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์อิออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆเผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้น เกิดจากผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท ได้แก่

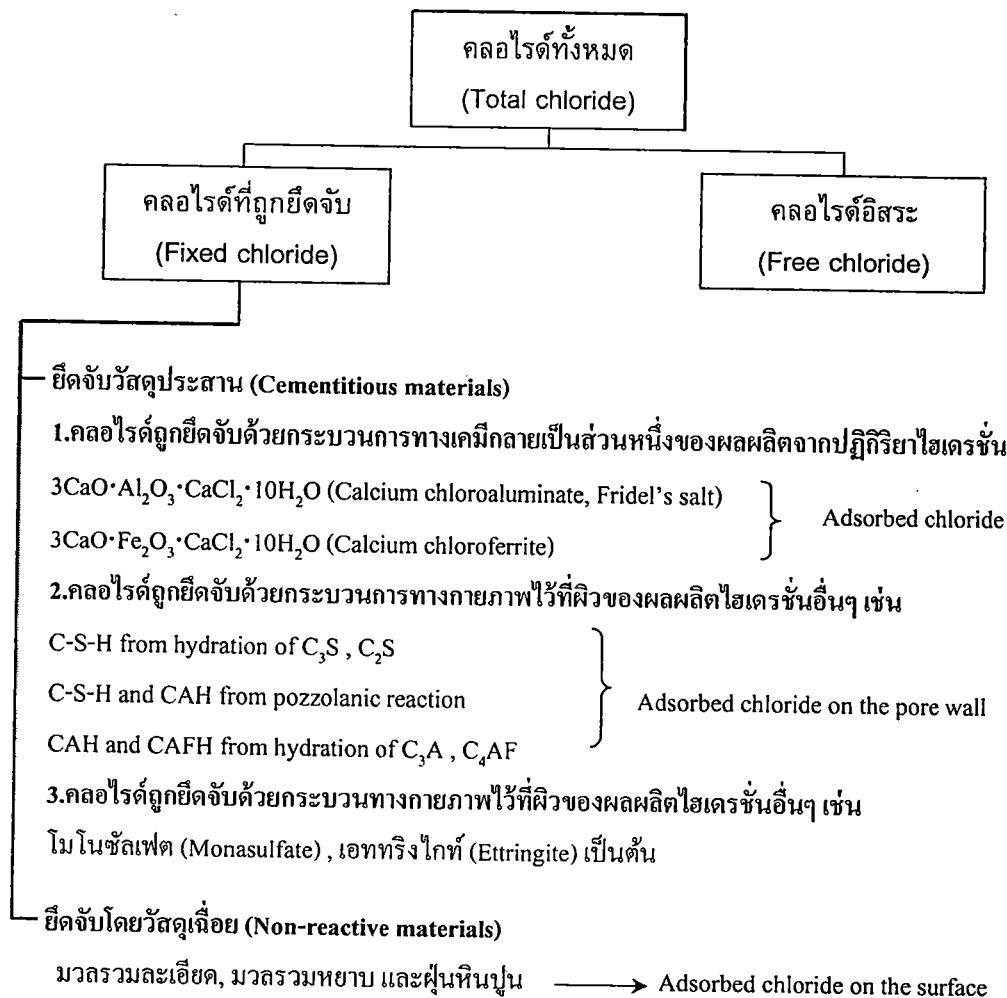
1. คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ในรูปของ  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  (Calcium chloroferrite)

1.2 Physical binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ททราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2. คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กออกไปได้

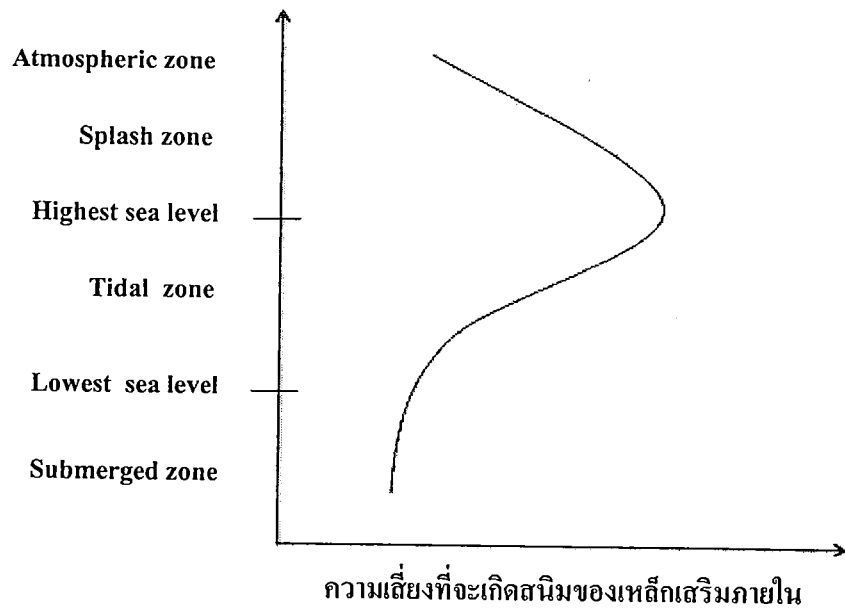
## Types of Chloride in Concrete



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต (ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช)

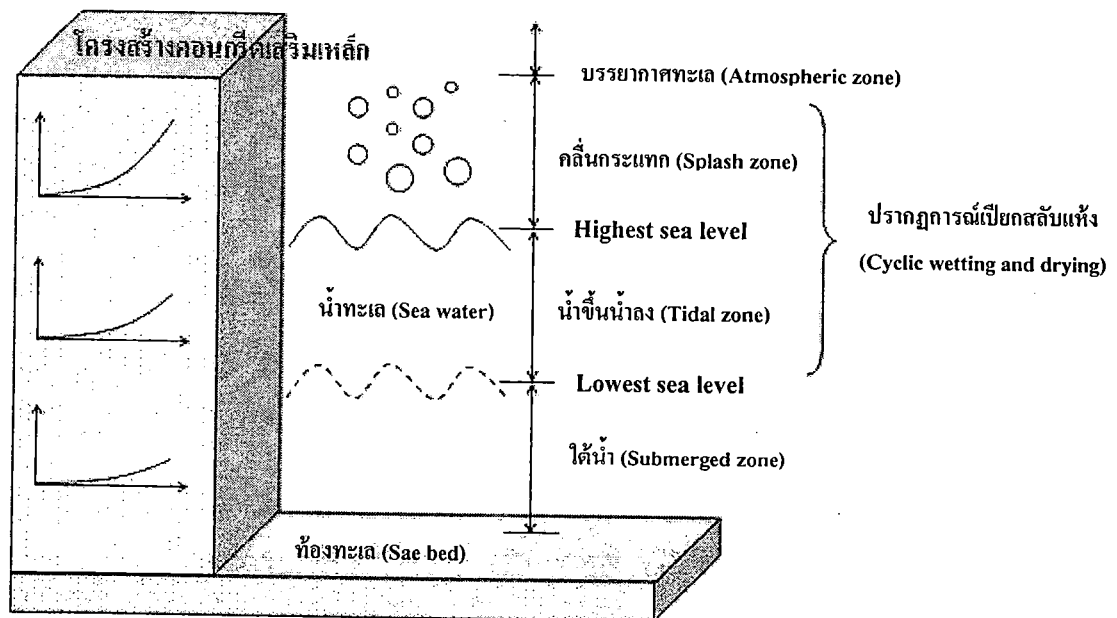
### 2.3 ความเสี่ยงของการกัดกร่อนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีมากที่สุดบริเวณโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมได้น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.3



ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน  
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับน้ำทะเล  
รูปที่ 2.3 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต  
(ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช)

การที่ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อึดอัดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (ที่มา: ทวีชัย สำราญวานิช)

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง น้ำที่ผิวของคอนกรีตจะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์ไอออนที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์ไอออนในสภาพเปียกสลับแห้ง

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันในแต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกจะเร่งให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น จะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้มากกว่า และสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้

โดยทั่วไปแล้ว แหล่งที่มาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมาจากน้ำทะเล เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของน้ำทะเลดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าน้ำทะเลมีคลอไรด์ โดยเฉพาะโซเดียมคลอไรด์ มีปริมาณมากถึง 27,000 ส่วนในล้าน จึงทำโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลเสื่อมสภาพได้ง่าย อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น แม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มาก แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างก็ไม่สามารถเกิดขึ้น ดังนั้นผลกระทบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงมีไม่มากนัก

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำทะเล (Mindess and Young, 1981)

Composition of seawater	Quantity (ppm)
Sodium chloride	27,000
Magnesium chloride	3,200
Magnesium sulfate	2,200
Calcium sulfate	1,100
Calcium chloride	500
<b>Total dissolved salts</b>	<b>34,000</b>

Thompson and Lankard (1997) กล่าวว่าโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล อาจเกิดความเสื่อมสภาพได้จากสาเหตุหลายประการ เช่น การกัดเซาะ การชะล้าง การทำลายโดยซัลเฟต การแข็งตัวและหลอมเหลวของน้ำในคอนกรีต การตกผลึกของเกลือ การทำลายเนื่องจากชีวภาพ และการทำลายโดยคลอไรด์ ซึ่งส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมถือเป็นสาเหตุหลัก

## 2.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ คลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ ซึ่งมีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีต ทั้งทางตรงและทางอ้อม จะส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้น กลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโครงสร้างโพรงภายในของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้น โดยคลอไรด์ไอออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ ซึ่งจะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -D_o \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

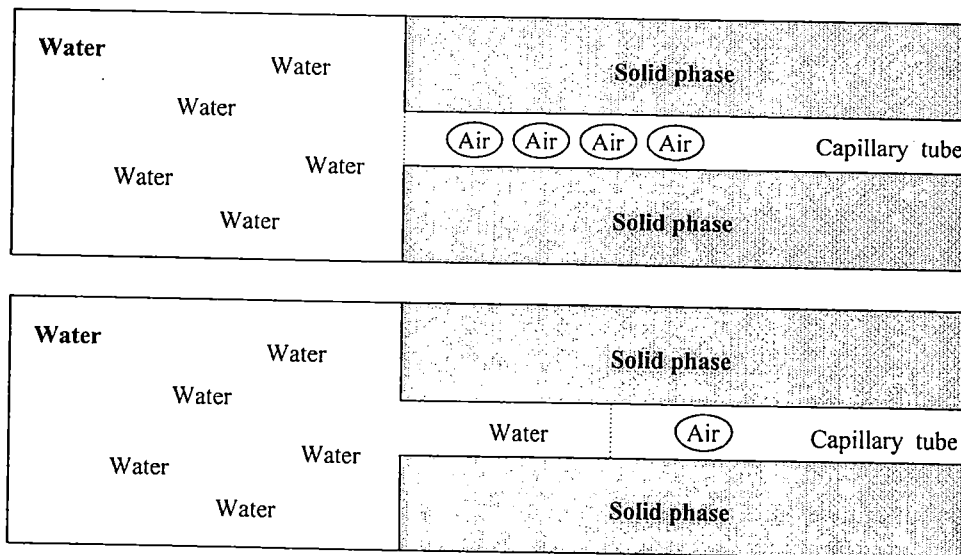
โดยที่	$C_i(x,t)$	คือ	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง $x$ จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา $t$ (โมล/ลิตร)
	$C_f(x,t)$	คือ	ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง $x$ จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา $t$ (โมล/ลิตร)
	$D_o$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. <sup>2</sup> /ปี)
	$x$	คือ	ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)
	$t$	คือ	ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ (2.3) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.4) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

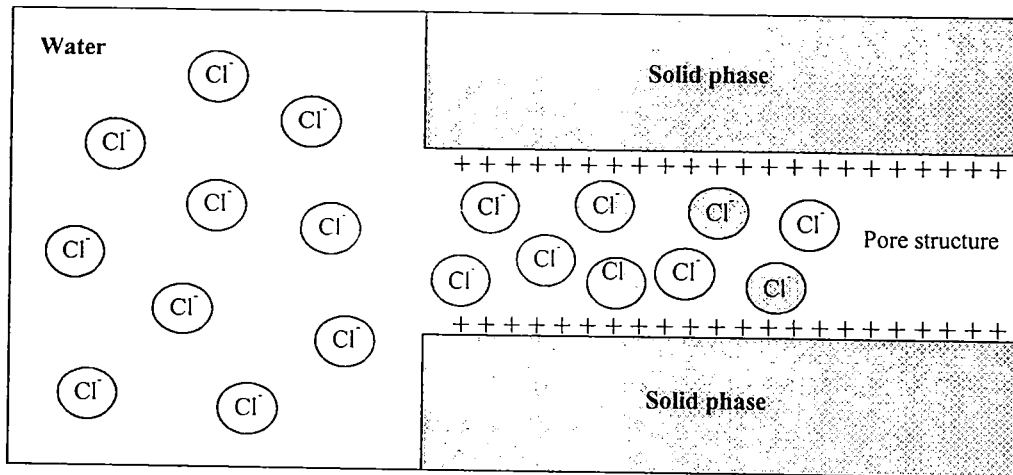
$$C_d = \frac{(C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{c}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0}{B} \times 100 \quad (2.4)$$

โดยที่	$C_d$	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผิวเหล็กเสริม (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
	$C_s$	คือ	ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (กก./ม <sup>3</sup> )
	$c$	คือ	ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม.)
	$D_a$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม. <sup>2</sup> /ปี)
	$t$	คือ	อายุการใช้งานที่ปลดการบำรุงรักษาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปี)
	$B$	คือ	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กก./ม. <sup>3</sup> )

2. การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการดึงดูดแบบคาพิลลารี (ที่มา: ฌปภัช จูเหล็ก)



โดย Free chloride Fixed Chloride

รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต (ที่มา: ฅปภัช จุฬาลง)

3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา จะพบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต เท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

4. แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดินหรืออุโมงค์ โดยความแตกต่างของแรงดัน สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มีแรงดันสูงไปยังบริเวณที่มีแรงดันต่ำ

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

## 2.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตจะมีผลต่อปริมาณคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ ได้แก่

1. ระยะเวลาผิวคอนกรีต อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับความพรุนและระยะของคอนกรีตที่หุ้มผิวเหล็กเสริม ความพรุนของคอนกรีต คือ ปริมาณรูพรุนที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต ถ้ารูพรุนน้อยไม่ต่อเนื่องกันก็จะทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง

Neville (1995) ยังมีระยะคอนกรีตหุ้มมากเท่าใด เวลาที่ใช้จนกระทั่งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับของเหล็กเสริมถึงค่าวิกฤตจะมากขึ้น ซึ่งระยะคอนกรีตหุ้มผิวนี้จะมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต หากคุณภาพของคอนกรีตดีจะสามารถลดระยะคอนกรีตหุ้มลงได้

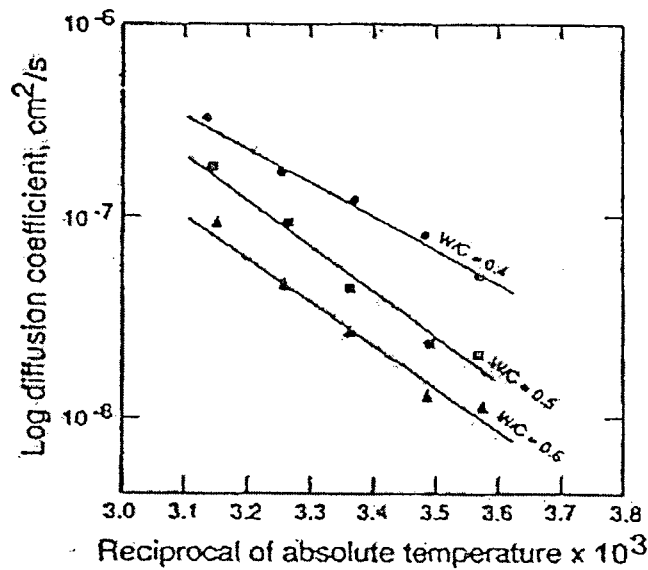
Soroka (1993) ระยะเวลาที่ใช้จนกระทั่งคลอไรด์มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.4 ที่ระยะหนึ่งวัดจากผิวของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตลดลง หรือระยะที่มีปริมาณวิกฤตที่เวลาหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่มต่างส่งผลต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ คือเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการควบคุมอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ จะต้องบ่มคอนกรีตหุ้มให้ดี และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำตลอดแนวของเหล็กเสริม

2. ชนิดและปริมาณของปูนซีเมนต์ ส่วนประกอบและปริมาณของปูนซีเมนต์ ต่างมีผลต่อปริมาณของคลอไรด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา เมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณมาก ก็ย่อมสามารถกักเก็บคลอไรด์ได้ในปริมาณมาก จึงทำให้อัตราการแทรกซึมลดลง ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และประเภทปูนซีเมนต์จะเป็นตัวบอกคุณภาพความซึมผ่านได้ของคอนกรีต ซึ่งคุณภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่นและเนื้อไขการ

Soroka (1993) สภาพการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม เกิดจากคลอไรด์อิสระหรือคลอไรด์ที่ไม่ถูกกักเก็บโดยผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่คลอไรด์จะเข้าร่วมสารผลิตภัณฑ์ของ  $C_3A$  เกือบทั้งหมด กลายเป็นฟรียเดิลคลอไรด์ (Friedels salt,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) หรือเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง จะทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์คลอไรด์ ( $CaO \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) ด้วยความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณ  $C_3A$  ถ้า  $C_3A$  มาก ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ก็จะมากตามไปด้วย ดังนั้นถ้าปูนซีเมนต์ยังมีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์มากเท่าใดก็ย่อมจะหน่วงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตให้ช้าลงเท่านั้นและจะทำให้ระยะเวลาช่วงแรกของการกัดกร่อนช้าออกไปอีก

3. ตัวขัดขวางการกัดกร่อน คือสารที่มีคุณสมบัติต่อต้านการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมของคลอไรด์ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะการป้องกันหรือหน่วงให้เหล็กเสริมผุกร่อนช้าลง มีทั้งแบบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือประเภทไนไตรต์ ได้แก่ แคลเซียมไนไตรต์และโซเดียมไนไตรต์ซึ่งเป็นประเภทสารอนินทรีย์





รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์

#### 4. อุณหภูมิ

Soroka (1993) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ในรูปลอกการิทึม กับส่วนกลับของอุณหภูมิที่มีหน่วยเป็นเคลวินจะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.6 โดยในสภาพอากาศร้อน เวลาที่คลอไรด์ใช้ในการเคลื่อนที่ถึงเหล็กจะสั้นกว่าในสภาพอากาศเป็นกลาง และจะสังเกตว่าอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

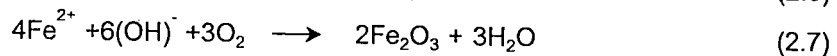
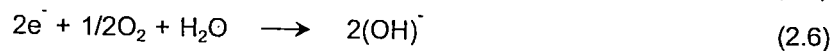
Khatib and Mangat (2002) ทำการทดลองถึงผลกระทบของการบ่มที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไว้วัสดุแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน โดยใช้อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 3 อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ 1 ใช้ซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน และอัตราส่วนผสมที่ 2 และ 3 ใช้เถ้าลอย 20% และ ซิลิกาฟุ่ม 9% แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ผลการทดสอบของการแพร่ตัวอย่างในช่วงเวลาสั้นๆ พบว่า การบ่มในช่วงต้นจะส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต และผลของอุณหภูมิที่สูง และความชื้นที่ต่ำส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตในช่วงที่เผชิญเกลือคลอไรด์สั้นๆ มากกว่า ตัวอย่างที่อยู่ในอุณหภูมิปกติ และใช้วิธีการบ่มเปียก ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้น้ำที่ผิวหน้าของตัวอย่างสูญหายไป และปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกจำกัด ผลกระทบของการบ่มจะส่งผลกระทบต่อตัวอย่างเผชิญกับคลอไรด์ในช่วงเวลานานและการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์จะลดลงเมื่อให้เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่ม แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต

5. คุณภาพของคอนกรีต ส่วนประกอบของคอนกรีตและอุณหภูมิที่ใช้ป่มมีความสำคัญกับโครงสร้างของโพรง เมื่อเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสามารถในการแทรกซึมของคลอไรด์จะลดลง ซึ่งจะเป็นจริงเมื่อคอนกรีตไม่มีการสูญเสียน้ำหนักนั้น หากสูญเสียระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเปลี่ยนไปตามระยะจากผิว เนื่องจากการลดลงของความชื้นจะทำให้ความสามารถซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น หากป่มคอนกรีตไว้นาน การแทรกซึมของคลอไรด์ก็จะลดลง นอกจากนี้หากการทำให้คอนกรีตแน่นไม่เพียงพอ การแทรกซึมของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้น

## 2.6 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์

ในปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มักคำนึงถึงด้านกำลังรับแรงของวัสดุโดยออกแบบให้โครงสร้างสามารถรับน้ำหนักที่มากกระทำได้อย่างปลอดภัย แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าโครงสร้างนั้นจะมีอายุการใช้งานได้นานเพียงใด ดังนั้นถ้าทราบถึงเวลาที่โครงสร้างจะเริ่มเสื่อมสภาพก็จะสามารถซ่อมแซมแก้ไขได้ทันเวลา ซึ่งการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นอาจเกิดมาจากกลุ่มใหญ่ๆ คือ เสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและเสื่อมสภาพจากการผุกร่อนของเหล็กเสริม

คลอไรด์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือคลอไรด์ที่ถูกเก็บกักไว้ สามารถแบ่งได้เป็นฟรีเคลคลอไรด์หรือคลอไรด์ที่ถูกเก็บกักจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีและทางกายภาพ และคลอไรด์อิสระ เป็นสารละลายคลอไรด์ที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสามารถแพร่ไปยังที่ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าได้ ปกติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะไม่ผุกร่อนเพราะคอนกรีตมีสภาพเป็นด่างสูง เนื่องมาจากไฮดรอกไซด์ไอออน แต่เมื่อคลอไรด์อิสระแพร่เข้าไปจะทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงเพราะคลอไรด์ไอออนซึ่งหนักกว่าจะเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อิสระแพร่เข้าไปถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม แล้วทำให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริมลดลงเหลือประมาณ 9 จากค่า pH ของคอนกรีตเดิมที่มีประมาณ 12.5 จะทำให้เหล็กเสริมผุกร่อนได้ดังสมการ



สำหรับปริมาณคลอไรด์อิสระที่มีอยู่ในคอนกรีตสามารถทราบได้โดยตรง จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอไรด์ในช่องว่างของคอนกรีต สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บหาได้จากสมการ 2.8

$$C_{\text{fixed}} = \alpha_{\text{fixed}} C_{\text{tot}} \quad (2.8)$$

และสามารถหาปริมาณคลอไรด์อิสระได้จากสมการ 2.9

$$C_{\text{free}} = C_{\text{tot}} - C_{\text{fixed}} \quad (2.9)$$

$C_{\text{free}}$  คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระ

$C_{\text{fixed}}$  คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกเก็บกัก

$C_{\text{tot}}$  คือ ปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดคิดเป็นค่าร้อยละตามน้ำหนักของปูนซีเมนต์

$\alpha_{\text{fixed}}$  คือ ค่าแฟกเตอร์การยึดจับคลอไรด์ (Fixed Chloride Factor)

ดังนั้น ถ้าสามารถเก็บกักคลอไรด์ไว้ได้มากคลอไรด์อิสระก็จะน้อย ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานนานขึ้น

## 2.7 โครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ถนน สะพาน อาคาร เขื่อน อุโมงค์ เป็นต้น ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต นอกจากความสามารถในการต้านทานแรงทั้งหมดของโครงสร้างแล้ว ความทนทานยังเป็นคุณสมบัติที่ควรให้ความสนใจอย่างมาก โดยทั่วไปความทนทานของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับ การต้านทาน การผ่านเข้าไปของสารที่ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างจากสิ่งแวดล้อม คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่ซับซ้อนและเป็นวัสดุที่มีความพรุน มีโครงสร้างระดับอนุภาค (Microstructure) ขนาดต่างกัน แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเป็นวัสดุที่มีขนาดนาโนเมตร ขณะที่ซีเมนต์เฟสเป็นโครงสร้างที่ระดับขนาดไมโครเมตร และเมื่อผสมทรายและหินทำให้คอนกรีตมีขนาดระดับมิลลิเมตร การศึกษาโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เฟสจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของมอร์ต้าและคอนกรีต ปริมาตรของโพรง (Pore volume) และการกระจายขนาดของโพรง (Pore size distribution) เป็นส่วนประกอบระดับอนุภาคที่สำคัญของซีเมนต์เฟสที่แข็งตัว เพราะมีผลต่อสมบัติทางด้านกายภาพของซีเมนต์เฟส เช่น กำลัง การคืบ การหดตัว การซึมผ่าน และความทนทาน เป็นต้น คุณสมบัติของคอนกรีตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปรับเปลี่ยนโครงสร้างโพรงในซีเมนต์เฟส เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น ความทนทานดีขึ้นและลดการซึมผ่านน้ำ จำเป็นต้องลดปริมาตรและขนาดโพรงในซีเมนต์เฟส โดยการนำวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) มาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อลดการซึมผ่าน ลดปริมาตรและขนาดของโพรงในซีเมนต์เฟส กลไกการทำงานของวัสดุปอซโซลานมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่อุดช่องว่างทำให้โครงสร้างโพรงในซีเมนต์เฟสแน่นขึ้น และส่วนที่สองทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต เป็นผลให้ปริมาตรและขนาดโพรงในซีเมนต์เฟสลดลง และมีผลทำให้การซึมผ่านน้ำลดลงด้วย มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาผลกระทบของสารปอซโซลานต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพของคอนกรีต แต่มีนักวิจัยส่วนน้อยที่ศึกษาผลของสารปอซโซลานต่อโครงสร้างของคอนกรีตระดับอนุภาค

โครงสร้างโพรงช่องว่างเป็นตัวควบคุมอัตราการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวที่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อม และยังมีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสประกอบด้วยโพรง 2 ชนิด คือโพรงคาปิลลารี (Capillary pore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.01 ถึง 10 ไมโครเมตร และโพรงของเจล (Gel pore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กประมาณ 0.0005 ถึง 0.01 ไมโครเมตร โพรงเจลที่มีขนาดเล็กกว่า 0.0005 ไมโครเมตร ถือเป็นโพรงเจลขนาดเล็กมาก และเป็นโพรงระหว่างแผ่น โดยสภาพของน้ำในโพรงมีแรงยึดเหนี่ยว เมื่อขนาดของโพรงใหญ่ขึ้นโดยอยู่ระหว่าง 0.0005 ถึง 0.0025 ไมโครเมตร ถือเป็นโพรงเจลขนาดเล็กโดยสภาพน้ำในโพรงอยู่ในสภาพดูดซับที่ผิว และเมื่อขนาดโพรงเพิ่มขึ้นเป็น 0.0025 ถึง 0.01 ไมโครเมตร ถือเป็นโพรงเจลขนาดใหญ่ (หรือโพรงคาปิลลารีขนาดเล็ก) โดยสภาพของน้ำในโพรงมีแรงดึงผิวสูง สำหรับโพรงคาปิลลารีมีขนาดระหว่าง 0.01 ถึง 0.05 ไมโครเมตรถือเป็นโพรงคาปิลลารีขนาดกลางโดยสภาพของ

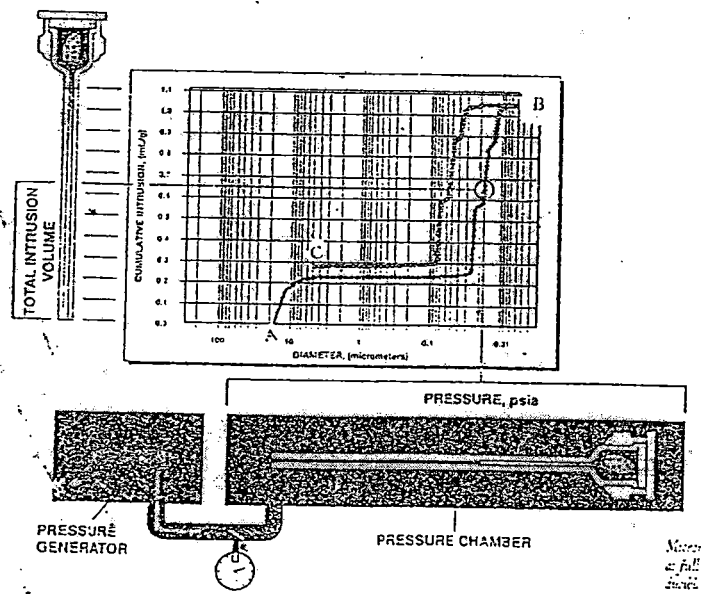
น้ำมีแรงตึงผิวปานกลาง และเมื่อเป็นโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่ (0.05 ถึง 10 ไมโครเมตร) พบว่าน้ำในโพรงจะอยู่ในสภาพอิสระ ความซับซ้อนของโพรงในวัสดุเหล่านี้ จะวัดระดับการกระจายตัวและขนาดของการเกิดโพรงได้ยาก ซึ่งวิธีที่มักจะใช้กันคือ Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) การดูดซับไอน้ำ การดูดซับไนโตรเจน และการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (SEM)

2.7.1 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) คือเทคนิคที่ใช้ในการวัดการกระจายตัวของโพรงช่องว่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความพรุนภายในของซีเมนต์เพสต์ และมีประโยชน์ในการใช้ขยายระยะของการวัดขนาดหลุม จากระดับที่เล็กเพียงไม่กี่นาโนเมตรไปถึงหลายร้อยไมโครเมตร โดยใช้ปรอทซึ่งเป็นของเหลวที่จะไม่ทำปฏิกิริยากับของแข็งทุกชนิด (Non-wetting material) และต้องใช้แรงดันอัดปรอทเข้าไปในวัสดุต่าง ๆ โดยตรวจสอบการลดลงของปรอทในเพเนโทรมิเตอร์ เมื่อความดันที่ใช้เพิ่มขึ้น รัศมีของโพรงช่องว่างที่สามารถเติมปรอทลงไปได้จะลดลง และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโดยรวมของปรอทที่แทรกเข้าไป ข้อมูลที่ได้รับจะแสดงถึงการกระจายตัวของปริมาณโพรง รูปแบบทางกายภาพของโพรง และสามารถคำนวณการกระจายตัวของขนาดโพรงในแต่ละมิติได้ง่ายขึ้น การตรวจวัดนี้เป็นไปตามสมการของ Washburn ที่ความสัมพันธ์ของความดัน (P) ถูกอัดเข้าไปในโพรงช่องว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) โดยจะให้โพรงมีรูปร่างกระบอก จะได้สมการดังนี้

$$P = \frac{-4\gamma\cos\theta}{d} \quad (2.10)$$

- เมื่อ P = ความดันของการแทรกซึมของปรอท  
 $\gamma$  = แรงตึงผิวของปรอท (Surface tension of mercury)  
 $\theta$  = มุมสัมผัสระหว่างปรอทกับผนังโพรงช่องว่าง  
d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่าง

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า ความสมดุลกันของ Washburn แม้ว่าในสารที่เกิดโพรงแทบทุกชนิดจะไม่มีลักษณะของหลุมที่เป็นโพรงทรงกระบอก แต่การหาความสมดุลนี้มักจะถูกใช้ในการคำนวณการกระจายตัวของขนาดโพรงช่องว่าง ซึ่งเกิดจากการคำนวณแรงดันของปรอทออกจากโพรงช่องว่างเท่ากับแรงและความดันที่อัดเข้าไปในโพรง ในทางปฏิบัติของการตรวจวัด การเพิ่มความดันขึ้น โดยขนาดของโพรงสามารถคำนวณได้ทุกจุดของความดันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรของปรอทที่ใช้แทนที่ปริมาตรของโพรง นอกจากนี้การตรวจวัดแต่ละช่วงความดันปรอท จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโพรงกับการกระจายขนาดของโพรงของตัวอย่างเช่นกัน (A. B. Abell, K. L. Willis, and D. A. Lange. 1997) โดยเครื่องวัดค่าที่ใช้ จะมีความดันอยู่ในช่วงต่ำกว่าความดันบรรยากาศจนถึง 414 MPa (60,000 psi) ซึ่งความดันดังกล่าวสามารถผลึกโดยปรอทที่เข้าไปในโพรงตั้งแต่ขนาด 7.5  $\mu\text{m}$  ถึง 1.7 nm ดังรูปที่ 2.8 จะแสดงถึงการอัดปรอทเข้าสู่โพรง สามารถสังเกตจากเส้นกราฟ AB และลดความดันจนถึงความดันบรรยากาศ เพื่อให้ปรอทออกจากโพรง พฤติกรรมสอดคล้องกับเส้นกราฟ BC ณ ที่ความดันต่าง ๆ สามารถคำนวณเป็นขนาดของโพรง การกระจายตัวของขนาดของโพรง และโพรงที่เปิดสู่ผิวภายนอก

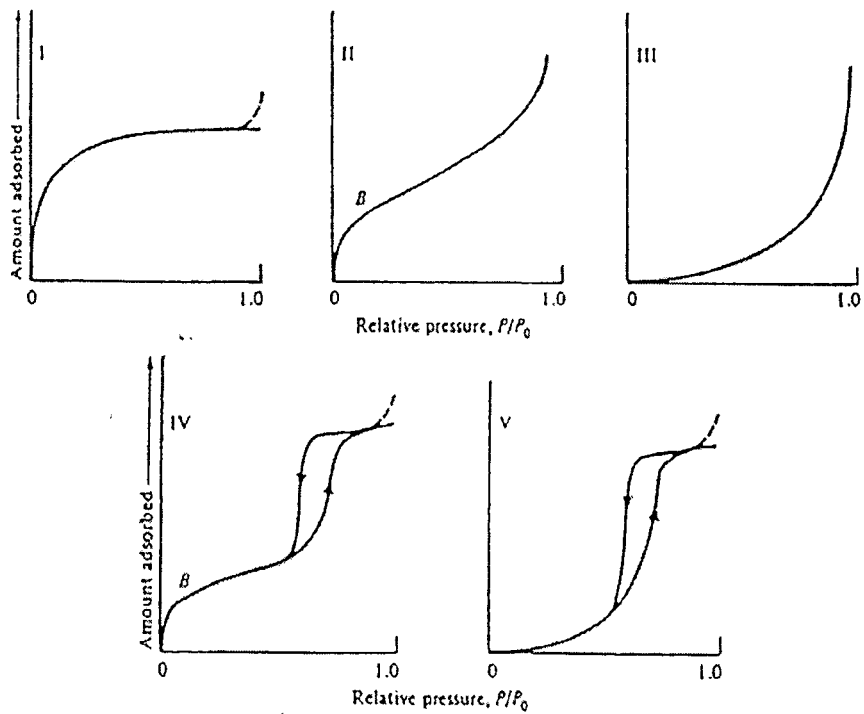


รูปที่ 2.8 ปริมาณของปรอทที่เข้าไปในโพรงขนาดต่างๆ

### 2.7.2 Brunauer-Emmett-Teller (BET)

พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงคุณสมบัติต่างๆ เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถใช้ทดสอบเปรียบเทียบโพรงช่องว่างและความพรุนได้ ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด (Total specific surface area) คือเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนหรือเรียกว่าเทคนิค BET (Brunauer Emmett Teller) ในการวัดพื้นที่ผิวจะต้องใช้ไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมนี้จะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะทำให้การทดลองที่อุณหภูมิคงที่ที่มีความดันย่อยต่างๆ เพื่อสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ และข้อมูลที่ได้จากไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ค่าของพื้นที่ผิว ค่าของปริมาตรรูพรุน ลักษณะเคมีพื้นผิว (Surface chemistry) ของตัวดูดซับ ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ และทราบประสิทธิภาพของการดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์ ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม โดยในตอนแรกเสนอโดย Brunauer, Deming, and Teller (BDDT) ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ในทุกกรณีเมื่อค่าความดันย่อยเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น รูปของชนิดไอโซเทอมแสดงที่รูป 2.9

ไอโซเทอมชนิดที่ 1 เป็นการดูดซับของแข็งที่มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็ก และการดูดซับส่วนใหญ่เป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวภายนอก (External surface area) จะต่ำ ที่ความดันย่อยต่ำ ( $< 0.1 p/p_0$ ) ก็จะสามารถดูดซับได้มากแล้ว ซึ่งการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยประมาณ  $0.5 p/p_0$  ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 1 คือ การดูดซับของไนโตรเจนบนถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 77 K การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 273 K และการดูดซับบนซีโอไลต์



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด (ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 2553)

ไอโซเทอมชนิดที่ 2 บางครั้งอาจจะเรียกว่า ไอโซเทอมที่มีรูปแบบ ซิกมอยด์ หรือแบบเอส (Sigmoid or S-shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับได้หลายครั้ง (Multilayer) จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุด B จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจึงเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

ไอโซเทอมชนิดที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้ทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

ไอโซเทอมชนิดที่ 4 พบในสารที่มีขนาดของรูพรุนประมาณ 15 – 1,000 อังสตรอม ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ากราฟเริ่มเข้าเติมในรูพรุน และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีก เป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation in pores) ทำให้เกิด Loop ขึ้นบนกราฟ โดยลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับไอโซเทอมแบบที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B แสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

ไอโซเทอมชนิดที่ 5 จะพบในสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวของของแข็งน้อย โดยมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมแบบที่ 3 แต่ไอโซเทอมแบบที่ 5 สามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้และเกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งไอโซเทอมแบบที่ 5 นี้คำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้น การดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกเสร็จสมบูรณ์

การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์ (Langmuir equation)

สมการแลงเมียร์มีสมมติฐานคือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น และเป็นการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยแต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะเหมือนกันหมด ซึ่งเราสามารถหาพื้นที่ผิวได้จากสมการของแลงเมียร์โดยมีรูปแบบจากไอโซเทอมชนิดที่ 1 สมการรูปแบบคือ

$$\frac{P}{V} = \frac{V}{V_m} + \frac{1}{BV_m} \quad (2.11)$$

$V$  = ปริมาณการดูดซับของแก๊สที่ถูกดูดซับ ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความดันย่อย ( $p/p_0$ ) ต่าง ๆ

$V_m$  = ปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer capacity,  $\text{mmol g}^{-1}$ )

$B$  = ค่าคงที่

$P$  = ความดัน

ค่าพื้นที่ผิวจะได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$S = V_m L \sigma \quad (2.12)$$

$S$  = พื้นที่ผิว ( $\text{m}^2/\text{g}$ )

$L$  = เลขอโวกาโดร (Avogadro's number,  $6.02 \times 10^{23}$ )

$\sigma$  = พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ( $\text{m}^2 \text{ molecule}^{-1}$ )

สมการดังกล่าวมีประโยชน์มากที่ได้จากไอโซเทอม อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ซึ่งมีสมมติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับตัวดูดซับบางชนิด

การคำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (BET)

เนื่องจากแรงในการเกิดการดูดซับทางกายภาพ จะคล้ายกับแรงในการเกิดการควบแน่น (liquefaction) คือเป็นแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ(ทั้งบนผิวแบนและบนผิวโค้ง) จึงไม่จำกัดเฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monomoleccular layer) แต่สามารถเกิดต่อไปจนเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multimoleccular layer) ของของเหลวปกคลุมพื้นที่ผิวได้

ทฤษฎีของบีอีที (Braunauer Emmett and Teller, BET) เป็นการเพิ่มเติมจากทฤษฎีของแลงเมียร์ คือสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น บนพื้นที่ผิวที่ไม่มีรูพรุน ได้โดยสมการบีอีที จะมีสมมติฐานว่า ชั้นการดูดซับชั้นบนสุดจะอยู่ในสภาพสมดุลกับไอของแก๊ส นั่นคืออัตราการระเหยของชั้นโมเลกุลต่างๆ เท่ากับอัตราการควบแน่น และมีสมมติฐานอย่างงานว่าสำหรับการดูดซับชั้นแรก (First monolayer) จะใช้พลังงานการดูดซับ (heat of adsorption,  $\Delta H_1$ ) ส่วนชั้นการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไป จะใช้พลังงานการควบแน่น (Heat of liauefaction,  $\Delta H_L$ ) ซึ่งสมการโดยทั่วไปของ บีอีที (BET) คือสมการ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2.13)$$

$P_0$  = ความดันไออิ่มตัว

$V_m$  = ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer capacity)

$C$  = ค่าคงที่ ( $C \approx \exp [(\Delta H_L - \Delta H_A)/(RT)]$ )

เมื่อเขียนกราฟค่า  $\{P/[V(P_0-P)]\}$  กับ  $P/P_0$  จะได้เส้นตรงความชัน  $[(C-1)/V_m C]$  และตัดแกน  $\{P/[V(P_0-P)]\}$  ที่จุด  $1/(V_m C)$  ซึ่งจะหา  $V_m$  ได้

จุดประสงค์หลักของสมการบีอีที คือ เพื่ออธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 2 นอกจากนี้ยังลดรูปลงเป็นสมการแลงเมียร์ที่ได้ที่ความดันต่ำๆ และสามารถอธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 3 ได้ในกรณีที่มีการดูดซับชั้นแรก (monolayer adsorption) คายความร้อนน้อยกว่าการควบแน่น (liquefaction  $C < 1$ ) นั่นคือ สามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวจากข้อมูลไอโซเทอมได้แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และยังสามารถใช้กับสารที่มีรูพรุนได้ ถ้าได้การดูดซับเกิดขึ้น  $n$  ชั้น ( $n$  สัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน) ได้ดังสมการ

$$V = \frac{V_m C X^{-(n+1)} + n X^{n+1}}{(1-X) + (C-1)X - C X^{n+1}} \quad \text{เมื่อ } X = P/P_0 \quad (2.14)$$

สมการนี้เป็นรูปแบบทั่วไป ซึ่งจะลดรูปเป็นสมการแลงเมียร์ (Langmuir) เมื่อ  $n = 1$  และเป็นสมการบีอีทีเมื่อ  $n = \infty$

วิธีบีอีที (BET) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากกันมากที่สุดในการคำนวณพื้นที่ผิว โดยใช้หลักการคำนวณเหมือนกับวิธีแลงเมียร์ แต่การคำนวณค่า  $V_m$  จะต่างกันโดยกราฟวิธีของบีอีทีจะเป็นการเขียนกราฟระหว่าง  $\{P/[V(P_0-P)]\}$  กับ  $P/P_0$  ซึ่งได้เส้นตรงในช่วงความดันสัมพัทธ์  $P/P_0$  ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35 โดยที่

ความชัน คือ  $[(C-1)/V_m C]$

จุดตัด คือ  $[1/V_m C]$

จากสมการของจุดตัดและความชันจะได้  $V_m = 1/(\text{จุดตัด} + \text{ความชัน})$  และจากค่า  $V_m$  สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างได้เช่นเดียวกับวิธีแลงเมียร์

ในความเป็นจริงการดูดซับทางกายภาพจะไม่มี การดูดซับในชั้นแรกเติมพื้นที่ผิวอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของแข็งไม่เท่ากับการดูดซับทางเคมี แต่สมการบีอีทีก็สามารถคำนวณค่าจำนวนโมเลกุลที่ใช้ในการปกคลุมพื้นที่ผิวของแข็งให้เต็ม 1 ชั้นได้แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกอย่างเติมพื้นที่ผิวจะเกิดเฉพาะในการดูดซับทางเคมีเท่านั้น

แม้ว่าสมการบีอีทีจะใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากความง่ายของรูปแบบสมมุติฐาน และยังสามารถคล่องกับผลการทดลองที่เป็น การดูดซับแบบหลายชั้น โดยเฉพาะที่ความดันสัมพัทธ์ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35 ซึ่งเป็นช่วงที่คิด  $V_m$  ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับสารที่มีรูพรุนซึ่งมักจะเกิดปรากฏการณ์ช่องว่าง (Hysteresis) จากควบแน่นในรูพรุน (Pore condensation) หรือเมื่อจุด B บนกราฟไอโซเทอมไม่เด่นชัดค่าของ  $V_m$  ที่คำนวณจากสมการบีอีทีก็ก็จะมีความน่าเชื่อถือน้อยลง



## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกศักดิ์ และคณะ (2551) ทำการศึกษาเรื่องความสามารถการกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 และ 0.50 และอัตราการผสมฝุ่นหินปูนที่ 0.05, 0.15, 0.25 พบว่าค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถกักเก็บคลอไรด์ที่อัตราส่วนน้ำ 0.40 มีค่าลดลง และที่อัตราส่วน 0.50 ค่าความสามารถกักเก็บคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการแพร่ของคลอไรด์พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำหรืออัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัดที่ 91 วันจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรืออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยฝุ่นหินปูนเพิ่มขึ้น

ธีรวัฒน์ สินสิริ และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความละเอียดเก้ถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยนำเก้ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ไม่ได้แยกขนาดมีอนุภาคที่  $d_{50}$  เท่ากับ 19.1 ไมครอน และเก้ถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีอนุภาค  $d_{50}$  เท่ากับ 6.41 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 จากผลการทดลองพบว่า เพสต์ที่ผสมเก้ถ่านหินแยกขนาดให้กำลังอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเก้ถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด การแทนที่และความละเอียดของเก้ถ่านหิน มีผลกระทบที่สำคัญต่อปริมาณโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาบิลลารีของเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้ถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาบิลลารีลดลง ขณะที่การแทนที่เก้ถ่านหินที่คัดแยกในเพสต์ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาบิลลารีลดลง เมื่อเทียบกับเพสต์ที่ผสมเก้ถ่านหินที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาบิลลารีลดลง เมื่อแทนที่เก้ถ่านหินที่ละเอียดลงในเพสต์ทุกระดับของการแทนที่

นัฐภา ภาระศรี และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารปอซโซลานต่อโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยสารปอซโซลานที่ศึกษาคือเก้ถ่านหิน ทำการหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนผสมต่างกัน ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเก้ถ่านหิน และประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากนั้นนำชิ้นส่วนจากตัวอย่างมาทดสอบหาโครงสร้างโพรงช่องว่างภายในซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) เพื่อหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างและความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ จากผลการศึกษาพบว่า ทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างและความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเมื่ออายุซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างและความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ลดลง เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ในซีเมนต์เพสต์จะทำให้ทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างและความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์มีค่าน้อยกว่า เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 และเมื่อใช้เก้ถ่านหินที่บางส่วนในวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ลดลง แต่ความพรุนทั้งหมดสูงขึ้นกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วนเห็นถึงผลของความสามารถในการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงชนิดเดียว

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Cheewaket et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเรื่องความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยในสภาพทะเล โดยจะศึกษาจากผลของการแทนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานระยะเวลาในการเผชิญสภาพแวดล้อมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานด้วยเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยตั้งแต่ร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ โดยนำคอนกรีตทรงลูกบาศก์ไปวางไว้ที่ชายฝั่งทะเลบริเวณมีน้ำขึ้นน้ำลงในอ่าวไทย เป็นเวลา 3, 4, 5 และ 7 ปี และจากผลการศึกษาพบว่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีตมีปริมาณมากขึ้น ขณะเดียวกันเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับสภาพทะเล เปอร์เซ็นต์การกักเก็บคลอไรด์จะลดลงในช่วง 3-4 ปี หลังจากนั้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบจะคงที่ และจากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นผลกระทบที่ไม่สำคัญต่อการกักเก็บคลอไรด์

พีรชล สุภัททธรรม และคณะ (2542) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย ในการเตรียมตัวอย่าง ปูนซีเมนต์จะถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยต่างชนิดกัน ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ คือ ชนิดของเถ้าลอย ร้อยละของเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 0, 30, 50) และร้อยละของโซเดียมคลอไรด์ที่ผสมน้ำ (ร้อยละ 2, 4, 6) ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุผสม (ปูนซีเมนต์ + เถ้าลอย) เท่ากับ 0.4 ปริมาณคลอไรด์อิสระในซีเมนต์เพสต์จะถูกวัดแล้วนำมาคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ถูกเก็บกัก โดยหาจากปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในน้ำผสมหักออกจากคลอไรด์อิสระที่ได้จากการทดสอบและสามารถนำมาคำนวณหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของวัสดุผงโดยอัตราส่วนต่อน้ำหนักของวัสดุผง หลังจากนั้นนำผลมาเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่ใส่เถ้าลอยกับส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอย จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยดีกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

สายัณห์ และคณะ (2541) ทำการศึกษาความทนทานด้านต่าง ๆ ของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมปูนหินจากแหล่งต่าง ๆ กัน 3 แหล่ง เทียบกับตัวอย่างควบคุม เพื่อหาปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมของปูนหินลงในปูนซีเมนต์ พฤติกรรมความทนทานที่ ทำการศึกษาได้แก่ การหดตัวแบบอโตจีนัสและความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ทำการศึกษา โดยใช้ซีเมนต์เพสต์ ส่วนการหดตัวแบบแห้ง และการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ทำการศึกษาโดยใช้มอร์ตาร์ และความชื้นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีต โดยปริมาณการแทนที่ของปูนหินในปูนซีเมนต์และชนิดของปูนหินเป็นตัวแปรหลัก ในส่วนของผลการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส พบว่าค่าการหดตัวแบบอโตจีนัสของ ซีเมนต์เพสต์ผสมปูนหินชนิดที่ 3 มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ส่วนของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนหินชนิดที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ค่าการหดตัวแบบแห้งของ มอร์ตาร์ผสมปูนหินชนิดที่ 1,2,3 และมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความลึกของ คาร์บอนชั่นของมอร์ตาร์ผสมปูนหินชนิดที่ 1 และ 3 มีแนวโน้มที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ส่วนของมอร์ตาร์ผสมปูนหินชนิดที่ 2 มีแนวโน้มที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ความสามารถการ กักเก็บคลอไรด์ของปูนหินแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนหิน กล่าวคือ ปูนหิน ชนิดที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด มีความสามารถการกักเก็บคลอไรด์มากกว่าปูน หินชนิดที่ 3 และ 2 ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าตามลำดับ ส่วนด้านความชื้นของ

357163

624-1833

๗๑๙๓๓

2๕๕๘

A-4

ปฏิกิริยา ไฮเดรชันสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย และคอนกรีตควบคุมสูงกว่าคอนกรีตซึ่งผสมฝุ่นหินชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ปิติ และคณะ (2543) ศึกษาเรื่องการใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอชโซลาน ตัวอย่างทดสอบใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนตั้งแต่ร้อยละ 20 จนถึง 60 โดยน้ำหนักของวัสดุผงทั้งหมด และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.485 พบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่ร้อยละ 20 ในขณะที่เดียวกันที่ร้อยละการแทนที่ 40 และ 60 การใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนที่ได้จากหินแม่ประเภทโดโลเมติก และโดโลไมต์ ก็สามารถแสดงให้เห็นถึงผลของความสามารถในการรับแรงอัดที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงชนิดเดียว

สมพงษ์ ธีรานพ และคณะ (2549) ศึกษาปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีต เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีทั้งที่สัมผัสกับน้ำทะเล ปัจจุบันการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยวิธีทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้น เป็นการวัดสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีต มากกว่าจะเป็นการวัดความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะประยุกต์วิธีการทดสอบ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 เพื่อใช้ในการหาค่าปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต โดยการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ ซึ่งจากนี้ไปภายในงานวิจัยนี้จะเรียกวิธีการทดสอบดังกล่าวนี้โดยย่อว่า วิธีประยุกต์ งานวิจัยนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการตรวจสอบหาปริมาณ และความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต โดยวิธีประยุกต์ ซึ่งจะพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในสารละลายบริเวณขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งเกิดขึ้นจากการเร่งอนุภาคคลอไรด์ที่มีอยู่ในสารละลาย ให้เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างด้วยแรงทางไฟฟ้า ความเข้มข้นของคลอไรด์จะถูกบันทึก ณ เวลาต่างๆ กัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตามสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา โดยได้เลือกทดสอบกับคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอชโซลานชนิดอื่น ร่วมกับปูนซีเมนต์ด้วย อันได้แก่ เถ้าแกลบและเถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้คือ 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ การทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 หรือ RCPT ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาระยะเวลาที่ก้อนตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะ คงที่ (Ts) โดยอาศัยการวัดและเก็บค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านก้อนตัวอย่าง ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าเริ่มคงที่ จากผลการทดลองวิธีประยุกต์พบว่า มีความสอดคล้องกับสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา และมีแนวโน้มสอดคล้องเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบอื่นๆ อันได้แก่ การทดสอบเอ็มไอพี กำลังรับแรงอัดประลัย และการทดสอบมาตรฐาน ASTM C1202 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตซึ่งใช้วัสดุประสานที่เป็นเถ้าลอยและเถ้าแกลบร่วมกับปูนซีเมนต์ มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ สูงกว่าวัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน หรือใช้ปอชโซลานเพียงชนิดเดียวคือเถ้าแกลบหรือเถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งยืนยันจากปริมาณโพรงแคพพิลารีที่ลดลงโดยวิธีเอ็มไอพี ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้โพรงคอนกรีตเกิดความไม่ต่อเนื่องและมีปริมาตรลดลง

## บทที่ 3

### วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง

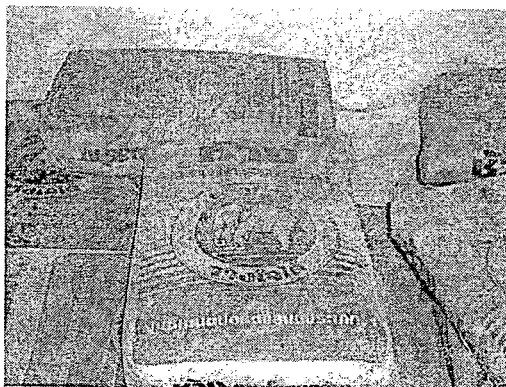
#### ขอบเขตของโครงการ

เพื่อศึกษาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ โครงสร้างโพรงขนาดเล็ก (Microstructure) และกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์ผสมแก้วยระยอง ที่ปัจจัยต่าง ๆ กัน เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ เป็นต้น เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15-2532

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ ไม่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงหรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟต ยกตัวอย่างเช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ถนนคอนกรีต สะพานคอนกรีต เป็นต้น และนอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น สะพานขนาดใหญ่ สนามกีฬา และอาคารสูง เป็นต้น



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

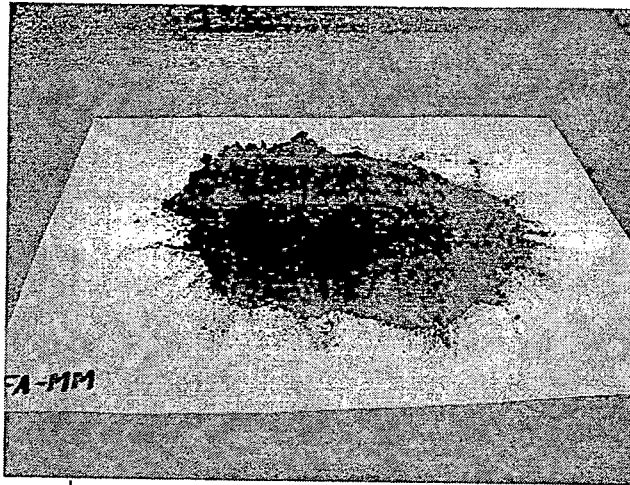
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (% by weight )	Cement Type I
Silicon Dioxide ,SiO <sub>2</sub>	20.2
Aluminum Oxide,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.9
Iron Oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2
Calcium Oxide, CaO	64.1
Magnesium Oxide ,MgO	1.0
Sodium Oxide ,Na <sub>2</sub> O	0.1
Potassium Oxide ,K <sub>2</sub> O	0.4
Sulfur Trioxide ,SO <sub>3</sub>	2.6
Loss on Ignition ,LOI	1.2
Tricalcium Silicate ,C <sub>3</sub> S	49
Dicalcium Silicate, C <sub>2</sub> S	25
Tricalcium Aluminate, C <sub>3</sub> A	12
Tetracalcium Aluminoferrite, C <sub>4</sub> AF	8

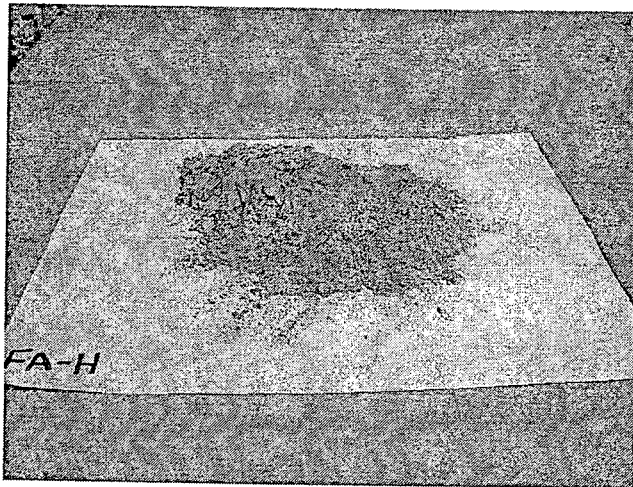
### 3.1.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียด และมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium silicate hydrate)เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ซึ่งในการทดสอบในครั้งนี้ได้ใช้วัสดุปอซโซลาน 3 ชนิด คือ เถ้าลอยแม่เมาะ รูปที่ 3.2 เถ้าลอยระยองBLCP-Hunter รูปที่ 3.3 และเถ้าลอยระยองBLCP-Hunter Malavan รูปที่ 3.4

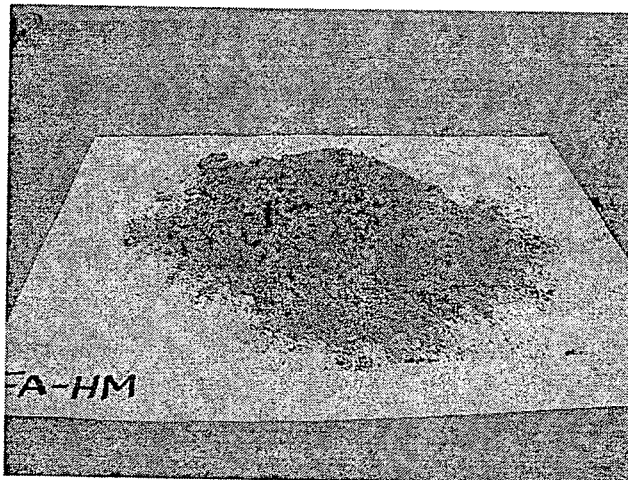
เถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัสดุผสมเพิ่มเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในแต่ละปีจะมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 3 ล้านตันต่อปี และเป็นวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย การใช้เถ้าลอยส่วนผสมจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความคงทนในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ แต่ข้อเสียของการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน คือ ในอายุแรกๆ จะให้กำลังที่ต่ำ



รูปที่ 3.2 เถ้าลอยแม่เมาะ (Mae Moh fly ash, FMM)



รูปที่ 3.3 เถ้าลอยระยอง BLCP-Hunter (BLCP Hunter fly ash, FAH)



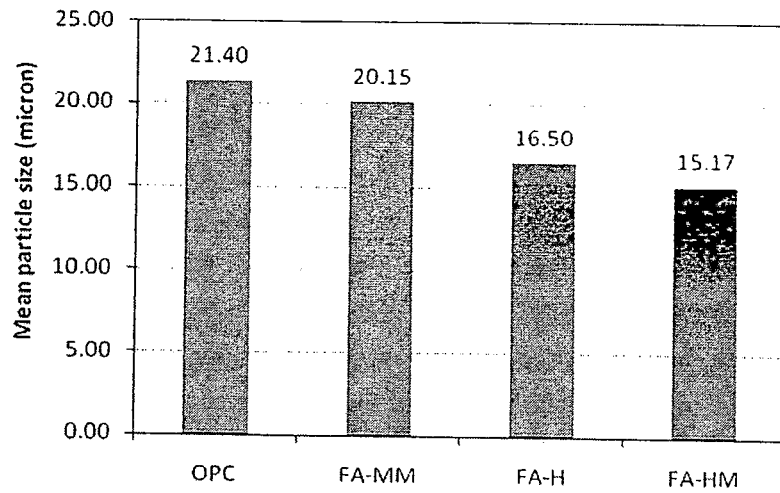
รูปที่ 3.4 เถ้าลอยระยอง BLCP-Hunter Malavan (BLCP Hunter Malavan fly ash, FAHM)

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly ash)

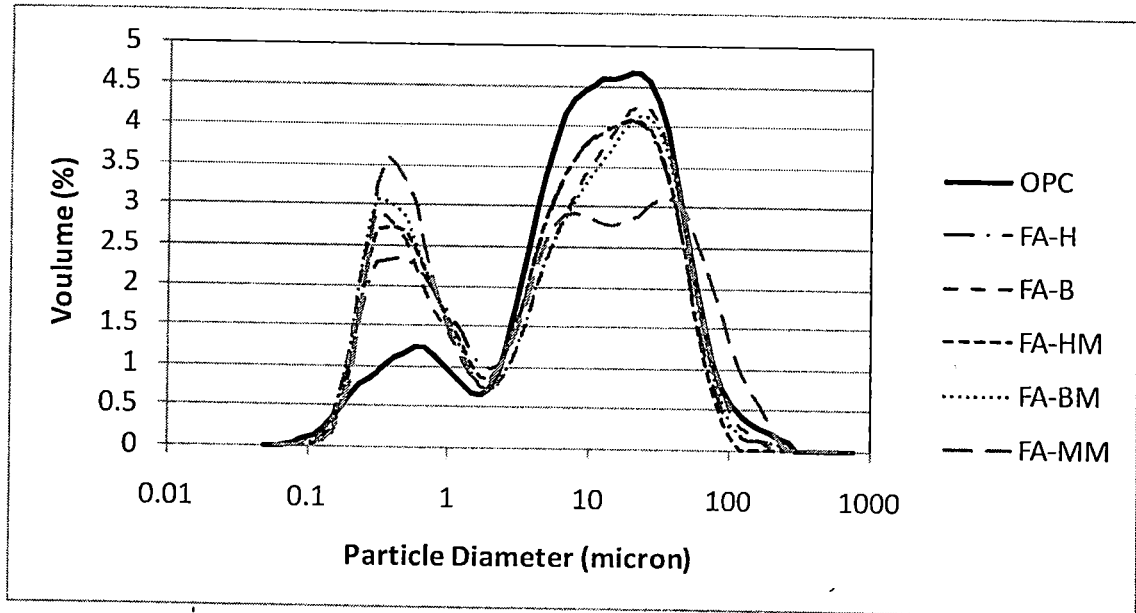
Chemical Compositions (%)	OPC	Mae Moh fly ash (FAMM)	BLCP fly ash	
			FAH	FAHM
SiO <sub>2</sub>	19.87	39.4	65.15	61.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.87	17.93	22.06	21.86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.55	12.92	4.17	5.85
CaO	65.03	19.19	1.25	2.13
MgO	2.52	2.99	0.68	1.47
SO <sub>3</sub>	0.73	3.03	0.18	0.24
Na <sub>2</sub> O	0.02	1.36	0.02	0.02
K <sub>2</sub> O	0.45	2.50	1.09	1.11
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.34	1.00	0.97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.20	0.35	0.33
LOI	2.26	0.17	3.78	4.09

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย (Fly ash)

Physical Compositions	OPC	Mae Moh fly ash (FAMM)	BLCP fly ash	
			FAH	FAHM
Specific Gravity	3.10	2.29	2.24	2.23
Blaine's Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3,350	2,836	2,860	3,030
Loss on Ignition (%)	2.26	0.14	3.78	4.09
Normal Consistency (%)	24.30	22.20	25.38	25.54
Initial Setting Time (minute)	108.89	139.98	147.34	148.40
Final Setting Time (minute)	130.00	175.00	171.50	180.00
Flow Test (%)	111.95	114.58	112.20	112.55
Water Requirement (%)	49.49	46.69	50.00	50.69



รูปที่ 3.5 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซีเมนต์และแก้วลอย (ที่มา : โรงไฟฟ้าในจ.ระยอง)



รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของซีเมนต์และแก้วลอย (ที่มา : โรงไฟฟ้าในจ.ระยอง)

### 3.1.3 น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการคอนกรีต

### 3.1.4 เกลือคลอไรด์

เกลือคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) มีความบริสุทธิ์ 99.9%



### 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 การทดลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

##### 3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร  
ดังรูปที่ 3.7

2) เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Cement paste mixer)

3) ถังพลาสติกบรรจุขึ้นตัวอย่างทดสอบ

4) ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว ดังรูปที่ 3.8

5) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 3.9

6) เครื่อง Auto titration รุ่น 721 NET titrimo metrohm และเครื่องกวนแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.10

7) ตู้อบความร้อน ดังรูปที่ 3.11

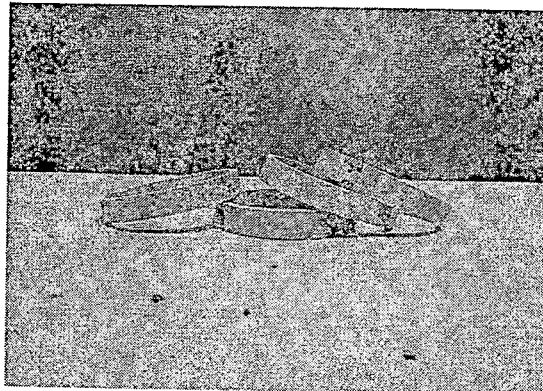
8) เครื่องกดขึ้นทำลายตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.12

##### 3.2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

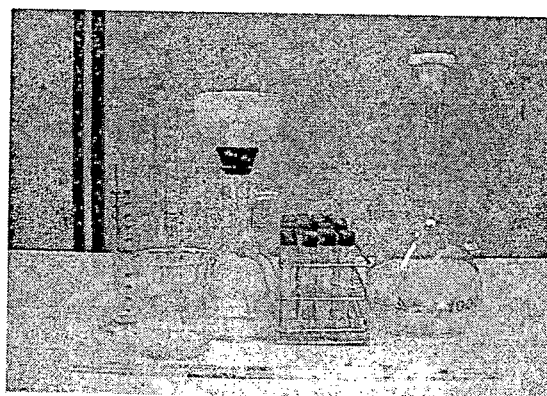
1) สารละลายมาตรฐาน 0.05 M โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)

2) สารละลายมาตรฐาน 0.05 M ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)

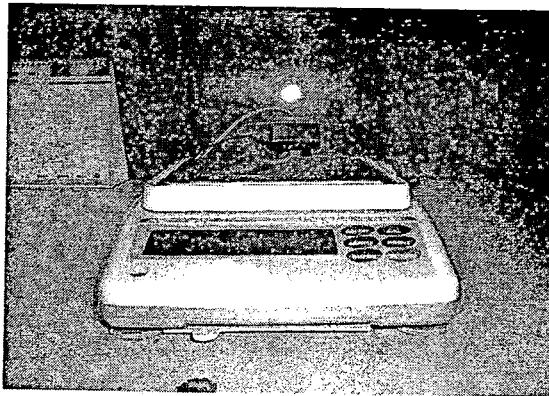
3) น้ำกลั่น



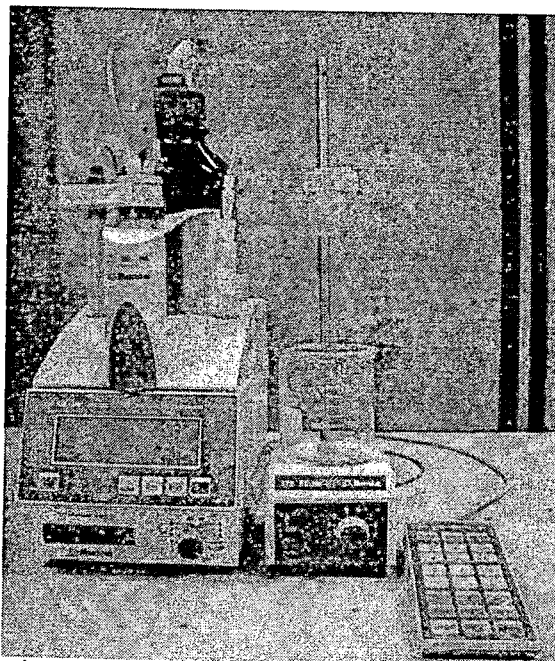
รูปที่ 3.7 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบ



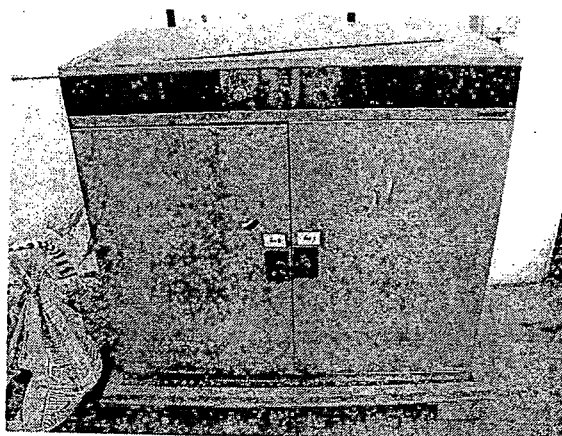
รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว



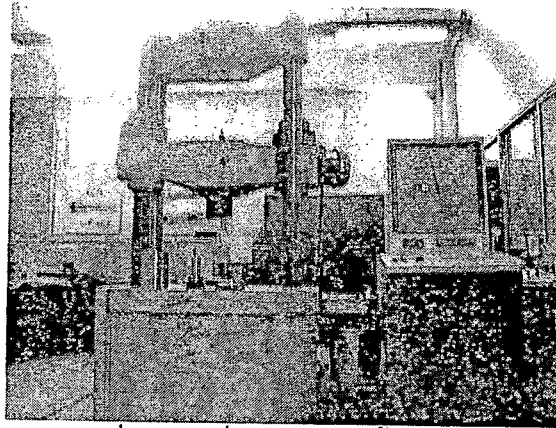
รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital balance)



รูปที่ 3.10 เครื่อง Auto titration และเครื่องกวนแม่เหล็ก



รูปที่ 3.11 ตู้ความชื้น

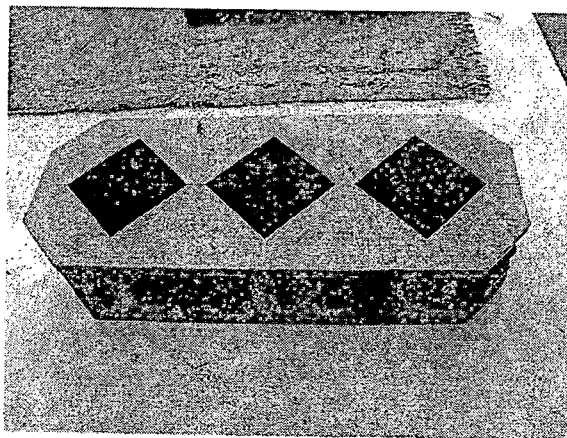


รูปที่ 3.12 เครื่องกดทำลายชิ้นตัวอย่าง

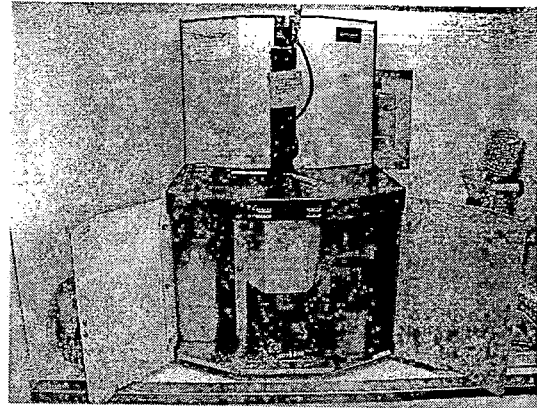
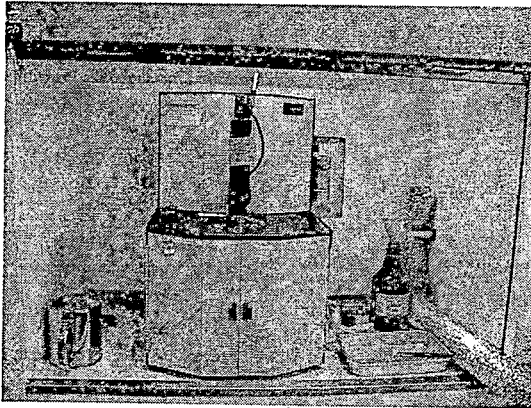
### 3.2.2 การทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี MIP

#### 3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

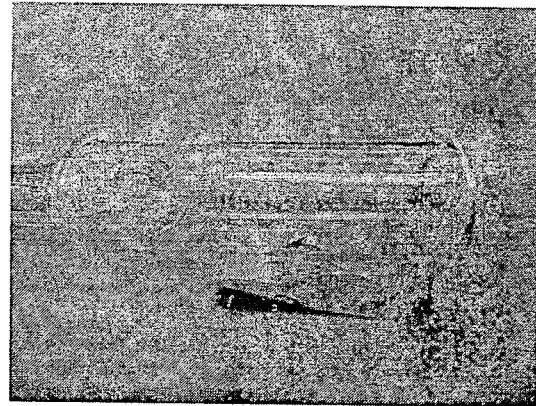
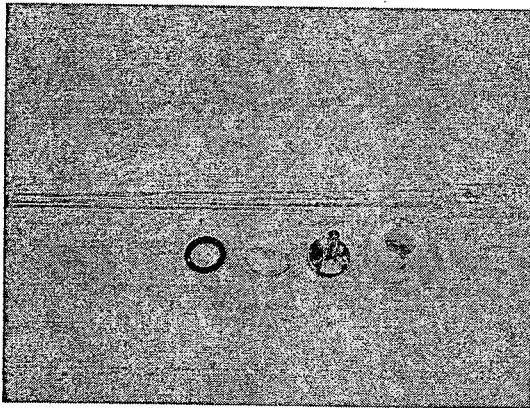
- 1) แบบหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร รูปที่ 3.13
- 2) เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Cement paste mixer)
- 3) เครื่องทดสอบโครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี MIP รูปที่ 3.14
- 4) เพเนโตรมิเตอร์ (Penetrometer) รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบโครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี MIP



รูปที่ 3.15 เพเนโทรมิเตอร์ (Penetrometer)

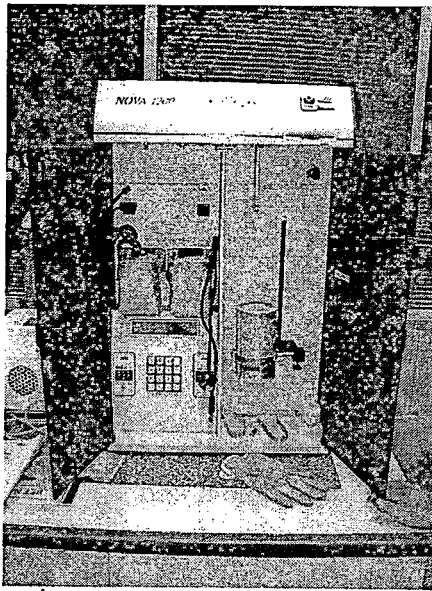
#### 3.2.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปรอท
- 2) ก๊าซไนโตรเจน

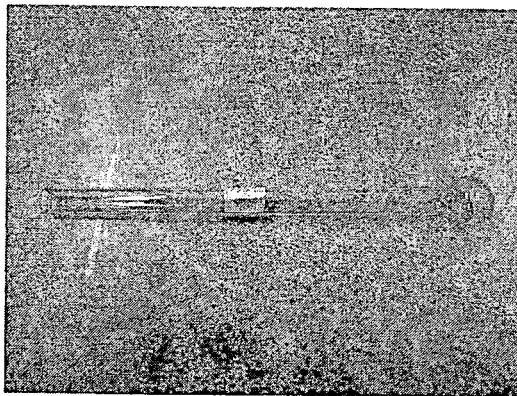
#### 3.2.3 การทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี BET

##### 3.2.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

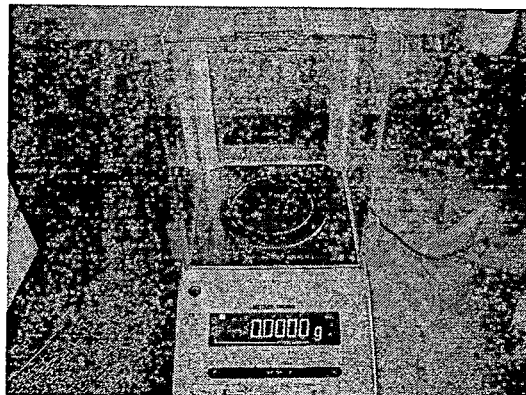
- 1) แบบหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร รูปที่ 3.13
- 2) เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Cement paste mixer)
- 3) เลื่อย
- 4) ครกหินบดตัวอย่างทดสอบ
- 5) เครื่องทดสอบโครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี BET รูปที่ 3.16
- 6) หลอดทดสอบตัวอย่าง (Tube) รูปที่ 3.17
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) รูปที่ 3.18



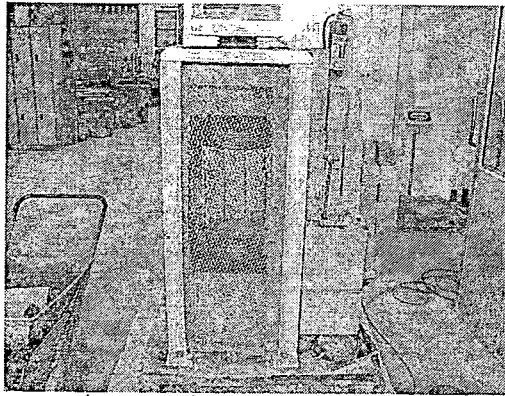
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบโครงสร้างโพรงช่องว่างด้วยวิธี BET



รูปที่ 3.17 หลอดทดสอบตัวอย่าง (Tube)



รูปที่ 3.18 เครื่องปั้มน้ำหนักแบบละเอียด



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

### 3.3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ไนโตรเจนเหลว
- 2) ก๊าซไนโตรเจน

### 3.3.4 การทดลองกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

#### 3.3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แบบหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร รูปที่ 3.13
- 2) เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (Cement paste mixer)
- 3) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังรูปที่ 3.19

#### ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์

Mix designation	Fly ash type	Fly ash (% replacement)	Water to binder ratio
C100W40	-	-	0.40
C100W50	-	-	0.50
C70FA-MM30W40	Mae Moh	30	0.40
C70FA-MM30W50	Mae Moh	30	0.50
C50FA-MM50W40	Mae Moh	50	0.40
C50FA-MM50W50	Mae Moh	50	0.50
C70FA-H30W40	Hunter	30	0.40
C70FA-H30W50	Hunter	30	0.50
C50FA-H50W40	Hunter	50	0.40
C50FA-H50W50	Hunter	50	0.50
C70FA-HM30W40	Hunter Malawan	30	0.40
C70FA-HM30W50	Hunter Malawan	30	0.50
C50FA-HM50W40	Hunter Malawan	50	0.40
C50FA-HM50W50	Hunter Malawan	50	0.50

หมายเหตุ : ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความหมายดังนี้

"0.30, 0.50" หมายถึง ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ร้อยละ 30 และ 0.50 โดยน้ำหนักวัสดุ  
ประสาน

"W40, W50" หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50  
ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

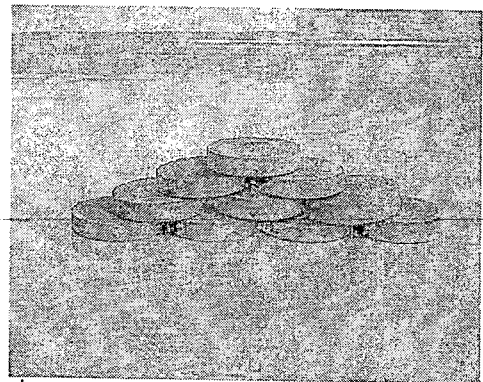
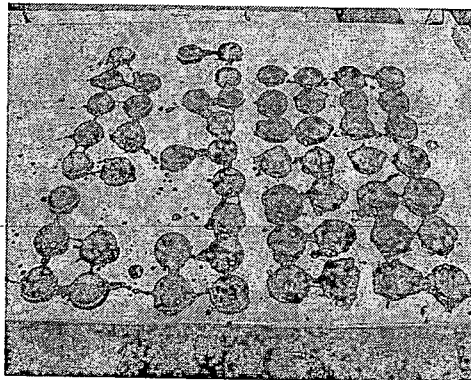
"C70FA-MM30W40" หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 70 ใช้เถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 30  
โดยปริมาตร และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

### 3.3 วิธีทำการทดลอง

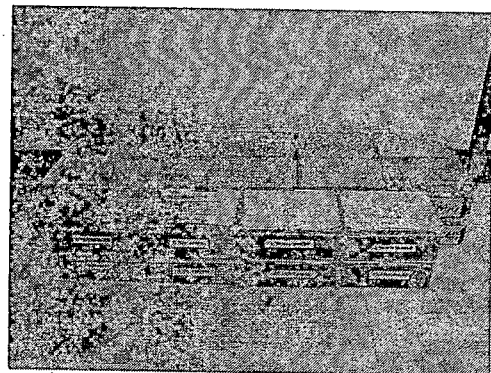
#### 3.3.1 การทดลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

##### 3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร  
ดังรูปที่ 3.20 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 แต่ละตัวอย่างมีจำนวน 13 ชิ้น มี  
รายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.20 ซีนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.21 การแช่ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

1) ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 นำไปแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แล้วนำไปแช่ต่อในน้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5% เป็นเวลา 91 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบ

2) ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยระยองแม่เมาะ (FAMM) ที่ 0.30 และ 0.50 นำไปแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แล้วนำไปแช่ต่อในน้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5% เป็นเวลา 91 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบ

3) ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยระยอง B LCP Hunter (FAH) ที่ 0.30 และ 0.50 นำไปแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แล้วนำไปแช่ต่อในน้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5% เป็นเวลา 91 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบ

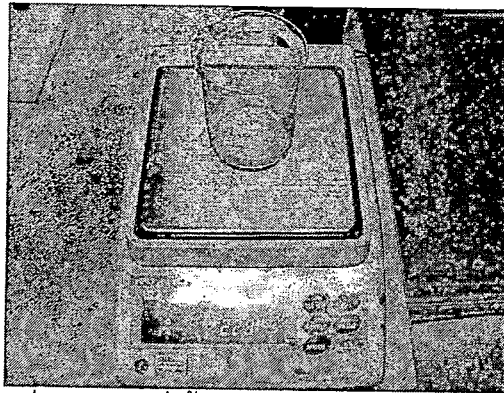
4) ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยระยอง B LCP Hunter Malavan (FAHM) ที่ 0.30 และ 0.50 นำไปแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แล้วนำไปแช่ต่อในน้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5% เป็นเวลา 91 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบ

3.3.1.2 การเก็บสารละลายในโพรงเพื่อหาปริมาณคลอไรด์และการหาปริมาณน้ำในซีเมนต์เพสต์ หลังจากแช่ในน้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5% ครบกำหนดระยะเวลาที่กำหนด จะนำเอาตัวอย่างขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าหรือกระดาษชำระ ให้ตัวอย่างอยู่ในลักษณะอิมตัวผิวแห้ง จากนั้นจะนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล รูปที่ 3.9 ซึ่งการชั่งน้ำหนักจะแยกเป็นตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น เพื่อนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำในซีเมนต์เพสต์ (Water content) และตัวอย่างอีกจำนวน 10 ชิ้น จะนำไปกดบีบเพื่อเก็บสารละลายภายในตัวอย่าง (น้ำภายใน) มาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride) รูปที่ 3.22 และนำสารละลายที่แช่ตัวอย่าง (น้ำภายนอก) มาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride)

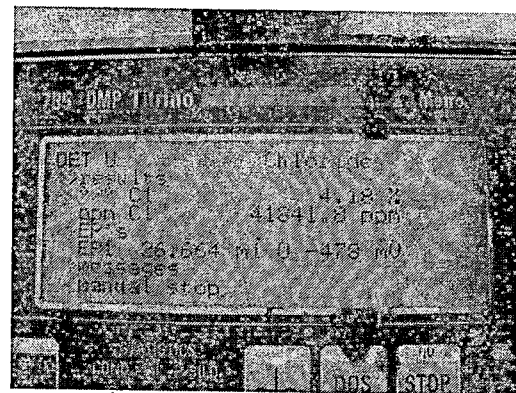
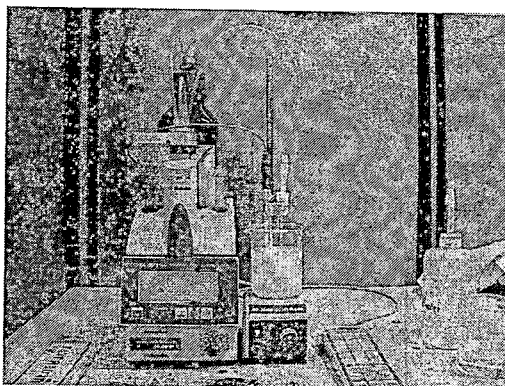


รูปที่ 3.22 การกดบีบเพื่อเก็บสารละลายจากตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ (น้ำภายใน)





รูปที่ 3.23 การชั่งน้ำหนักสารละลายที่จะนำมาไตเตรท



รูปที่ 3.24 การไตเตรทโดยเครื่อง Auto titration

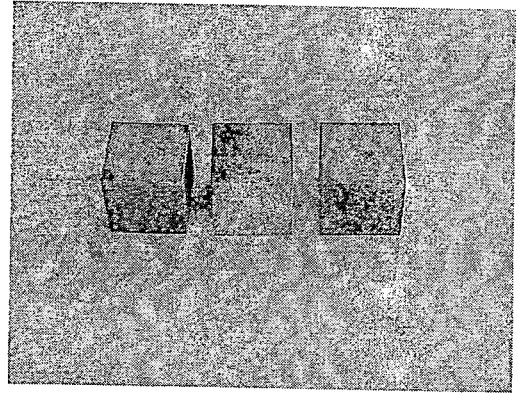
### 3.3.1.3 การหาปริมาณคลอไรด์

นำสารละลายที่เก็บได้จากการกดบีบตัวอย่าง (น้ำภายใน) หรือสารละลายที่แช่ตัวอย่าง (น้ำภายนอก) ออกมาประมาณ 2 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปชั่งน้ำหนัก (ซึ่งเฉพาะน้ำหนักน้ำเกลือคลอไรด์เท่านั้น) โดยชั่งละเอียดถึง 0.01 กรัม รูปที่ 3.23 จากนั้นนำมาเติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 150 มิลลิลิตร แล้วทำการไตเตรทด้วยเครื่อง auto titration ดังรูป 3.24 บันทึกค่าปริมาณสารละลายซิลเวอร์ในเตรทที่ใช้ รวมไปถึงค่าปริมาณคลอไรด์

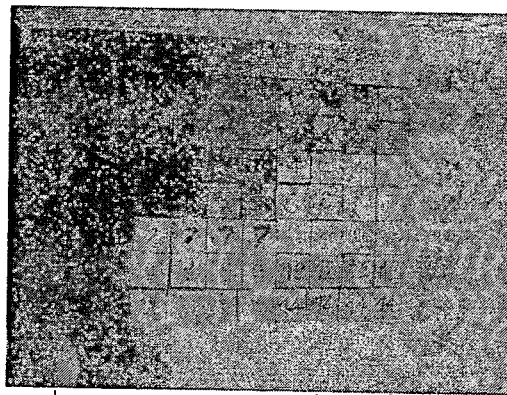
## 3.3.2 การทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี MIP

### 3.3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

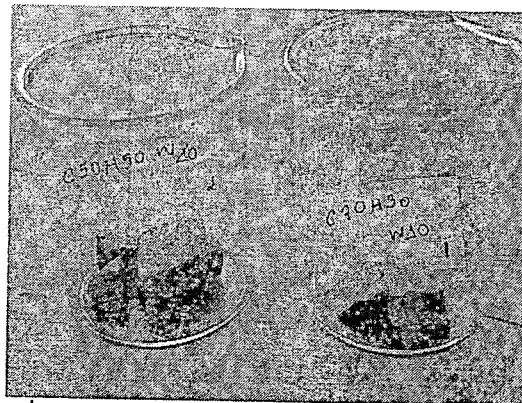
หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.25 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 แต่ละตัวอย่างมีจำนวน 3 ชิ้น และแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 28 และ 91 วัน ดังรูปที่ 3.26 เมื่อครบกำหนดระยะเวลา จะนำตัวอย่างมาตัดให้มีขนาดพอเหมาะกะกับเพเนโตรมิเตอร์ โดยจะเอาส่วนที่เป็นแกนกลางของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ แล้วนำไปอบเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.27



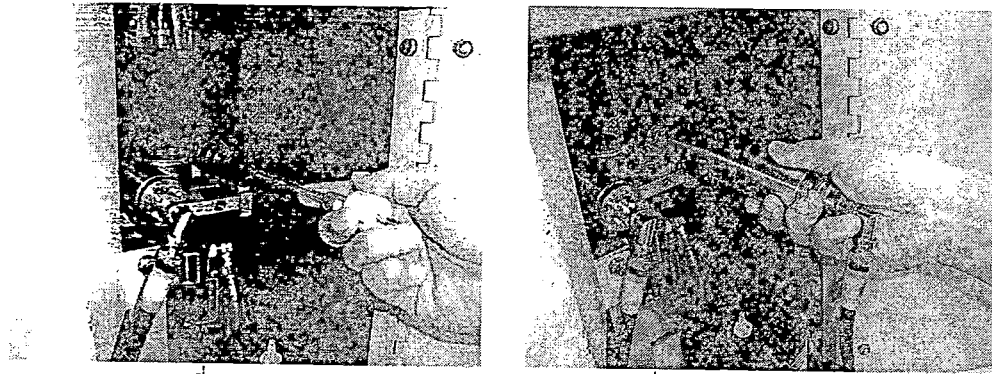
รูปที่ 3.25 ชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์



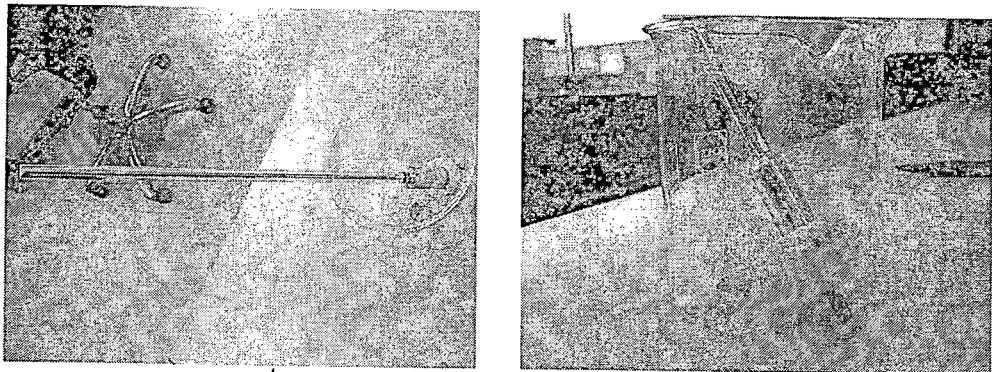
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างทดสอบที่แช่ในน้ำประปา



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างทดสอบที่ตัดและผ่านการอบแล้ว



รูปที่ 3.28 การประกอบเพเนโทรมิเตอร์เข้าเครื่องอัดความดันต่ำ



รูปที่ 3.29 เพเนโทรมิเตอร์ที่ผ่านการอัดปรอทแล้ว

### 3.3.2.2 การทดสอบ

- 1) ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง และน้ำหนักของเพเนโทรมิเตอร์
- 2) ใส่ตัวอย่างลงในเพเนโทรมิเตอร์ พร้อมประกอบชุดเพเนโทรมิเตอร์ จากนั้นนำไปประกอบเข้ากับเครื่องอัดความดันต่ำ (Low pressure) รูปที่ 3.28
- 3) ทำการดูดอากาศออกจากเพเนโทรมิเตอร์ จนมีความดันต่ำกว่า 50 psi แล้วจึงปล่อยปรอทเข้าไปในเพเนโทรมิเตอร์ เพิ่มความดันของปรอทอย่างช้าๆ โดยเครื่องอัดแก๊สไนโตรเจน พร้อมบันทึกข้อมูลความดันต่างๆ จนความดันประมาณ 24-25 psi. และปรับความดันสู่ความดันบรรยากาศ ดังรูปที่ 3.29
- 4) นำเพเนโทรมิเตอร์ไปประกอบกับส่วนที่เป็นเครื่องอัดความดันสูง แล้วอัดปรอทด้วยน้ำมัน จนถึงความดัน 30,000-33,000 psi พร้อมบันทึกข้อมูลความดันและปริมาตรของปรอท

### 3.3.3 การทดลองโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสด้วยวิธี BET

#### 3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

หล่อตัวอย่างซีเมนต์เฟสทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.24 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 แต่ละตัวอย่างมีจำนวน 3 ชิ้น แช่น้ำประปาเป็นเวลา 28 และ 91 วัน ดังรูปที่ 3.26 เมื่อครบกำหนดเวลา จะนำตัวอย่างมาตัดเฉพาะส่วนที่เป็นแกนกลางของตัวอย่าง และบดให้มีขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง รูปที่ 3.30

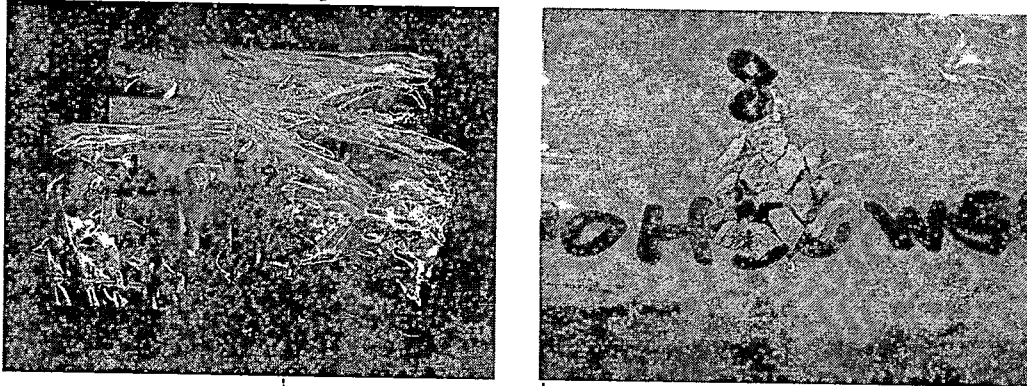
### 3.3.3.2 การทดสอบ

1) ชั่งน้ำหนักหลอดทดสอบและตัวอย่างทดสอบ รูปที่ 3.31

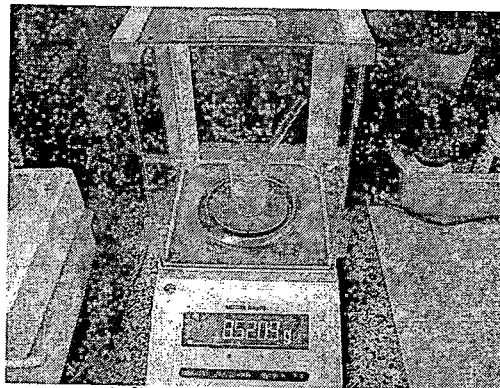
2) ทำการไล่อากาศ (Outgas) ออกจากหลอดทดลองและโพรงภายในตัวอย่างด้วยเครื่องทำความร้อน (Heater) โดยการติดตั้งหลอดทดสอบตัวอย่าง (Tube) เข้ากับเครื่องทดสอบ รูปที่ 3.32 แล้วเปิดเครื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เสร็จแล้วปิดหลอดทดลองให้สนิท นำตัวอย่างไปชั่งอีกครั้ง แล้วทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงจนเป็นปกติ

3) เต็มไนโตรเจนเหลวที่ภาชนะของเครื่องทดสอบจนถึงขีดที่กำหนด และนำหลอดทดสอบไปใส่ในช่องด้านบนของเครื่องทดสอบ รูปที่ 3.33

4) หาขนาดโพรงช่องว่างและการกระจายตัวของซีเมนต์เพสต์ด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจน โดยใช้หลักการดูดซับ (Absorb) ของพื้นผิวภายในโพรงช่องว่างของตัวอย่าง และใช้ในโตรเจนเหลวในการควบคุมอุณหภูมิของการทดสอบ รูปที่ 3.34



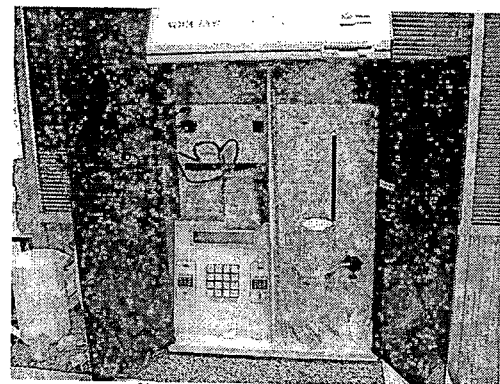
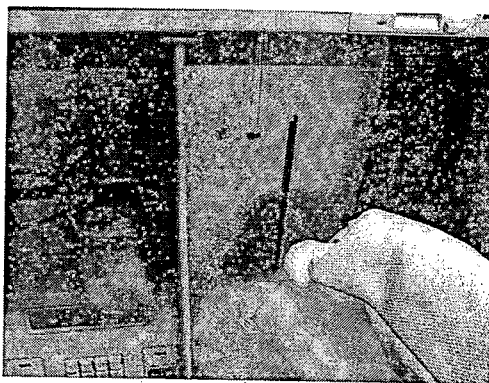
รูปที่ 3.30 ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการบดและอบแล้ว



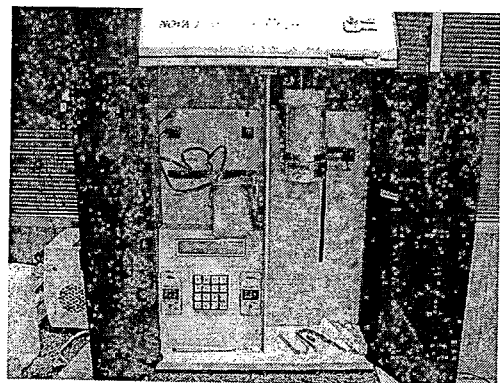
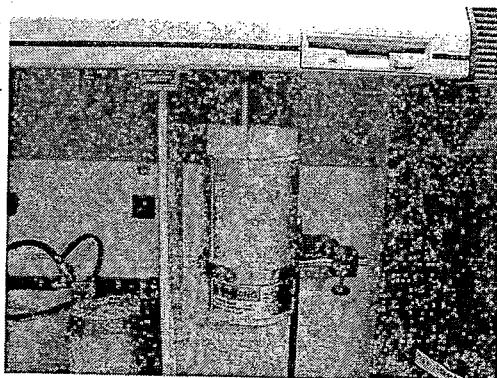
รูปที่ 3.31 การชั่งน้ำหนักหลอดทดสอบและตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.32 การไล่อากาศและความชื้นออกจากหลอดทดสอบ(Outgas)



รูปที่ 3.33 การเติมไนโตรเจนเหลวและติดตั้งหลอดทดสอบ



รูปที่ 3.34 การหาขนาดและการกระจายตัวของโพรงช่องว่าง

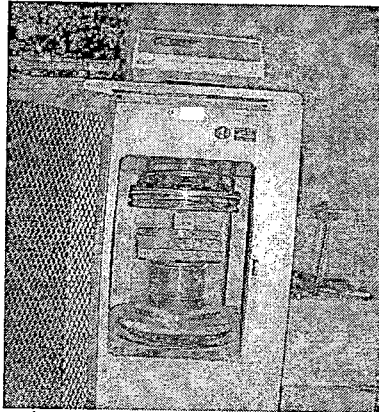
#### 3.3.4 การทดลองกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.25 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 แต่ละตัวอย่างมีจำนวน 3 ชิ้น และแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 28 และ 91 วัน ดังรูปที่ 3.26 เมื่อครบกำหนดระยะเวลา จึงนำมาทดสอบทำลายเพื่อหากำลังรับแรงอัด ซึ่งมาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ (BS 1881: PART 4) Method of testing concrete for strength ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

- 1) วัดขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบที่จะรับแรงกด
- 2) นำก้อนตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด ในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ โดยอัตราที่ใช้คือ 1.4-3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที
- 3) เปิดเครื่องทดสอบ และกดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ รูปที่ 3.35
- 4) นำค่าน้ำหนัก และ พื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

$$\text{จาก } f'_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

- เมื่อกำหนดให้  $f'_c$  = กำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่าง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)  
 $P$  = น้ำหนักของแรงที่กระทำ (กิโลกรัม)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 3.35 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

## บทที่ 4

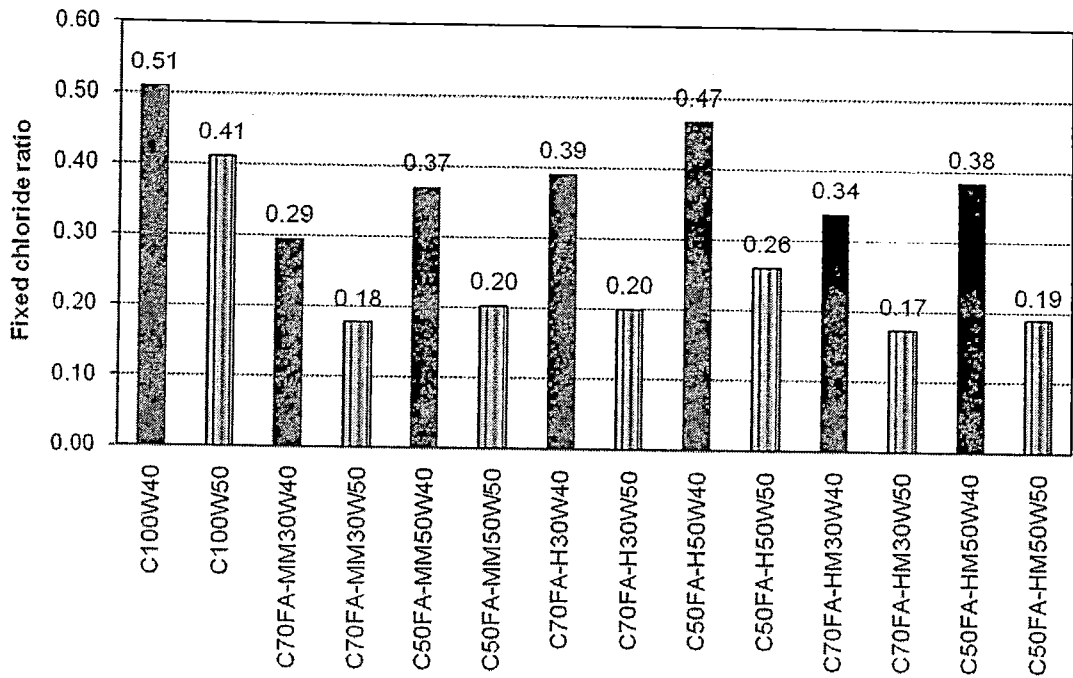
### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

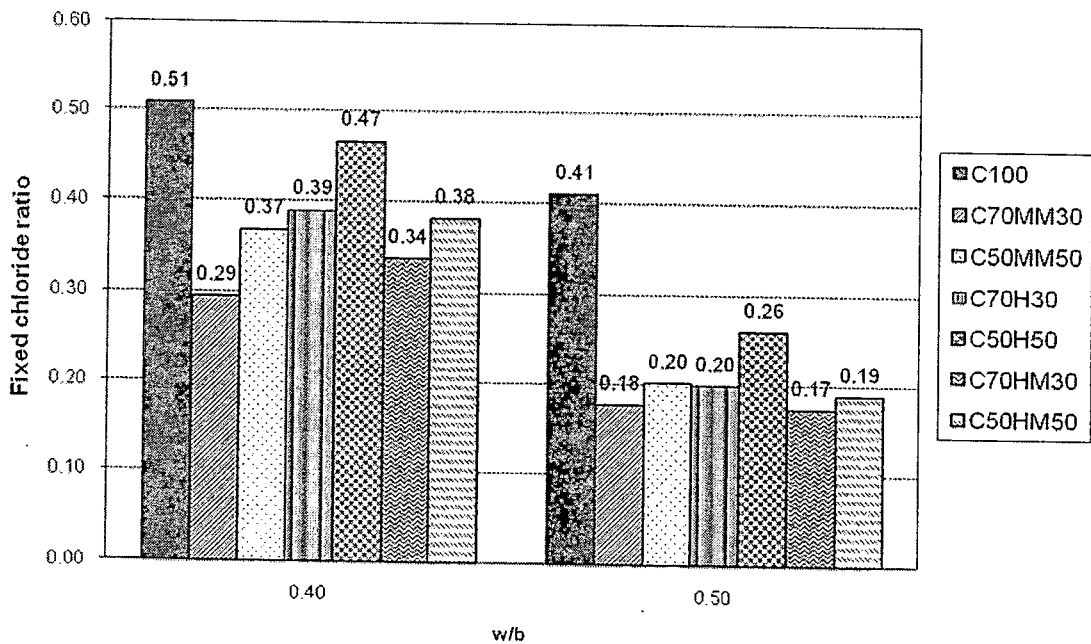
จากการทดลองได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วนคือ 0.40 และ 0.50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยที่ใช้มี 3 ชนิด คือ เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอย BLCP Hunter และเถ้าลอย BLCP Hunter Malawan และแช่น้ำเป็นเวลา 28 และ 91 วัน หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำเกลือคลอไรด์เข้มข้น 5% เป็นเวลา 91 วัน โดยผลการทดลองได้แสดงออกมาเป็นกราฟเพื่อพิจารณาตั้งแต่ 4.1-4.5 ดังนี้

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่มีส่วนผสมเดียวกัน การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่ามากขึ้น เนื้อซีเมนต์เพสต์มีความทึบน้ำต่ำลง จึงมีปริมาณโพรงช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ทำให้การแพร่ของคลอไรด์เกิดได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระมากขึ้น แต่ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับน้อยลง เพราะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีน้อยลง จึงทำให้สารประกอบ C-S-H น้อยลง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์จึงลดลง

เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่มีส่วนผสมเดียวกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.50 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.30 เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น คุณสมบัติในการยึดประสานของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ส่งผลให้โพรงช่องว่างน้อยขึ้น การยึดจับทางกายภาพและทางเคมีเพิ่มขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์จึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์โพสท์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน



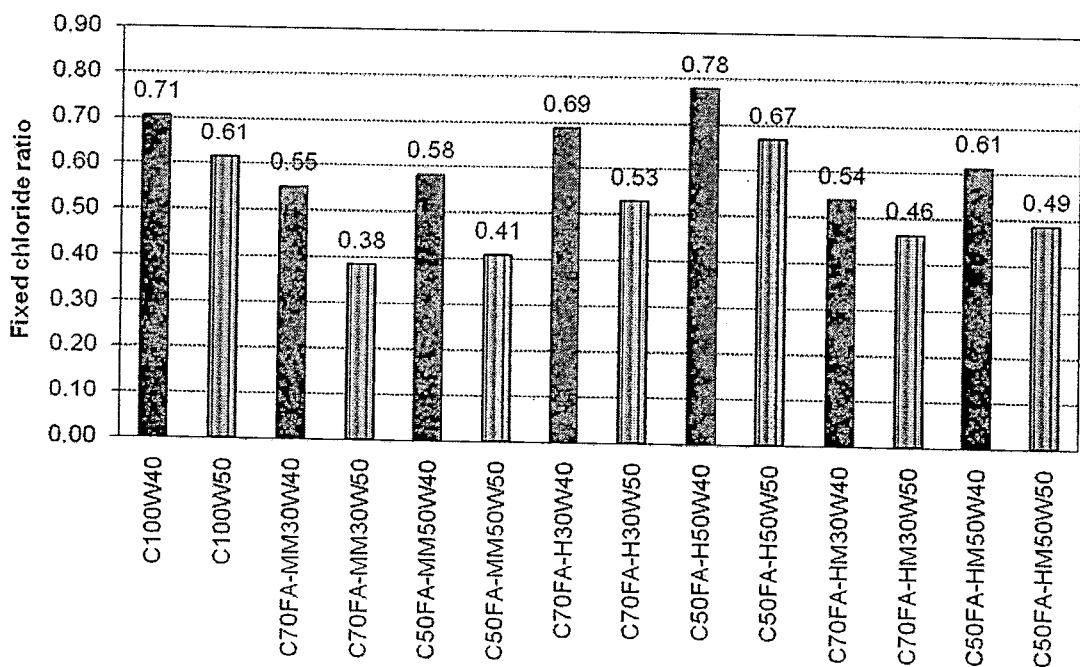
รูปที่ 4.2 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์โพสท์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานแตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน



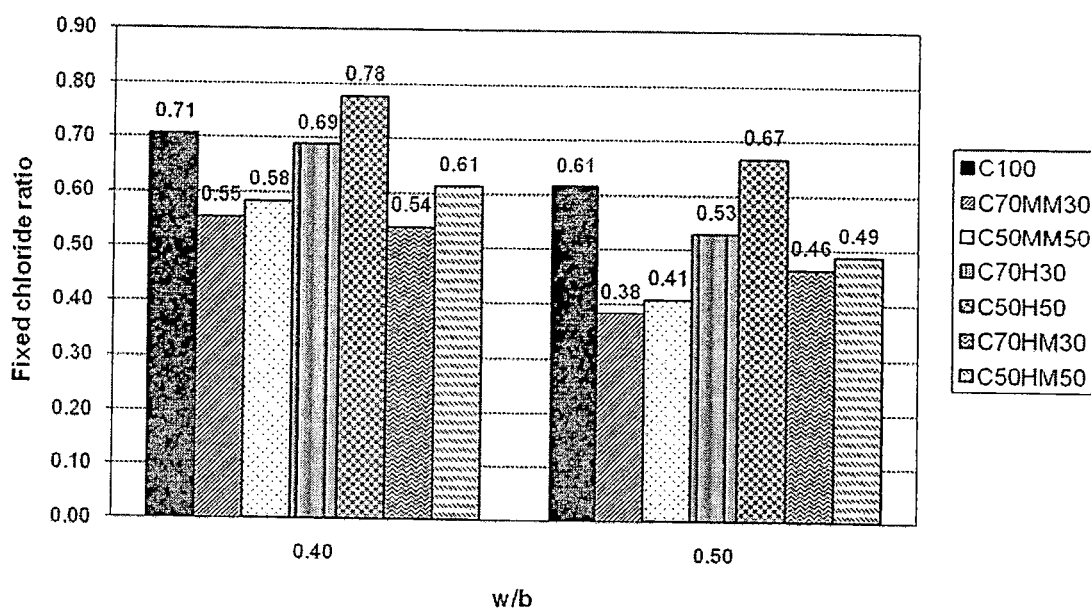
พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์สูงสุดคือ ตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวไม่มีการแทนที่วัสดุประสาน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นเกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก หรือผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกอาจจะเกิดไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์มีมากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่มีส่วนผสมเดียวกัน การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 เนื่องมาจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่ามากขึ้น เนื้อซีเมนต์เพสต์มีความทึบหน้าต่ำลง จึงมีปริมาณโพรงช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ทำให้การแพร่ของคลอไรด์เกิดได้ง่าย ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระมากขึ้น แต่ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับน้อยลง เพราะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีน้อยลง ทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ลดลง

เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่มีส่วนผสมเดียวกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.50 มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.30 เนื่องมาจากเมื่ออัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากขึ้น คุณสมบัติในการยึดประสานของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น การยึดจับทางกายภาพและทางเคมีเพิ่มขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์จึงเพิ่มขึ้น



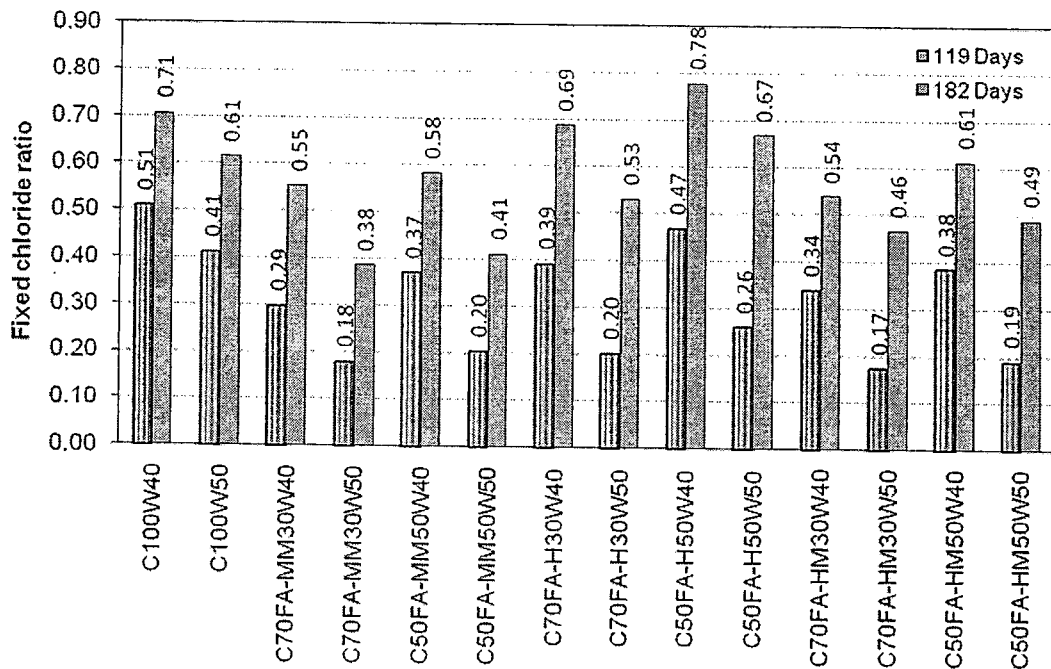
รูปที่ 4.3 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 91 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน



รูปที่ 4.4 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานแตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 91 วันและแช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์สูงสุดคือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอย BCLP-Hunter ที่ 0.50 เนื่องจากแก้วลอยชนิดนี้มีปริมาณซิลิกาและอลูมินาสูงกว่าแก้วลอยชนิดอื่นๆ จึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สารประกอบ C-S-H และ C-A-H มากกว่า ส่งผลการยึดประสานของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ และอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานและอายุการบ่มมีผลต่อความสามารถเก็บกักคลอไรด์

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แช่น้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 119 และ 182 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 182 วัน มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 119 วัน เนื่องจาก เมื่อระยะเวลาการบ่มนานมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงมีมากขึ้น ได้สารประกอบ C-S-H และ C-A-H มากขึ้น ส่งผลการยึดประสานของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ และอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง

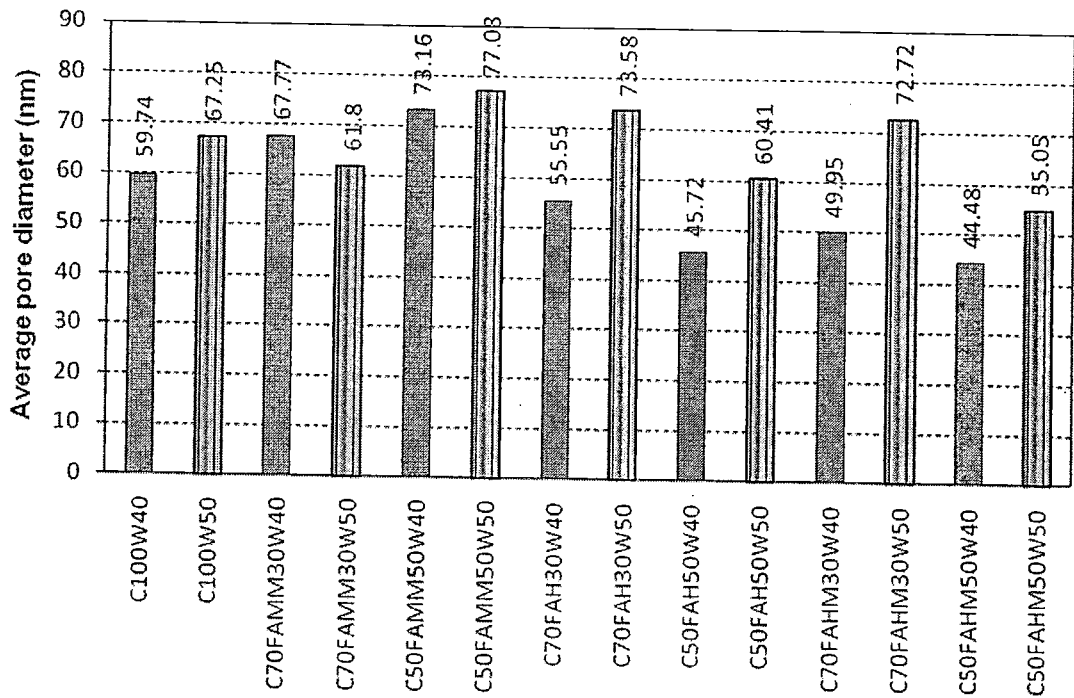


รูปที่ 4.5 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน แชน้ำเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 119 และ 182 ตามลำดับ

## 4.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์

### 4.2.1 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

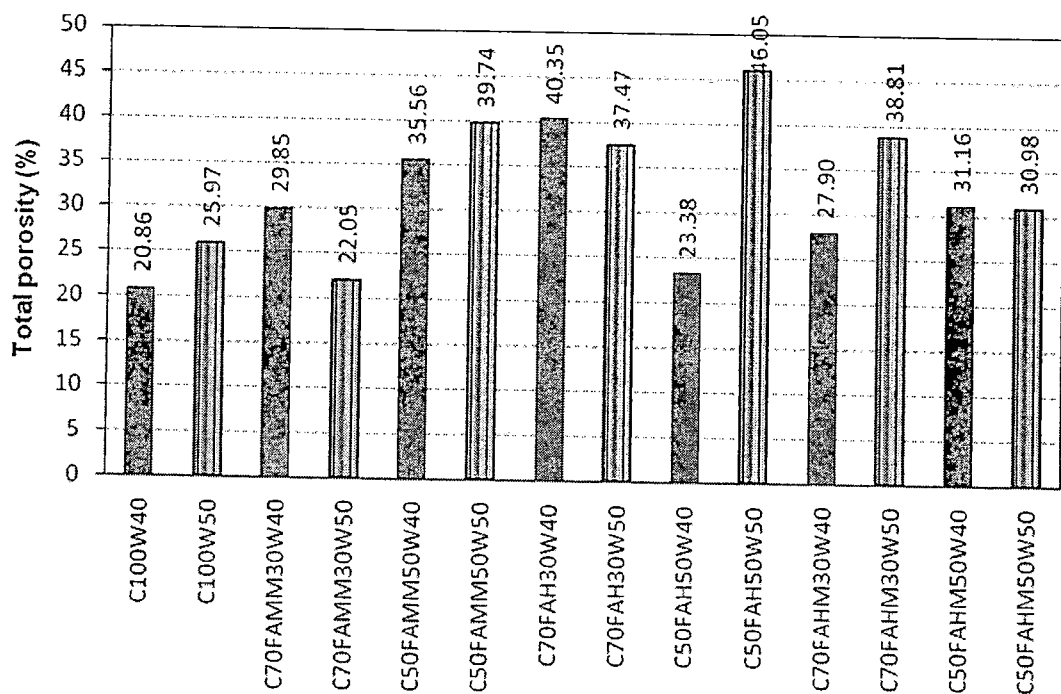
จากการทดลองได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วนคือ 0.40 และ 0.50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 โดยน้ำหนัก แก้วลอยที่ใช้มี 3 ชนิด คือ แก้วลอยแม่เมาะ แก้วลอย BLCP Hunter และแก้วลอย BLCP Hunter Malawan และแช่ตัวอย่างทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยผลการทดสอบได้แสดงออกมาเพื่อพิจารณาตั้งแต่รูปที่ 4.6-4.11 ดังนี้



รูปที่ 4.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.6 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างน้อยกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์มากขึ้น

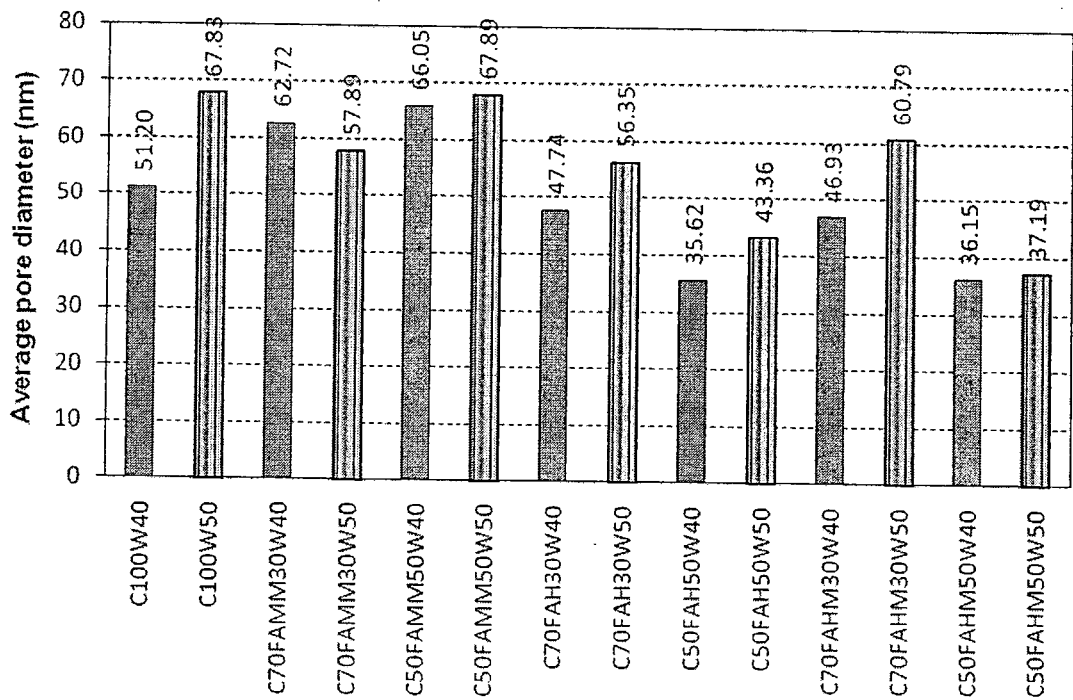
เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเท่ากับ 0.50 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างน้อยกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยที่ 0.30 เนื่องจากแก้วลอยมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อมีการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้ขนาดโพรงช่องว่างมีขนาดเล็กลง และจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของแก้วลอยจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์เนื้อแน่นขึ้น



รูปที่ 4.7 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์น้อยกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เนื่องมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์มากขึ้น

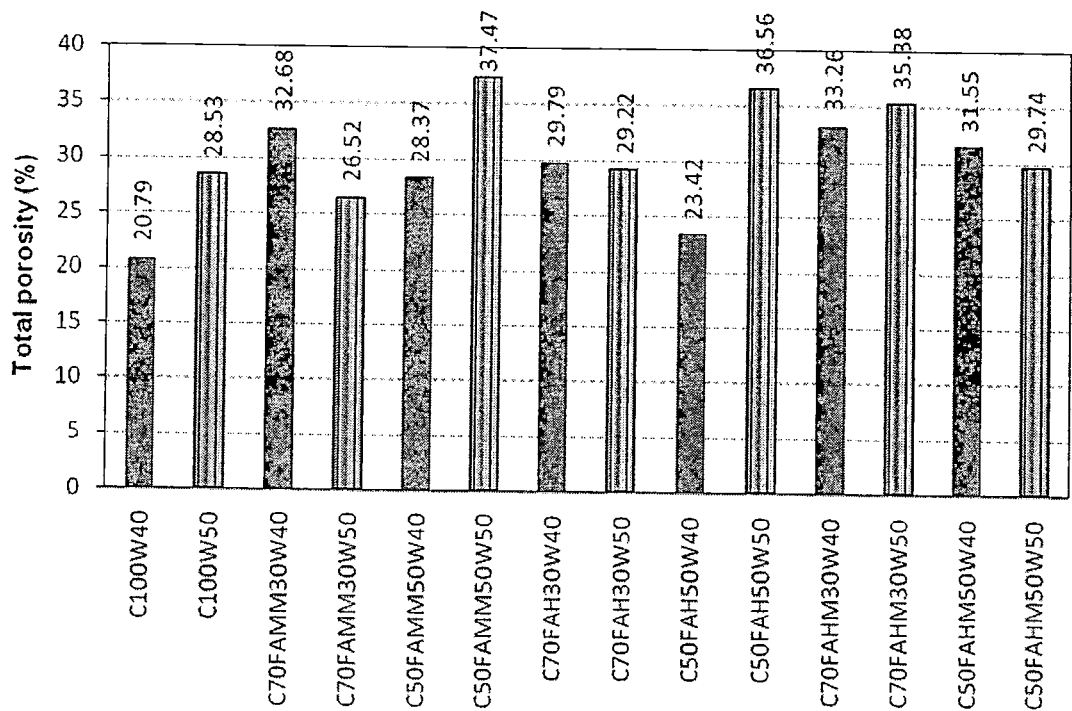
เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยถ้ำลอยเท่ากับ 0.50 มีความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างมากกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยถ้ำลอยที่ 0.30 แม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างจะมีค่าเล็กลงก็ตาม ซึ่งสรุปได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างเล็กลง แต่มีจำนวนมากขึ้นจึงทำให้ค่าความพรุนทั้งหมดมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.8 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างน้อยกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์มากขึ้น

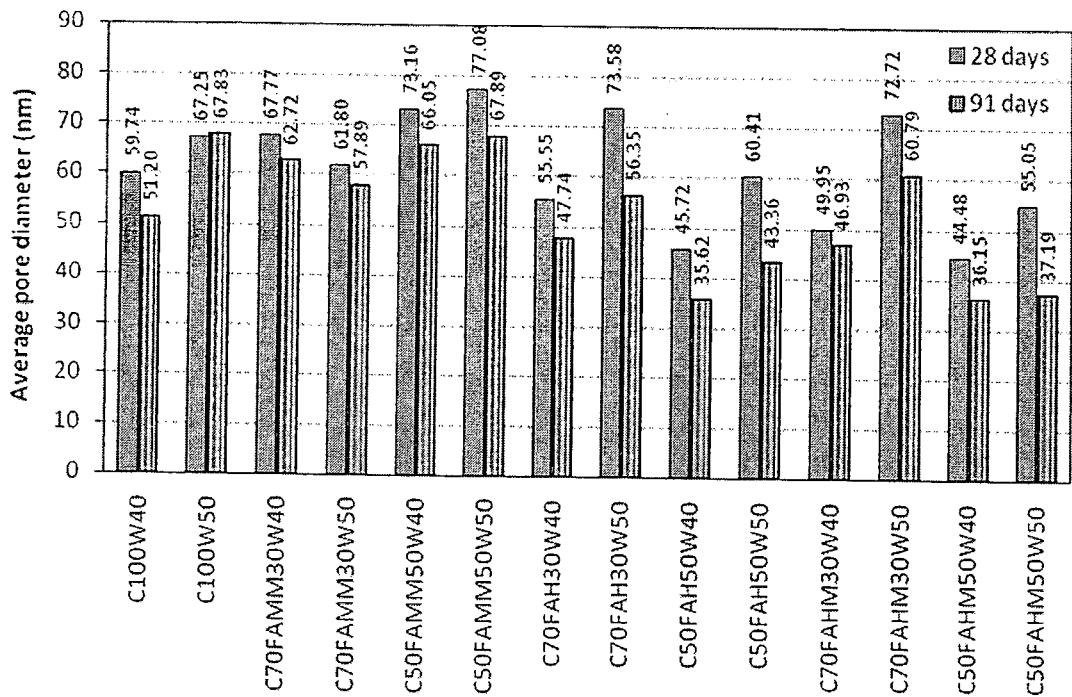
เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเท่ากับ 0.50 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างน้อยกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยที่ 0.30 เนื่องจากแก้วลอยมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อมีการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้ขนาดโพรงช่องว่างมีขนาดเล็กลง และจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของแก้วลอยจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์เนื้อแน่นขึ้น



รูปที่ 4.9 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์น้อยกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์มากขึ้น

เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ที่อายุการบ่ม 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.50 มีความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างมากกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.30 แม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างจะมีค่าเล็กลงก็ตาม ซึ่งสรุปได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างเล็กลง แต่มีจำนวนมากขึ้นจึงทำให้ค่าความพรุนทั้งหมดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

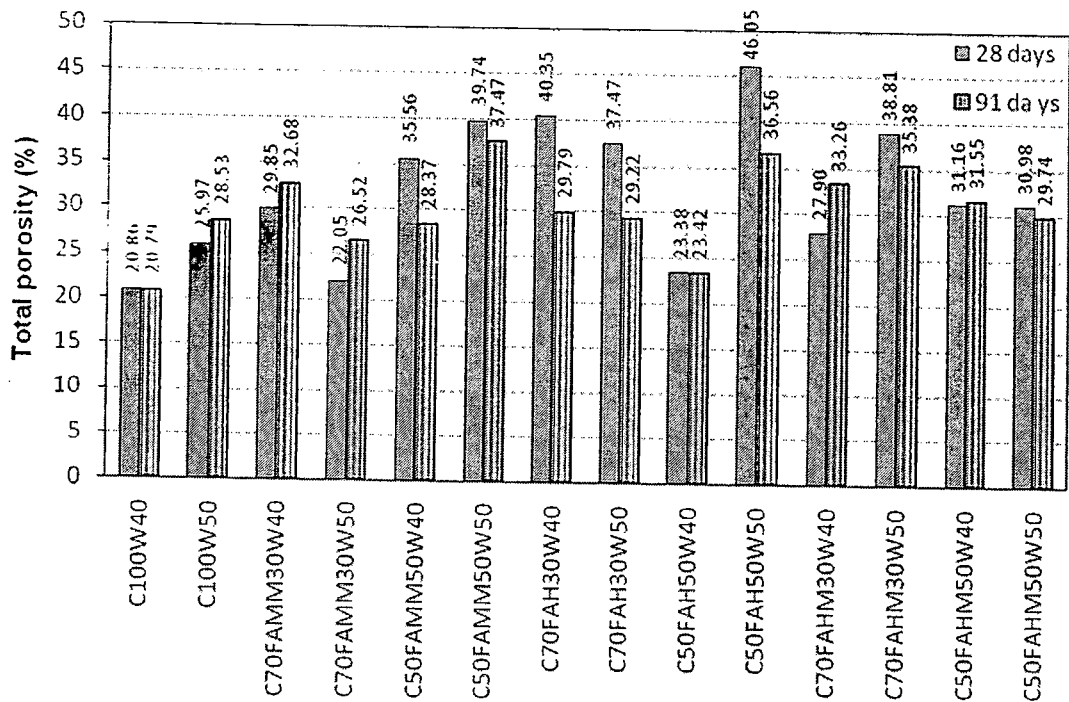


รูปที่ 4.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเล็กกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เนื่องจาก เมื่อระยะเวลาการบ่มนานมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงมีมากขึ้น ได้สารประกอบ C-S-H และ C-A-H มากขึ้น ส่งผลการยึดประสานของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ และอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน มีความพรุนทั้งหมดน้อยกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เนื่องจาก เมื่อระยะเวลาการบ่มนานมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงมีมากขึ้น ได้สารประกอบ C-S-H และ C-A-H มากขึ้น ส่งผลการยึดประสานของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ และอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง



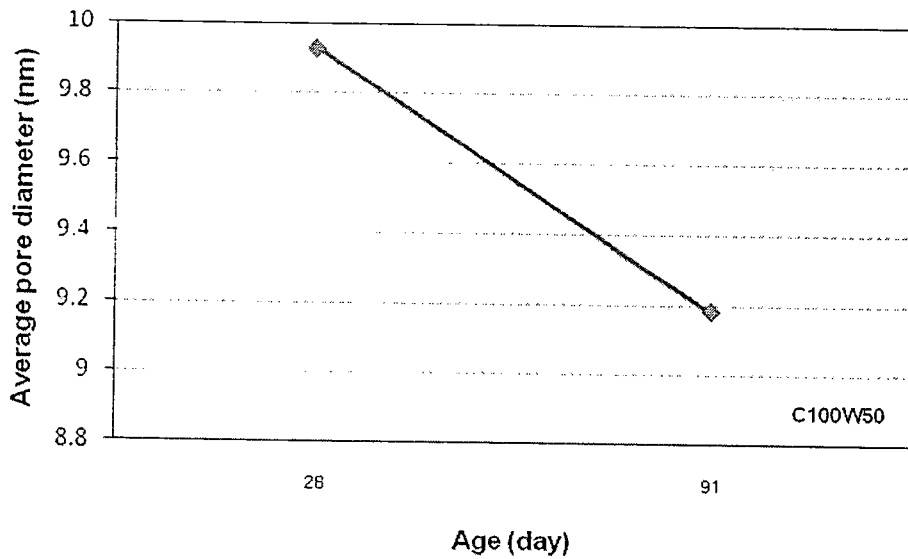


รูปที่ 4.11 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน

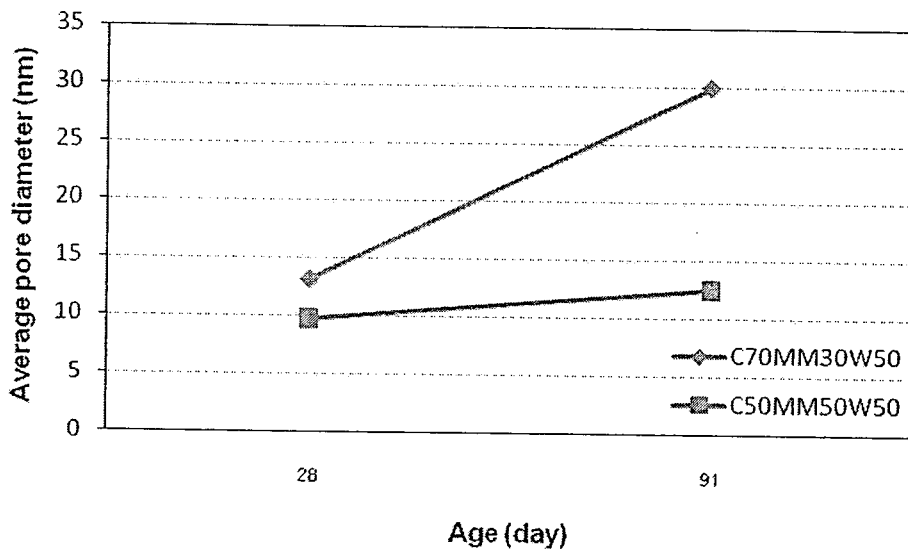
#### 4.2.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี Brunauer Emmett and Teller (BET)

จากการทดลองได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 2 อัตราส่วนคือ 0.40 และ 0.50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 โดยน้ำหนัก แก้วลอยที่ใช้มี 3 ชนิด คือ แก้วลอยแม่เมาะ แก้วลอยBLCP-Hunter และแก้วลอยBLCP-Hunter Malawan และแช่ตัวอย่างทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยผลการทดสอบได้แสดงออกมาเป็นกราฟเพื่อพิจารณาตั้งแต่รูปที่ 4.12-4.16 ดังนี้

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.12 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และไม่มี การแทนที่วัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 28 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 91 วัน มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน เนื่องมาจากเมื่อระยะเวลาการบ่มนานมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องและมากขึ้น ทำให้ได้สารประกอบ C-S-H และ C-A-H มากขึ้น ส่งผลต่อการยึดประสานของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์จึงมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และไม่มีการแทนที่วัสดุประสาน ที่อายุ 28 และ 91 วัน



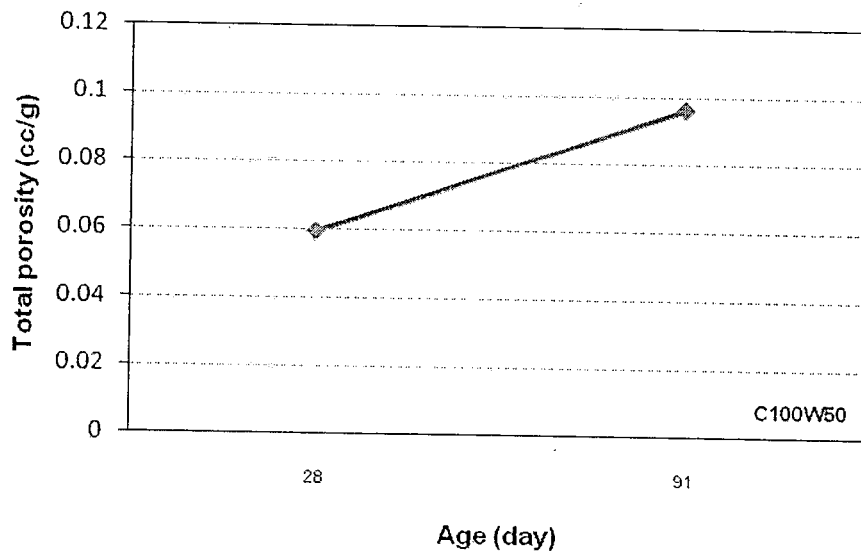
รูปที่ 4.13 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.13 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างที่อายุ 28 วัน มีขนาดเล็กกว่าที่อายุ 91 วัน ซึ่งไม่เป็นไปตามแนวโน้มของชุดข้อมูล ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนในการวัดตัวอย่าง ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์อาจรยรวัวเกิดขึ้น

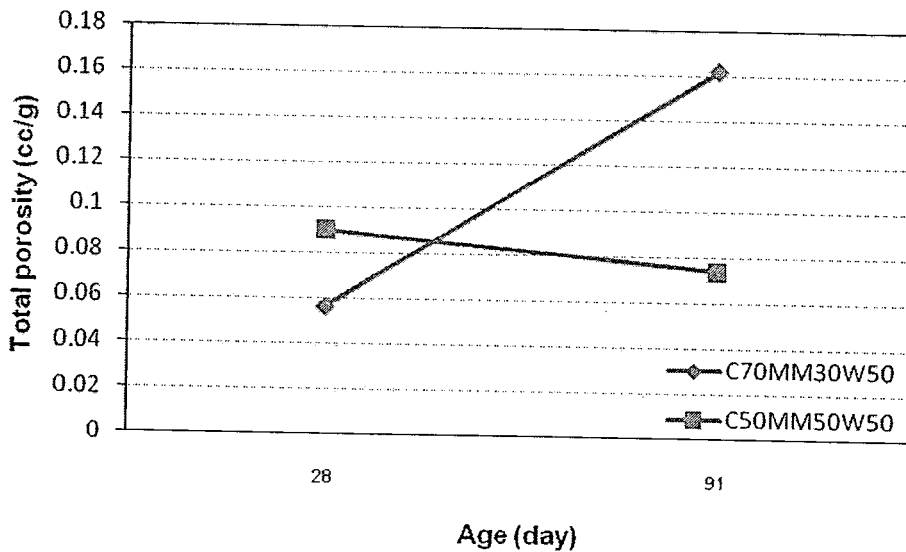
เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเท่ากับ

0.50 มีขนาดเล็กกว่า 0.30 เนื่องจากเพราะแก้วลอยมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อมีการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสที่มีขนาดเล็กลง

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และไม่มีการแทนที่วัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 28 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่าความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสที่อายุ 91 วัน มีปริมาณมากกว่าความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสที่อายุ 28 วัน แม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างจะมีค่าเล็กลงก็ตาม



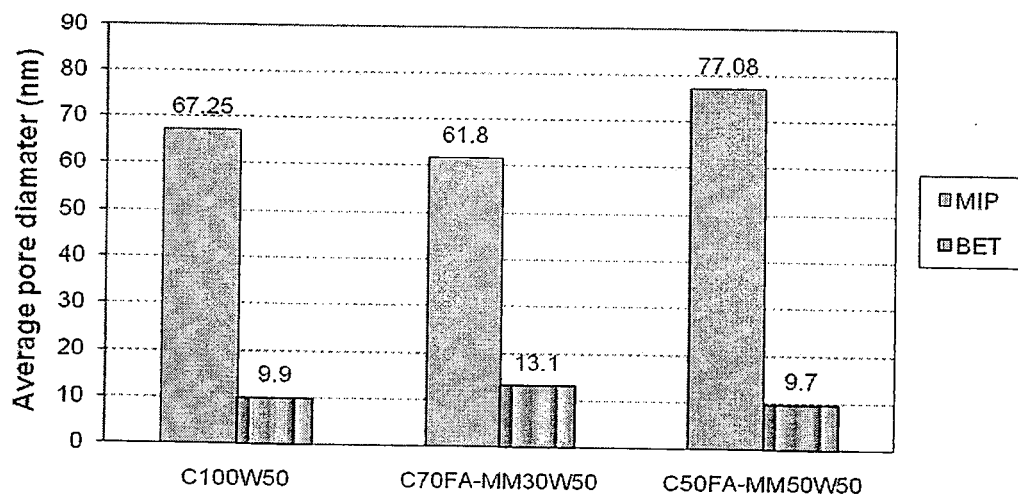
รูปที่ 4.14 ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และไม่มีการแทนที่วัสดุประสาน ที่อายุ 28 และ 91 วัน



รูปที่ 4.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เฟส โดยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วแตกต่างกัน ที่อายุ 28 และ 91 วัน จากผลการทดลองพบว่า ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 91 วัน มีปริมาณน้อยกว่าความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน เนื่องมาจากเมื่อระยะเวลาการบ่มนานมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องและมากขึ้น ทำให้ได้สารประกอบ C-S-H และ C-A-H มากขึ้น ส่งผลต่อการยึดประสานของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์เพสต์จึงมีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อายุการบ่มมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่าง แต่ทั้งนี้ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างที่อายุ 28 วัน มีขนาดเล็กกว่าที่อายุ 91 วัน ซึ่งไม่เป็นไปตามแนวโน้มของชุดข้อมูล ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนในการบดตัวอย่าง ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์อาจร่วนรำวเกิดขึ้น

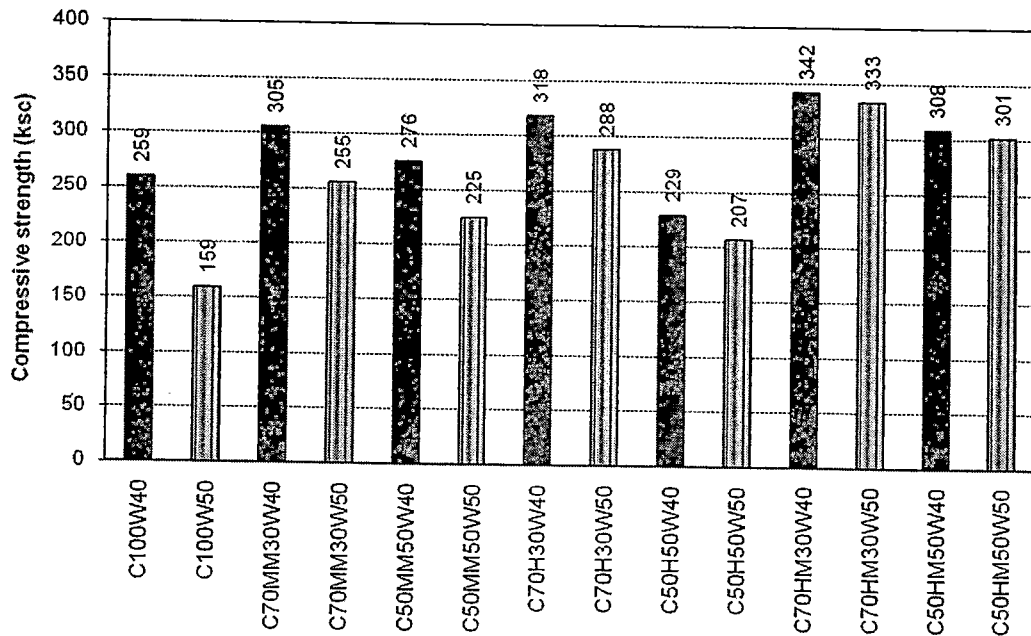
พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.16 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ระหว่างการทดสอบด้วยวิธี MIP กับการทดสอบด้วยวิธี BET ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของการทดสอบด้วยวิธี MIP มาขนาดใหญ่มากกว่าการทดสอบด้วยวิธี BET เนื่องมาจาก การทดสอบด้วยวิธี BET นั้นใช้การดูดซับของแก๊ส จึงวิเคราะห์โครงสร้างโพรงช่องว่างที่มีขนาดเล็กมากเท่านั้น แต่ในการทดลองด้วยวิธี MIP ใช้ปรอทอัดเข้าไปแทนที่โพรงช่องว่าง จึงวิเคราะห์โครงสร้างโพรงช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่าวิธีของ BET ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จึงมีค่าแตกต่างกันมาก และไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้



รูปที่ 4.16 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ระหว่างการทดสอบด้วยวิธี MIP กับการทดสอบด้วยวิธี BET ที่อายุ 28 วัน

#### 4.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟสค์

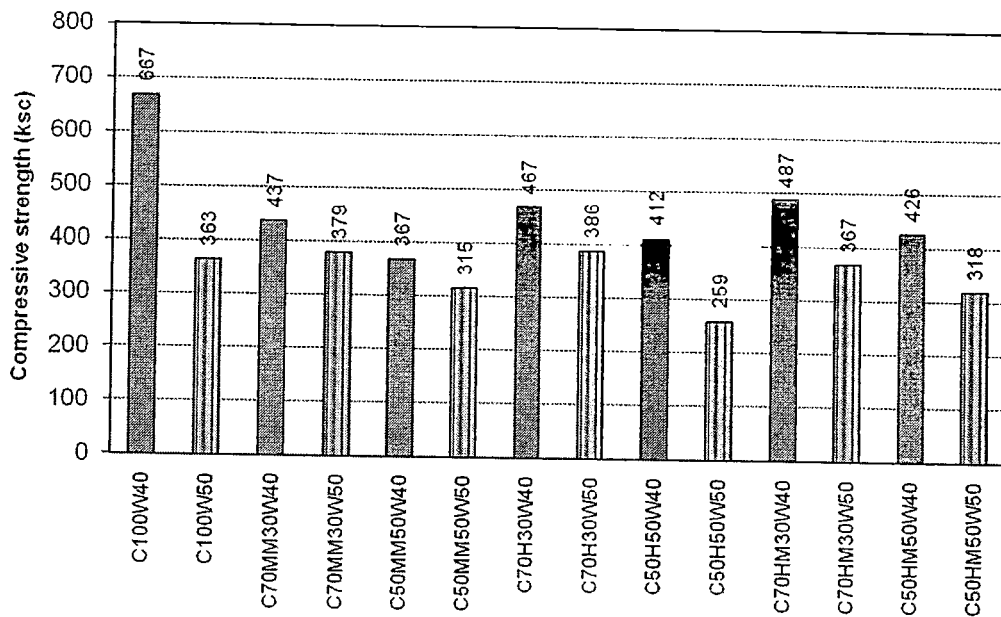
จากการทดลองได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 2 อัตราส่วนคือ 0.40 และ 0.50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 โดยน้ำหนัก แก้วลอยที่ใช้มี 3 ชนิด คือ แก้วลอยแม่เมาะ แก้วลอย BLCP Hunter และแก้วลอย BLCP Hunter Malawan และแช่ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยผลการทดสอบได้แสดงออกมาเป็นกราฟเพื่อพิจารณาดังแต่รูปที่ 4.17-4.19 ดังนี้



รูปที่ 4.17 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟสค์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมเดียวกัน การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เฟสค์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าซีเมนต์เฟสค์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่ามากขึ้น เนื้อซีเมนต์เฟสค์มีความทึบน้ำตาล จึงมีปริมาณโพรงช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

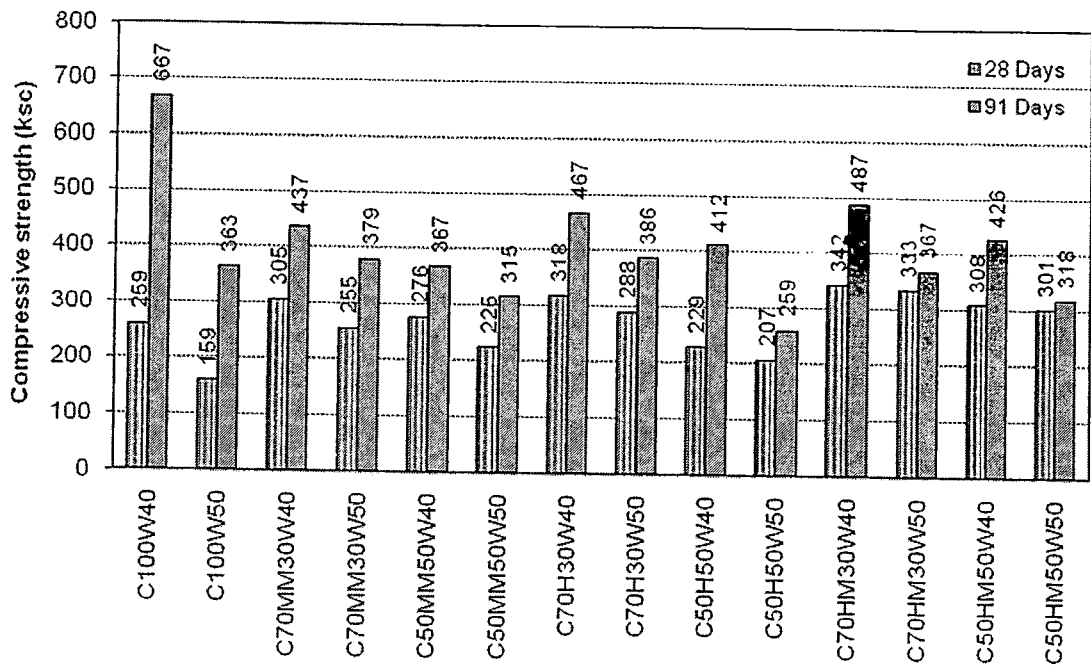
เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมเดียวกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เฟสค์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยที่ 0.30 จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยที่ 0.50 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นก่อนปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งทำให้ได้สารประกอบ C-S-H ส่งผลต่อการยึดประสานของซีเมนต์เฟสค์ดีขึ้น ทำให้สามารถรับกำลังได้มากกว่า



รูปที่ 4.18 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมเดียวกัน การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่เท่ากัน แต่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่ามากขึ้น เนื้อซีเมนต์เพสต์มีความทึบน้ำตาล จึงมีปริมาณโพรงช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมเดียวกัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน แต่การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.30 จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยที่ 0.50 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นก่อนปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งทำให้ได้สารประกอบ C-S-H ส่งผลต่อการยึดประสานของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น ทำให้สามารถรับกำลังได้มากกว่า

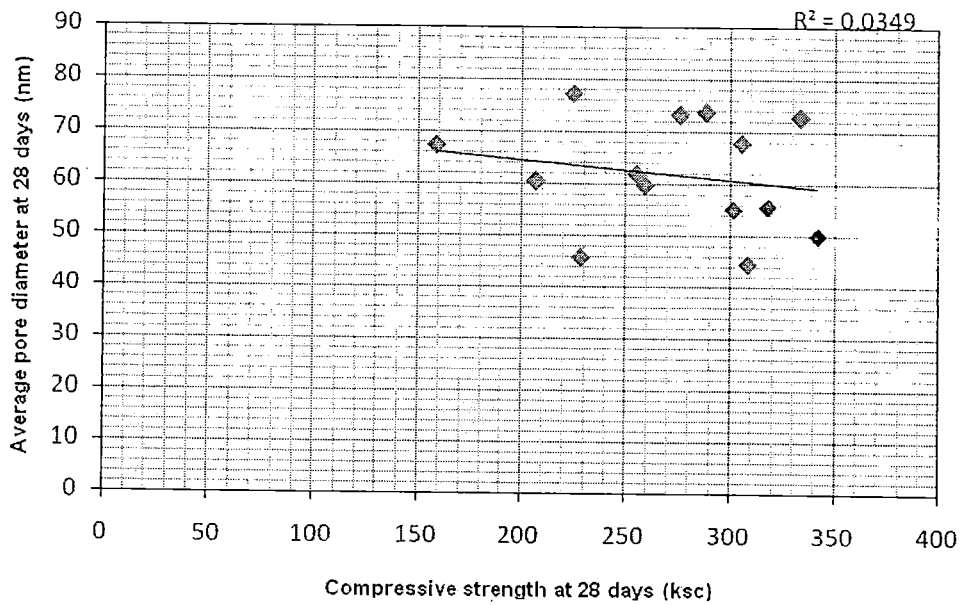


รูปที่ 4.19 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่าง ๆ โดยบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 และ 91

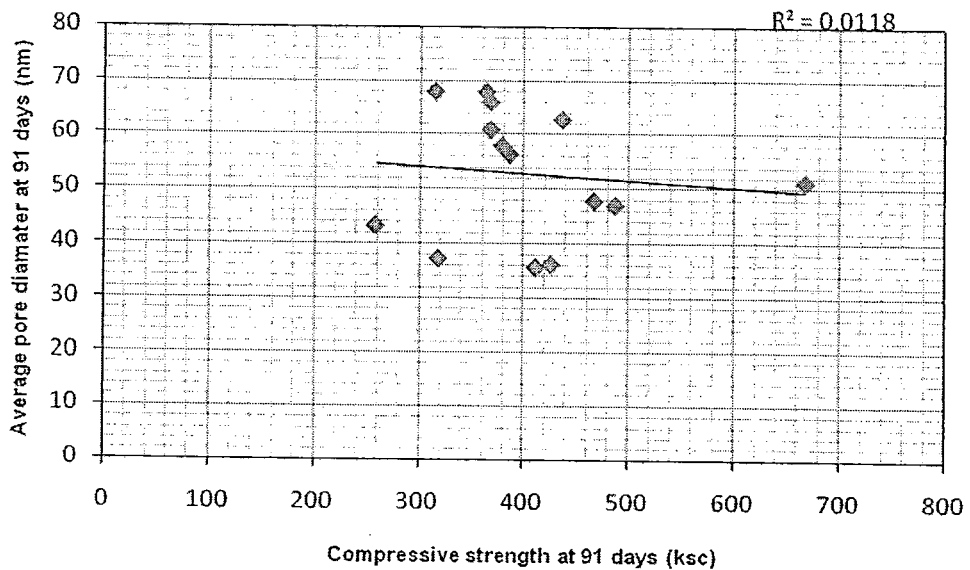
พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่มีส่วนผสมเดียวกัน การแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน แต่อายุการทดสอบแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีอายุการทดสอบ 91 วัน จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่อายุการทดสอบ 28 วัน เนื่องจากเมื่ออายุการทดสอบนานขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ส่งผลต่อการยึดประสานของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น

#### 4.4 ความสัมพันธ์ของผลการทดลอง

จากผลการทดลองความสามารถเก็บกักคลอไรด์ โครงสร้างโพรงช่องว่าง และกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ ได้นำผลการทดลองที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย ชนิดของเถ้าลอย และอายุการทดสอบที่เท่ากัน มาหาความสัมพันธ์กัน โดยผลของความสัมพันธ์ได้แสดงออกมาเป็นกราฟเพื่อพิจารณาดังรูปที่ 4.20-4.29 ดังนี้



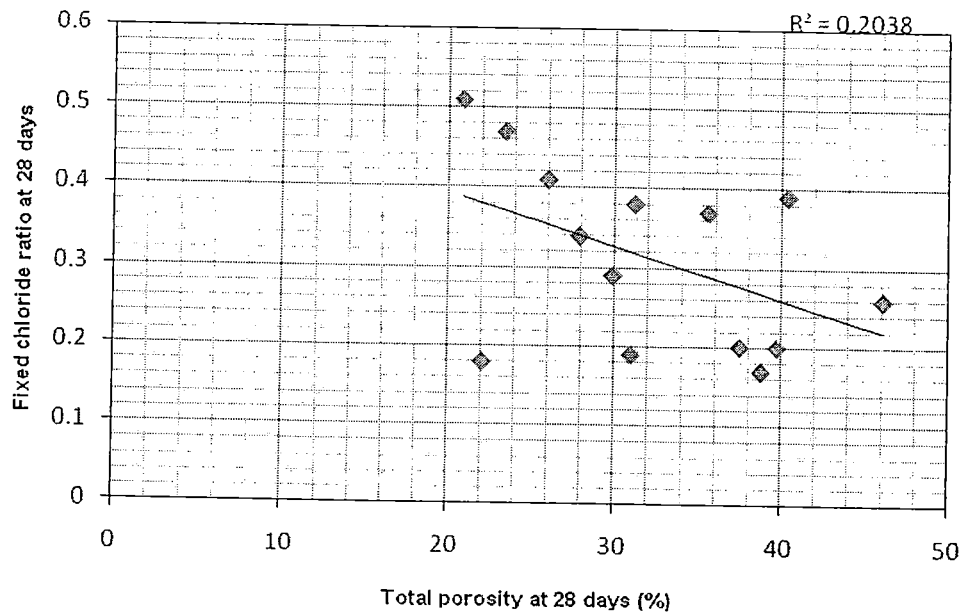
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน



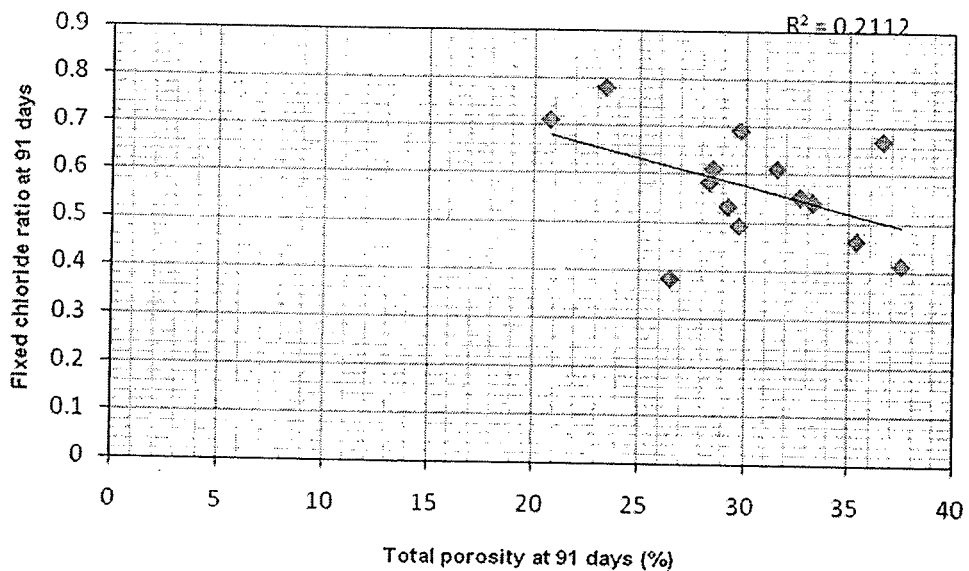
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.20 และ 4.21 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 และ 91 วัน พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง ความสามารถของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของทั้ง 2 ชุดข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด มีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กัน



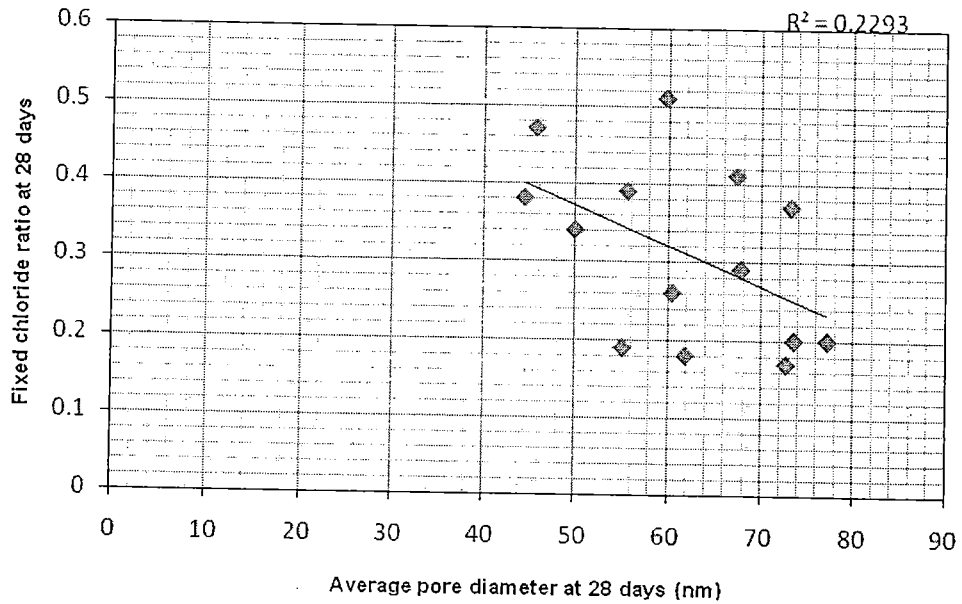


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของความพรุนทั้งหมดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

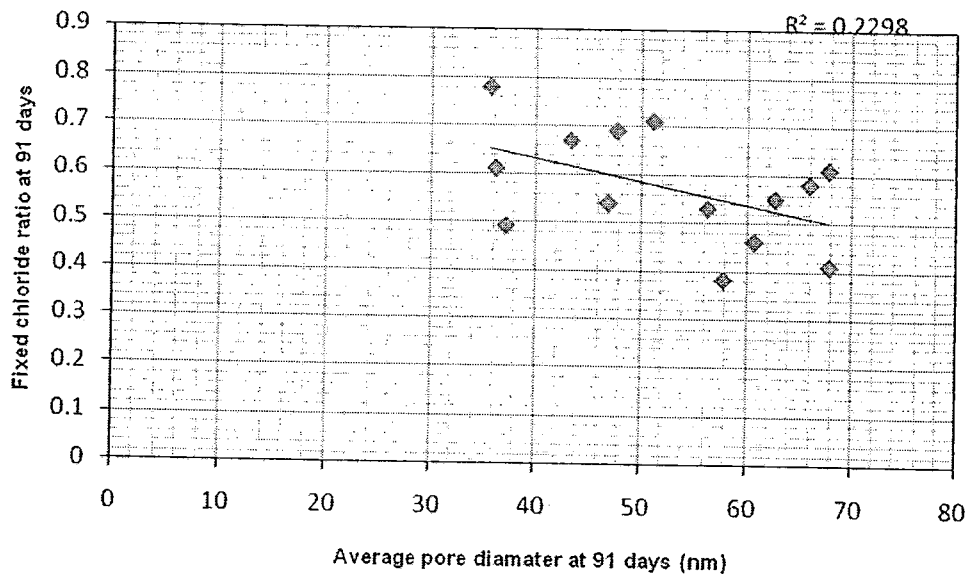


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความพรุนทั้งหมดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.22 และ 4.23 ความสัมพันธ์ของความพรุนทั้งหมดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 และ 91 วัน พบว่าเมื่อปริมาตรความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของทั้ง 2 ชุดข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด มีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กัน

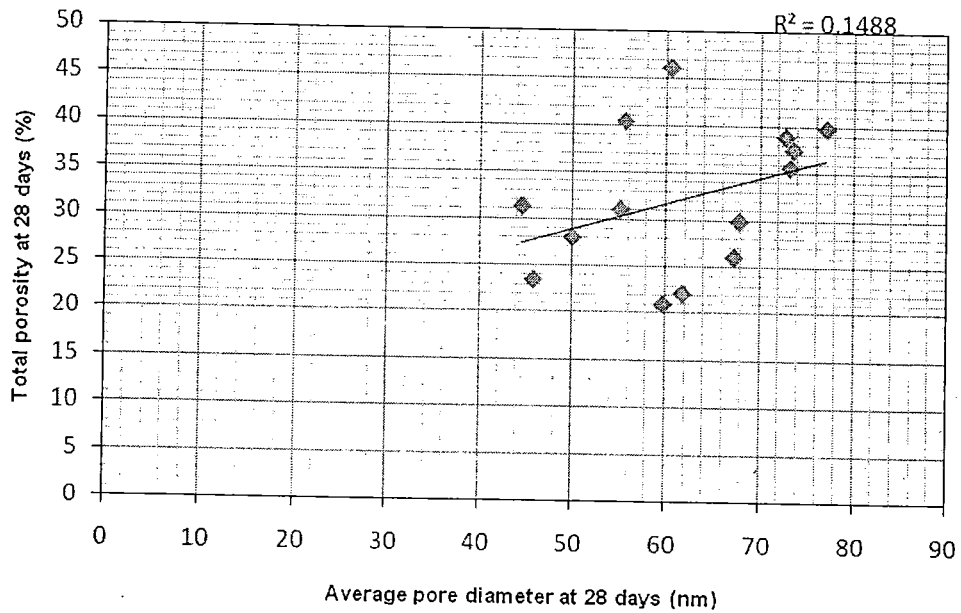


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

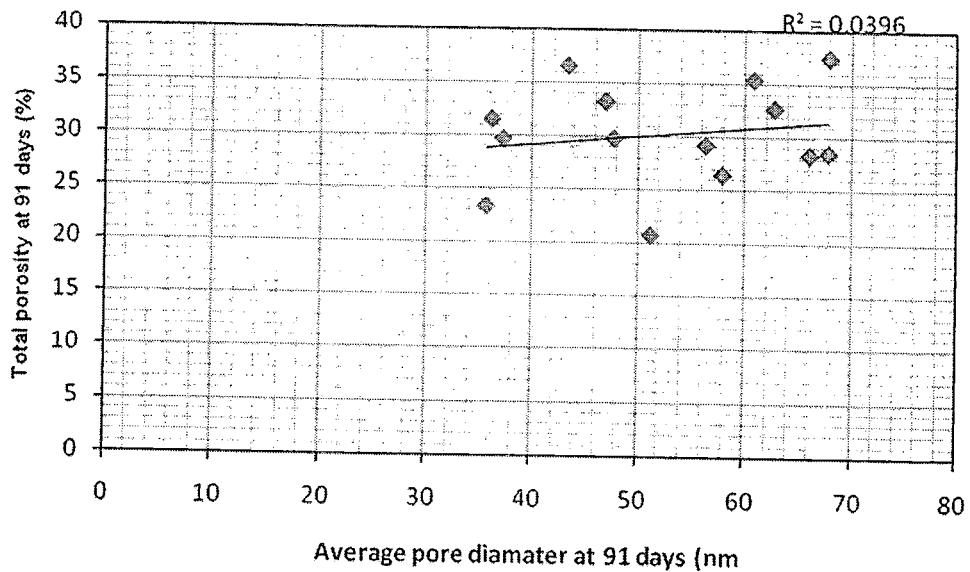


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.24 และ 4.25 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 และ 91 วัน พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของทั้ง 2 ชุดข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด มีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กัน

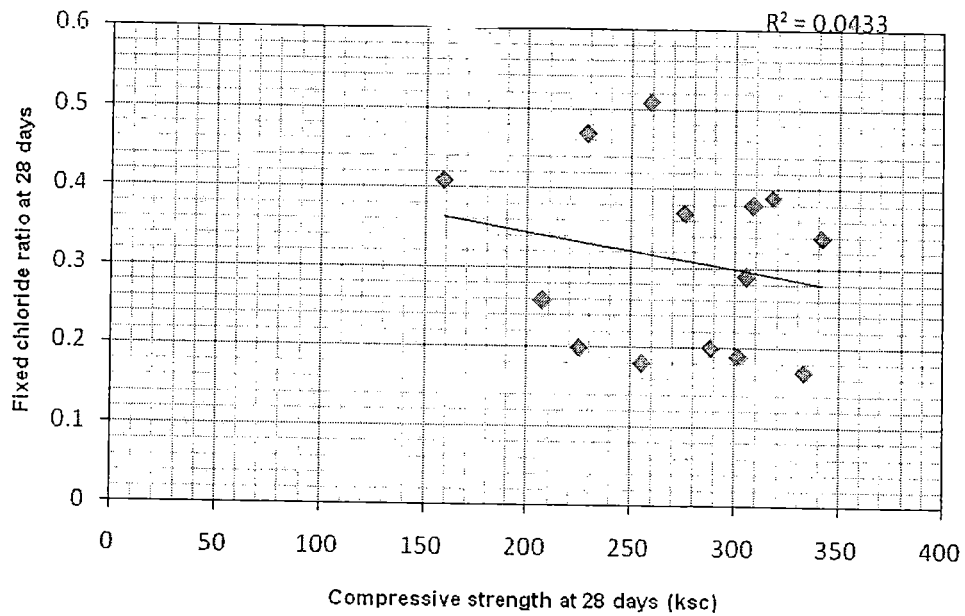


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

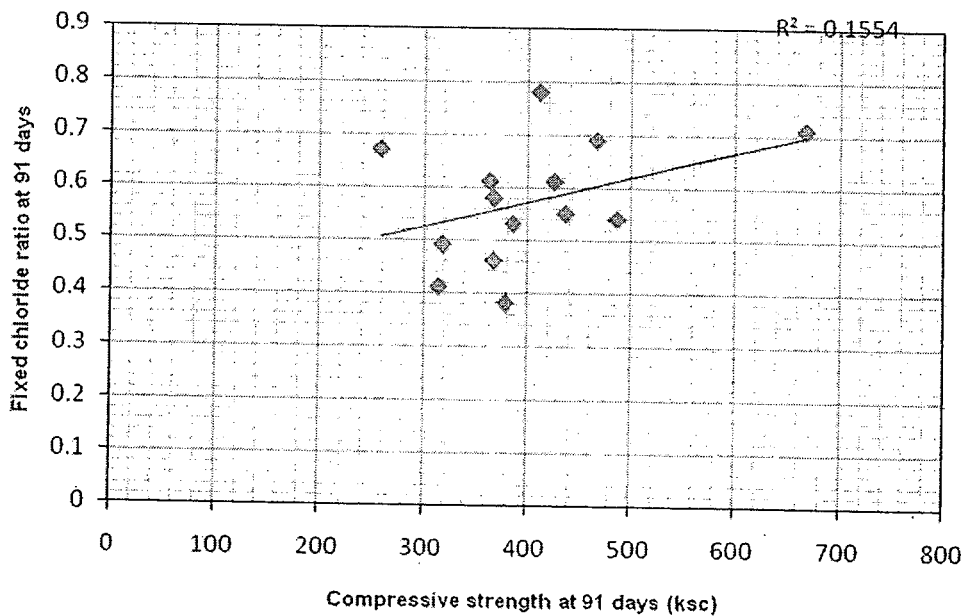


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.26 และ 4.27 ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างกับความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 และ 91 วัน พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของทั้ง 2 ชุดข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด มีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 91 วัน

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.28 และ 4.29 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 และ 91 วัน พบว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน เมื่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์ ผลจึงไม่ชัดเจน แต่ที่อายุการบ่ม 91 วัน เมื่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### 5.1 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์

จากการทดลองตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ โดยมีการเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ ) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอย ( $f/b$ ) ในปริมาณต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบ 28 วันและ 91 วัน ผลที่ได้คือในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานที่มากกว่า ( $f/b = 0.50$ ) ทำให้ความสามารถการเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า ( $w/b = 0.40$ ) ทำให้ความสามารถการเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น ในส่วนผสมที่มีระยะเวลาการแช่ในน้ำเปล่าที่อายุทดสอบนานกว่า (91 วัน) ทำให้ความสามารถการเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่มีความสามารถเก็บกักคลอไรด์สูงสุดของการทดลอง คือส่วนผสมที่อัตราส่วนมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอย BLCP Hunter เท่ากับ 0.50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

#### 5.2 โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์

##### 1. โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ด้วยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

จากการทดลองตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ โดยมีการเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ ) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอย ( $f/b$ ) ในปริมาณต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบ 28 วันและ 91 วัน ผลที่ได้คือในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ( $w/b = 0.50$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างเพิ่มขึ้น ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานเพิ่มขึ้น ( $f/b = 0.50$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงมีลดลง และในส่วนผสมที่มีระยะเวลาการแช่ในน้ำเปล่าที่อายุการทดสอบนานกว่า (91 วัน) ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรงช่องว่างมีขนาดเล็กลง

ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ( $w/b = 0.50$ ) ปริมาตรความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานเพิ่มขึ้น ( $f/b = 0.50$ ) ปริมาตรความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ลดลง และในส่วนผสมที่ใช้ระยะเวลาการบ่มที่นานกว่า (91 วัน) ทำให้ความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างมีจำนวนน้อยลง

##### 2. โครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ด้วยวิธี Brunauer Emmett and Teller (BET)

จากการทดลองตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ โดยมีการเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ ) ที่อัตราส่วนเดียวกัน แต่อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอย ( $f/b$ ) ในปริมาณต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบ 28 วันและ 91 วัน ผลที่ได้คือ ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานมากขึ้น ( $f/b = 0.50$ ) ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์มีขนาดลดลง

ในส่วนผสมที่มีระยะเวลาการแช่ในน้ำเปล่าที่อายุทดสอบนานกว่า (91 วัน) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์มีขนาดลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความพรุนทั้งหมดของโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ผลที่ได้คือในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานที่มากขึ้น ( $f/b = 0.50$ ) ปริมาตรความพรุนทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น และในส่วนผสมที่มีระยะเวลาการแช่ในน้ำเปล่าที่อายุการทดสอบนานกว่า ปริมาตรความพรุนทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง

### 5.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

จากการทดลองตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ โดยมีการเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ ) ที่อัตราส่วนต่างๆกัน อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอย ( $f/b$ ) ในปริมาณต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบ 28 วันและ 91 วัน ผลที่ได้คือส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยแก้วลอยเพิ่มขึ้น ( $f/b = 0.50$ ) กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลง ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ( $w/b = 0.50$ ) กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลง และที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเปล่าที่อายุการทดสอบนานกว่า (91 วัน) กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547, *แก้ลรอยในงานคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย
- [2] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. *ความคงทนของคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทองจำกัด.
- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย
- [4] บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง. 2550. *คอนกรีตอินทรีย์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท เซอร์ติสเพลส จำกัด.
- [5] Funahashi M. 1990. Predicting corrosion free service life of a concrete structure in chloride environment. *ACI Materials Journal*, 87(6) 548-587
- [6] Maruya T., Tangtermsirikul S., and Matsuoka Y. 1992. Simulation of Chloride Penetration into Hardened Concrete. *Taisei Technical Report*, No.23: 1-11
- [7] Malhotra V.M. 1994, Durability of Concrete. Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Nice, France.
- [8] Soroka I. 1993. *Concrete in hot environments*. Great Britain: Alden Press.
- [9] Neville A. M. 1995. Properties of Concrete, 4th ed. *John Wiley & Sons Inc.*, Newyork
- [10] Shamsad A. 2003. Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction. *Cement & concrete composites*. 25: 459-471
- [11] A. B. Abell, K. L. Willis, and D. A. Lange. 1997. Mercury Intrusion Porosimetry and Image Analysis of Cement-Based Materials. *Journal of Colloid and Interface Science*. 211: 39-44
- [12] เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ภูมินทร์ กิตติศักดิ์บวร, วสุ วิทยาเขตปภา, และทวีชัย สำราญวานิช. 2551. ความสามารถกักเก็บคลอไรด์และการแพร่ของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินปูน, *9<sup>th</sup> National Grad Research Conference*, 14-15 มีนาคม 2551, มหาวิทยาลัยบูรพา, บางแสน, ชลบุรี

- [13] ธีรวัฒน์ สินศิริ, ชัยจาดุรพิทักษ์กุล, และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. ผลกระทบของความละเอียดแก้วถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมด และขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์. *KMUTT RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL*. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1
- [14] นัฐภา ภาระศรี, และทวีชัย สำราญวานิช. 2551. ผลกระทบของสารปอซโซลานต่อโครงสร้างโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์. *9<sup>th</sup> National Grad Research Conference*, 14-15 มีนาคม 2551, มหาวิทยาลัยบูรพา, บางแสน, ชลบุรี
- [15] T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, and W. Chalee. 2552. Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Materials*. 24: 1352-1357
- [16] พีรชล สุภัทธรรม, บุรฉัตร ฉัตรวีระ, และสมนึก ตังเต็มสิริกุล 2542. ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์. *วิศวกรรมสาร* ปีที่ 52, ฉบับที่ 4
- [17] J. M. Khatib, and P. S. Mangat. 2002. Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete. *School of Environment and Development*. Sheffield Hallam University, Howard Street, Sheffield S1 1WB, UK
- [18] Harald Justnes. 1998. A review of chloride binding in cementitious systems
- [19] ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2553. *ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย