

ผลของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการซึมผ่านของคลอไรด์



นาย สมพงษ์ อีวานพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF THE AMOUNT AND CONTINUITY OF PORE STRUCTURE IN CONCRETE
TO CHLORIDE PENETRATION

Mr. Sompong Teeranop

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering Chulalongkorn University

Academic year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

490679

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการ
ซึมผ่านของคลอไรด์

โดย

นาย สมพงษ์ ธีรานพ

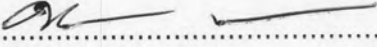
สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

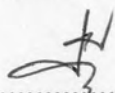
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

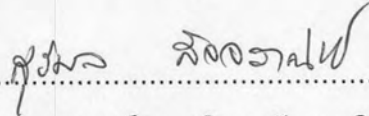

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

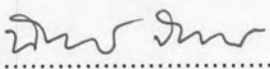
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉิมไชย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุสม)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล สัจจวานิชย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

สมพงษ์ ธีรานพ : ผลของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ (EFFECT OF THE AMOUNT AND CONTINUITY OF PORE STRUCTURE TO CHLORIDE PENETRATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.บุญไทย สถิตมันน์ในธรรม 117 หน้า

ปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตโดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีทั้งที่สัมผัสกับน้ำทะเล ปัจจุบันการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยวิธีทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นเป็นการวัดสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมากกว่าจะเป็นการวัดความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะประยุกต์วิธีการทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 เพื่อใช้ในการหาค่าปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตโดยการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ ซึ่งจากนี้ไปภายในงานวิจัยนี้จะเรียกวิธีทดสอบดังกล่าวนี้โดยย่อว่า " วิธีประยุกต์ "

งานวิจัยนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการตรวจสอบหาปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตโดยวิธีประยุกต์ ซึ่งจะพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในสารละลายบริเวณขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งเกิดขึ้นจากการเร่งอนุภาคคลอไรด์ที่มีอยู่ในสารละลายให้เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างด้วยแรงทางไฟฟ้า ความเข้มข้นของคลอไรด์จะถูกบันทึก ณ เวลาต่างๆกัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตามสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา โดยได้เลือกทดสอบกับคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นร่วมกับปูนซีเมนต์ด้วย อันได้แก่แก้วแกลบ และ แกลลวย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ใช้คือ 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ การทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 หรือ RCPT ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาระยะเวลาที่ก้อนตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) โดยอาศัยการวัดและเก็บค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านก้อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าเริ่มคงที่ จากผลการทดลองวิธีประยุกต์พบที่มีความสอดคล้องกับสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา และมีแนวโน้มสอดคล้องเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบอื่นๆอันได้แก่ การทดสอบเอ็มไอพี กำลังรับแรงอัดประลัย และการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตซึ่งใช้วัสดุประสานที่เป็นแกลลวยและแก้วแกลบร่วมกับปูนซีเมนต์ มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์สูงกว่าวัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน หรือใช้ปอซโซลานเพียงชนิดเดียวคือแก้วแกลบหรือแกลลวยร่วมกับปูนซีเมนต์ซึ่งยืนยันจากปริมาณโพรงแคพพิลารีที่ลดลงโดยวิธีเอ็มไอพี ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้โพรงคอนกรีตเกิดความไม่ต่อเนื่องและมีปริมาตรลดลง

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา..2549..

4770485021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: THE CONTINUITY OF PORE / PORE SIZE DISTRIBUTION / CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT / MERCURY INTRUSION POROSIMETRY / ELECTRICAL MIGRATION TECHNIQUE

SOMPONG TEERANOP : THE EFFECT OF THE AMOUNT AND CONTINUITY OF PORE STRUCTURE IN CONCRETE TO CHLORIDE PENETRATION. THESIS ADVISOR:

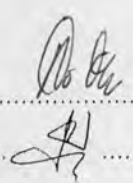
ASSOC.PROF.BOONCHAI STITMANNAITHUM, D.Eng. , 117 pp.

The amount and continuity of pore structure in concrete are crucial parameters affecting the durability of reinforced concrete structures that exposed to marine environment. Nowadays, ASTM C1202 or RCPT was proposed for rapid qualitative assessment of chloride penetrability of concrete. However, ASTM C1202 seems to be measured the electrical conductivity of concrete specimen more than the ability of concrete to resist chloride ions. Consequently, this study will try to modify ASTM C1202 for determining the amount and the continuity of pore structure in concrete by monitoring the chloride concentration and compare the result with other tests such as Mercury-Intrusion Porosimetry (MIP), Compressive Strength and ASTM C1202.

This research aims to study the possibility of determining the amount and continuity of pores in concrete by considering the variations of chloride concentration in anode solution and cathode solution with respect to time. The chloride ions in cathode solution were accelerated through the saturated pores of concrete specimen by the electromotive force. The chloride concentration will be recorded in order to analyze according to the research assumption. In this study, plain cement concrete and concrete containing different types of pozzolan (fly ash and rice husk ash) with water to binder ratios (w/b) of 0.40, 0.50 and 0.60 were tested. The coulomb charge passed (RCPT or ASTM C1202) was modified to indicate the time-span (Ts) of steady state condition by mean of the constant flux of electric current. The results of the experiment reveal good correspondence with the research assumption and comply with other tests such as Mercury-Intrusion Porosimetry (MIP), Compressive Strength and ASTM C1202 respectively.

According to the study the resistance to chloride-ion penetration of the concrete made with triple-blends is higher than that of concrete made either with portland cement alone or a blend of Portland cement with fly ash or rice husk ash. This is mainly due to the refinement of the capillary pore of concrete made with triple-blends.

Department.....Civil..Engineering.....Student's signature.....
Field of study.....Civil.Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year2006.....



กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้อุทิศ ทั้งกำลังกายและใจ ตลอดจนสละเวลาอันมีค่าในการให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยและในการเขียนวิทยานิพนธ์นี้ และกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รศ.ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดม รศ.ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฉมิไชย รศ.ดร. สุวิมล สัจจาณิชย์ และผศ.ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการเขียนวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณ บริษัทนครหลวงคอนกรีต ที่สนับสนุนด้านวัสดุที่ใช้ในการวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณ หน่วยงาน สยามวิจัย บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่เอื้อเพื่อข้อมูลอันเป็นประโยชน์และเครื่องมือทดสอบ ASTM C1202 ในการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย คุณสุรัชย์ สุทธิธรรมมา ที่ได้คำแนะนำอันมีประโยชน์ระหว่างการทำวิจัย คุณปานิดา ทวีถาวรและ สถาบันวิจัยแห่งชาติ ที่ช่วยทำการทดสอบและพร้อมทั้งสนับสนุนเรื่องค่าทดสอบโดยวิธีเอ็มไอพี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบและสอนการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในห้องทดสอบ

ท้ายที่สุดนี้คุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่คุณพ่อประธาน และคุณแม่อุไรวรรณ ธีรานพ ผู้ล่วงลับไปแล้ว คุณจิตจรลดา เพียรภักทวณิช ภรรยาที่คอยสนับสนุนและช่วยเหลือ และตลอดจนครูปาอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกพระคุณในการอบรมและให้การศึกษาแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บททั่วไป.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างทางกายภาพคอนกรีต.....	5
2.2 กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต.....	6
2.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์.....	7
2.4 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202.....	10
2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาและสมมติฐานเบื้องต้นในการศึกษาโดยวิธีประยุกต์..	11
2.6 ข้อจำกัดวิธีประยุกต์.....	13
2.7 การวิเคราะห์และแปลความหมายการทดลองจากสมมติฐานข้างต้น...	13
2.8 การทดสอบเพื่อหาปริมาณของโพรงและการกระจายขนาดของโพรง ภายในเนื้อคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอพี.....	16
บทที่ 3 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	31
3.1 การเตรียมวัสดุ.....	31
3.2 การทดสอบ.....	33

	หน้า
บทที่ 4	
วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ.....	58
4.1 การวิเคราะห์หาค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตภายในเนื้อคอนกรีต.....	58
4.2 การวิเคราะห์ขนาดโพรงคอนกรีต.....	62
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีประยุกต์.....	63
4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์กับวิธีอื่น ๆ	65
บทที่ 5	
สรุปผลการวิจัย.....	89
5.1 ทัวไป.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก.....	96
ภาคผนวก ข.....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

สารบัญตาราง

ณ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1	23
ตารางที่ 2.2	23
ตารางที่ 3.1	38
ตารางที่ 3.2	39
ตารางที่ 3.3	40
ตารางที่ 3.4	41
ตารางที่ 3.5	42
ตารางที่ 3.6	43
ตารางที่ 3.7	44
ตารางที่ 3.8	45
ตารางที่ 3.9	46
ตารางที่ 3.10	47
ตารางที่ 3.11	48
ตารางที่ 3.12	49
ตารางที่ 3.13	50
ตารางที่ 3.14	50

ตาราง		ญ หน้า
	ของสัดส่วนผสม D.33.....	51
ตารางที่ 4.1	ค่าปริมาตรและสัดส่วนที่คิดเป็นร้อยละของโพรงคอนกรีตประเภทต่างๆที่ ตรวจวัดได้จากการวัดปริมาตรโพรงคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอพี.....	69
ตารางที่ 4.2	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์.....	70
ตารางที่ 4.3	ค่าขนาดโพรงคอนกรีตชนิดต่างๆ ของสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วน ผสม.....	71

สารบัญญภาพ

๗

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำแนกตามลักษณะการเปิดเผยของโครงสร้างสู่สิ่งแวดล้อม.....	24
รูปที่ 2.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202.....	24
รูปที่ 2.3 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบโดยวิธีElectrical Migration Technique.....	25
รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลายทำย่น้ำที่เกิดขึ้นบริเวณหัวแอนด์	25
รูปที่ 2.5 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบของ Chung-Chia Yang.....	26
รูปที่ 2.6(ก) การความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์เทียบกับเวลาเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่.....	26
รูปที่ 2.6(ข) ค่าของปริมาณประจุไฟฟ้าเทียบกับเวลาเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่.....	26
รูปที่ 2.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคลอไรด์ที่เข้าและออก ที่เวลาต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์ที่เข้าและออก ที่เวลาต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.9 ภาพจำลองตามสมมติฐานแสดงกลไกการเคลื่อนที่ผ่านโพรงคอนกรีตของคลอไรด์.....	28
รูปที่ 2.10(ก) มุมสัมผัสของของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียก.....	29
รูปที่ 2.10(ข) มุมสัมผัสของของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก.....	29
รูปที่ 2.11(ก) ผลแคปพิลลารีจากของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียก...	29
รูปที่ 2.11(ข) ผลแคปพิลลารีจากของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก	29
รูปที่ 2.12 การกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของ Winslow และ Lovell ของซีเมนต์เฟสดี w/c = 0.60.....	30
รูปที่ 2.13 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากวิธีเอ็มไอพีจากการเกิดสภาพคอขวด.....	30
รูปที่ 3.1(ก) แผนภูมิคละของวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33	52
รูปที่ 3.1(ข) แผนภูมิคละของวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33	52
รูปที่ 3.2 การตัดก้อนตัวอย่างด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร.....	53
รูปที่ 3.3 ก้อนตัวอย่างที่ถูกเตรียมสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202.....	53
รูปที่ 3.4 การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับตัวอย่างในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202.....	54
รูปที่ 3.5 ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยซึ่งเป็นการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202	54
รูปที่ 3.6 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ 14 28 และ 91 วัน	55
รูปที่ 3.7 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ 14 28 และ 91 วัน	55

ภาพประกอบ	หน้า	
รูปที่ 3.8	กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ 14 28 และ 91 วัน	56
รูปที่ 3.9	การเกิดก๊าซคลอรินที่ขั้วบวก.....	56
รูปที่ 3.10	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบด้วยวิธีประยุกต์เพื่อหาค่าปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต.....	57
รูปที่ 3.11	เครื่องทดสอบความเข้มข้นของคลอไรด์.....	57
รูปที่ 4.1	ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมเทียบกับสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม....	72
รูปที่ 4.2	ปริมาตรโพรงคอนกรีตชนิดต่างๆ เทียบกับคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม.....	72
รูปที่ 4.3	ปริมาตรของโพรงคอนกรีตรวมเทียบกับปริมาตรของโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพีของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม.....	73
รูปที่ 4.4	ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 เทียบกับปริมาตรของโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม.....	73
รูปที่ 4.5	ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 เทียบกับปริมาตรของโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม.....	74
รูปที่ 4.6	ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 91 วันเทียบกับปริมาตรของโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม.....	74
รูปที่ 4.7(ก)	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.4 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4.....	75
รูปที่ 4.7(ข)	ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.4.....	75
รูปที่ 4.8(ก)	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.7 (OPC65%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4.....	76
รูปที่ 4.8(ข)	ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.7.....	76
รูปที่ 4.9(ก)	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.11(65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4.....	77

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.9(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.11.....	77
รูปที่ 4.10(ก) แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.15 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....	78
รูปที่ 4.10(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.15.....	78
รูปที่ 4.11(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.18 (OPC65%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....	79
รูปที่ 4.11(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.18.....	79
รูปที่ 4.12(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.22(65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....	80
รูปที่ 4.12(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.22.....	80
รูปที่ 4.13(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.26 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6.....	81
รูปที่ 4.13(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.26.....	81
รูปที่ 4.14(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.29 (OPC65%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6.....	82
รูปที่ 4.14(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.29.....	82
รูปที่ 4.15(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะ	

ภาพประกอบ	หน้า
คองกรี (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.33(65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6.....	83
รูปที่ 4.15(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลา ของสัดส่วนผสม D.33.....	83
รูปที่ 4.16 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	84
รูปที่ 4.17 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามชนิดของวัสดุประสานที่ใช้...	84
รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้าและออกที่ได้ ณ จุดเริ่มต้นสภาวะคองกรี ใน แต่ละสัดส่วนผสม.....	85
รูปที่ 4.19 ค่าร้อยละของความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสม.....	85
รูปที่ 4.20 ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสม.....	86
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคองกรี (Qs) เทียบ กับประจุไฟฟ้า เฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Q).....	86
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่อเนื่องเทียบกับประจุไฟฟ้าของASTMC1202.	87
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์เทียบกับค่าประจุไฟฟ้า เฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202.....	87
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของ สภาวะคองกรี ([Cl ⁻]in) เมื่อเทียบกับ ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมที่ได้จากวิธี เอ็มไอพี.....	88