

ผลของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการซึมผ่านของคลอไรด์



นาย สมพงษ์ ธีรานพ

สถาบันวิทยบริการ

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

สถาบันวิศวกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของปริมาณและความถี่ของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการ
ซึมผ่านของคลอไรด์

โดย

นาย สมพงษ์ อีรานพ


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

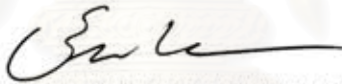
อาจารย์ที่ปรึกษา


รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

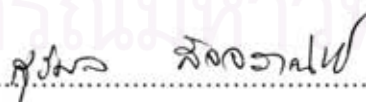

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อีรพงศ์ เสนจันทร์มิไชย)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดม)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล สัจจานิชย์)


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

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

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

งานวิจัยนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการตรวจสอบหาปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตโดยวิธีประยุกต์ ซึ่งจะพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในสารละลายบริเวณขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งเกิดขึ้นจากการเร่งอนุภาคคลอไรด์ที่มีอยู่ในสารละลายให้เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างด้วยแรงทางไฟฟ้า ความเข้มข้นของคลอไรด์จะถูกบันทึก ณ เวลาต่าง ๆ กัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตามสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา โดยได้เลือกทดสอบกับคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอร์โซลานชนิดอื่นร่วมกับปูนซีเมนต์ด้วย อันได้แก่แก้วกลม และ แก้วลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ใช้คือ 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ การทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 หรือ RCPT ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาระยะเวลาที่ก้อนตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) โดยอาศัยการวัดและเก็บค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านก้อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าเริ่มคงที่ จากผลการทดลองวิธีประยุกต์พบว่ามีความสอดคล้องกับสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษา และมีแนวโน้มสอดคล้องเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอื่นๆอันได้แก่ การทดสอบเอมไอพี กำลังรับแรงอัดประลัย และการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตซึ่งใช้วัสดุประสานที่เป็นแก้วลอยและแก้วกลมร่วมกับปูนซีเมนต์ มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์สูงกว่าวัสดุประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน หรือใช้ปอร์โซลานเพียงชนิดเดียวคือแก้วกลมหรือแก้วลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ซึ่งยืนยันจากปริมาณโพรงแคพิลลารีที่ลดลงโดยวิธีเอมไอพี 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 เพียรสุดสม รศ.ดร. ธีรพงศ์ เสนอจันทร์ฉิมไชย รศ.ดร. สุวิมล สัจจาภิษย์ และผศ.ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการเขียนวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณ บริษัทนครหลวงคอนกรีต ที่สนับสนุนด้านวัสดุที่ใช้ในการวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณ หน่วยงาน สยามวิจัย บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลอันเป็นประโยชน์และเครื่องมือทดสอบ ASTM C1202 ในการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย คุณสุรัชย์ สุทธิธรรมมา ที่ให้คำแนะนำอันมีประโยชน์ระหว่างการทำวิจัย คุณปานิดา ทวีถาวรและ สถาบันวิจัยแห่งชาติ ที่ช่วยทำการทดสอบและพร้อมทั้งสนับสนุนเรื่องค่าทดสอบโดยวิธีเอ็มไอพี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบและสอนการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในห้องทดสอบ

ท้ายที่สุดนี้คุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่คุณพ่อประสาน และคุณแม่อุไรวรรณ ธีรานพ ผู้ล่วงลับไปแล้ว คุณจิตรลดา เพียรภักทวณิช ภรรยาที่คอยสนับสนุนและช่วยเหลือ และตลอดจนครูปาอาจารย์ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกพระคุณในการอบรมและให้การศึกษแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
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 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์กับวิธีอื่นๆ	65
บทที่ 5	
สรุปผลการวิจัย.....	89
5.1 ทิ้งไป.....	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



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

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 ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลายทำย่น้ำที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนด	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 ของซีเมนต์เพสต์ 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	การเกิดก๊าซคลอไรด์ที่ขั้วบวก.....	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) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.11.....	77
รูปที่ 4.10(ก) แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.15 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....	78
รูปที่ 4.10(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.15.....	78
รูปที่ 4.11(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.18 (OPC65%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....	79
รูปที่ 4.11(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม 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) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.22.....	80
รูปที่ 4.13(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.26 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6.....	81
รูปที่ 4.13(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.26.....	81
รูปที่ 4.14(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.29 (OPC65%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6.....	82
รูปที่ 4.14(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.29.....	82
รูปที่ 4.15(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะ	

ภาพประกอบ	หน้า
คองกรีท (Ts) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.33(65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6.....	83
รูปที่ 4.15(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.33.....	83
รูปที่ 4.16 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	84
รูปที่ 4.17 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามชนิดของวัสดุประสานที่ใช้...	84
รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้าและออกที่ได้ ณ จุดเริ่มต้นสภาวะคองกรีท ในแต่ละสัดส่วนผสม.....	85
รูปที่ 4.19 ค่าร้อยละของความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสม.....	85
รูปที่ 4.20 ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสม.....	86
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคองกรีท (Qs) เทียบกับประจุไฟฟ้า เฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Q).....	86
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่อเนื่องเทียบกับประจุไฟฟ้าของASTMC1202.	87
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์เทียบกับค่าประจุไฟฟ้า เฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202.....	87
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคองกรีท ([Cl ⁻]in) เมื่อเทียบกับ ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมที่ได้จากวิธีเอ็มไอพี.....	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บททั่วไป

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมชายฝั่งทะเล มักพบว่ามีการสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง ละอองน้ำทะเล หรือกระทั่งไอน้ำทะเล คลอไรด์ไอออนซึ่งมีอยู่ในน้ำทะเลเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมนั้นเกิดสนิม ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบโครงสร้างที่ดีแล้วก็ตาม

ความสามารถซึมผ่านได้นั้นถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของคอนกรีตในด้านความทนทานต่อการสัมผัสน้ำทะเล เนื่องจากคลอไรด์ไอออนนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถทำลายฟิล์มของออกไซด์ที่ผิวของเหล็กเสริมได้ ซึ่งหากมีความชื้นและออกซิเจนเพียงพอ เหล็กเสริมนั้นจะสามารถเกิดสนิมได้โดยง่ายและลุกลามจนโครงสร้างได้รับความเสียหายเป็นอันมาก โดยกลไกการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนที่จะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตนั้นมีหลายกลไกด้วยกันเช่น กลไกการแพร่ (Diffusion) กลไกแคปิลลารี (Capillary Adsorption) และกลไกความดันของน้ำ (Hydrostatic Pressure) เป็นต้น^[1-4] ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นกลไกประเภทใดก็ตามการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตนั้นล้วนแล้วแต่จะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีต โดยอาศัยระบบโพรงคอนกรีต (Pore System) เป็นช่องทางเข้าถึงเหล็กเสริม เนื่องจากคอนกรีตนั้นเป็นวัสดุที่มีรูพรุน (Porous Material) ซึ่งเปรียบเสมือนท่อเป็นจำนวนมากซึ่งโพรงคอนกรีตนี้เองมีความแตกต่างกันเนื่องจากมีทั้งประเภทโพรงคอนกรีตที่มีการเชื่อมต่อกัน และไม่เชื่อมต่อกัน อีกทั้งมีความแตกต่างในเรื่องของการกระจายปริมาณของโพรงคอนกรีต (Pore Size Distributions) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยทางด้านกายภาพที่ส่งผลต่อการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ไอออนทั้งสิ้น

ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดขึ้นของโพรงคอนกรีตนั้นมีอยู่หลายตัวแปรด้วยกันเช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งเป็นตัวแปรหลัก นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่รองลงมาอันได้แก่ เรื่องของชนิดวัสดุประสานที่ใช้ และ สารเคมีผสมเพิ่ม เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องของชนิดของวัสดุประสานนั้นพบว่าวัสดุประสานที่ใช้ในงานคอนกรีตในปัจจุบันมักจะใช้วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ให้ผลที่ดีในการป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อของคอนกรีต เนื่องจากเนื้อคอนกรีตที่ได้มีความแน่นเพิ่มมากขึ้น หรือมีปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตที่ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานมากกว่าหนึ่งชนิดเช่นมีการผสม

ถ้าลอยร่วมกับแก้วเคลือบ (Triple Blends or Ternary Blends) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในด้านกำลังในช่วงต้นและช่วงปลายให้ดีขึ้นอีกด้วย^[5-6]

ในปัจจุบันการทดสอบคอนกรีตต่อการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนนั้น สามารถทดสอบได้หลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีทดสอบที่มีความนิยมแพร่หลายที่สุด คือ การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202^[7] หรือ RCPT ซึ่งย่อมาจาก Rapid Chloride Permeability Test เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว โดยผลการทดสอบที่ได้จะอยู่ในรูปของปริมาณประจุไฟฟ้า จึงมักนิยมเรียกว่าผลการทดสอบที่ได้ชื่อว่า Coulomb Charge Passed

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นพบว่าหากปริมาณ Coulomb Charge Passed มีค่าสูง หมายถึงคอนกรีตมีความสามารถทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนได้ต่ำ และหากปริมาณ Coulomb Charge Passed มีค่าน้อยหมายถึงคอนกรีตมีความสามารถทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนได้สูง ซึ่งในมาตรฐานนี้มิได้มีการกล่าวถึงคุณสมบัติของความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตที่ส่งผลต่อความสามารถด้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนแต่อย่างใด และยิ่งกว่านั้นอาจจะมีประเด็นที่ว่า การทดสอบด้วยวิธีอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นเป็นการวัดสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมากกว่าจะเป็นการวัดความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์^[8] นอกจากนี้การทดสอบดังกล่าวยังไม่สามารถเชื่อมโยงความคิดเกี่ยวกับเรื่องของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อความคงทนของคอนกรีตเข้ากับความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้

ด้วยเหตุผลข้างต้น การศึกษาหาความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตให้ได้ผลเป็นรูปธรรมนั้นเป็นประเด็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง โดยในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะประยุกต์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 เพื่อวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตด้วยการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนที่ไหลเข้าและไหลออกจากก้อนตัวอย่าง ซึ่งจากนี้ไปภายในรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเรียกวิธีทดสอบที่กล่าวถึงข้างต้นนี้โดยย่อว่า “วิธีประยุกต์” และจะทำการทดสอบกับคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่มีการผสมวัสดุพอลิซิลานเพื่อทดแทนซีเมนต์ อันได้แก่แก้วลอยและแก้วเคลือบที่สัดส่วนการแทนที่ต่าง ๆ กัน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนของคอนกรีตอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202

1.2.2 ศึกษาการกระจายขนาดโพรงคอนกรีต (Pore Size Distribution) และปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Porosity) อันเนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานอันได้แก่ เถ้าลอยและเถ้าแกลบที่สัดส่วนการแทนที่ต่างๆ กัน โดยวิธีเอ็มไอพี (Mercury-Intrusion Porosimetry)

1.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต โดยการประยุกต์เครื่องมือทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202

1.2.4 ศึกษาคุณสมบัติด้านการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานอันได้แก่ เถ้าลอยและเถ้าแกลบที่สัดส่วนการแทนที่ต่างๆ กันที่อายุ 14 วัน 28 วันและ 91 วัน ตามลำดับ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนของคอนกรีตอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มีทั้งสัดส่วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานอันได้แก่เถ้าแกลบ และเถ้าลอย ในที่นี้การแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเถ้าลอย อยู่ที่ร้อยละ 15 25 และ 35 สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเถ้าแกลบอยู่ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 นอกจากนี้ยังมีสัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุประสาน สามชนิดอันได้แก่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและเถ้าแกลบร่วมกัน ในที่นี้สัดส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบอยู่ที่ร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่อยู่ที่ร้อยละ 15 และ 25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้อยู่ที่ 0.40 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ โดยทำการทดสอบที่อายุ 91 วัน

1.3.2 ศึกษาการกระจายขนาดโพรง (Pore Size Distribution) และ ปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Porosity) โดยวิธีเอ็มไอพี

1.3.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการหาปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตโดยวิธีการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์ หรือ วิธีประยุกต์โดยใช้เครื่องมือทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202

1.3.4 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อันได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และเถ้าลอย

1.3.5 ศึกษาผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมที่อายุ 14 28 และ 91 วัน ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบผลของความสามารถด้านทานการซีมผ่านต่อสภาพแวดล้อมคลอไรด์ของ คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอย ตามลำดับ ซึ่งมีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่างๆกัน

1.4.2 ทราบผลของการกระจายขนาด (Pore Size Distribution) และปริมาณโพรง คอนกรีตทั้งหมด (Total Porosity) ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและ คอนกรีตผสมเถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาสัดส่วนผสม คอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมชายฝั่งทะเล

1.4.3 ทราบวิธีการวัดหาปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตด้วยการ ประยุกต์ใช้เครื่องมือและขั้นตอนการเตรียมก้อนตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C1202 ซึ่งจะเป็น ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

1.4.4 ทราบผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ คอนกรีตผสมเถ้า ลอย และ คอนกรีตผสมเถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่างๆกัน เมื่อ เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างทางกายภาพคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบมาจากวัสดุดิบหลายชนิดด้วยกัน (Heterogeneous) ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมของคอนกรีตให้แม่นยำจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยากมาก อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในระดับมหภาค (Macroscopic Level)^[12-13] จะพบว่ามีส่วนประกอบที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ มีมวลรวมซึ่งกระจายอย่างสม่ำเสมออยู่ในไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ (Hydrated Cement Paste) แต่ถ้าพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตในระดับจุลภาค (Microscopic Level) จะสามารถแบ่งแยกได้เป็น 3 ส่วนได้แก่มวลรวมไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ และผิวสัมผัสส่วนที่เชื่อมต่อกันระหว่างผิวของมวลรวมกับไฮเดรทซีเมนต์เพสต์หรือเรียกว่าทรานซิชันโซน (Transition Zone) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆหนาประมาณ 10 ถึง 50 ไมครอน เคลือบรอบๆ ผิวของมวลรวม^[12-13] โดยส่วนที่เป็นทรานซิชันโซนนี้จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันตลอดเวลาซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างทางกายภาพของคอนกรีตอันได้แก่ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และความสามารถในการซึมผ่านได้

โครงสร้างของไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ พบว่าที่จุดหนึ่งๆของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าโครงสร้างของไฮเดรทซีเมนต์เพสต์จะประกอบด้วยเจลหรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ผลิตภัณฑ์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา (Unhydrated Cement) และช่องว่าง (Space) ที่มีน้ำอยู่ภายในซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปน้ำเหล่านี้จะถูกดึงมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในเจลจะประกอบด้วยกลุ่มของอนุภาคโดยจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเจลซึ่งเรียกว่า โพรงเจล (Gel Pore)

จากการศึกษาเกี่ยวกับโพรงของคอนกรีต สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1 โพรงเจล (Gel Pore) หมายถึง โพรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ตั้งที่กล่าวมาแล้ว ในช่วงแรก Powers^[34] สันนิษฐานว่าโพรงชนิดนี้มีขนาด 18 อังสตรอม แต่ภายหลัง Feldman และ Sereda^[35] พบว่ามีขนาดประมาณ 5 ถึง 25 อังสตรอม จากการศึกษพบว่าโพรงเจลเหล่านี้มิได้มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำที่จะเคลื่อนที่ผ่านโพรงภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากขนาดของโพรงที่จะส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำเกิดขึ้นได้นั้น ต้องมีรัศมีไม่น้อยกว่า 500 อังสตรอม^[14-17]

2.1.2 โพร่งแคพพิลลารี (Capillary Pore) หมายถึง โพร่งคอนกรีตที่ภายในประกอบด้วยน้ำซึ่งพร้อมที่จะถูกดึงเพื่อนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นโพร่งคอนกรีตที่เป็นที่ว่างเหล่านี้จึงยังไม่ถูกอุดรูหรือถูกเติมเต็มโดยไฮเดรทซีเมนต์เฟสด้วยเหตุนี้ปริมาตรและขนาดของโพร่งแคพพิลลารีจึงขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาในคอนกรีตสด และระดับของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of Hydration) ^[18-19] นอกจากนี้ยังพบว่าโพร่งแคพพิลลารีนั้นมีขนาดใหญ่กว่าโพร่งเจลมากและเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านได้ของคอนกรีต ในกรณีซีเมนต์เฟสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งแคพพิลลารีจะมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.01 ถึง 0.05 ไมครอน เท่านั้น แต่ในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงพบว่าโพร่งแคพพิลลารีจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึงประมาณ 0.30 ถึง 0.50 ไมครอน ^[15] แต่โดยทั่วไปหากกล่าวถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งแคพพิลลารี มักหมายถึง โพร่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 ถึง 10 ไมครอน และจากการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งแคพพิลลารีที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านได้นั้น พบว่าขนาดอยู่ระหว่าง 0.12 ถึง 0.16 ไมครอน

2.1.3 ฟองอากาศ (Air Void or Entrapped Air) หมายถึง ฟองอากาศที่ถูกกักเก็บไว้ในคอนกรีตระหว่างการหล่อทิ้งที่เกิดจากความตั้งใจและไม่ได้ตั้งใจ โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศที่เกิดขึ้น อาจจะมีขนาดใหญ่ถึง 3 มิลลิเมตร และหากมีการใส่สารกักฟองอากาศจะทำให้ฟองอากาศนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 200 ไมครอน ฟองอากาศส่งผลต่อความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีตมาก โดยทั่วไปฟองอากาศ มักหมายถึงโพร่งที่มีขนาดใหญ่กว่าโพร่งแคพพิลลารี นั่นคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน

โครงสร้างของทรานซิชันโซน (Transition Zone) มีลักษณะเป็นผลึกขนาดใหญ่ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิโพลูมิเนต ^[20] และมักพบว่าบริเวณรอบๆมวลรวมนั้นมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นมากกว่าบริเวณอื่นๆ ทำให้บริเวณนี้มีลักษณะคล้ายเป็นฟิล์มน้ำเคลือบผิวมวลรวม ส่งผลให้บริเวณนี้มีความพรุนและมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆอีกด้วย ด้วยเหตุนี้เองทำให้ขนาดของโพร่งแคพพิลลารีที่อยู่ใกล้กับบริเวณรอบๆมวลรวมนั้นจะมักมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นมีความพรุนเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลทำให้คอนกรีตในบริเวณนั้นมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ต่ำลง และทำให้คุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตลดลงไปด้วย

2.2 กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตนั้นมีการสรุปออกมาได้ 3 กลไก ดังต่อไปนี้

2.2.1 กลไกแคพพิลลารี (Capillary Adsorption) คือ เมื่อคอนกรีตมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีสถานะที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตอาจจะเผชิญสถานะของการเกิดเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) เมื่อของเหลวในที่นี้คือสารละลายที่มีเกลือของคลอไรด์เกิดการสัมผัสกับผิวคอนกรีตที่แห้ง จะถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในโพรงคอนกรีตภายในโดยแรงตึงผิว (Capillary Suction) การดูดซึมมักจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่เมื่อความแตกต่างของความชื้นเกิดขึ้น โดยจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีความชื้นมากไปยังจุดที่มีความชื้นน้อยกว่า โดยทั่วไปกลไกการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยการดูดซึม (Capillary Adsorption) จะมีความลึกเพียงเล็กน้อยแต่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว คลอไรด์ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ระดับเหล็กเสริมได้ด้วยกลไกนี้โดยตรงยกเว้นคอนกรีตที่ใช้มีคุณภาพที่ต่ำ หรือเหล็กเสริมมีระยะหุ้มน้อย แต่ที่สำคัญมาก คือ กลไกนี้ส่งเสริมกลไกการแพร่ (Diffusion) ของคลอไรด์เข้าสู่เหล็กเสริมให้เกิดได้ง่ายและเร็วขึ้น

2.2.2 กลไกความดันของน้ำ (Hydrostatic Pressure) คือ การใช้ความดันของน้ำหรือสารละลายในการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยระดับความลึกของของเหลว (Pressure Head) ซึ่งกลไกการแพร่ของคลอไรด์ด้วยวิธีนี้มักเกิดในโครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีความลึกมากพอสมควร โดยความสัมพันธ์ของแรงดันและระดับความลึกนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของดาร์ซี (Darcy's Equation or Darcy's Law)

2.2.3 กลไกการแพร่ (Diffusion) คือ วิธีที่มีความนิยมมากที่สุดในการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ที่ซึมเข้าสู่คอนกรีต โดยใช้หลักการของการแพร่ใน 1 มิติ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ในที่นี้อธิบายด้วยกฎข้อที่ 1 ของการแพร่ หรือ Fick's First Law^[2-3] โดยเป็นการพิจารณาเมื่อความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางเพียงอย่างเดียวโดยไม่ขึ้นกับเวลา หรือที่เรียกว่า สถานะคงที่ (Steady State) แต่ในทางปฏิบัติการพิจารณาว่าความเข้มข้นนั้นจะคงที่เมื่อเทียบกับเวลานั้นเป็นไปได้ นั่นคือความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางและเวลา หรือที่เรียกว่า สถานะไม่คงที่ (Non-steady State) ในที่นี้อธิบายด้วยกฎข้อที่ 2 ของการแพร่ หรือ Fick's Second Law

2.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride)

ปัญหาหลักของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ใกล้ชายฝั่ง หรือ ริมทะเล คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ เนื่องมาจากในน้ำทะเลมีอนุภาคของคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 90^[10] ซึ่งถือว่ามากกว่าอนุภาคชนิดอื่นๆ เช่น โซเดียม ซัลเฟต

แคลเซียม แมกนีเซียม ฯลฯ อย่างไรก็ตามอนุภาคของคลอไรด์เพียงอย่างเดียวนั้นไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กโดยตรง แต่คลอไรด์มีคุณสมบัติในการเร่งให้การเกิดสนิมเกิดได้เร็วขึ้น

จากการศึกษาปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในภายในเนื้อคอนกรีต(Total Chloride) พบว่าเป็นผลรวมของคลอไรด์สองประเภทด้วยกัน^[28] ได้แก่ ประเภทที่หนึ่งคือคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ (Fixed Chloride or Bound Chloride) ซึ่งถูกจับยึดอยู่ในไฮเดรทซีเมนต์เฟส และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปไปในรูปของสารประกอบแคลเซียมคลอโรออลูมิเนตไฮเดรท (Chloro-aluminate Hydrate) ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นเกลือของฟรีเดิล(Friedel's Salts) หรือที่ถูกดูดซับด้วยผิวของโพรงเจล(Gel Pore) และบางส่วนอาจถูกดูดซับที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยคุณสมบัติหลักของคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่นี้คือไม่สามารถละลายน้ำได้ส่งผลให้คลอไรด์ที่ประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อเนื่องเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่อยู่ลึกเข้าไปจนถึงเหล็กเสริมได้ ส่วนคลอไรด์ประเภทที่สองคือคลอไรด์อิสระ(Free Chloride) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้และเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อคอนกรีตตลอดจนถึงผิวเหล็กเสริมได้โดยอาศัยความชื้นผ่านกลไกการเคลื่อนที่ต่างๆดังที่ได้กล่าวไป อย่างไรก็ตามคลอไรด์อิสระนั้นสามารถถูกจับยึดและเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ได้โดยไตรแคลเซียมอลูมิเนต(C_3A) ซึ่งมีอยู่ภายในปูนซีเมนต์โดยอาศัยกระบวนการทางเคมี(Chemical Binding)^[32]

การเกิดสนิมเหล็กเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่มีองค์ประกอบคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน ความชื้นและออกซิเจน โดยธรรมชาติแล้วสภาวะความเป็นต่างอันเนื่องมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีค่า pH ประมาณ 12.0 -13.0 จะช่วยต้านทานการเกิดสนิมได้ดีในระดับหนึ่ง จากฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริม ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งเป็นแผ่นบางๆซึ่ง ที่เรียกว่า Passivation Layer โดยแผ่นฟิล์มนี้ทำหน้าที่เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดสนิมจากการสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นโดยตรง หากฟิล์มนี้ถูกทำลายลงเหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้โดยง่ายซึ่งเราเรียกกระบวนการนี้ว่า Depassivation ซึ่งกระบวนการนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้เมื่อสภาวะความเป็นต่างของคอนกรีตลดต่ำลงจนมีค่า pH ประมาณ 11.5 -12.0 ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น จากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนेशन จากการซึมผ่านและชะล้างสภาวะต่างด้วยน้ำ จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และจากการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระบางส่วนที่สามารถซึมผ่านเข้าไปจนถึงผิวของเหล็กเสริม โดยสาเหตุหลังสุดนี้พบว่าเมื่อปริมาณคลอไรด์อิสระเพิ่มขึ้นจะทำให้สภาวะความเป็นต่าง ณ จุดที่ คลอไรด์เข้าถึงเหล็กเสริมนั้นลดลงไปด้วยและหลังจากนั้นอาจจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง(Propagation Period) เพื่อเพิ่มจำนวนปริมาณคลอไรด์ให้มากขึ้นจนถึงจุดวิกฤต และหลังจากจุดวิกฤตแล้วสนิมจะมีโอกาสเกิดขึ้นทันทีได้หากมีปริมาณออกซิเจน และความชื้นที่เพียงพอ ดังนั้นการวิบัติของโครงสร้างจึงเกิดจากการที่

ปริมาณของเหล็กเสริมเกิดสนิมจะมีการขยายตัวมากขึ้นจากเดิม ทำให้เกิดการกะเทาะร่อน (Spalling) ของคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริม การจำแนกตามลักษณะของการเปิดเผยของโครงสร้างต่อสภาพแวดล้อม (Basic Exposure Zones) สามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณด้วยกัน ดังรูปที่ 2.1 พบว่าในแต่ละบริเวณมีกลไกการซึมผ่านที่แตกต่างกันไป ดังนี้

2.3.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Marine Atmospheric Zone) ในบริเวณนี้ไม่มีการสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงแต่ละอองหรือไอทะเลสามารถส่งถ่ายผ่านอากาศได้ (Air Blown or Blown Spray) โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่งทะเลโดยระดับความเข้มข้นของคลอไรด์จะแปรผกผันกับระยะห่าง ความเร็วลม กลไกการซึมผ่านในบริเวณนี้จะเป็นกลไกการแพร่ของไอทะเลและคลอไรด์ (Gas Diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจำเป็นต้องใช้ความชื้นเป็นตัวกลางในการแพร่ ดังนั้นการแพร่ของไอน้ำ (Water Vapour Diffusion) จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต จึงเป็นปัจจัยอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ภายในเนื้อคอนกรีตเกิดความชื้นและเหมาะสมต่อการการแพร่ของคลอไรด์อิออนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.3.2 บริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) ในบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กมากที่สุด เนื่องจากเกิดสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในวงรอบที่มีความถี่มากที่สุด โดยน้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตแห้งโดยวิธีการดูดซึม (Capillary Adsorption) จนกระทั่งคอนกรีตอิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกแห้งลง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งคราบเกลือไว้ภายในผิวคอนกรีต ดังนั้น เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์อิออนจะซึมเข้าสู่ภายในด้วยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ผิวเกิดการสะสมของเกลือคลอไรด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะเข้าสู่คอนกรีตและเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตในบริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) นี้คอนกรีตจะเปียกเร็วแต่แห้งช้ากว่ามากและภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นกลไกการแพร่ของอิออนคลอไรด์ (Ionic Diffusion) บริเวณนี้จึงมากกว่าการแพร่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) และในทำนองเดียวกันในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงจึงมากกว่าการแพร่ในบริเวณที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone or Seabed Zone) จึงทำให้บริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) มีโอกาสเกิดสนิมได้มากที่สุด

2.3.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ในบริเวณนี้มีกลไกการแพร่ที่คล้ายกับบริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) แต่มีสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในวงรอบที่น้อยกว่า จึงทำให้บริเวณน้ำขึ้นน้ำลงมีโอกาสดเกิดสนิมรองลงมาจากบริเวณที่มีคลื่นและละอองและประเด็นที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ถึงแม้ว่าบริเวณนี้จะมีความเข้มข้นของออกซิเจนมากก็ตามแต่อัตราการแพร่ของออกซิเจนจะถูกจำกัดด้วยช่วงเวลาที่ยังคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียก

2.3.4 บริเวณที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone or Seabed Zone) ในบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากในบริเวณนี้มีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตทั้งหมดเป็นช่องว่างที่อึดอัดด้วยน้ำซึ่งออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นได้น้อยตามไปด้วย

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม การใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้คลอไรด์เข้าสู่เนื้อได้เร็วขึ้น^[33] ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือมีช่วงแห้งที่ยาวนานกว่าช่วงเปียกจะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของสนิมมากกว่าคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลซึ่งเป็นช่วงเปียกที่ยาวนานกว่าช่วงแห้ง โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีปริมาณมากพอที่ผิวเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions) ซึ่งพบว่าช่วงนี้จะมีค่าความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.4 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นจะต้องใช้ก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความหนา 50 มิลลิเมตร สำหรับวิธีการทดสอบนั้นจะดำเนินการโดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) ที่มีความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นระยะเวลาต่อเนื่องกัน 6 ชั่วโมง^[7] ดังรูปที่ 2.2

ค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีนี้คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างในเวลา 6 ชั่วโมง โดยในการทดสอบนี้ไม่ได้เป็นการวัดการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยกลไกต่างๆดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.2 แต่เป็นการวัดการซึมผ่านที่จำลองขึ้นโดยเสมือนว่าเป็นการซึมผ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยการใส่คุณสมบัติเรื่องแรงทางไฟฟ้าในการผลักดันให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ด้วยเหตุนี้เองประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่นั้นจึงมิได้มีเฉพาะอนุภาคประจุที่เป็นคลอไรด์เท่านั้นแต่ยังพบว่ามีประจุไฟฟ้าชนิดอื่นๆที่เกิดการเคลื่อนที่ด้วย

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อค่าประจุไฟฟ้าที่วัดได้ด้วยวิธีการทดสอบนี้อีกหลายประการด้วยกัน ได้แก่ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน สารเคมีผสมเพิ่มประเภทที่เป็นโพลีเมอร์ซึ่งมีคุณสมบัติด้านประจุไฟฟ้า อายุของก้อนตัวอย่าง พองอากาศและระบบความ

ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต ชนิดของวัสดุมวลรวมหรือชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ประเภทของการบ่ม นอกจากนี้ในการทดสอบยังพบว่าความร้อนจากการผ่านกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย^[7-8] ด้วยเหตุนี้เองข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ทำการจัดเก็บนั้นจึงมีค่ามากเกินไปกว่าความเป็นจริงนำไปสู่การแปลความหมายข้อมูลของความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ผิดพลาดได้

ตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าปริมาณประจุไฟฟ้า (Coulomb Charge Passed) สามารถกระทำได้จากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบจนครบสอบ 6 ชั่วโมง ดังสมการ (2.1)

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2.1)$$

โดยที่

Q คือ Coulomb Charge Passed, คูลอมบ์(C)

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น, แอมแปร์ (A)

I_t คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t นาที นับจากเริ่มการทดสอบ, แอมแปร์ (A)

การประเมินผลทดสอบด้วยวิธีนี้ เป็นการประเมินข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Measurement) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งวิธีการทดสอบนี้ให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และเหมาะที่จะใช้ในงานจริงเนื่องจากสภาวะในการทดสอบนี้คลอไรด์ถูกกักกั้นอยู่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นตัวเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่มากกว่าเป็นไปตามกลไกการซึมผ่านที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติของอนุภาคคลอไรด์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เนื่องจากในความเป็นจริงนั้นสภาพการเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตของคลอไรด์คงไม่มากไปกว่าสภาพที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้อีกแล้ว ด้วยเหตุผลนี้เองหากปริมาณประจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด คอนกรีตที่ทดสอบดังกล่าวควรมีคุณสมบัติในด้านความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ดีด้วย

2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาและสมมติฐานเบื้องต้นในการศึกษาโดยวิธีประยุกต์

จากการศึกษาในงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำให้ประจุไฟฟ้าคลอไรด์เกิดการเคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่าง ซึ่งเรียกรูปวิธีนี้ว่า Electrical Migration Technique^[9-10] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเกิดจากการนำสารละลายเกลือหรือไฮเดียมคลอไรด์มาใส่ไว้ในภาชนะบรรจุ (Chamber Cell) ด้านที่เป็นขั้วลบเพื่อให้เกิดแรงดันทางไฟฟ้าต้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของ

อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบไปยังอีกด้านหนึ่งที่เป็นขั้วบวก โดยอนุภาคคอลลอยด์จำเป็นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่าง ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของคอลลอยด์ในสารละลายด้านท้ายน้ำ (Down Stream Solution) จะมีความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มขึ้นเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในขณะที่สารละลายด้านต้นน้ำ (Up Stream Solution) จะมีความเข้มข้นของคอลลอยด์ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป งานวิจัยของ Chung-Chia Yang^[11] ได้ออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าการอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายในสารละลายที่อยู่ในด้านท้ายน้ำหรือขั้วแอโนด (Anode or Down Stream Solution) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะเริ่มมีค่าคงที่ ทันทีที่ก้อนตัวอย่างเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6(ข) เนื่องจากในช่วงแรกก้อนตัวอย่างอยู่ในสภาวะไม่คงที่ (Non-Steady State) อนุภาคของคอลลอยด์ที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตจากต้นน้ำ (Cathode or Upstream Solution) ไปยังด้านท้ายน้ำ (Anode or Down Stream Solution) นั้นสามารถแยกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านโพรงคอนกรีตประเภทที่ต่อเนื่องถึงกัน (Continuous Pore, P_c) จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะถูกกักเก็บไว้ในก้อนตัวอย่างด้วยโพรงคอนกรีตประเภทที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Discontinuous Pore, P_{dc}) ที่ละน้อย จนกระทั่งโพรงคอนกรีตประเภทที่ไม่ต่อเนื่องนี้เต็มและไม่สามารถเก็บอนุภาคของคอลลอยด์ได้อีกต่อไป ซึ่งเรียกว่าเป็นจุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Steady State) ทำให้หลังจากนั้นอัตราการไหลของอนุภาคของคอลลอยด์ที่ไหลเข้าและไหลออกจะมีค่าเท่ากัน^[11] ดังนั้นในการวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตโดยวิธีประยุกต์จึงมีความจำเป็นจะต้องกำหนดสมมติฐานเบื้องต้นขึ้นดังต่อไปนี้

2.5.1 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ทำการศึกษาแยกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Continuous Pore, P_c) และปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Discontinuous Pore, P_{dc})

2.5.1.1 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Continuous Pore, P_c) หมายถึง ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่มีลักษณะที่ต่อเนื่องกันโดยตลอดจากผิวภายนอกจากคอนกรีตด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โพรงคอนกรีตประเภทนี้ทำให้อนุภาคของคอลลอยด์สามารถเคลื่อนที่จากผิวภายนอกคอนกรีตเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้

2.5.1.2 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Discontinuous Pore, P_{dc}) หมายถึง ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องถึงกันโดยตลอด หรือ เป็นปริมาณของโพรงที่ตัน โพรงคอนกรีตประเภทนี้ทำให้อนุภาคของคอลลอยด์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้แต่อนุภาคของคอลลอยด์เหล่านี้จะถูกเก็บสะสมไว้ในโพรงคอนกรีตที่เป็นโพรงตันนั่นเอง

2.5.2 ณ สภาวะที่ไม่คงที่ (Non-Steady State) อนุภาคของคอลลอยด์ที่ไหลเข้าก้อนตัวอย่าง (Cl^-_{in}) จะมีค่ามากกว่าอนุภาคของคอลลอยด์ที่ไหลออกก้อนตัวอย่าง (Cl^-_{out}) จนกระทั่งเริ่ม

มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าเท่ากันในที่สุด ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Steady State) ที่เวลา T_s จะได้ว่าปริมาณคลอไรด์ไหลเข้า (Cl_{in}) จึงมีค่าเท่ากับ พื้นที่ใต้กราฟของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้าเทียบกับเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง T_s ส่วนปริมาณคลอไรด์ไหลออก (Cl_{out}) จึงมีค่าเท่ากับ พื้นที่ใต้กราฟของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออกเทียบกับเวลา ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง T_s ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถึง รูปที่ 2.8 และหากพิจารณา ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Steady State) พบว่าปริมาณอนุภาคของคลอไรด์สะสมในโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Cl_{acc}) จึงมีค่าเท่ากับ ผลต่างของปริมาณอนุภาคของคลอไรด์ไหลเข้าทั้งหมด (Cl_{in}) กับปริมาณคลอไรด์ออกทั้งหมด (Cl_{out}) ที่เวลา T_s ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2.5.3 คอนกรีตมีปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Pore, P) เท่ากับผลรวมของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกันกับปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน

2.5.4 คอนกรีตมีอัตราส่วนของปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน ต่อ ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกันมีค่าคงที่ และเท่ากันในทุกทิศทาง

2.6 ข้อจำกัดวิธีประยุกต์

ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตด้วยวิธีประยุกต์ นั้นมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องไม่นำมาพิจารณา เพื่อความง่ายต่อการวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลจากการทดลอง ข้อจำกัดเหล่านี้ได้แก่

2.6.1 ไม่คำนึงถึงผลของแรงผลัทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากประจุชนิดเดียวกันที่เกิดการสะสมภายในโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน

2.6.2 ไม่คำนึงผลของโพรงคอนกรีตที่เป็นโพรงซึ่งอยู่เดี่ยวๆ อย่างอิสระ (Air Void or Entrapped Air) หมายถึง โพรงคอนกรีตที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับผิวภายนอกคอนกรีตและไม่มีการเชื่อมต่อกับโพรงคอนกรีตที่อยู่ข้างเคียงด้วย เพื่อให้วิเคราะห์ผลการทดสอบได้สะดวกขึ้น

2.6.3 ไม่คำนึงผลของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอลิไซคลานีกระหว่างทำการทดสอบ

2.7 การวิเคราะห์และแปลความหมายผลการทดลองวิธีประยุกต์จากสมมติฐานข้างต้น

2.7.1 ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Pore, P)

ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด หมายถึง ผลรวมของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกัน (Pc) กับปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Pdc) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งในที่นี้การหาค่าดังกล่าวในเชิงเปรียบเทียบ (Relative Quantities) สามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด แปรผันตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ([Cl⁻in]) ดังสมการ (2.2)

$$P \propto [Cl^{in}] \quad (2.2)$$

2.7.2 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกัน (Continuous Pore, Pc)

การหาค่าปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกันในเชิงเปรียบเทียบนั้น สามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกัน (Pc) แปรผันตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ([Cl⁻out]) ดังสมการ (2.3)

$$Pc \propto [Cl^{out}] \quad (2.3)$$

2.7.3 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Pore , Pdc)

การหาค่าปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกันในเชิงเปรียบเทียบ สามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ปริมาณโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Pdc) แปรผันตาม ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บไว้ในก้อนตัวอย่างคอนกรีต ([Cl⁻acc]) ดังสมการ (2.4)

$$Pdc \propto [Cl^{acc}] \quad (2.4)$$

2.7.4 ค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต (Continuity of Pore)

ค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต หมายถึง อัตราส่วนปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Pc) ต่อปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (P) ดังนั้นในการหาค่าความต่อเนื่องของ

โพรงคอนกรีตในเชิงเปรียบเทียบสามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต แปรผันตาม อัตราส่วนของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก (Cl_{out}^-) ต่อความเข้มข้นของอนุภาคของคลอไรด์ที่ไหลเข้า (Cl_{in}^-) ดังสมการ (2.5)

$$\text{The Continuity of Pore} \propto \frac{[Cl_{out}^-]}{[Cl_{in}^-]} \quad (2.5)$$

2.7.5 ค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต (Discontinuity of Pore)

ค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต หมายถึง อัตราส่วนปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Pdc) ต่อปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (P) ดังนั้นในการหาค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในเชิงเปรียบเทียบสามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตแปรผันตาม อัตราส่วนของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บไว้ในก้อนตัวอย่างคอนกรีต (Cl_{acc}^-) ต่อ ปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Cl_{in}^-) ดังสมการ (2.6)

$$\text{The Discontinuity of Pore} \propto \frac{[Cl_{acc}^-]}{[Cl_{in}^-]} \quad (2.6)$$

2.7.6 การนิยามค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K)

ในการทดสอบโดยวิธีประยุกต์นั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสามารถอธิบายให้ได้ว่าในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีความแตกต่างกันนั้น สัดส่วนผสมใดจะเป็นสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในงานคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเล หรือ งานคอนกรีตที่ทนสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ได้

ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นต้องกำหนดค่าดัชนีขึ้นมาค่าหนึ่งเพื่อใช้เป็นตัวดัชนีชี้วัดต่อการยอมให้คลอไรด์ซึมผ่านได้ของคอนกรีตขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีประยุกต์ โดยเรียกค่าที่ถูกระบุขึ้นมาใหม่นี้ว่า “ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K)”

ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ โดยวิธีประยุกต์นี้มีแนวความคิดพื้นฐานที่ว่า คอนกรีตที่มีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่สูง นั้นควรจะเป็นคอนกรีตที่มีปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (P) เป็นจำนวนมาก และ ในบรรดาโพรงคอนกรีตทั้งหมดเหล่านั้น

ส่วนมากเป็นโพรงคอนกรีตประเภทต่อเนื่องถึงกัน (Pc) นั่นเอง และนอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนกระทั่งคอนกรีตเข้าสู่สภาวะคงที่ควรมีระยะเวลา (T_s) ไม่นานอีกด้วย

ดังนั้นค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K) จึงสามารถนิยามให้แปรผันตามอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณโพรงคอนกรีตประเภทต่อเนื่องถึงกัน (Pc) ต่อ เวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนกระทั่งคอนกรีตเข้าสู่สภาวะคงที่ควรมีระยะเวลา (T_s) ดังสมการ (2.7)

แต่ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Pc) ยังแปรผันตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ($[Cl^- out]$) ได้ดังที่ได้แสดงในสมการ (2.3) ดังนั้นค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K) จึงแสดงได้อีกในรูปแบบหนึ่งดังสมการ (2.8)

$$K \propto \frac{Pc}{T_s} \quad (2.7)$$

$$K \propto \frac{[Cl^- out]}{T_s} \quad (2.8)$$

2.8 การทดสอบเพื่อหาปริมาณของโพรงและการกระจายขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอพี (MIP; Mercury-Intrusion Porosimetry)

2.8.1 วิธีเอ็มไอพี หรือ Mercury-Intrusion Porosimetry

เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างของโพรงคอนกรีตมีหลายรูปแบบด้วยกัน เริ่มทดลองในช่วงแรกๆ เมื่อประมาณ 65 ปีมาแล้วโดย Ritter และ Drake^[21] โดยช่วงแรกเป็นวิธีที่นิยมวิธีหนึ่งเพื่อศึกษาปริมาณโพรงภายในวัสดุประเภท เซรามิกส์ หิน ดินเหนียว และเพสต์ประเภทซีเมนต์ (cement-based materials) เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ง่าย และแสดงผลของปริมาตรและขนาดโพรงภายในรวมทั้งการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต (Pore Size Distribution) และปริมาณโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตที่เริ่มตรวจวัดได้ (Threshold Diameter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตตามทฤษฎี (The theoretical pore diameter) หรือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตโตสุดที่มีความต่อเนื่องถึงกัน (The maximum continuous pore diameter) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตเฉลี่ย (The mean pore diameter)

2.8.2 แนวความคิดของวิธีเอ็มไอพี (Concept of Mercury Intrusion Porosimetry)

โดยวิธีเอมไอพีนี้ต้องใช้ของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก (Non-wetting liquid) ซึ่งมีค่าของมุมสัมผัส (θ) มากกว่า 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) ซึ่งในที่นี้ได้แก่ปรอท (Mercury) ซึ่งจะถูกรวมเข้ากับการเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างโพรงคอนกรีต^[22] โดยความดันที่ใช้ในการอัดปรอทนั้นเป็นฟังก์ชันของมุมสัมผัส (Contact Angle) และมีสมมติฐานว่ารูปร่างของโพรงคอนกรีตที่ถูกปรอทอัดเข้าไปนั้นเป็นรูปทรงกระบอก โดยจากสมมติฐานดังกล่าวจะได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงคอนกรีตกับความดันที่เปลี่ยนแปลงได้ดังสมการ (2.9)

$$\Delta P = \frac{-2\sigma_{l/v} \cos \theta}{r} \quad (2.9)$$

โดยที่	ΔP	หมายถึง ความดันเกจ (Gauge Pressure)
	r	หมายถึง รัศมีของโพรงคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกปรอทอัดเข้าไป
	$\sigma_{l/v}$	หมายถึง แรงตึงผิวของปรอท ซึ่งมีค่า 485 มิลลินิวตันต่อเมตร
	θ	หมายถึง มุมสัมผัสของปรอทกับผนังโพรงคอนกรีต (Contact Angle)

สมการ (2.9) ของ Washburn^[23] ซึ่งเป็นสมการทั่วไป ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับของเหลวทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก (Non-wetting liquid)^[22] หรือของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียกได้ก็ตาม (Wetting liquid) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) ปรากฏการณ์แคพิลลารีของของเหลวทั้งสองประเภทที่จุ่มลงในหลอดแก้วรูปทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11(ก) และรูปที่ 2.11(ข) ตามลำดับ โดยของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียกได้จะมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90 องศา ค่าความดันเกจ จะมีค่าติดลบในขณะที่ของเหลวที่ไม่เปียกจะมีมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา ค่าความดันเกจ จะมีค่าเป็นบวก นั่นคือจะต้องใช้ความดันที่มีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศเพื่อที่จะดันปรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีตได้ ในกรณีที่มุมสัมผัสมีค่าเป็น ศูนย์องศา จากสมการ (2.9) กลายเป็นสมการ (2.10)

$$\Delta P = \frac{-2\sigma_{l/v}}{r} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.9) พบว่าสำหรับ พบว่า รัศมีของโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเล็กมากพบว่าความดันที่ใช้จะต้องมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศมากตามไปด้วย โดยหากขนาดรัศมีของโพรง

คอนกรีตมีค่าประมาณ 18 อังสตรอม หรือ 18×10^{-10} เมตร ในอัตราที่เข้าสู่โพรงจะต้องใช้ความดันสูงถึง 415 เมกกะปาสคาล โดยDiamond^[24] ได้ให้ข้อสังเกตว่าวิธีเอ็มไอพี นี้มีสมมติฐานอยู่บนพื้นฐานของรูปร่างของโพรงคอนกรีตที่จะเป็นทรงกระบอก^[21-24] ซึ่งคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเนื่องจากโพรงคอนกรีตที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีรูปร่างของโพรงที่มีลักษณะซับซ้อนและหลากหลายมากกว่าที่จะถูกสมมติให้เป็นรูปทรงกระบอกเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การเกิดสภาพคอขวด (Neck-Bottle Effect) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.8.6.2 ที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดจากสมมติฐานของวิธีเอ็มไอพีต่อไป

2.8.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี

ในปัจจุบันพบว่าเครื่องเอ็มไอพีที่ถูกผลิตออกมาในเชิงพาณิชย์มีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่ทุก ๆ รูปแบบที่ต่าง ๆ กันนั้นล้วนใช้หลักการเดียวกัน การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีนี้ มีขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอนดังนี้

2.8.3.1 ขั้นตอนการคัดเลือกและเตรียมตัวอย่างคอนกรีต (Sample Preparation)

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะถูกตัดให้เป็นลูกบาศก์ชิ้นเล็กๆซึ่งมีปริมาตรไม่เกิน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาตรของพรอทที่ใช้ร้อยละ 5 ถึง 10 ของปริมาตรก้อนตัวอย่าง ในกรณีที่คอนกรีตที่ทำการทดสอบมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneities) ก้อนตัวอย่างที่เลือกใช้ควรมีปริมาตรมากกว่า ในกรณีที่คอนกรีตที่จะทำการทดสอบมีเนื้อที่สม่ำเสมอ เนื่องจากก้อนตัวอย่างที่มีปริมาตรมากกว่าจะทำให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องมากขึ้นและลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบไปได้มาก ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับวิธีเอ็มไอพีจึงมีอยู่เพียง 2 ประการด้วยกัน ซึ่งได้แก่ ขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตต้องมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของภาชนะที่ใช้ใส่ก้อนตัวอย่างระหว่างการอัดพรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีต (Chamber or Empty Cell) และ ปริมาตรโพรงคอนกรีตที่มีอยู่ในจริงภายในก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบนั้นจะต้องมีค่าไม่มากกว่าปริมาตรของพรอทจะถูกอัดเข้าไประหว่างการทดสอบ^[25] โดยงานวิจัยของ Hearn และ Hooton^[26] แสดงให้เห็นว่าผลจากการเลือกใช้ขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันทำให้ได้ผลทดสอบที่แตกต่างกันมากไปด้วย

สิ่งที่มีความสำคัญมากคือก้อนตัวอย่างจะต้องถูกทำให้แห้งสนิท ซึ่งเงื่อนไขของการทดสอบที่ดีนั้นภายในโพรงคอนกรีตจะต้องปราศจากของเหลวทุกชนิด

2.8.3.2 ขั้นตอนการอัดพรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีต (Mercury Intrusion Experiment)

พรอทจะถูกดันเข้าสู่โพรงคอนกรีตโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นสุญญากาศโดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะดูน้ำและอากาศที่ตกค้างภายในโพรงคอนกรีต เนื่องจากหากมีน้ำเคลือบอยู่ที่ผนังโพรงคอนกรีตจะทำให้ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ระหว่างผนังโพรงคอนกรีตกับพรอทมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ที่เครื่องอัดพรอท (Penetrometer) เริ่มอัดพรอทที่ความดันต่ำๆ

จะทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณโพรงที่มีขนาดใหญ่ได้ก่อน และเมื่อเพิ่มความดันขึ้นเรื่อยๆจะทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณโพรงที่มีขนาดเล็กลงได้อย่างต่อเนื่องตามลำดับจนถึงโพรงที่มีขนาดเล็กสุดที่ความดันสูงสุด ทำให้สามารถทราบถึงการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตได้จากการวัดความดันและปริมาตรพรอทอัดเข้าไป จากทฤษฎีพบว่าขนาดโพรงคอนกรีตใหญ่สุดที่ตรวจวัดได้มีค่าประมาณ 1 มิลลิเมตร และประเด็นที่สำคัญอีกประการหนึ่งคืออัตราการให้ความดันของเครื่องอัดพรอทจะต้องไม่สูงมากจนเกินไปเนื่องจากในการเคลื่อนที่เข้าไปในระบบโพรงคอนกรีตของพรอทนั้นต้องการระยะเวลาที่แน่นอนค่าหนึ่ง กล่าวโดยสรุปคือขนาดของโพรงคอนกรีตที่ทำการตรวจวัดในแต่ละช่วงของความดันนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรของพรอทที่ถูกอัดเข้าไปและความดันที่ใช้ในการอัดพรอทเข้าไป

ขนาดของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยพรอทจะมีความสัมพันธ์ต่อความดันที่ใช้ในการอัดพรอท เครื่องเอ็มไอพีที่ใช้โดยทั่วไปต้องใช้ความดันที่สูงมากถึง 400 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถตรวจสอบขนาดโพรงที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรได้บางส่วน อย่างไรก็ตามที่ระดับความดันสูงมากมักพบปัญหา เช่น อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นทำให้ปริมาตรของพรอทส่วนที่แทนที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนปัญหาอีกประการคือภายใต้ความดันสูงพรอทจะมีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่สามารถอัดตัวได้

ในการหาค่าการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตสามารถทำได้โดย เมื่อพิจารณาสมการ (2.9) พบว่าถ้าหากการวัดความดัน (ΔP) เริ่มต้นที่ความดันบรรยากาศดังนั้นจะได้ว่า (ΔP) สามารถเขียนได้เป็น P ซึ่งเป็นความดันเกจ สมการ (2.9) จะกลายเป็นสมการ (2.11) ดังนี้

$$Pr = 2\sigma_{l/v} \cos \theta \quad (2.11)$$

หากหาอนุพันธ์สมการที่ (2.11) ซึ่งในที่นี้ $\sigma_{l/v}$ และ $\cos \theta$ ซึ่งมีค่าคงที่จะได้ว่า

$$Pdr + rdP = 0$$

$$\frac{r}{P} = -\frac{dr}{dP} \quad (2.12)$$

การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต(Pore Size Distribution) ถูกนิยามว่า คือฟังก์ชันของอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของโพรงคอนกรีตเทียบกับรัศมี ซึ่งแทนด้วย $D_v(r)$ สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.13)

$$dV = D_v(r)dr \quad (2.13)$$

โดยที่ dV หมายถึง ส่วนของปริมาตรของโพรงที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงของรัศมี r ถึง $r + dr$ จากสมการที่ (2.12) นำมาแทนที่ในสมการ (2.13) จะได้ดังสมการที่ (2.14) ดังนี้

$$-dV = D_v(r) \frac{r}{P} dP \quad (2.14)$$

หากพิจารณาจะพบว่าค่าของ dV มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง ดังนั้นสมการ (2.14) จะกลายเป็นสมการ (2.15) ดังนี้

$$D_v(r) = \frac{P}{r} \frac{dV}{dP} \quad (2.15)$$

ในระหว่างการทดลองมีการเพิ่มความดันขึ้นเรื่อยๆ จาก P ไปเป็น $P + \Delta P$ ทำให้มีปริมาณทางขวามือในสมการ (2.8) สามารถตรวจวัดได้ในแต่ละช่วงที่มีการเพิ่มความดัน คือ P และ ΔP ในขณะที่สามารถคำนวณหาค่า r ได้จากสมการ (2.11) ในทำนองเดียวกัน ΔV สามารถวัดได้จากปริมาตรของปรอทในส่วนที่ถูกแทนที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.8.4 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี

2.8.4.1 มุมสัมผัส (contact angle) มีผลต่อความถูกต้องของขนาดโพรงคอนกรีตที่คำนวณได้ เช่น การใช้ค่ามุมสัมผัสคลาดเคลื่อนจากค่าจริงไปร้อยละ 1 ของมุมสัมผัส 140 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าขนาดโพรงคลาดเคลื่อนไปร้อยละ 1.50

2.8.4.2 โดยทั่วไปสำหรับมุมสัมผัสของวัสดุประเภทซีเมนต์เพสต์ (cement-based materials) ขึ้นกับวิธีการทำตัวอย่างให้แห้ง โดยเพสต์ที่ทำให้แห้งด้วยเตาอบ ที่ 105 องศาเซลเซียส (Oven dried sample) จะมีค่ามุมสัมผัสเป็น 117 องศาเซลเซียส

2.8.4.3 วิธีการทำตัวอย่างให้แห้ง (sample drying) ตัวอย่างที่ทดสอบจะต้องทำให้แห้ง ซึ่งการใช้กรรมวิธีที่ทำให้ตัวอย่างแห้งแตกต่างกันที่แต่ละวิธีจะทำให้มีสภาวะน้ำค้างเหลือภายในโพรงแตกต่างกันไปด้วยโดยเฉพาะในโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเล็กๆ ดังนั้นกรรมวิธีที่ทำให้ตัวอย่างแห้งจึงมีอิทธิพลต่อผลการทดสอบในส่วนขนาดของโพรงขนาดเล็ก

2.8.4.4 ความบริสุทธิ์ของปรอท (mercury purity) ในการทดสอบควรใช้ปรอทบริสุทธิ์ (Distilled Mercury) เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรปรวนในส่วนของคุณค่ามุมสัมผัสและค่าแรงดึงผิวปรอท

2.8.4.5 อัตราการให้ความดันของปรอท

2.8.5 ผลการทดสอบโดยทั่วไปด้วยเครื่องเอ็มไอพี

ผลการทดสอบโดยทั่วไปด้วยวิธีเอ็มไอพีมักแสดงด้วยการกระจายของขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตเมื่อเทียบกับโพรงคอนกรีตขนาดต่างๆ (Cumulative Pore Size Distribution Curve) โดยทั่วไปการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ที่ได้จากการทดลองมักอยู่ในรูปของเส้นกราฟการสะสมของการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต (Cumulative Pore Size Distribution Curve) โดย Winslow และ Lowell ได้ทำการอบแห้งก้อนตัวอย่างด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาดำเนินการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 ที่อายุ 1 วัน ถึง 318 วัน^[27] ซึ่งสามารถแสดงการกระจายของขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งโพรงขนาดใหญ่ถึงโพรงขนาดเล็กที่สุดซึ่งถูกแทนที่ด้วยปรอทที่เข้าไปในโพรงคอนกรีตต่อหน้าหน้าหนึ่งของมวลคอนกรีตได้ดังรูปที่ 2.12

2.8.6 ข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดจากสมมติฐานของวิธีเอ็มไอพี ที่พึงระวังในการหาปริมาตรโพรงคอนกรีต

2.8.6.1 โพรงภายในเนื้อคอนกรีตถูกตั้งอยู่บนให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก (Cylindrical Shape) ซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริง เนื่องจากรูปร่างโพรงที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์มีรูปร่างที่ซับซ้อนกว่ามาก

2.8.6.2 การใช้สมมติฐานว่าความต่อเนื่องของโพรงที่มีลักษณะเรียงจากโพรงขนาดใหญ่ด้านนอกไปสู่โพรงที่มีขนาดเล็กกว่าที่อยู่ด้านใน แต่การเชื่อมต่อในสภาพจริงอาจไม่เป็นเช่นนี้ ผลทดสอบจึงคลาดเคลื่อน โดยปริมาตรของโพรงขนาดใหญ่กว่าด้านในจะถูกแสดงผลรวมไปในส่วนปริมาตรของโพรงขนาดเล็กกว่าลำดับก่อนหน้า หรือที่เรียกว่า ปัญหาสภาพคอขวด (Neck-Bottle Effect) คือ มีโพรงขนาดเล็กเชื่อมกลางระหว่างโพรงขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นปริมาตรของโพรงขนาดใหญ่กว่าด้านในที่แสดงออกมาจะถูกรวมในส่วนปริมาตรของโพรงขนาดเล็กที่เชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.8.6.3 การวัดปริมาตรโพรงทั้งหมดไม่สามารถทำได้ เนื่องจากโพรงบางส่วนมีขนาดเล็กมากคือ มีขนาดเล็กกว่าโพรงเจด คือ 0.007 ไมครอน ต้องใช้ความดันปรอทที่สูงมากกว่าค่าสูงสุดที่เครื่องเอ็มไอพีจะสามารถทำได้คือประมาณ 30,000 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว ดังนั้นจึงเรียกปริมาตรของโพรงคอนกรีตที่ไม่สามารถวัดได้เหล่านี้ว่า ปริมาตรโพรงที่หายไป (Lost Porosity)

2.8.6.4 การใช้ความดันสูงอาจทำลายผนังโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องให้เกิดการต่อเนื่องขึ้น หรือเกิดการทำลายความต่อเนื่องของโพรงภายในซีเมนต์เพสต์ให้เชื่อมต่อกัน ทำให้ได้ค่าการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตที่มีความคลาดเคลื่อน

2.8.7 ข้อเสนอแนะในการศึกษาโพรงด้วยวิธีเอ็มไอพี

จากปัญหาและข้อจำกัดของด้วยวิธีเอ็มไอพีโดยเฉพาะในเรื่องลักษณะการเรียงขนาดโพรง และปัญหาคอขวดซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อผลของการกระจายขนาดโพรงและความ

คดเคี้ยวภายในโพรงเองซึ่งไม่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Tortuosity) อย่างไรก็ตามจะไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ในเชิงปริมาตรโพรงทั้งหมด (Porosity) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการแนะนำให้ใช้วิธีเอ็มไอพี เพื่อจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ปริมาตรโพรง (Pore Volume) และไม่ควรใช้เพื่อการวิเคราะห์การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบเชิงคุณภาพ (Qualitative Measurement) ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ^[7]

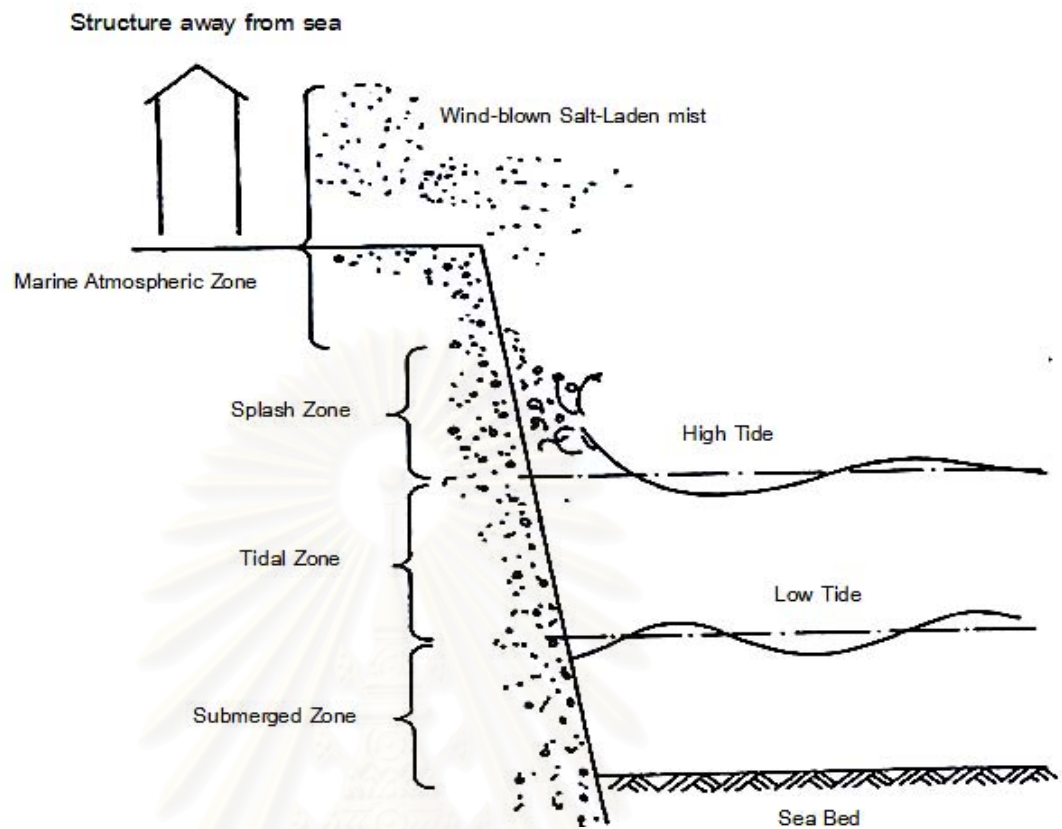
ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ย(คูลอมบ์)	ความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 - 4,000	ปานกลาง
1,000 - 2,000	ต่ำ
100 – 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ซึมผ่านได้น้อยมากหรือไม่ได้เลย

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีเอ็มไอพีเพื่อหาการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ^[31]

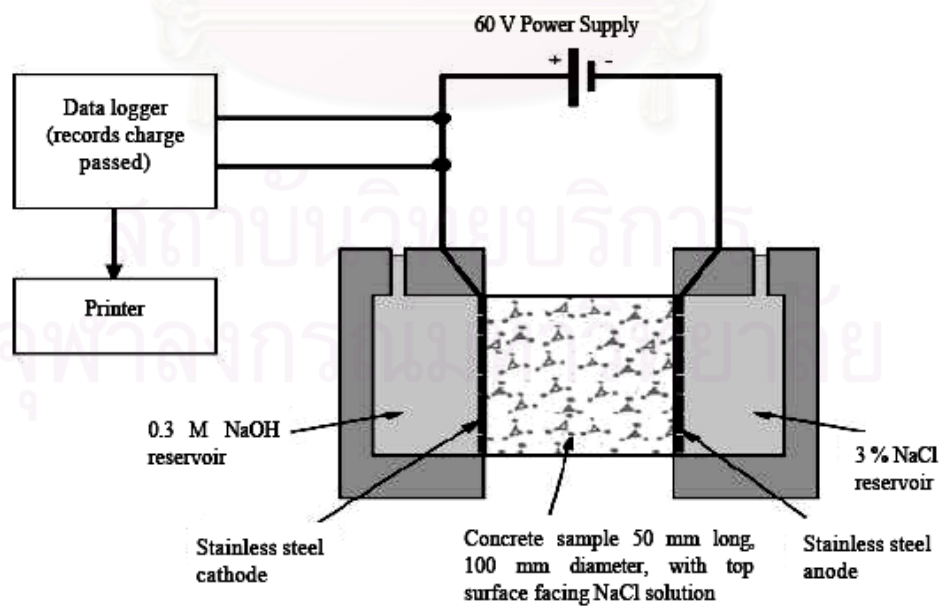
Sample Identity	w/c Ratio	Age (days)	Hg Volume Intruded (cm ³ /g)	Pore Volume* (cm ³ /g)	Volume Intruded (cm ³ /g)
1	0.3	5	0.133	0.188	70.8
	0.3	11	0.116	0.187	61.9
	0.3	34	0.104	0.187	57.0
2	0.6	4	0.335	0.440	76.2
	0.6	22	0.278	0.431	64.5
	0.6	36	0.251	0.412	60.9
3	0.8	4	0.489	0.565	86.5
	0.8	22	0.449	0.527	85.2
	0.8	36	0.425	0.521	81.6

*measured from water immersion experiments

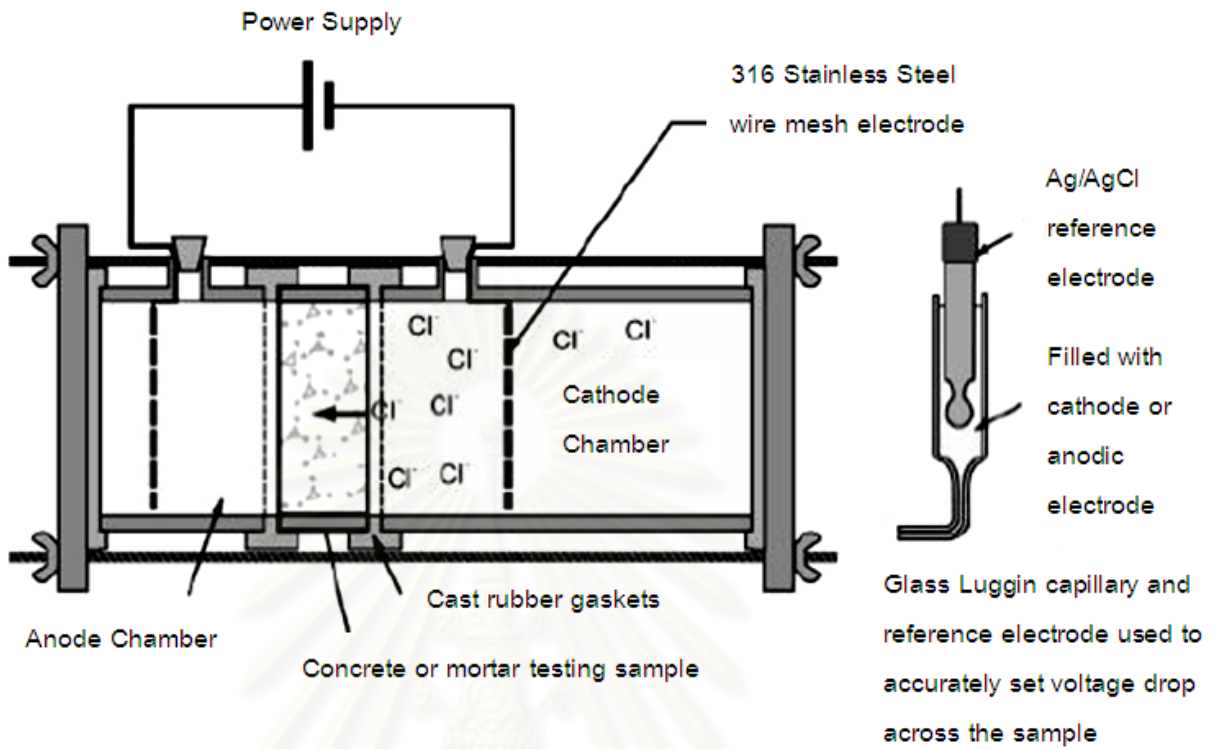
Types of Marine Basic Exposure Zone



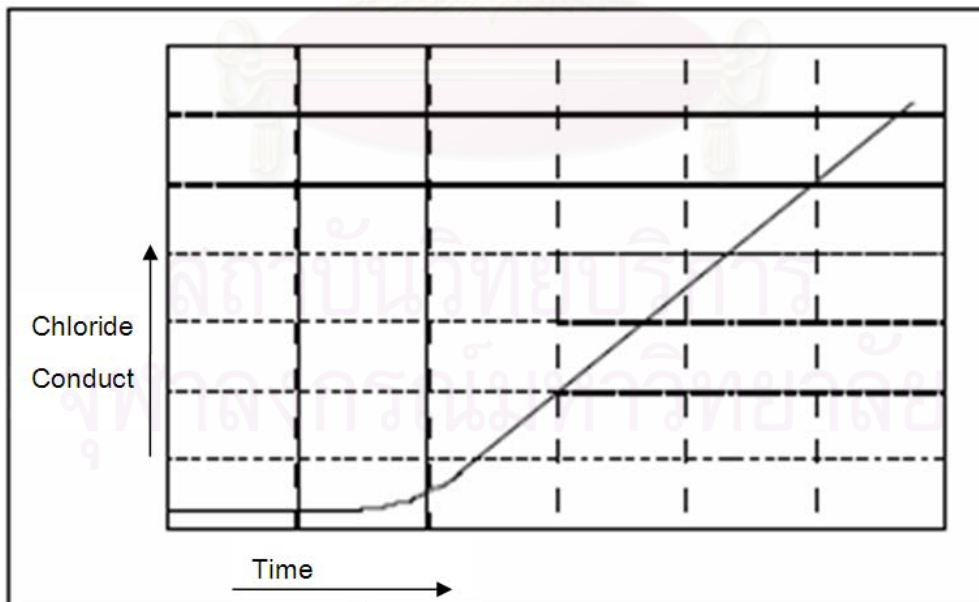
รูปที่ 2.1 การจำแนกตามลักษณะการเปิดเผยของโครงสร้างสู่สิ่งแวดล้อม (Basic Exposure Zones)



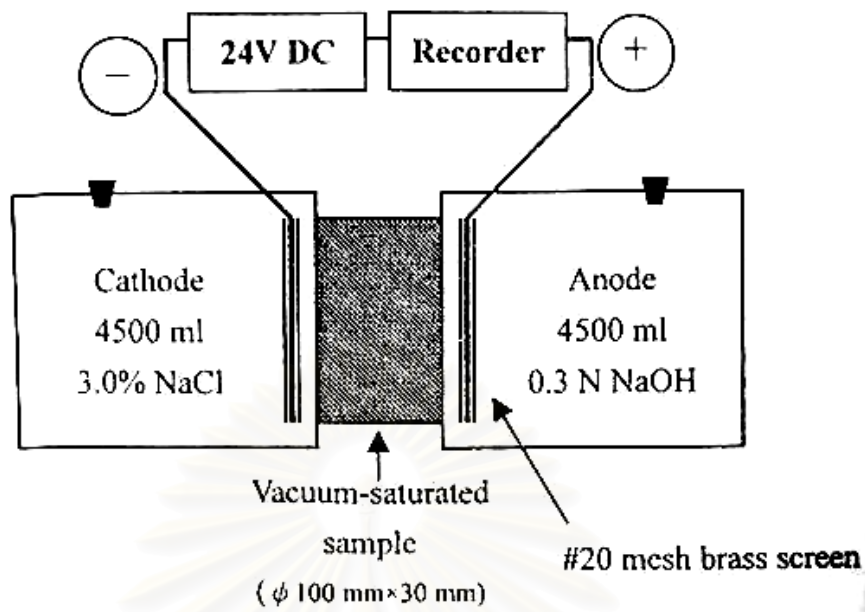
รูปที่ 2.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202^[7]



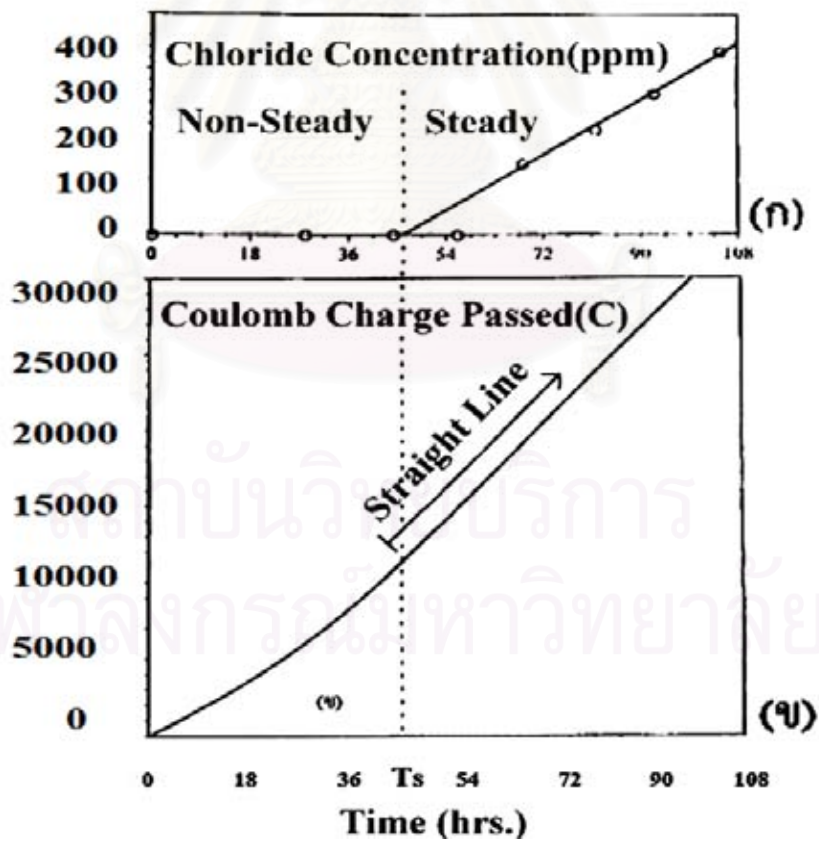
รูปที่ 2.3 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบโดยวิธี Electrical Migration Technique^[9]



รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลายทำน้ำที่เพิ่มขึ้นบริเวณขั้วแอโนด^[30]

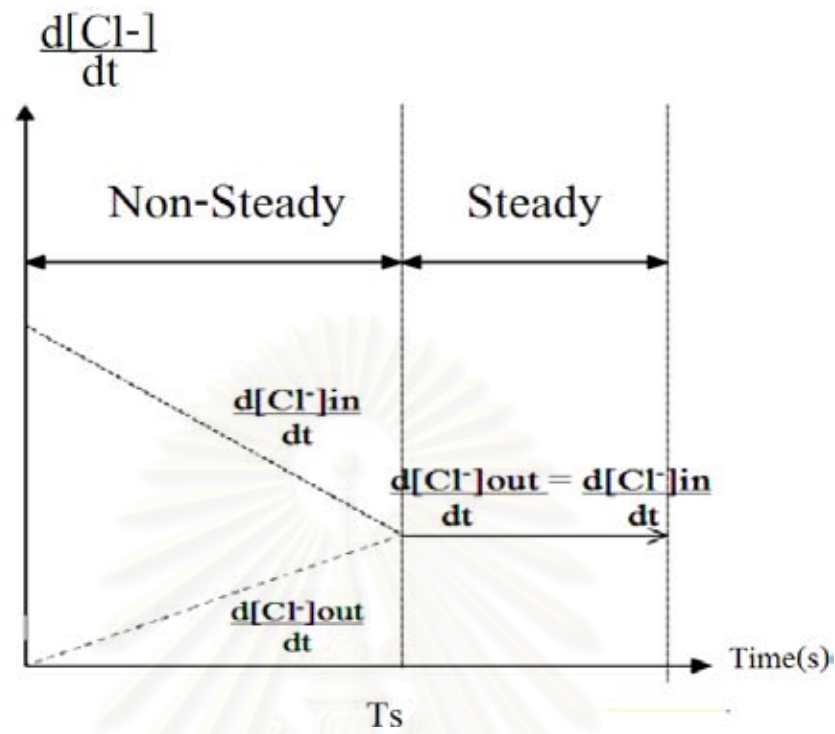


รูปที่ 2.5 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบของ Chung-Chia Yang^[11]

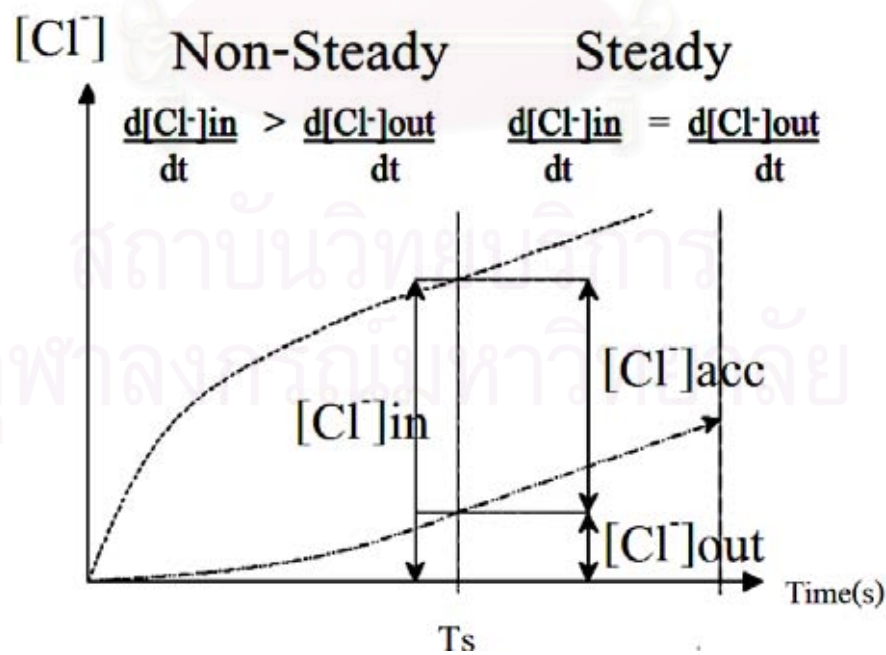


รูปที่ 2.6(ก) การความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์เทียบกับเวลาเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่^[11]

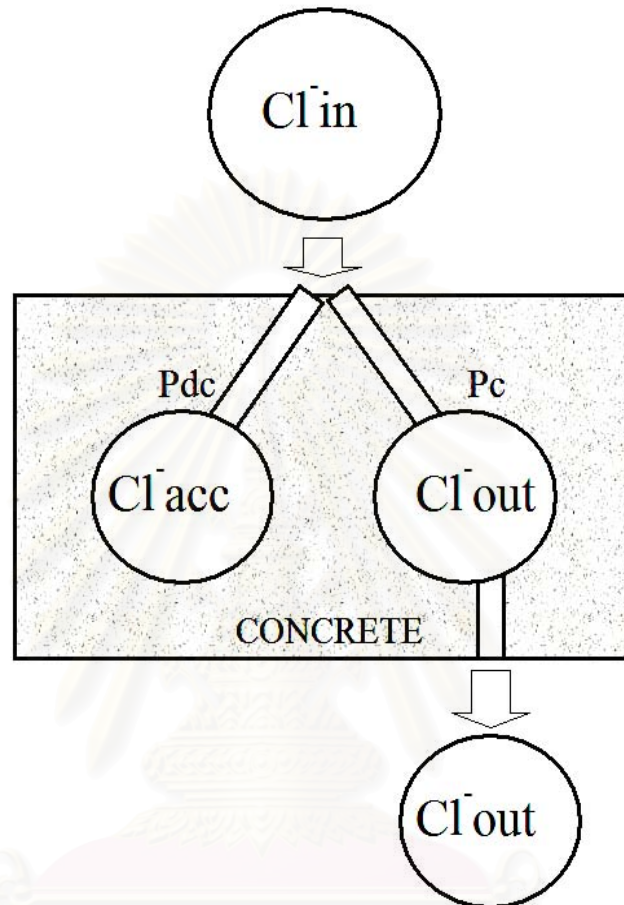
รูปที่ 2.6(ข) ค่าของปริมาณประจุไฟฟ้าเทียบกับเวลาเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่^[11]



รูปที่ 2.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เข้า ($\frac{d[Cl^-]_{in}}{dt}$) และออก ($\frac{d[Cl^-]_{out}}{dt}$) ที่เวลาต่างๆ

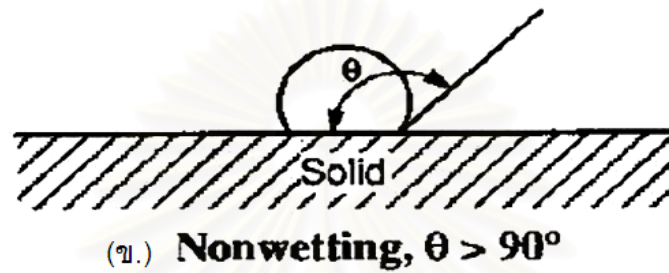
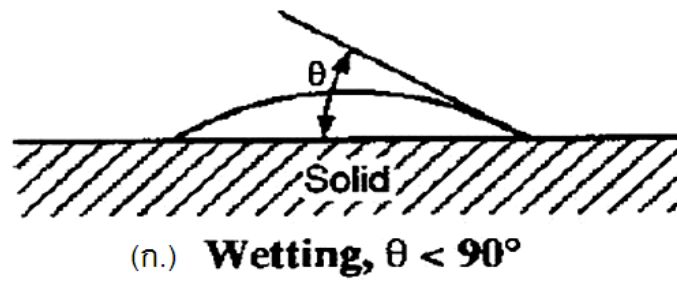


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เข้า $[Cl^-]_{in}$ และออก $[Cl^-]_{out}$ ที่เวลาต่างๆ



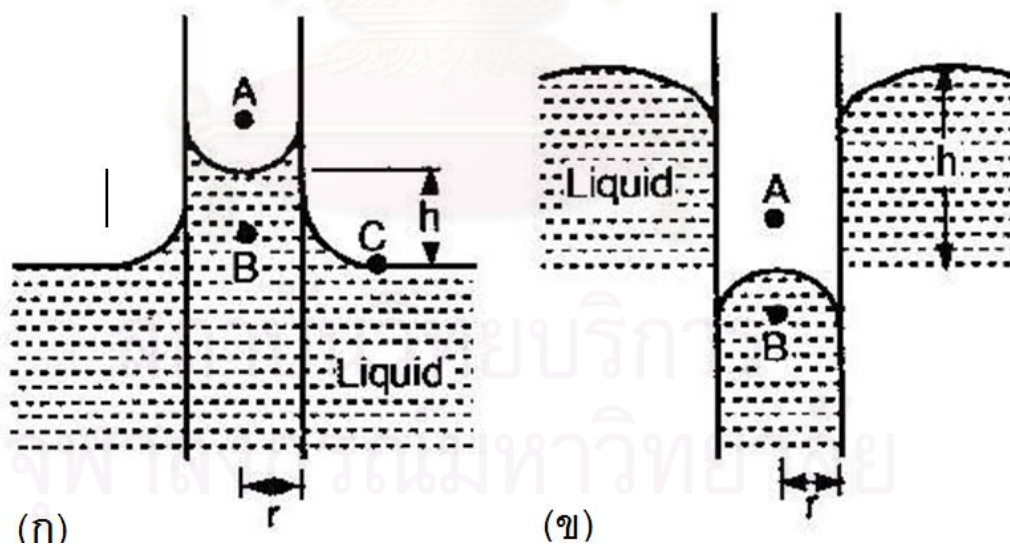
รูปที่ 2.9 ภาพจำลองตามสมมติฐานแสดงกลไกการเคลื่อนที่ผ่านโพรงคอนกรีตของคลอไรด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



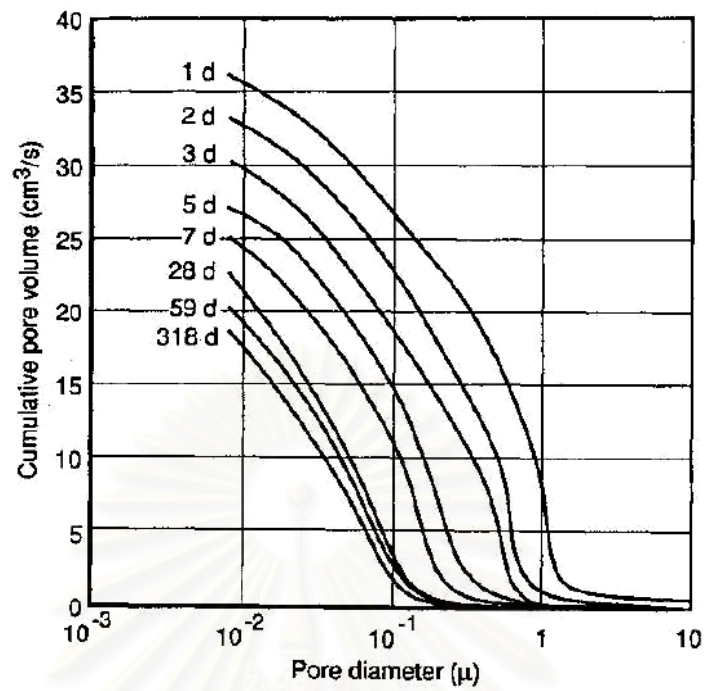
รูปที่ 2.10(ก) มุมสัมผัสของของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียก^[76]

รูปที่ 2.10(ข) มุมสัมผัสของของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก^[76]

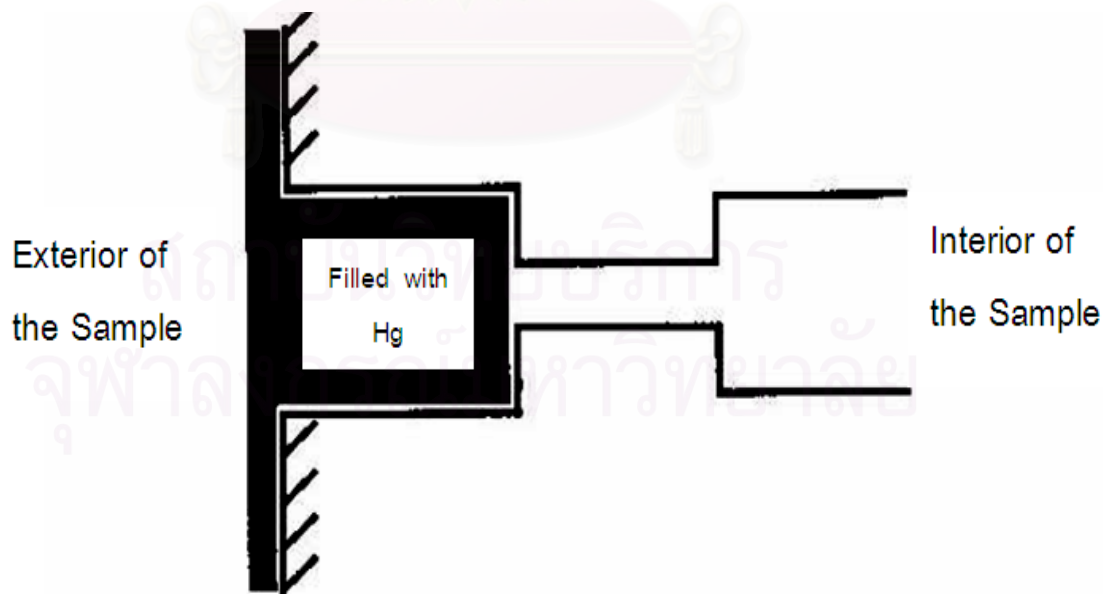


รูปที่ 2.11(ก) ผลแคปพิลลารีจากของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียก
(Wetting; $\theta < 90$ องศา)^[24]

รูปที่ 2.11(ข) ผลแคปพิลลารีจากของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก
(Non-Wetting; $\theta > 90$ องศา)^[24]



รูปที่ 2.12 การกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของ Winslow และ Lowell^[27] ของซีเมนต์เพสต์ $w/c=0.60$



รูปที่ 2.13 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากวิธีเอ็มไอพีจากการเกิดสภาพคอขวด (Neck-Bottle)^[24]

บทที่ 3

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อที่จะหาปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต ซึ่งเรียกว่าวิธีประยุกต์เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบด้วยวิธีอื่นๆ เช่นการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งอ้างอิงตาม ASTM C1202 (Coulomb Charge Passed หรือ RCPT) และการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี (MIP; Mercury Intrusion Porosimetry) และการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัด โดยขั้นตอนทั้งหมดในห้องปฏิบัติการจะสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน อันได้แก่ การเตรียมวัสดุ และการทดสอบด้วยวิธีต่างๆโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมวัสดุ

3.1.1 วัสดุประสาน

ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150 และใช้วัสดุปอซโซลาน อันได้แก่ เถ้าลอย เถ้าแกลบ เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ตามลำดับ ซึ่งวัสดุประสานแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

สำหรับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ได้รับมาทำการทดสอบนั้นสามารถนำมาใช้ในการทดสอบได้ทันที ในขณะที่เถ้าแกลบจะต้องมีการนำไปบดเสียก่อนเนื่องจากในช่วงแรกเถ้าแกลบที่ได้รับมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีสีขาวเทา

ในการนำเถ้าแกลบมาบดนั้นได้ใช้เครื่องบดที่เรียกว่า เครื่องบอลมิลล์(Ball Mill) ซึ่งมีลักษณะเป็นภาชนะรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และมีความยาว 30 เซนติเมตร โดยตัวเครื่องบดจะมีแกนหมุนซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และมีฝาปิดเปิดเพื่อใส่สิ่งของที่จะนำมาบดลงไป โดยจะใช้ลูกบอลเหล็กใส่รวมลงไปด้วยซึ่งลูกบอลเหล็กเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันประมาณ 5 ขนาด คือ 3.81 3.25 2.54 1.90 และ 1.00 เซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่เครื่องบดทำงานเครื่องจะหมุนรอบแกนหมุนลูกบอลเหล็กเหล่านี้จะทำให้หน้าที่ยึดของที่ใส่ลงไปให้ละเอียดโดยอาศัยการกระทบซึ่งกันและกัน โดยความละเอียดที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกันเช่น เวลาที่ใช้ในการบด ขนาดคละและจำนวนของลูกบอลและวิธีการบด ซึ่งมีทั้งการบดอยู่สองแบบคือ การบดแห้ง และการบดเปียกโดยการบดเปียกนั้นจะอาศัยน้ำช่วยในการหล่อลื่นทำให้การบดสามารถบดได้ละเอียดกว่าการบดแห้ง แต่สำหรับการ

ทดสอบในครั้งนี้อ้ใช้การบดแห้งทั้งหมด โดยในการบดแต่ละครั้งจะบดได้ประมาณ 2.5 กิโลกรัม และใช้ระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

3.1.2 มวลรวม

มวลรวมหยาบและละเอียดที่ใช้อ้คือหินปูน และทรายแม่น้ำตามลำดับ ซึ่งมีขนาดความคละของมวลรวมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 โดยได้แสดงในรูปที่ 3.1(ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยทรายที่ใช้อ้มีค่าโมดูลัสความละเอียดประมาณ 2.74 และมีขนาดโตสุดของหินปูนที่ใช้อ้ 19 มิลลิเมตร $\frac{3}{4}$ นิ้ว และสัดส่วนผสมทั้งหมดมีค่าอัตราส่วนของวัสดุมวลรวมละเอียดต่อวัสดุมวลรวมทั้งหมด (Sand to Aggregate Ratio) อยู่ที่ประมาณ 0.43

3.1.3 สัดส่วนผสม

สัดส่วนผสมคอนกรีตออกแบบตามวิธี ACI โดยไม่ใช้สารผสมเพิ่ม โดยมีทั้งคอนกรีตที่ใช้อ้ปูนซีเมนต์ล้วนและปูนซีเมนต์ผสมปอซโซลาน ในที่นี้การแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเ้าลอย อยู่ที่ร้อยละ 15 25 และ 35 สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเ้ากลบอยู่ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 นอกจากนี้ยังมีสัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุประสาน สามชนิดอันได้แก่ปูนซีเมนต์ เ้าลอยและเ้ากลบร่วมกัน ในที่นี้สัดส่วนการแทนที่ของเ้ากลบอยู่ที่ร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับเ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่อยู่ที่ร้อยละ 15 และ 25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้อ้อยู่ที่ 0.40 0.50 และ 0.60 และมีค่าความยุบตัวอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 10 เซนติเมตร สัดส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 3.2

ในการออกแบบนั้นมีการควบคุมค่าความชื้นเหลว (Consistency) ของคอนกรีตด้วยการพิจารณาจากค่าการยุบตัว (Slump) ให้มีค่าประมาณ 7.5 ± 2.5 ซม. เนื่องจากเป็นค่าการยุบตัวที่ใช้อ้กันมากที่สุดในงานโครงสร้างทั่วไปอีกทั้งยังสะดวกในการหล่อก่อน-ตัวอย่างเนื่องจากไม่แข็งหรือเหลวจนเกินไป นอกจากนี้ยังมีการควบคุมปริมาณหินที่ใช้อ้ในแต่ละสัดส่วนผสมให้มีค่าคงที่ เนื่องจากต้องการให้ปริมาตรของส่วนละเอียด (Fine Part) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการศึกษานั้นมีค่าเท่ากันทุกสัดส่วนผสม โดยส่วนละเอียดในที่นี้หมายถึง ส่วนที่ประกอบด้วย วัสดุประสาน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่ม

3.1.4 การเตรียมก้อนตัวอย่าง

ทำการผสมคอนกรีตและหล่อในแบบรูปทรงระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร และมีความสูง 200 มิลลิเมตร แล้วทำการจี้คอนกรีตสดในแบบหล่อรูปทรงระบอกให้แน่นด้วยเครื่องสั่นคอนกรีต (Vibrator) หลังจากคอนกรีตแข็งตัวจึงแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในบ่อบ่ม แล้วจึงนำขึ้นจากบ่อบ่มเมื่ออายุครบตามที่ต้องการทดสอบ

3.2 การทดสอบ

3.2.1 การทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุครบ 91 วันจากทุกสัดส่วนผสมจะถูกนำมาทำการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งอ้างอิงตาม ASTM C1202 ซึ่งสามารถสรุปวิธีการทดสอบโดยย่อว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 60 โวลต์จะทำการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่อิมมิดด้วยน้ำรูปทรงทรงกระบอก ความหนา 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร โดยผ่านตะแกรงลวดซึ่งสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีอนุภาคของคลอไรด์สะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าระหว่างขั้วลบ (Cathode) กับ อนุภาคของคลอไรด์เนื่องจากมีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกัน ส่งผลให้อนุภาคของคลอไรด์พยายามเคลื่อนที่ไปยังหน้าตัดอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นขั้วบวก (Anode) ซึ่งถูกรอบด้วยตะแกรงลวดซึ่งสัมผัสกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกัน ทำให้อนุภาคของคลอไรด์บางส่วนสามารถเดินทางผ่านโพรงคอนกรีตจากทางด้านขั้วลบ มายังด้านขั้วบวกได้ โดยในการทดสอบนั้นจะบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆกันเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงลงบนกราฟ จากนั้นจึงทำการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาจะได้ปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งค่าปริมาณประจุไฟฟ้านี้ จะใช้เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้น หรือเรียกอีกอย่างว่า ค่า Coulomb Charge Passed โดยสัดส่วนผสมที่มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี คือมีค่า ปริมาณประจุไฟฟ้า หรือ ค่าคูลอมบ์ (Coulomb Charge Passed) ที่ต่ำ ปริมาณไม่เกิน 2,000 คูลอมบ์ จะถูกนำไปทดสอบด้วยวิธีประยุกต์ต่อไป

ก้อนตัวอย่างที่เตรียมจะทำการทดสอบด้วยวิธีนี้จะถูกนำมาตัดด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร (Diamond Saw) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและความหนา 50 มิลลิเมตร จำนวน 2 ก้อนต่อหนึ่งการทดสอบ ดังรูปที่ 3.3 และทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 60 โวลต์ และต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บค่ากระแสไฟฟ้าทุก ๆ 1 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตในทุก ๆ สัดส่วนผสมแสดงในตารางที่ 3.3 และผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงด้วยแผนภูมิแท่งในรูปที่ 3.5

3.2.2 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกของคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมของคอนกรีตได้ถูกนำขึ้นจากบ่อบ่มเพื่อนำมาทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 14 28 และ 91 วันตามลำดับ เพื่อจะดูผลของปฏิกิริยาปอลิไซโคลนิกของวัสดุประสานในสัดส่วนผสมต่างๆที่มีผลต่อกำลังอัดในระยะต้นและระยะปลายที่

แตกต่างกัน และเชื่อมโยงผลของกำลังอัดเข้ากับการวิเคราะห์ผลของปริมาณของโพรงที่ได้จากวิธีประยุกต์ และวิธีเอ็มไอพี ว่าสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร

ก่อนคอนกรีตที่ครบตามอายุจะถูกนำมาทดสอบกำลังอัด โดยก่อนจะครบกำหนดในการทดสอบจะต้องนำก้อนตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่มล่วงหน้าเพื่อให้ตัวอย่างแห้ง แล้วจึงนำมาทำการปรับให้หน้าตัดผิวสัมผัสหัวท้ายให้เรียบด้วยการเคลือบหัว (Capping) ด้วยผงกำมะถันต้ม มีความหนาประมาณ 1.5 ถึง 3 มิลลิเมตร เพื่อช่วยให้การถ่ายแรงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตามมาตรฐาน ASTM C 617 หลังจากการเคลือบหัวเสร็จควรทิ้งไว้อย่างต่ำประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวเคลือบกำมะถันแห้งเสียก่อน เนื่องจากหากนำไปทดสอบทันทีที่กำมะถันเคลือบหัวยังไม่แห้งดีพบว่าค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง หลังจากนั้นจึงนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดต่อไป โดยผลการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 3.4

จากตารางข้างต้นกำลังอัดคอนกรีตที่ 14 28 และ 91 วัน สามารถนำมาจำแนกตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 0.50 และ 0.60 ได้ตามลำดับ ดังแสดงได้ในรูปแผนภูมิแท่งในรูปที่ 3.6 – 3.8

3.2.3 การทดสอบด้วยวิธีประยุกต์

รายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์นั้นมีความแตกต่างกับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 อยู่หลายประการด้วยกัน ถึงแม้ว่าทั้งสองวิธีจะใช้หลักการทางไฟฟ้าเหมือนกันก็ตาม คือการผ่านไฟฟ้ากระแสตรง (DC.) เข้าสู่เนื้อของก้อนคอนกรีตที่อิมมัวด้วยน้ำ และทำให้อิออนคลอไรด์ (Cl⁻) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ต่อกับขั้วลบ (Up Stream or Cathode Solution) นั้นพยายามเคลื่อนที่ไปในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ต่อกับขั้วบวก (Down Stream or Anode Solution) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) ทั้งนี้พบว่าหากดำเนินการทดสอบวิธีประยุกต์โดยใช้รายละเอียดต่างๆเช่นเดียวกันกับที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C1202 จะพบอุปสรรคและปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้ ความหนาของก้อนตัวอย่างที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นหนาถึง 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการทดสอบอาจกินเวลานานมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการทดสอบคอนกรีตที่มีคุณสมบัติต้านทานการซึมผ่านสูง ดังนั้นความหนาที่เลือกใช้วิธีประยุกต์ จึงเลือกใช้ความหนาเพียง 35 มิลลิเมตรเท่านั้น หรือ การใช้ความต่างศักย์สูงถึง 60 โวลต์จะทำให้เกิดความร้อนซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้สูงขึ้น^[8] ทำให้มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มีการบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ มีค่าสูงเกินความเป็นจริงและยากต่อการสังเกตระยะเวลาที่ก้อนตัวอย่างเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) นอกจากนี้ความร้อนภายในสารละลายเองยังก่อให้เกิดก๊าซคลอรีนซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายที่บริเวณขั้วแอโนดอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยเหตุนี้ความต่างศักย์ที่ใช้ในวิธีประยุกต์จึงมีค่าเพียง 24 โวลต์เท่านั้น ซึ่ง Chung-Chia Yang

^[11] พบว่าเป็นความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบ นอกจากนี้ปริมาณสารละลายในภาชนะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นมีปริมาณจำกัดเพียงด้านละประมาณ 220 ลบ.ซม. เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอในการทดลองเนื่องจากจะต้องมีการสูมเก็บตัวอย่างตลอดช่วงเวลาการทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบโดยวิธีประยุกต์จึงมีการขยายปริมาตรของภาชนะที่บรรจุสารละลายทั้งสองด้านให้มากขึ้นเป็นด้านละ 700 ลบ.ซม. ดังแสดงด้วยเส้นปะในรูปที่ 3.10 เพื่อเพียงพอต่อการนำไปทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ ณ เวลาต่างๆ และอีกเรื่องหนึ่งคือระยะเวลาที่ใช้ทดสอบซึ่งจะต้องให้ครอบคลุมถึงระยะเวลาที่คอนกรีตเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นใช้ระยะเวลาสั้นๆเพียง 6 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์จึงเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบเป็น 60 ถึง 90 ชั่วโมง หรือจนกว่าก่อนคอนกรีตตัวอย่างจะเข้าสู่สภาวะคงที่(Ts)

ขั้นตอนในการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์ นั้นมีการเตรียมการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่อิมตัวด้วยน้ำและติดตั้งเครื่องมือทดสอบ ขั้นตอนการเก็บข้อมูลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆกันตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ และ ขั้นตอนการวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคลอไรด์ระหว่างสารละลายภายในขั้วแคโทดและแอโนด การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบด้วยวิธีประยุกต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

ในขั้นตอนการเตรียมก่อนตัวอย่างที่อิมตัวด้วยน้ำ จะดำเนินการโดยนำตัวอย่างที่อายุครบ 91 วัน ขึ้นมาจากบ่อบ่มและตัดให้ได้ขนาดด้วยเลื่อยหัวเพชร (Diamond Saw) ก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบผิวรอบๆหน้าตัดทรงกระบอกด้วยอีพอกซีซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน (Insulation) เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นบริเวณขอบรอบนอกของหน้าตัดคอนกรีตซึ่งอาจจะทำให้ประจุไฟฟ้าบางส่วนเคลื่อนที่โดยไม่ผ่านหน้าตัดก่อนตัวอย่างซึ่งผลก็คือจะทำให้ค่ากระแสที่บันทึกได้มีความคลาดเคลื่อน หลังจากนั้นเมื่ออีพอกซีแห้งก่อนตัวอย่างที่เคลือบอีพอกซีแล้วจะถูกลงไปบ่มบ่อบ่มอีกครั้งเพื่อให้อิมตัวด้วยน้ำ ส่วนในขั้นตอนต่อไปเป็นการติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยก่อนตัวอย่างที่อิมตัวดังกล่าวจะถูกนำมาประกบด้วยเซลล์บล็อกซึ่งทำด้วยอะคริลิกทั้งสองด้านของหน้าตัดโดยเซลล์บล็อกด้านซ้ายบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.3 N ส่วนเซลล์บล็อกด้านขวาบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ในขั้นตอนสุดท้ายคือการเก็บข้อมูลของปริมาณกระแสไฟฟ้า พบว่าขณะเริ่มทดสอบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านก่อนตัวอย่างจะถูกส่งเข้าไปเก็บค่าในโปรแกรมจัดเก็บข้อมูล(Data Logger) ภายในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 1 นาที ดังนั้นปริมาณประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่าน ณ เวลาต่างๆจึงสามารถถูกคำนวณออกมาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา โดยในระหว่าง

การเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าจะดำเนินการสุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายไปพร้อมๆกันโดยเว้นระยะห่างทุกๆ 5 ถึง 7 ชั่วโมง

ในขั้นตอนการวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคลอไรด์จะดำเนินการทันทีหลังจากทดสอบเสร็จ สารละลายที่สุ่มเก็บทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบหาความเข้มข้นของคลอไรด์อออนด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า “อโตไตเตรเตอร์ (Auto Titrator)” ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งใช้หลักการของวิธีการไตเตรท เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.10 M ซึ่งเครื่องมือวัดชนิดนี้มีความละเอียดในการวัดความเข้มข้นของคลอไรด์อออนสูงถึง ± 0.01 พีพีเอ็ม

ผลการทดสอบในการหาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เวลาต่าง ๆ โดยวิธีประยุกต์นี้ซึ่งได้ทำการทดสอบกับสัดส่วนผสมทั้งหมด 9 สัดส่วนผสม (D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33) เพื่อการศึกษาผลจากปฏิกิริยาปอซโซโลนิกของวัสดุประสานแต่ละชนิดที่มีต่อโพรงคอนกรีตจึงต้องเลือกทดสอบที่อายุ 91 วันเพราะภายหลังจากนี้ปริมาณโพรงจะถือว่ามีเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ จากการทดสอบด้วยเครื่องอโตไตเตรเตอร์ ทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวแอโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆกันของสัดส่วนผสมทั้ง 9 สัดส่วนผสม(D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 ตามลำดับ) ดังแสดงในตารางที่ 3.6 – 3.14 และเมื่อนำค่าจากตารางมาสร้างกราฟจะได้ความสัมพันธ์ ดังแสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.1-ข.9 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีการเก็บบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดคอนกรีตไว้ทุกๆ 1 นาที ตั้งแต่เริ่มทดสอบในช่วงที่คอนกรีตยังอยู่ในสภาวะไม่คงที่ (Non-Steady State) จนกระทั่งก่อนตัวอย่างคอนกรีตเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) หลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่าปริมาณประจุไฟฟ้า (Q_s) ซึ่งหมายถึงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านก่อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเกิดสภาวะคงที่ภายในก่อนตัวอย่างจากพื้นที่ได้กราฟกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา ซึ่งได้แสดงค่าของประจุไฟฟ้า (Q_s) ไว้ทั้งหมด 9 สัดส่วนผสม ดังแสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.10-ข.18 ตามลำดับ ในแต่ละรูปพบว่าจุดที่เริ่มเกิดสภาวะคงที่เส้นกราฟจะมีการหักมุม หรือ อาจมีการเปลี่ยนแปลงความชันจากช่วงแรกซึ่งอยู่ในสภาวะไม่คงที่ซึ่งกราฟจะมีลักษณะโค้งเล็กน้อย แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วพบว่าเส้นกราฟจะการเปลี่ยนแปลงคือจะมีความชันคงที่ และเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าให้ยาวนานขึ้นจากระยะเวลา T_s

3.2.4 การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี (Mercury Intrusion Porosimetry)

การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี ได้ดำเนินการเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทดสอบด้วยวิธีประยุกต์เท่านั้น อันได้แก่ สัดส่วนผสมทั้ง 9 สัดส่วนผสม ได้แก่ D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29

และ D.33 เพื่อจะพิจารณาผลการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีหรือไม่อย่างไร

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำชิ้นตัวอย่างที่อายุครบ 91 วันขึ้นจากบ่อต้มแล้วตัดด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร (Diamond Saw) ให้มีขนาดเล็กประมาณ $1.00 \times 1.00 \times 1.00$ ลบ.ซม. หลังจากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสประมาณ 24 ชั่วโมงจนมีน้ำหนักคงที่ซึ่งถือได้ว่าสามารถไล่น้ำในเพสต์ออกจนหมด ในการทดสอบจะต้องใช้ค่ามุมสัมผัส (Contact angles) ของผิวสัมผัสภายในโพรงคอนกรีตกับปรอท จากการศึกษาพบว่าจะมีค่าคงที่ประมาณ 117 องศาสำหรับวัสดุประเภทซีเมนต์เพสต์

ผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีมีรายงานเป็นค่าของปริมาณโพรงรวมของคอนกรีต (Total Porosity) และค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงคอนกรีต (Pore Diameter) ซึ่งเฉลี่ยโดยใช้ค่าฐานนิยม (Mode) ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และนอกจากนี้การทดสอบเอ็มไอพียังมีผลการทดสอบที่แสดงการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตสะสมซึ่งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข. รูปที่ ข.19- ข.27

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางด้านเคมีของวัสดุประสาน

รายการที่ทดสอบ	ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย
คุณสมบัติทางกายภาพ			
• ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.23	2.51
• พื้นที่ผิวจำเพาะ(ตร.ซม. / กรัม)	3,633	11,450	2,363
องค์ประกอบทางเคมี(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
• SiO ₂	20.19	87.74	33.03
• Al ₂ O ₃	6.38	0.79	18.56
• Fe ₂ O ₃	3.34	3.03	17.74
• CaO	62.67	1.84	20.17
• TiO ₂	0.32	0.09	0.45
• MgO	1.77	0.40	2.46
• Na ₂ O	0.14	0.34	1.56
• K ₂ O	0.33	2.66	2.76
• P ₂ O ₅	0.37	0.00	0.23
• SO ₃	2.76	0.84	2.69
• LOI	1.73	2.27	0.34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่มา ข้อมูลตารางที่ 3.1 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) บางกรวย

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)

สัดส่วน	W/B	ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	น้ำ	ทราย	หิน
D.1	0.4	500	0	0	200	753	992
D.2	0.4	475	25(5%)	0	200	743	992
D.3	0.4	450	50(10%)	0	200	733	992
D.4	0.4	425	75(15%)	0	200	723	992
D.5	0.4	425	0	75(15%)	200	724	992
D.6	0.4	375	0	125(25%)	200	704	992
D.7	0.4	325	0	175(35%)	200	684	992
D.8	0.4	400	25(5%)	75(15%)	200	714	992
D.9	0.4	375	50(10%)	75(15%)	200	703	992
D.10	0.4	350	25(5%)	125(25%)	200	694	992
D.11	0.4	325	50(10%)	125(25%)	200	684	992
D.12	0.5	400	0	0	200	838	992
D.13	0.5	380	20 (5%)	0	200	830	992
D.14	0.5	360	40(10%)	0	200	821	992
D.15	0.5	340	60(15%)	0	200	813	992
D.16	0.5	340	0	60(15%)	200	814	992
D.17	0.5	300	0	100(25%)	200	798	992
D.18	0.5	260	0	140(35%)	200	783	992
D.19	0.5	320	20 (5%)	60(15%)	200	806	992
D.20	0.5	300	40(10%)	60(15%)	200	798	992
D.21	0.5	280	20 (5%)	100(25%)	200	790	992
D.22	0.5	260	40(10%)	100(25%)	200	782	992
D.23	0.6	333	0	0	200	894	992
D.24	0.6	317	17(5%)	0	200	887	992
D.25	0.6	300	33(10%)	0	200	880	992
D.26	0.6	283	50(15%)	0	200	874	992
D.27	0.6	283	0	50(15%)	200	874	992
D.28	0.6	250	0	83(25%)	200	861	992
D.29	0.6	217	0	117(35%)	200	848	992
D.30	0.6	267	17(5%)	50(15%)	200	868	992
D.31	0.6	250	33(10%)	50(15%)	200	861	992
D.32	0.6	233	17(5%)	83(25%)	200	854	992
D.33	0.6	217	33(10%)	83(25%)	200	848	992

ตารางที่ 3.3 ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ในแต่ละสัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต

สัดส่วนผสม (% OPC+%RHA+%FA)	W/B	ก้อนตัวอย่าง คอนกรีตที่ 1	ก้อนตัวอย่าง คอนกรีตที่ 2	ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ย (คูลอมบ์)
D.1 (100%OPC)	0.4	5,193	4,873	5,015
D.2 (95%OPC+5%RHA)	0.4	4,532	5,048	4,790
D.3 (90%OPC+10%RHA)	0.4	4,469	4,155	4,312
D.4 (85%OPC+15%RHA)	0.4	1,135	1,325	1230*
D.5 (85%OPC+15%FA)	0.4	2,146	2,718	2,432
D.6 (75%OPC+25%FA)	0.4	1,084	1,326	1,205
D.7 (65%OPC+35%FA)	0.4	1,031	8,53	942*
D.8 (80%OPC+5%RHA+15%FA)	0.4	1996	2040	2018
D.9 (75%OPC+10%RHA+15%FA)	0.4	1217	1331	1274
D.10 (70%OPC+5%RHA+25%FA)	0.4	1083	989	1036
D.11(65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.4	697	715	706 *
D.12 (100% OPC)	0.5	5041	6015	5528
D.13 (95% OPC+5%RHA)	0.5	4983	5257	5120
D.14 (90% OPC+10%RHA)	0.5	4133	4907	4520
D.15 (85% OPC+15%RHA)	0.5	1366	1488	1427*
D.16 (85%OPC+15%FA)	0.5	2693	2871	2693
D.17 (75%OPC+25%FA)	0.5	1501	2023	1762
D.18 (65%OPC+35%FA)	0.5	946	1362	1154*
D.19 (80%OPC+5%RHA+15%FA)	0.5	1987	2387	2187
D.20(75%OPC+10%RHA+15%FA)	0.5	1423	1803	1613
D.21 (70%OPC+5%RHA+25%FA)	0.5	1107	1143	1125
D.22(65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.5	711	987	849*
D.23 (100% OPC)	0.6	5846	7362	6604
D.24 (95% OPC+5%RHA)	0.6	5888	6172	6030
D.25(90% OPC+10%RHA)	0.6	5443	5957	5700
D.26(85% OPC+15%RHA)	0.6	2494	2622	2558*
D.27(85%OPC+15%FA)	0.6	3430	3738	3430
D.28(75%OPC+25%FA)	0.6	2954	2506	2730
D.29(65%OPC+35%FA)	0.6	1777	2191	1984*
D.30(80%OPC+5%RHA+15%FA)	0.6	2011	2835	2423
D.31(75%OPC+10%RHA+15%FA)	0.6	1694	1832	1763
D.32(70%OPC+5%RHA+25%FA)	0.6	987	1373	1180
D.33(65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.6	1164	966	1065*

หมายเหตุ * หมายถึง สัดส่วนผสมที่นำไปทดสอบด้วยวิธีประยุกต์ และวิธีเอ็มไอพี ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 14 28 และ 91 วัน

สัดส่วนผสม	W/B	สัดส่วนการแทนที่(ร้อยละ)		กำลังอัดคอนกรีต(กก.ต่อตร.ซม.)		
		เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	14 วัน	28 วัน	91 วัน
D.1	0.4	0	0	388	421	458
D.2	0.4	5	0	380	409	470
D.3	0.4	10	0	392	413	496
D.4	0.4	15	0	420	429	533*
D.5	0.4	0	15	283	354	414
D.6	0.4	0	25	340	395	467
D.7	0.4	0	35	351	444	562*
D.8	0.4	5	15	404	434	516
D.9	0.4	10	15	421	441	521
D.10	0.4	5	25	414	444	563
D.11	0.4	10	25	425	483	595*
D.12	0.5	0	0	327	358	387
D.13	0.5	5	0	322	348	400
D.14	0.5	10	0	332	348	421
D.15	0.5	15	0	352	360	447*
D.16	0.5	0	15	278	300	351
D.17	0.5	0	25	301	334	412
D.18	0.5	0	35	314	364	472*
D.19	0.5	5	15	344	369	465
D.20	0.5	10	15	356	373	478
D.21	0.5	5	25	352	379	496
D.22	0.5	10	25	361	379	515*
D.23	0.6	0	0	270	301	328
D.24	0.6	5	0	271	293	336
D.25	0.6	10	0	280	294	352
D.26	0.6	15	0	298	302	379*
D.27	0.6	0	15	232	253	295
D.28	0.6	0	25	249	278	341
D.29	0.6	0	35	257	305	398*
D.30	0.6	5	15	279	306	383
D.31	0.6	10	15	295	313	407
D.32	0.6	5	25	287	317	412
D.33	0.6	10	25	315	322	445*

หมายเหตุ * หมายถึง สัดส่วนผสมที่นำไปทดสอบต่อด้วยวิธีประยุกต์ และวิธีเอ็มไอพี ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 ค่าผลทดสอบด้วยวิธี เอ็ม ไอ พี เพื่อที่จะหาขนาดโพรงคอนกรีต (Pore Diameter) และ ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Porosity) ตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม

สัดส่วนผสมคอนกรีต	W/B	ขนาดโพรงคอนกรีต (ไมครอน) แบบฐานนิยม(Mode)	โพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Porosity) (%)
D.4 (85%OPC+15%RHA)	0.40	0.07	13.28
D.7 (65%OPC+35%FA)	0.40	0.06	12.20
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.40	0.06	8.30
D.15 (85%OPC+15%RHA)	0.50	0.06	13.88
D.18 (65%OPC+35%FA)	0.50	0.06	14.04
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.50	0.04	10.52
D.26 (85%OPC+15%RHA)	0.60	0.06	21.98
D.29 (65%OPC+35%FA)	0.60	0.06	18.41
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.60	0.07	15.39

ตารางที่ 3.6 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวแอโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.4

สัดส่วนผสม D.4 (85% OPC + 15% RHA) , W/B = 0.40		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณผิวแอโนด (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณผิวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	2	502
10	6	903
16	17	1368
24	38	1540
30	59	1873
37	90	1979
45	128	2018
56	182	2103
63	245	2113

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.7

D.7 (65%OPC +35% FA) , W/B = 0.40		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	304
10	0	541
16	14	803
20	27	954
25	43	1000
30	51	1254
34	84	1380
38	108	1355
43	116	1440
50	153	1484
55	182	1450
60	215	1502

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.8 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.11

D.11 (65%OPC+10% RHA+5% FA) , W/B = 0.40		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	140
10	0	303
15	12	428
20	27	557
25	32	598
30	45	703
35	68	733
40	71	797
45	111	868
50	132	888
55	161	903
60	163	952

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.9 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.15

สัดส่วนผสม D.15 (85% OPC + 15% RHA) , W/B = 0.50		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	546
10	34	1210
15	60	1516
20	76	1964
25	111	2006
29.7	162	2134
35	246	2188
40	318	2234

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.10 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.18

สัดส่วนผสม D.18 (65%OPC +35% FA) , W/B = 0.50		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	383
10	0	800
15	33	1025
20	67	1110
25	90	1320
30	111	1623
35	174	1626
40	210	1712
45	289	1753
50	330	1803
55	378	1850
60	431	1934

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.11 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.22

สัดส่วนผสม D.22 (65%OPC+10% RHA+5% FA) , W/B = 0.50		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	301
10	0	520
15	30	772
20	56	890
25	89	1012
30	129	1185
35	161	1206
40	236	1326
45	306	1378
50	345	1455
55	413	1503
60	481	1562
65	532	1654

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.12 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.26

สัดส่วนผสม D.26 (85% OPC + 15% RHA) , W/B = 0.60		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	33	725
10	83	2055
16	226	2668
22	350	3033
28	602	3423
35	920	3644
40	908	3945
47	1270	4097
54	1503	4445
60	1711	4701
65	1885	4804

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.13 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.29

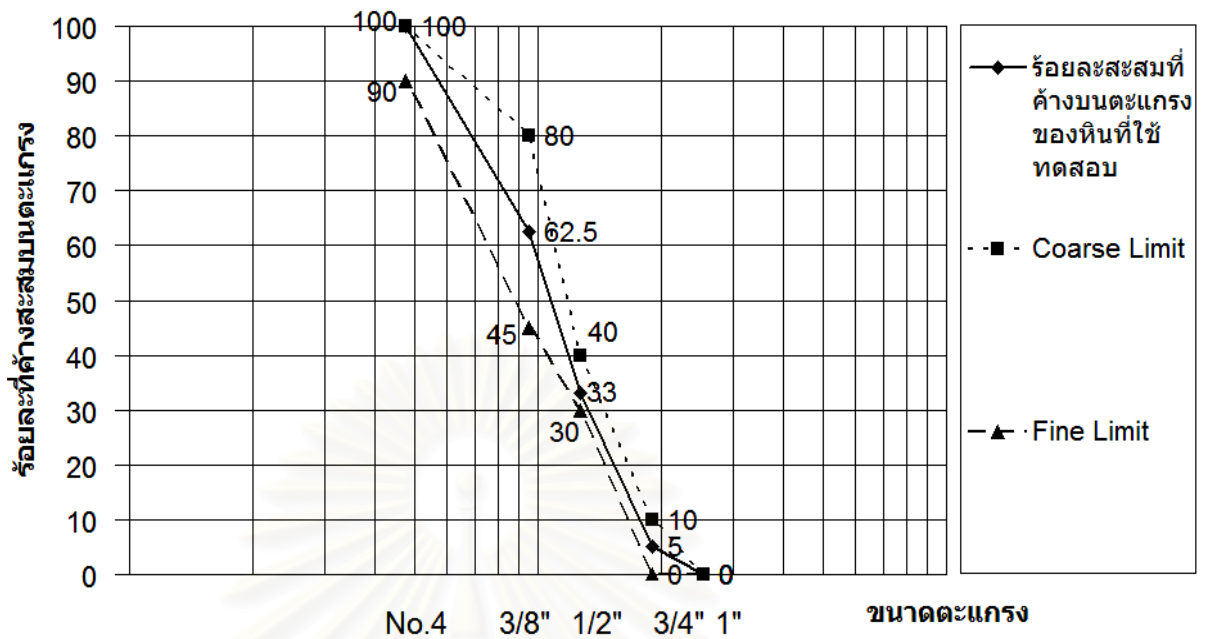
สัดส่วนผสม D.29 (65%OPC +35% FA) , W/B = 0.60		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	776
10	51	1489
15	97	1933
20	216	2303
25	324	2729
30	405	2904
35	603	3135
40	753	3408
45	821	3304
50	1048	3408
55	1201	3708

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

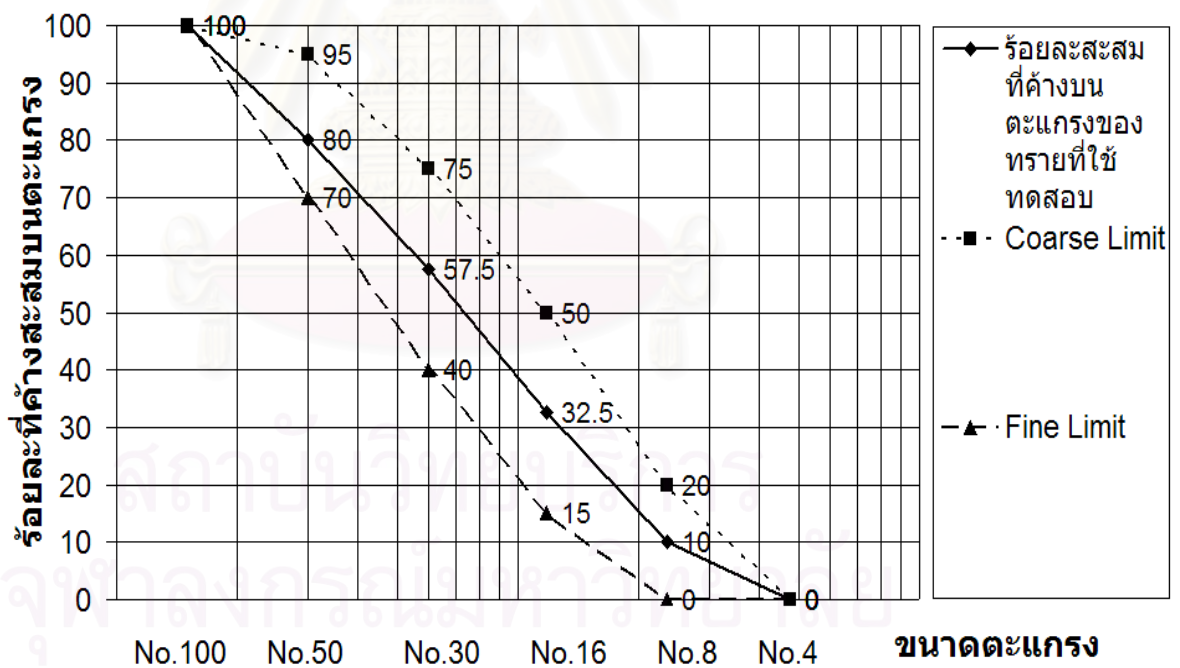
ตารางที่ 3.14 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.33

สัดส่วนผสม D.33 (65%OPC+10% RHA+5% FA) , W/B = 0.60		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (พีพีเอ็ม)
0	0	0
5	0	381
10	64	790
15	84	1172
20	188	1502
25	256	1704
30	430	1900
35	532	1997
40	669	2101
45	812	2378
50	926	2507

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1ก แผนภูมิคละของวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33

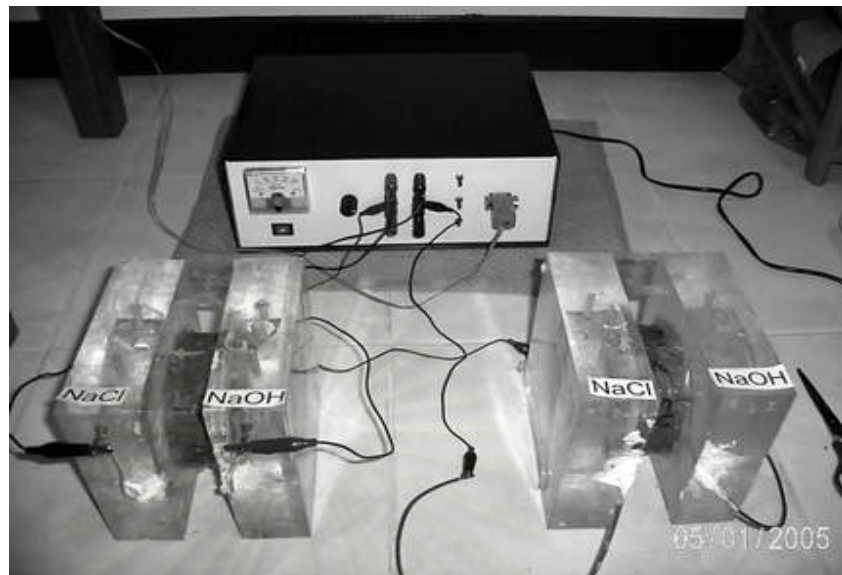
รูปที่ 3.1ข แผนภูมิคละของวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33



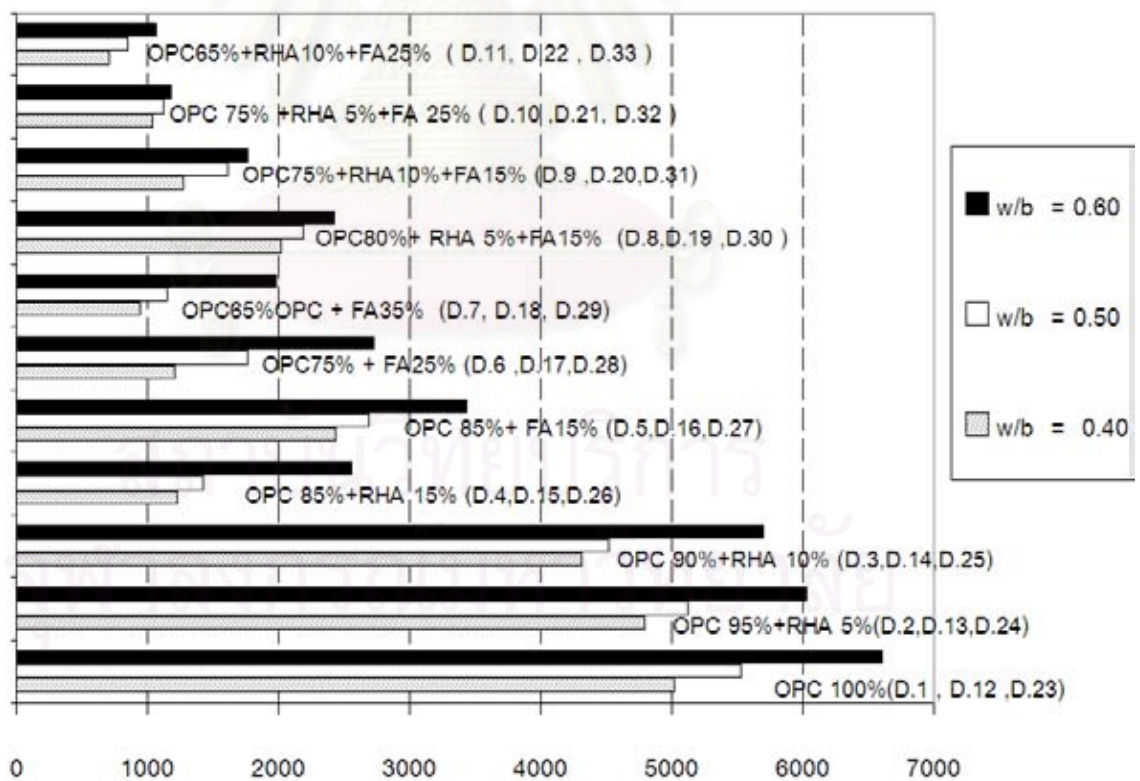
รูปที่ 3.2 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร (Diamond Saw)



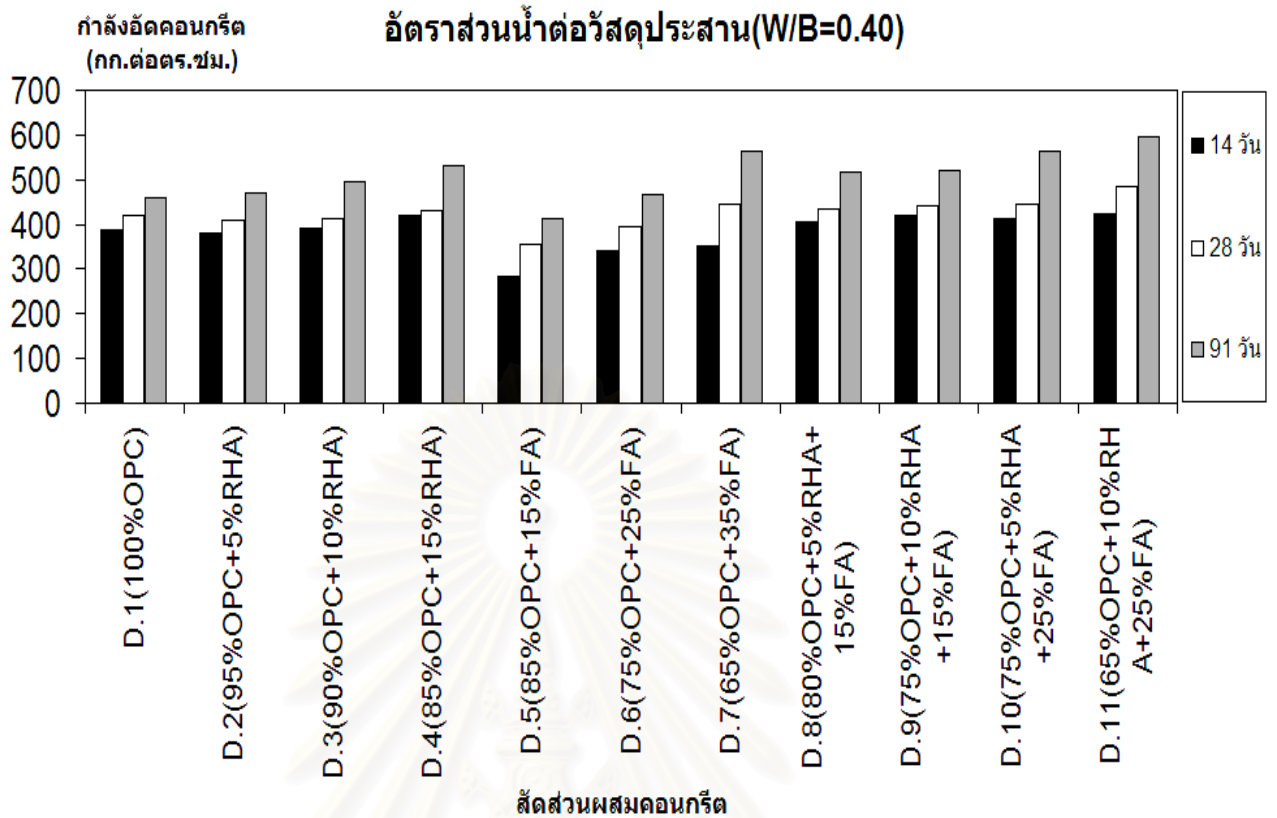
รูปที่ 3.3 ก้อนตัวอย่างที่ถูกเตรียมสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202



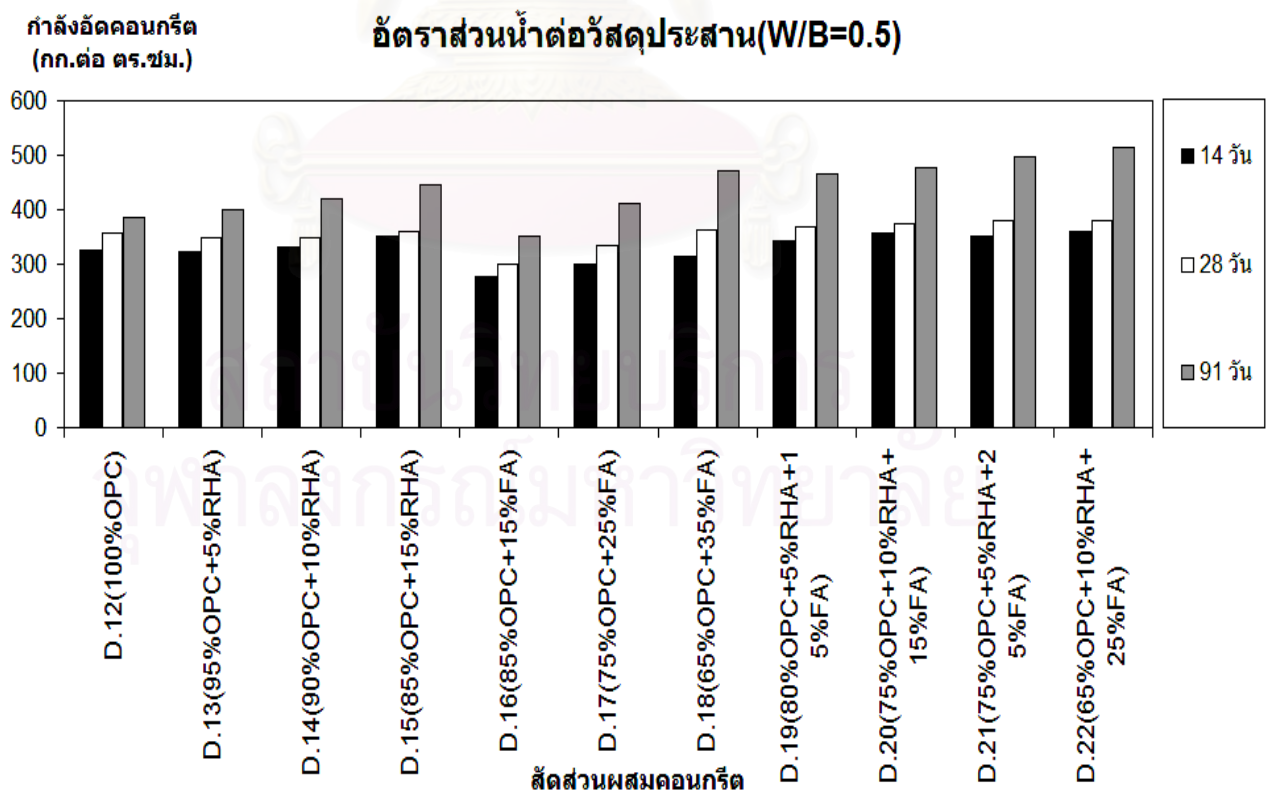
รูปที่ 3.4 การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับตัวอย่างในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202



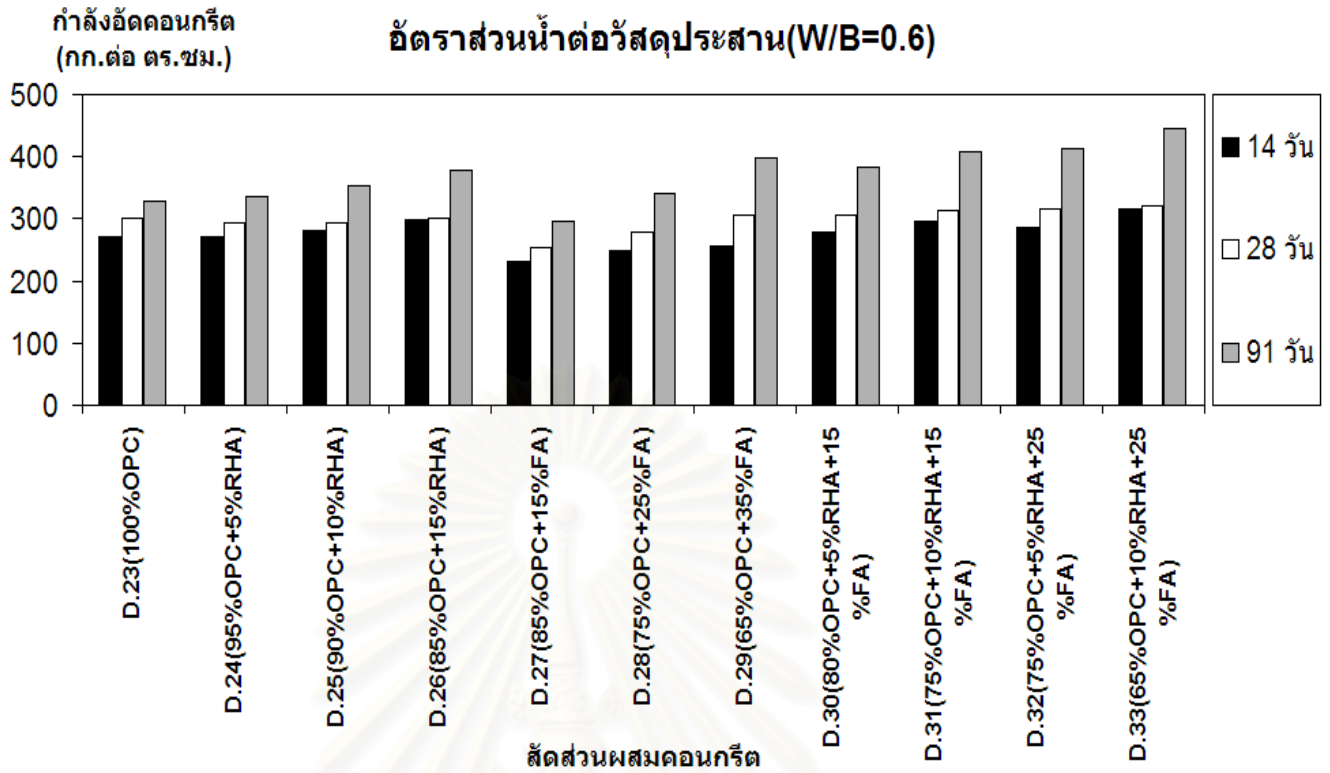
รูปที่ 3.5 ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยซึ่งเป็นการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Coulomb Charge Passed)(คูลอมบ์)



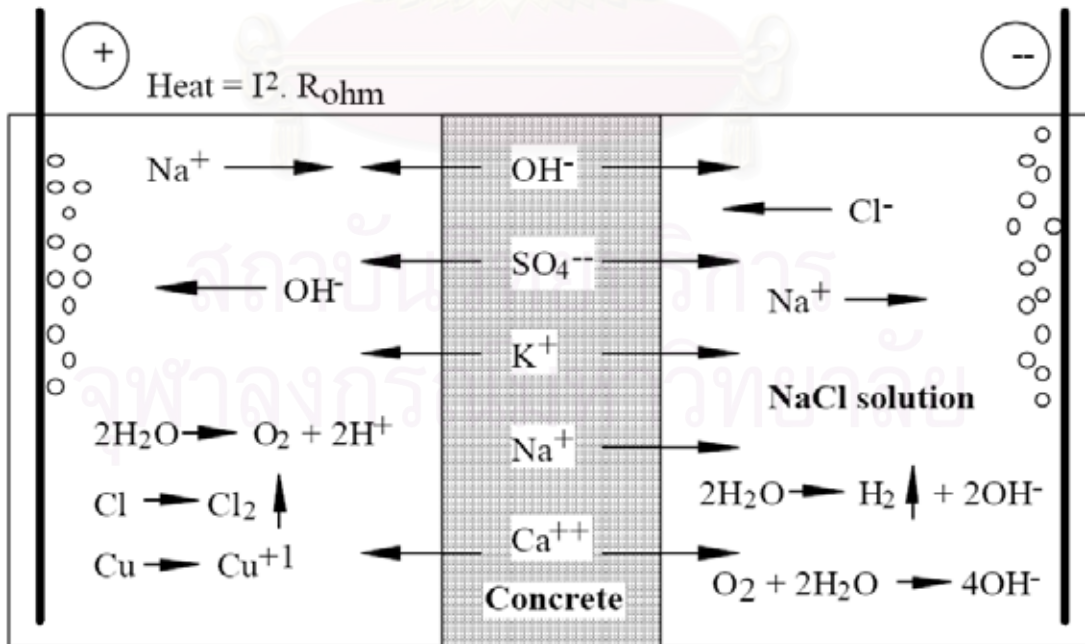
รูปที่ 3.6 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ 14 28 และ 91 วัน



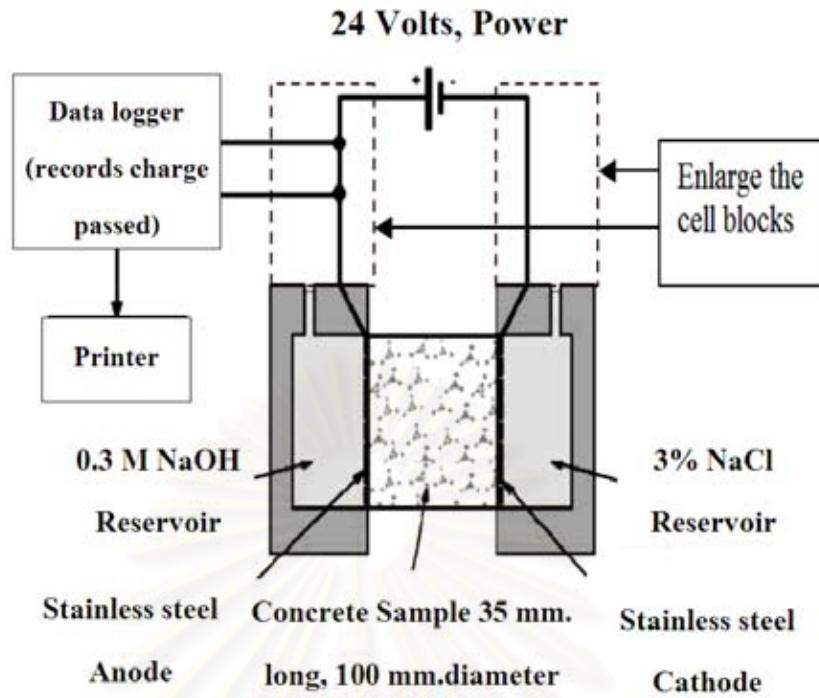
รูปที่ 3.7 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ 14 28 และ 91 วัน



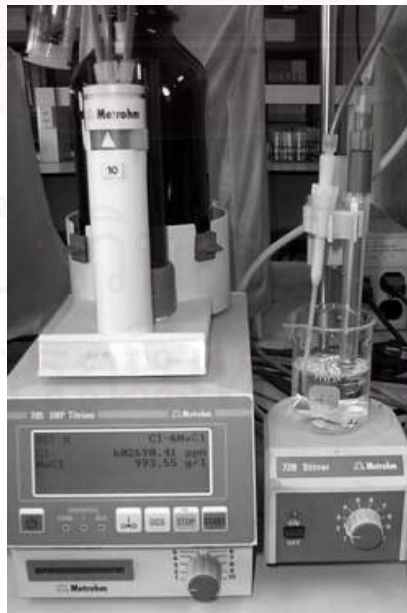
รูปที่ 3.8 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ 14 28 และ 91วัน



รูปที่ 3.9 การเกิดก๊าซคลอรีน (Cl₂) ที่ขั้วบวก



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบด้วยวิธีประยุกต์เพื่อหาค่าปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความเข้มข้นของคลอไรด์

บทที่ 4

วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบโดยวิธีประยุกต์นั้นเป็นวิธีใหม่ ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีทดสอบที่ได้รับการยอมรับมาก่อนและสามารถตอบโจทย์ที่ต้องการทราบเกี่ยวกับคุณลักษณะต่างๆของคอนกรีตได้ เช่น การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ขนาดโพรงคอนกรีต และปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม เป็นต้น ด้วยดังกล่าววิธีเอ็มไอพีซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับวิธีหนึ่งจึงเป็นวิธีที่นำมาใช้ทดสอบเพื่ออ้างอิง และเปรียบเทียบผลการทดสอบควบคู่ไปด้ววิธีประยุกต์ นอกจากวิธีเอ็มไอพีแล้วยังมีผลการทดสอบด้วยวิธีอื่นๆประกอบอีกด้วย อันได้แก่ มาตรฐาน ASTM C1202 และกำลังอัดคอนกรีต ตามลำดับ

4.1 การวิเคราะห์หาค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตภายในเนื้อคอนกรีต

จากการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีพบว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม ได้แก่ D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 ตามลำดับ พบว่าจะได้ ค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของปริมาตรของปรอทที่ถูกอัดเข้าสู่ก้อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ (Total Intruded Volume) ต่อ ปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (Sample Bulk Volume) ซึ่งสามารถแสดงเป็นร้อยละได้ ดังรูปที่ 4.1 และยังสามารถนำมาจำแนกต่อไปได้เป็นโพรงคอนกรีตประเภทต่างๆ กันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเรียงจากขนาดใหญ่ไปหาเล็กตามลำดับดังต่อไปนี้ คือค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตขนาดใหญ่หรือโพรงอากาศ (Air Void or Entrapped Air) ซึ่งหมายถึง โพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 10 ไมครอนขึ้นไป โพรงแคพิลลารี (Capillary Pore) ซึ่งหมายถึงโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 10 ไมครอน และสุดท้ายคือโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเล็กที่สุดหรือโพรงเจล (Gel Pore) ซึ่งหมายถึงโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.01 ไมครอนลงไปแต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีพบว่าในเรื่องของความดันปรอทที่ใช้อัดคอนกรีตนั้นค่าความดันที่ใช้ต้องมีค่าไม่เกิน 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วโดยประมาณ ทำให้โพรงเจลที่เล็กที่สุดที่สามารถวัดได้นั้นได้มีขนาดประมาณ 0.007 ไมครอนเท่านั้น ดังนั้น โพรงเจลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีเอ็มไอพีในที่นี้จึงหมายถึงโพรงที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.007 ไมครอนถึง 0.01 ไมครอน โดยหลักการในการคำนวณหาค่าปริมาตรโพรงชนิดต่างๆนั้นจะสามารถพิจารณาจากค่าปริมาตรของปรอทส่วนที่ถูกอัดเข้าสู่โพรงด้วยความดันที่ใช้อัดปรอทที่มีค่าต่างๆกัน ความ

ตันที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะถูกใช้ในการแปลความหมายขนาดของโพรงคอนกรีตซึ่งจะมีขนาดเล็กกลง ๆ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ คือ ในช่วงเริ่มต้นความตันที่ใช้จะมีค่าเริ่มต้นที่ศูนย์ถึงประมาณ 1.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ขนาดของโพรงคอนกรีตที่วัดได้ในช่วงนี้จึงหมายถึงโพรงคอนกรีตที่เป็นโพรงอากาศซึ่งมีขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาดประมาณ 140 ถึง 160 ไมครอน จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความตันจนถึงค่าประมาณ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าค่าความตันนี้จะสามารถตรวจพบโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมครอนได้ และหลังจากเพิ่มความตันต่อไปจนถึงค่าประมาณ 21,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะสามารถตรวจพบโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 ไมครอนได้ ด้วยเหตุนี้เองการทราบปริมาตรของพรอทส่วนที่ถูกแทนที่เข้าสู่โพรงคอนกรีตด้วยความตันในช่วงนี้ คือตั้งแต่ 20 ถึง 21,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงสามารถทำนายค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตประเภทแคฟพิลลารี ที่มีขนาด 10 ไมครอนถึง 0.01 ไมครอนได้ และเมื่อเพิ่มความตันต่อไปอีกจะพบว่าโพรงคอนกรีตที่ตรวจได้จึงเป็นโพรงเจลซึ่งต้องใช้ความตันพรอทมากกว่า 21,000 ถึง 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งค่าขนาดของโพรงเจลที่ได้เหล่านี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ไมครอน แต่ไม่เล็กไปกว่า 0.007 ไมครอน ด้วยเหตุนี้การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีจึงยังคงไม่สามารถตรวจวัดโพรงเจลบางส่วนได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีนั้นพบว่าปริมาตรของโพรงเจลในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.007 ไมครอน นั้นมีปริมาณน้อยมากและอีกทั้งยังไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติการซึมผ่านของคอนกรีตได้มากเท่ากับโพรงชนิดแคฟพิลลารี ดังนั้นจึงไม่นำโพรงเจลในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.007 ไมครอนมาประกอบการพิจารณาได้ ผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีกับทั้ง 9 สัดส่วนผสมพบว่าจะได้ค่าปริมาตรของโพรงอากาศ โพรงแคฟพิลลารี โพรงเจล และโพรงคอนกรีตรวม ตามลำดับ ดัง-แสดงในตารางที่ 4.1

หากนำผลของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ได้ในแต่ละประเภทต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับบนกราฟเดียวกันจะได้ความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาตรของโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity) ด้วยวิธีเอ็มไอพีนั้น ทำให้สามารถแบ่งแยกได้ 2 ส่วนด้วยกัน ดังนี้คือ

ส่วนแรกได้แก่ ส่วนของปริมาตรโพรงที่ไม่มีความสัมพันธ์เทียบกับสัดส่วนผสมคอนกรีตแต่อย่างใด ซึ่งได้แก่ โพรงอากาศหรือโพรงอากาศ (Air Void) โดยหากพิจารณาปริมาตรโพรงอากาศที่วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าสัดส่วนอยู่ระหว่างร้อยละ 0.14 ถึง 1.66 ของโพรงคอนกรีตรวม และจากรูปที่ 4.2 พบว่าโพรงอากาศนั้นไม่มีรูปแบบที่สามารถอธิบายได้แต่อย่างใด ส่วนสาเหตุที่น่าจะเกิดจากปัจจัยต่างๆระหว่างการทดสอบ เช่น การหล่อตัวอย่างและการเคาะแบบหล่อแห่งคอนกรีตที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

ในขณะที่ส่วนที่สอง ได้แก่ ส่วนของปริมาตรโพรงคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนผสมคอนกรีตซึ่ง ได้แก่ โพรงแคฟพิลลารี และโพรงเจล เนื่องจากหากพิจารณาจากตารางที่ 4.2

และ รูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีปริมาตรโพรงแคพพิลลารีและโพรงเจลที่ต่ำกว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า ตัวอย่างเช่น หากพิจารณาสัดส่วนผสมที่มีชนิดของวัสดุประสานที่เหมือนกัน คือ ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 (65% OPC+35%RHA) อันได้แก่ สัดส่วนผสม D.7 D.18 และ D.29 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกันได้แก่ 0.4 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ พบว่าจะได้ปริมาตรโพรงแคพพิลลารีและโพรงเจลที่ได้จะเรียงจากน้อยไปหามากดังนี้ คือ สัดส่วนผสม D.7 D.18 และ D.29 ตามลำดับ หรือถ้าหากพิจารณากรณีนี้ ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน แต่พบว่ามีชนิดของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่าง เช่น สัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันคือ 0.5 แต่มีวัสดุประสานที่แตกต่างกัน คือ สัดส่วนผสม D.15 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 85 และเถ้าแกบลร้อยละ 15 (85% OPC+15%RHA) สัดส่วนผสม D.18 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 (65% OPC+35%RHA) และ สัดส่วนผสม D.22 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 เถ้าแกบลร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 25 (65% OPC+10%RHA+25%FA) ตามลำดับ พบว่าปริมาตรโพรงแคพพิลลารีและโพรงเจลที่ได้จะเรียงจากน้อยไปหามากดังนี้ คือ สัดส่วนผสม D.22 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 เถ้าแกบลร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 25 มีปริมาตรน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ สัดส่วนผสม D.18 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 และสุดท้ายคือ สัดส่วนผสม D.15 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 85 และเถ้าแกบลร้อยละ 15 (85% OPC+15%RHA) ซึ่งมีปริมาตรโพรงมากที่สุด

นอกจากนี้ในตารางที่ 4.2 ยังพบว่าในที่นี้แยกเป็นโพรงคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นประเภทโพรงแคพพิลลารีโดยคิดเป็นร้อยละ 78.67 ถึง 93.31 ของปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม โดยโพรงเจลและโพรงอากาศมีปริมาตรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังพบว่าโพรงเจลจะมีปริมาตรคิดเป็นเพียงร้อยละ 5.52 ถึง 9.70 ของปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม หรือ ร้อยละ 5.91 ถึง 10.90 ของโพรงประเภทแคพพิลลารีซึ่งจากรูปที่ 4.2 พบว่า ความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรงของโพรงเจลและโพรงแคพพิลลารีมีคุณลักษณะและแนวโน้มที่เหมือนกัน

เนื่องจากโพรงแคพพิลลารีนั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการซึมผ่านได้ (Permeability) และมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อความทนทาน (Durability) อีกทั้งยังเป็นโพรงที่มีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับโพรงชนิดอื่นๆ จากการทดสอบโดยเอ็มไอพีพบว่าสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของโพรงแคพพิลลารีกับปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมได้ ดังสมการ (4.1) และพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

$$P = 1.1048P' + 0.0047 \quad (4.1)$$

โดยที่	P'	หมายถึง ปริมาตรโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)
	P	หมายถึง ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น(The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) มีค่า 0.9821 ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้สามารถนำไปใช้ประมาณค่าปริมาณโพรงแคพพิลลารีจากโพรงคอนกรีตรวมได้

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบเอ็มไอพีกับวิธีตามมาตรฐาน ASTM C1202 พบว่า ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กล่าวคือ ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมมีความสัมพันธ์แปรตามกันและพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อเทียบกับกับค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังสมการ (4.2)

$$Q = 13752.6P - 631.8 \quad (4.2)$$

โดยที่	Q	หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)
	P	หมายถึง ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น(The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) มีค่า 0.90 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นที่น่าสนใจและสามารถนำไปใช้ทำนายค่า ประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 หรือ ค่า ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพีก็ได้ หากทราบค่าใดค่าหนึ่งที่ให้มาก่อน

ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะค่าของปริมาตรโพรงแคพพิลลารีเทียบกับค่าของประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 พบว่าจะได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 กล่าวคือปริมาตรโพรงแคพพิลลารี มีความสัมพันธ์แปรตามกันและพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นกัน เมื่อเทียบกับกับค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังสมการ (4.3)

$$Q = 15219P' - 570.64 \quad (4.3)$$

โดยที่	Q	หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)
	P'	หมายถึง ปริมาตรโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น(The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) มีค่า 0.88 ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้นของสมการที่ (4.3) นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าเดียวกันที่ได้จากสมการที่ (4.2) แต่เนื่องจากสมการ (4.3) นี้ ได้มาจากผลของปริมาตรของโพรงแคพพิลลารีซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตโดยตรงมากกว่าผลของปริมาตรโพรงรวม เนื่องจากโพรงแคพพิลลารีเป็นโพรงที่มีปริมาณมากที่สุดในเรื่องคอนกรีต ด้วยเหตุนี้สมการที่(4.3) จึงน่าจะเป็นสมการที่ให้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าสมการ (4.2)

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบเอ็มไอพีกับการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ อายุ 91 วัน นั้น พบว่าได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับทฤษฎี คือ คอนกรีตที่มีปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity or Pore Volume) สูง พบว่าค่ากำลังอัดจะมีค่าต่ำ ดังสมการ (4.4)

$$fc' = -233.91 \ln(P) + 18.135 \quad (4.4)$$

โดยที่ fc' หมายถึง ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 91 วัน (กก.ต่อ ตร.ซม.)
 P หมายถึง ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) มีค่า 0.8387

ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาผลของปริมาตรโพรงแคพพิลลารีเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ อายุ 91 วันนั้น พบว่าเนื่องจากสมการ (4.1) พบว่าปริมาตรโพรงแคพพิลลารีมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับปริมาตรโพรงรวม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรงแคพพิลลารีเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 91 วัน จึงควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับสมการ (4.4)

4.2 การวิเคราะห์ขนาดโพรงคอนกรีต

หากพิจารณาผลของขนาดของโพรงคอนกรีต (Pore Size) จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโค้งสะสมของการกระจายขนาดโพรงคอนกรีต (Cumulative Pore Size Distribution) เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี ดังแสดงผลการทดสอบในภาคผนวก ข รูปที่ ข.19-ข.27 พบว่า ขนาดของโพรงคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสมจะมีค่าขนาด

ของโพรงคอนกรีตที่แตกต่างกัน โดยค่าขนาดของโพรงคอนกรีตที่ได้โดยวิธีเอ็มไอพีนั้นมักหมายถึงค่าที่ได้จากการหาค่ากลางแบบฐานนิยม (Mode) ซึ่งหมายถึงขนาดโพรงคอนกรีตที่มีจำนวนหรือมีความถี่ของขนาดโพรงในช่วงนั้นมากที่สุด แต่นอกจากวิธีฐานนิยมนี้ยังพบว่ายังสามารถคำนวณหาขนาดโพรงคอนกรีตได้จากค่ากลางแบบอื่น ๆ อีก เช่น ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) และค่าเฉลี่ยมัธยฐาน (Median) ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 4.4 โดยพบว่าขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณด้วยค่ากลางทั้ง 3 วิธีนี้ให้ค่าที่แตกต่างกันไป ดังนั้นค่าฐานนิยมให้มีความหมายของขนาดโพรงที่โตที่สุด รองลงมาคือมัธยฐาน และค่าที่ได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิต มีขนาดโพรงที่เล็กที่สุด

อย่างไรก็ดีในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าของขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดไม่ว่าจะคำนวณขนาดด้วยวิธีใดก็ตาม แต่หากพิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้จากวิธีเอ็มไอพีของสัดส่วนผสมทั้ง 9 สัดส่วนผสม พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันแต่อย่างใด ในกรณีนี้จึงพอจะสรุปได้ว่าชนิดของวัสดุประสานที่ใช้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนั้นจะมีอิทธิพลต่อปริมาณโพรงคอนกรีตโดยตรงมากกว่าที่จะส่งผลที่ชัดเจนต่อขนาดโพรงคอนกรีต

ในการเปรียบเทียบขนาดของโพรงคอนกรีตระหว่างสัดส่วนผสมนั้นนอกจากจะต้องทราบขนาดของโพรงคอนกรีตแล้วนั้นยังไม่เพียงพอ ควรจะต้องทราบด้วยว่าขนาดโพรงนั้นได้มาจากการคำนวณด้วยค่ากลางวิธีใด จึงจะสามารถใช้ในการเปรียบเทียบกันได้

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีประยุกต์

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องรอจนกว่าก้อนตัวอย่างจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการคัดเลือกสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม นั่นคือมีค่าความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ต่ำ คือไม่เกินประมาณ 2,000 คูลอมป์ และนอกจากนี้ยังต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีความหลากหลายต่าง ๆ กัน คือ 0.4 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ และมีชนิดของวัสดุประสานที่มีหลายรูปแบบต่าง ๆ กัน ได้แก่ สัดส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์ร้อยละ 85 และเถ้าลอยร้อยละ 15 (85% OPC+15%RHA) สัดส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 (65% OPC+35%RHA) และสุดท้ายคือสัดส่วนผสมที่ใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 25 (65% OPC+10%RHA+25%FA) ตามลำดับ ซึ่งหลังจากการได้ผลทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 แล้วพบว่ามีส่วนผสมที่เข้าเกณฑ์อยู่ 9 สัดส่วนผสม

ด้วยกัน ได้แก่ สัดส่วนผสม D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 ซึ่ง สัดส่วนผสมเหล่านี้จะถูกนำไปได้นำมาทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีเช่นกัน

โดยส่วนผลการทดสอบวิธีประยุกต์นั้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ส่วนขั้นตอนการวิเคราะห์นั้น สามารถดำเนินการได้จากสมมติฐานของงานวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.7 ถึง 4.15 โดยในการวิเคราะห์แต่ละครั้งนั้นพบว่าค่าความเข้มข้นที่ได้ทั้งทางด้านชีวแอโนดและ แคโทดนั้นจะถูกนำมาพิตเพื่อให้ได้สมการเส้นโค้งพหุนามกำลังสามโดยใช้หลักการของวิธี Least Square หลังจากวิเคราะห์วิธีประยุกต์แล้วจะได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

4.3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าเนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มทดสอบ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่(Ts) จะใช้เวลายาวนานกว่า สัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานสูง ดังแสดงด้วยแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.16

4.3.2 สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 (D.7 D.18 และ D.29) มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าสัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้า- แกลบร้อยละ 15 (D.4 D.15 และ D.26) ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มทดสอบ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่(Ts) ยาวนานกว่า แต่พบว่าสัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุปอซโซลาน มากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สัดส่วนที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกับเถ้าแกลบร้อยละ 10 (D.11 D.22 และ D.33) จะมีค่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเข้าสู่ สภาวะคงที่ (Ts) ที่ยาวนานที่สุด ดังแสดงด้วยแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.17

4.3.3 จากสมมติฐานเบื้องต้นในการศึกษา ปริมาตรของโพรงภายในเนื้อคอนกรีต แปร- ผันโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ([Cl]⁻) ที่เกิดขึ้น ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะ คงที่ (Ts) ซึ่งจะเห็นว่าผลการทดสอบสอดคล้องกับสมมติฐานเนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานต่ำจะมี ปริมาตรโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานสูง ดังแสดงในแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.18 ซึ่งจากรูปเดียวกันนี้ หากพิจารณาในกรณีที่มี สัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันพบว่า สัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุปอซโซลาน มากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ เถ้าลอยร้อยละ 25 เถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมกัน (D.11 D.22 และ D.33) มีแนวโน้มที่จะมีปริมาตรโพรงภายในเนื้อคอนกรีตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ([Cl]⁻) ที่ได้จากการทดสอบต่ำที่สุด รองลงมา คือ สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 (D.7 D.18 และ D.29) และที่มีปริมาตรโพรง ภายในเนื้อคอนกรีตที่สูงที่สุด คือ สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 15 (D.4 D.15 และ D.26)

4.3.4 จากสมมติฐานค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตภายในเนื้อคอนกรีต แปรผันโดยตรงกับ อัตราส่วนของค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ($[Cl^-]_{out}$) ต่อความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ($[Cl^-]_{in}$) ดังนั้นค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในรูปที่ 4.19 พบว่าในสัดส่วนผสมที่มีชนิดของวัสดุประสานเหมือนกัน จะพบว่าค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตจะแปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าในรูปเดียวกันนี้ หากพิจารณาในกรณีที่มีสัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันนั้นพบว่า สัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ แก้วลอยร้อยละ 25 และแก้วเกลบร้อยละ 10 ร่วมกัน (D.11 D.22 และ D.33) มีแนวโน้มที่จะมีค่าความต่อเนื่องที่สูงที่สุดแทนที่จะมีค่าความต่อเนื่องต่ำที่สุด ในขณะที่สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยแก้วเกลบร้อยละ 15 (D.4 D.15 และ D.26) กลับมีค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตต่ำที่สุดแทนที่จะมีค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตสูงที่สุด ทั้งนี้อาจจะเนื่องด้วยค่าความต่อเนื่องตามสมมติฐานนั้นเป็นค่าที่ได้จากการสัมพันธ์กับปริมาณโพรงรวม ซึ่งหากจะพิจารณาปริมาณโพรงรวมจากค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า จากรูปที่ 4.18 พบว่าค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้าในแต่ละสัดส่วนนั้นมีความแตกต่างกันมากในขณะที่ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลออกในแต่ละสัดส่วนนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากและความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าความเข้มข้นที่ไหลออกเพียงเล็กน้อยอาจจะมีผลกระทบอย่างยิ่งต่อการคำนวณค่าร้อยละของความต่อเนื่องตามสมมติฐาน ซึ่งในประเด็นนี้เอง อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลื่อนขึ้นได้ง่ายสำหรับการคำนวณหาค่าร้อยละของความต่อเนื่อง

4.3.5 สัดส่วนผสมที่มีค่าดัชนีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ของคลอไรด์สูง หมายถึง คอนกรีตที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับงานคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ เนื่องจากจะมีคลอไรด์ที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านก่อนทดสอบได้เป็นปริมาณมาก ซึ่งทราบได้จากค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลออก ($[Cl^-]_{out}$) ภายในระยะเวลาการทดสอบที่ไม่ยาวนาน ซึ่งทราบได้จากค่าระยะเวลา (T_s) จากการทดสอบ ค่าดัชนีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ ของสัดส่วนผสมทั้งหมดสามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 4.20

4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบวิธีประยุกต์กับวิธีอื่นๆ

4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวิธีประยุกต์กับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีประยุกต์ร่วมกับ ASTM C1202 พบว่าสามารถพิจารณาได้หลายกรณีด้วยกัน ดังต่อไปนี้

4.4.1.1 ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ ค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Q_s) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ(4.5)

$$Q = 0.3479Q_s - 59.208 \quad (4.5)$$

โดยที่ Q หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)
 Q_s หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Q_s) (คูลอมบ์)

ซึ่งพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) เป็น 0.90 ซึ่งมีความสอดคล้องกันเป็นที่น่าพอใจ

4.4.1.2 สำหรับสัดส่วนผสมที่มีวัสดุประสานชนิดเดียวกันพบว่า ค่าความต่อเนื่องแปรผันตาม ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 4.22

4.4.1.3 ค่าดัชนีความสามารถการซึมผ่านของคลอไรด์ จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยพบว่า หากพิจารณาค่าดัชนีความสามารถการซึมผ่านของคลอไรด์แยกตามชนิดของวัสดุประสานจะสามารถจำแนกดัชนีค่าความสามารถการซึมผ่านของคลอไรด์ ได้ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ K1 K2 และ K3 ตามสมการ (4.6) (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

$$K1 = 0.0319Q - 20.525 \quad (4.6)$$

$$K2 = 0.0111Q - 7.522 \quad (4.7)$$

$$K3 = 0.0111Q - 10.861 \quad (4.8)$$

โดย K1 หมายถึง ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่มีสัดส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้า แกลบร้อยละ 10 และเถ้าลอย ร้อยละ 25 ได้แก่ D.11 D.22 และ D.33 (พีพีเอ็ม ต่อ ซม.)

K2 หมายถึง ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่มีสัดส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้า-ลอย ร้อยละ 35 ได้แก่ D.7 D.18 และ D.29 (พีพีเอ็ม ต่อ ซม.)

K3 หมายถึง ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่มีสัดส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้า-

แกลบ ร้อยละ 15 ได้แก่ D.4 D.15 และ D.26 (พีพีเอ็ม ต่อ ชม.)

Q หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) ของทั้งสามสมการมีค่าเป็น 0.9897 1.000 และ 0.9953 สำหรับสมการที่ (4.6) (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีค่าสอดคล้องกันอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้สมการเหล่านี้จึงน่าที่จะนำไปใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 กับค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ ได้เป็นอย่างดี

หากพิจารณารูปที่ 4.23 จะพบว่าผลของชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ทั้งสามชนิดนั้นมีความแตกต่างกันโดยวัสดุประสานที่มีการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกันสมการ (4.6) มีค่าความชันมากที่สุด หมายถึง การเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อยของประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ที่ทดสอบได้นั้นจะส่งผลทำให้ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์โดยวิธีประยุกต์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ในขณะที่ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ของวัสดุประสานที่มีการแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 35 หรือสมการ(4.7) และวัสดุประสานที่มีการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 15 หรือสมการ(4.8) จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเนื่องจากความชันที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความชันของสมการ (4.7) กับ สมการ (4.8) นั้นมีค่าเท่ากันคือ 0.0111 แต่พบว่าสมการ (4.7) จะมีระยะตัดแกนตั้ง (Y-intercept) ที่มากกว่าสมการ (4.8) ซึ่งถ้าหากกำหนดให้ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ คือ K2 และ K3 ของทั้งสมการ(4.7) และสมการ (4.8) มีค่าเป็นศูนย์ หรือสมมติว่าคอนกรีตที่ใช้มีคุณสมบัติดีเยี่ยมสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ร้อยละศูนย์ จะคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ได้เท่ากับ 678 และ 978 คูลอมบ์ ตามลำดับ ซึ่งจากความค่าประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันเหล่านี้จะเป็นผลอันเนื่องมาจากสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ที่แตกต่างกันของวัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวิธีประยุกต์ กับการทดสอบวิธีเอ็มไอพี

ตามสมมติฐานของการศึกษาในบทที่ 2 จะได้ว่า ค่าปริมาณโพรงคอนกรีตรวมนั้น แปรผันตาม ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ($[Cl^-]_{in}$) ซึ่งหลังจากได้ทำการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี พบว่าจะได้ปริมาณโพรงคอนกรีตรวมที่แท้จริง ซึ่งหากนำค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณจุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ($[Cl^-]_{in}$) ที่ได้จากการทดสอบประยุกต์มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี พบว่าค่าที่ได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จากรูปจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (4.9)

$$P = (5 \times 10^{-5}) ([Cl^-] \text{ in}) + 0.0399 \quad (4.9)$$

โดย	P	หมายถึง	ปริมาณโพรงคอนกรีตรวม (ร้อยละ)
	[Cl ⁻] in	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ([Cl ⁻] in) (พีพีเอ็ม)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression; R^2) ของสมการมีค่าเป็น 0.9139 ซึ่งถือว่าความสัมพันธ์ที่ได้ี้มีความสอดคล้องกัน และสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณโพรงคอนกรีตรวมกับค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ได้เป็นอย่างดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ค่าปริมาตรและสัดส่วนที่คิดเป็นร้อยละของโพรงคอนกรีตประเภทต่างๆที่ตรวจวัดได้จาก การวัดปริมาตรโพรงคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอพี

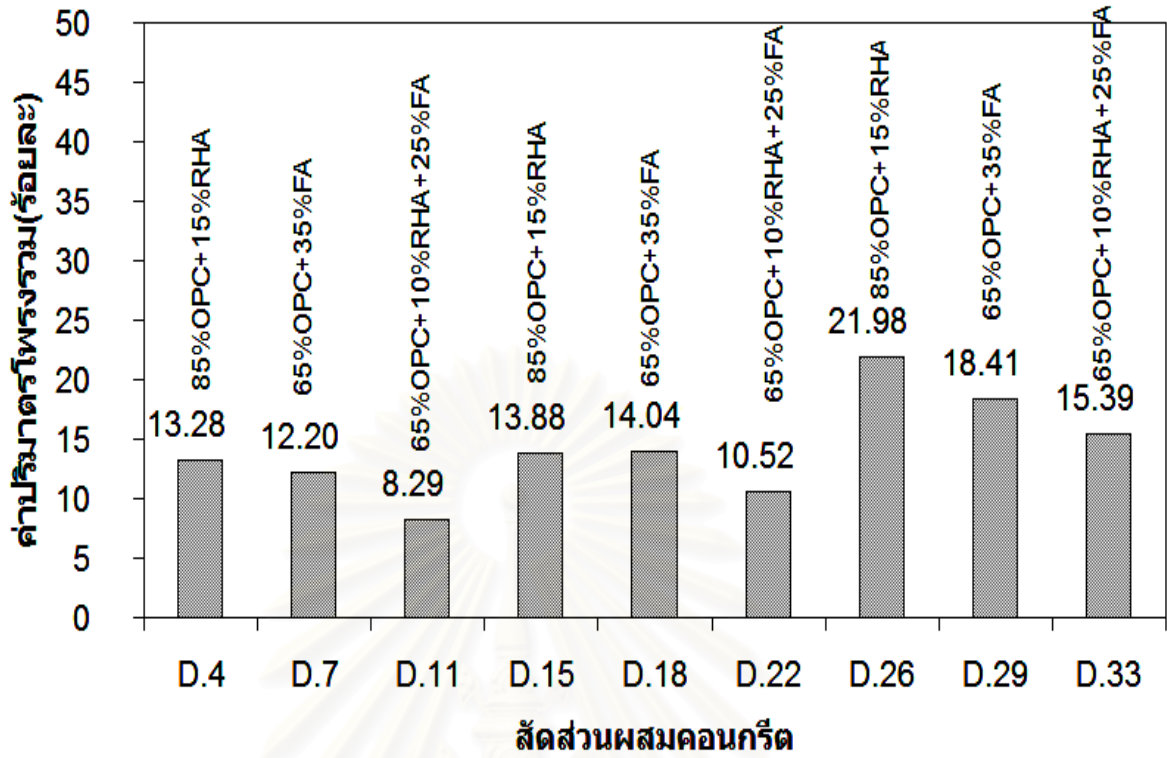
สัดส่วนผสมคอนกรีต	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน (W/B)	ปริมาตรโพรง แคพิลลารี (0.01-10 ไมครอน)(%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)	ปริมาตรโพรง เจล (0.007- 0.01 ไมครอน) (%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)	ปริมาตรโพรง อากาศ(10- 150 ไมครอน) (%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)	ปริมาตรโพรง คอนกรีตรวม (%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)
D.4 (85%OPC+15%RHA)	0.4	12.39% (93.31%)	0.73% (5.52%)	0.16% (1.17%)	13.28% (100.00%)
D.7 (65%OPC+35%FA)	0.4	9.60% (78.67%)	0.94% (7.70%)	1.66% (13.62%)	12.20% (100.00%)
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.4	7.22% (87.10%)	0.53% (6.45%)	0.53% (6.45%)	8.29% 100.00%
D.15 (85%OPC+15%RHA)	0.5	11.90% (85.76%)	1.27% (9.15%)	0.71% (5.09%)	13.88% (100.00%)
D.18 (65%OPC+35%FA)	0.5	12.42% (88.42%)	1.10% (7.82%)	0.53% (3.76%)	14.04% (100.00%)
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.5	9.36% (89.01%)	1.02% (9.70%)	0.14% (1.29%)	10.52% (100.00%)
D.26 (85%OPC+15%RHA)	0.6	19.18% (87.24%)	1.55% (7.03%)	1.26% (5.74%)	21.98% (100.00%)
D.29 (65%OPC+35%FA)	0.6	16.35% (88.80%)	1.45% (7.88%)	0.61% (3.33%)	18.41% (100.00%)
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.6	13.63% (88.55%)	1.07% (6.96%)	0.69% (4.49%)	15.39% (100%)

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์

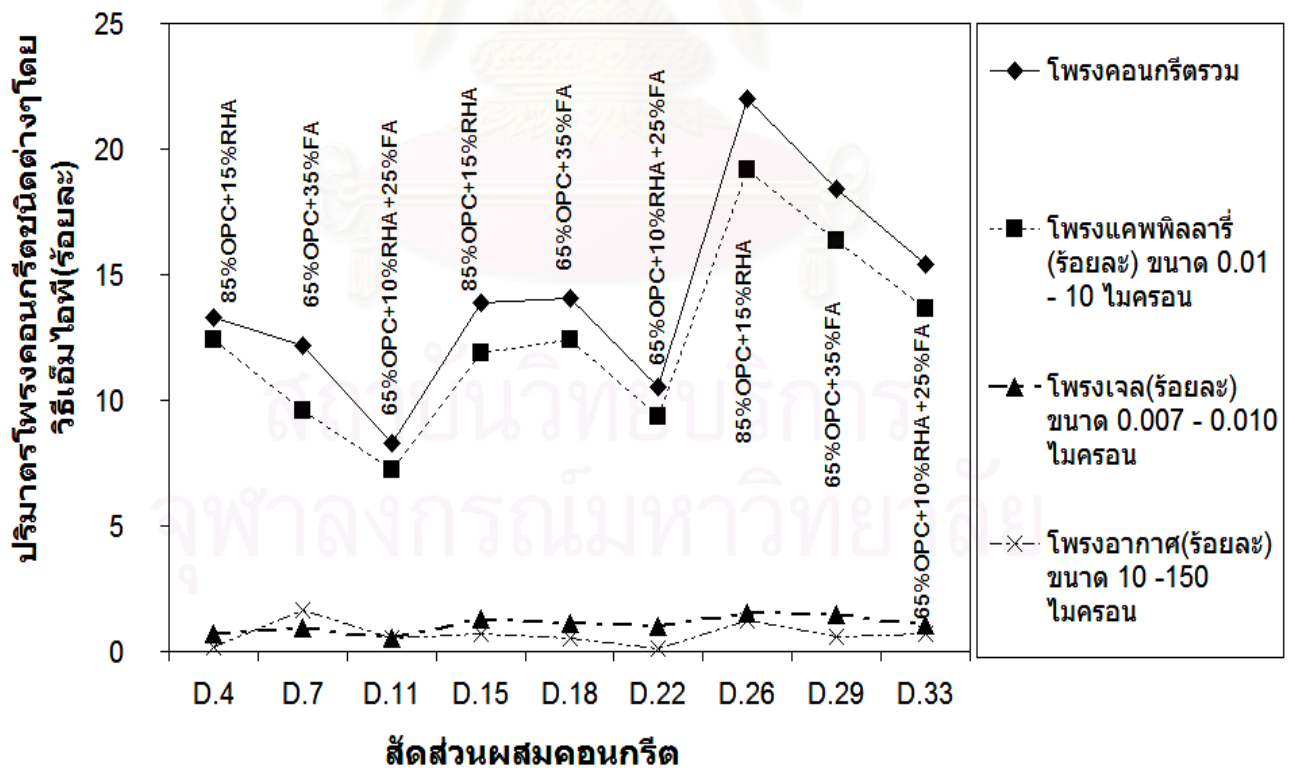
สัดส่วนผสมคอนกรีต	ระยะเวลา (Ts) (ชั่วโมง)	ค่าประจุ ไฟฟ้าณ สภาวะคงที่ (Qs) (คูลอมบ์)	[Cl ⁻]in (พีพีเอ็ม)	[Cl ⁻]out (พีพีเอ็ม)	ความ ต่อเนื่อง (ร้อยละ)	ค่าดัชนีการ ซึมผ่านได้ ของคลอไรด์ (พีพีเอ็ม/ซม.)
D.4 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.4)	37.2	3,915	1961	87	4.44%	2.34
D.7 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.4)	43.0	2,815	1426	125	8.77%	2.91
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.4)	49.6	2,114	834	120	14.39%	2.42
D.15 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.5)	29.7	4,213	2156	167	7.75%	5.62
D.18 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.5)	36.5	3,509	1652	190	11.50%	5.21
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.5)	40.5	2,678	1317	239	18.15%	5.90
D.26 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.6)	22.0	7,612	3088	386	12.50%	17.55
D.29 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.6)	29.5	5,635	2913	425	14.59%	14.41
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.6)	31.0	3,287	1890	426	22.54%	13.74

ตารางที่ 4.3 ค่าขนาดโพรงคอนกรีตชนิดต่างๆ ของสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม

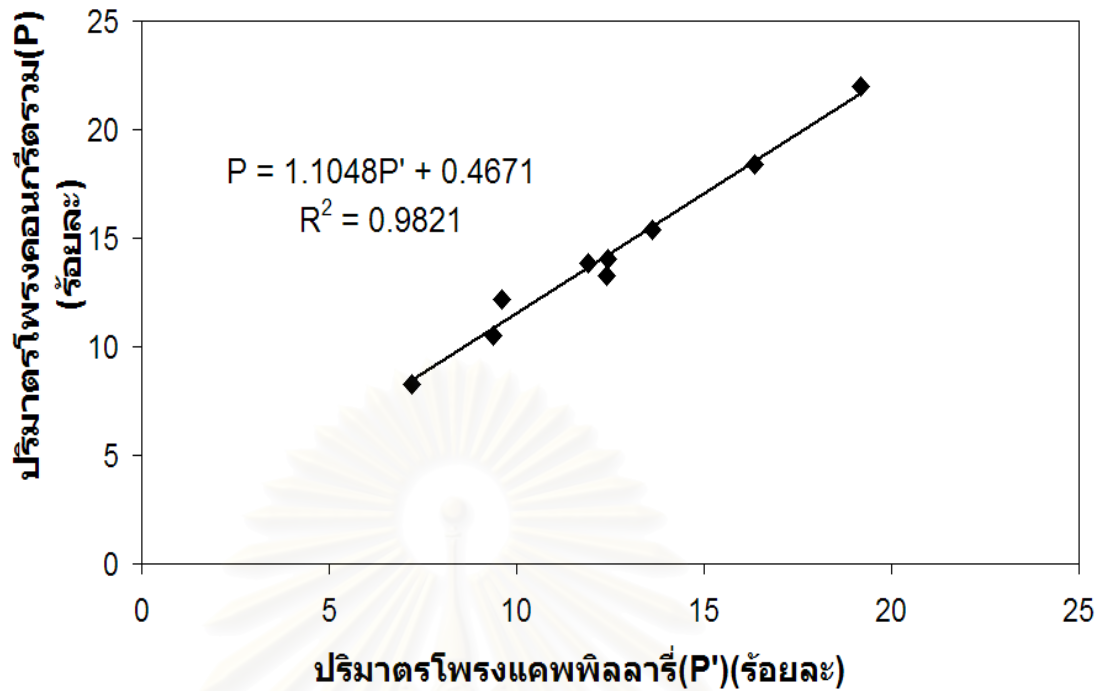
สัดส่วนผสมคอนกรีต	ขนาดโพรงคอนกรีต(ไมครอน)		
	ค่าเฉลี่ยแบบฐานนิยม (Pore Size) (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยแบบเลขคณิต (Pore Size) (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยแบบมัธยฐาน (Pore Size) (ไมครอน)
D.4 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.4)	0.06537	0.0313	0.05221
D.7 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.4)	0.06455	0.03422	0.0686
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.4)	0.06301	0.03086	0.0534
D.15 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.5)	0.05632	0.02871	0.05079
D.18 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.5)	0.05596	0.02857	0.04832
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.5)	0.03973	0.02372	0.03423
D.26 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.6)	0.05624	0.02936	0.04879
D.29 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.6)	0.05920	0.02988	0.05321
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.6)	0.06648	0.03371	0.06648



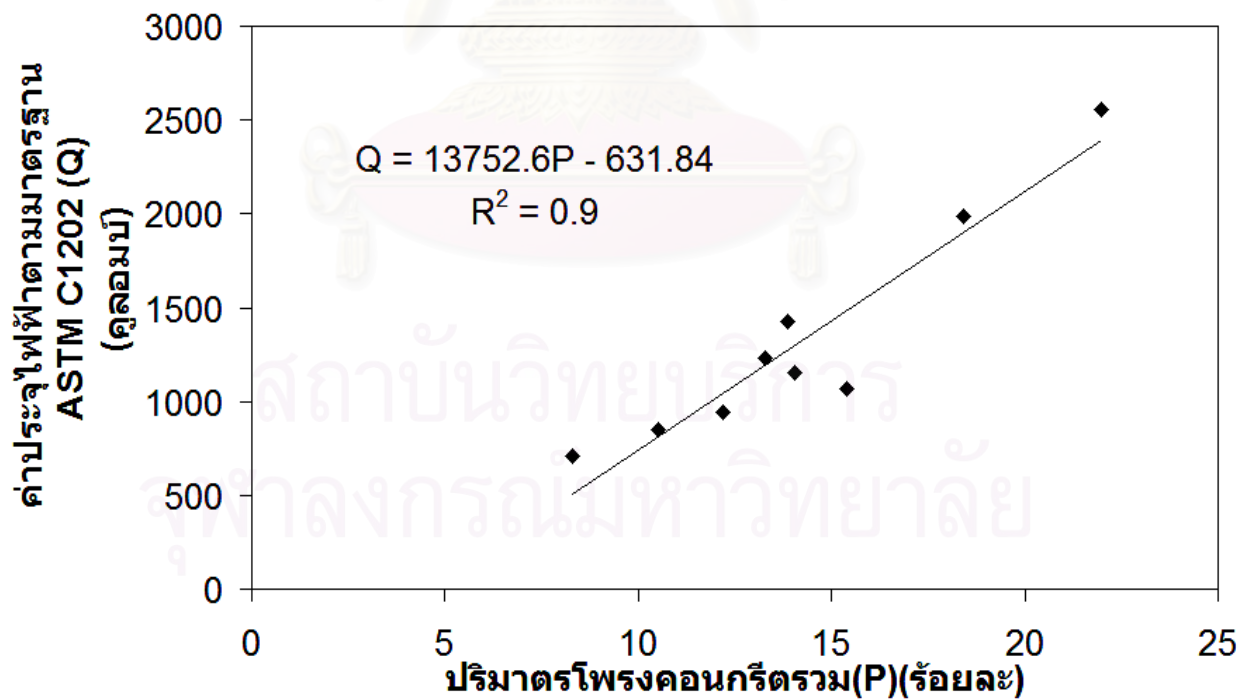
รูปที่ 4.1 ปริมาณไพล์คอนกรีตรวมเทียบกับสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



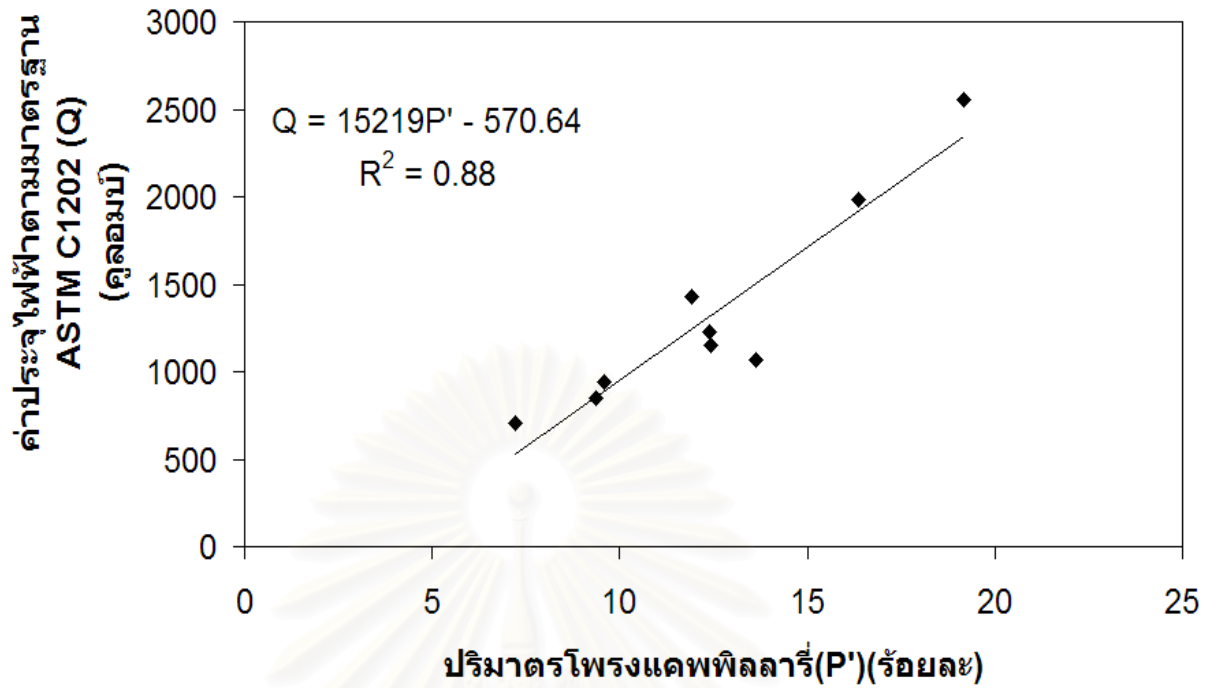
รูปที่ 4.2 ปริมาณไพล์คอนกรีตชนิดต่างๆ เทียบกับคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



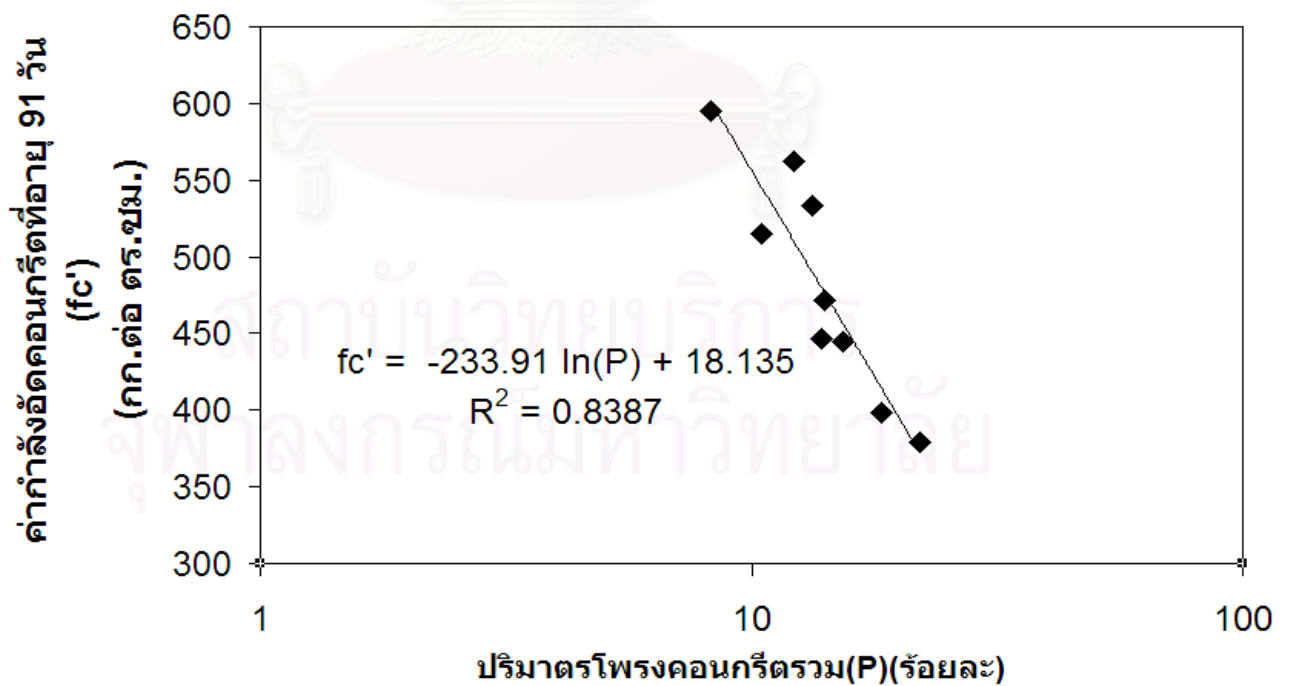
รูปที่ 4.3 ปริมาณของไฟรอกคอนกรีตรวมเทียบกับปริมาณของไฟรอกแคพฟิลลารี โดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



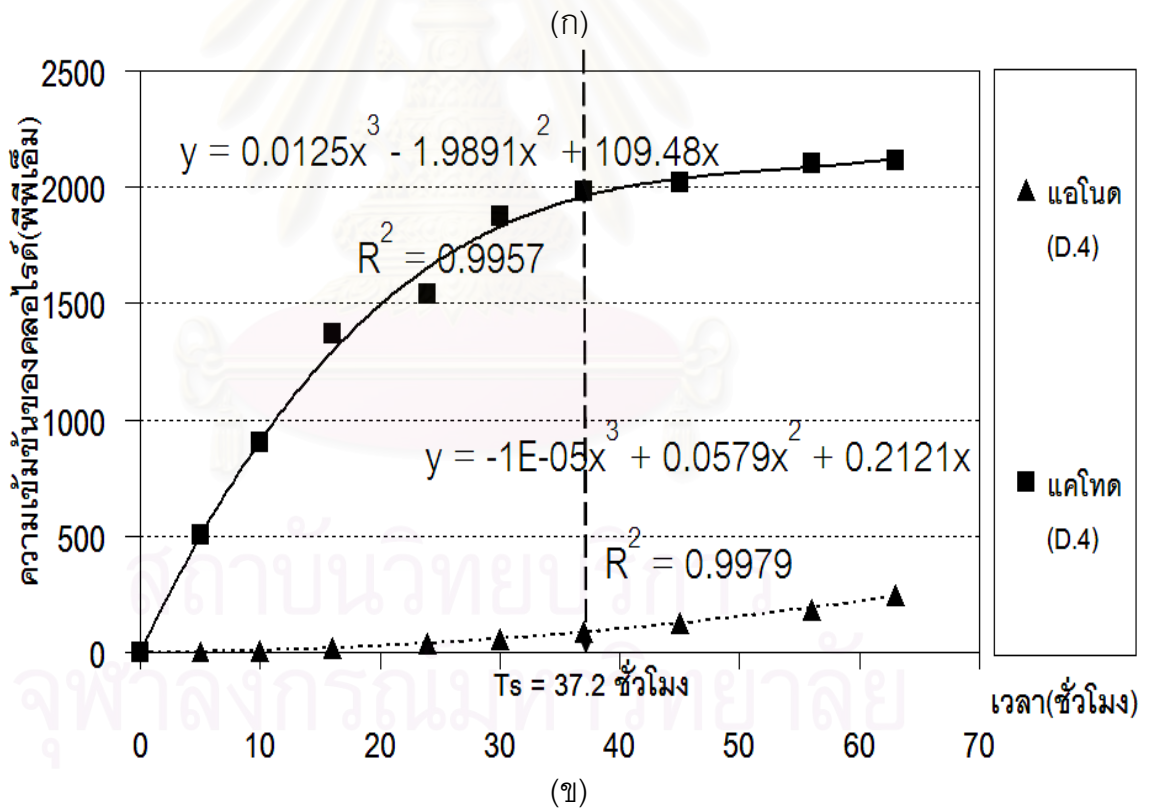
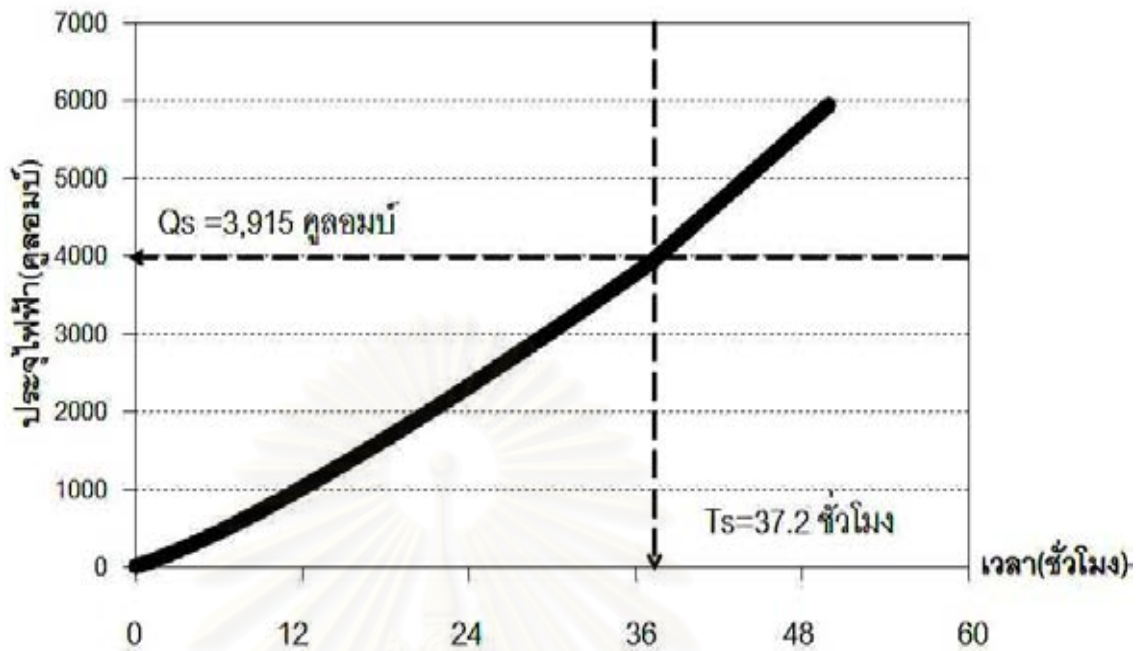
รูปที่ 4.4 ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 เทียบกับปริมาณของไฟรอกคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



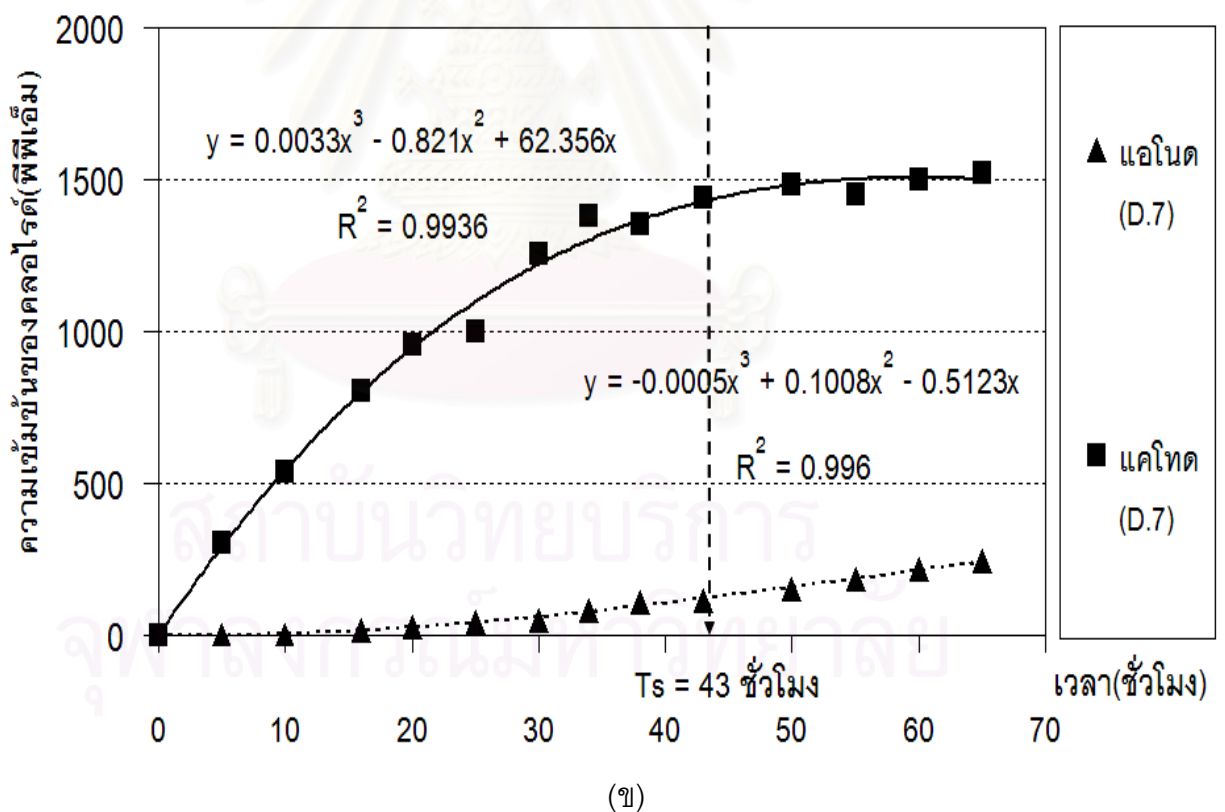
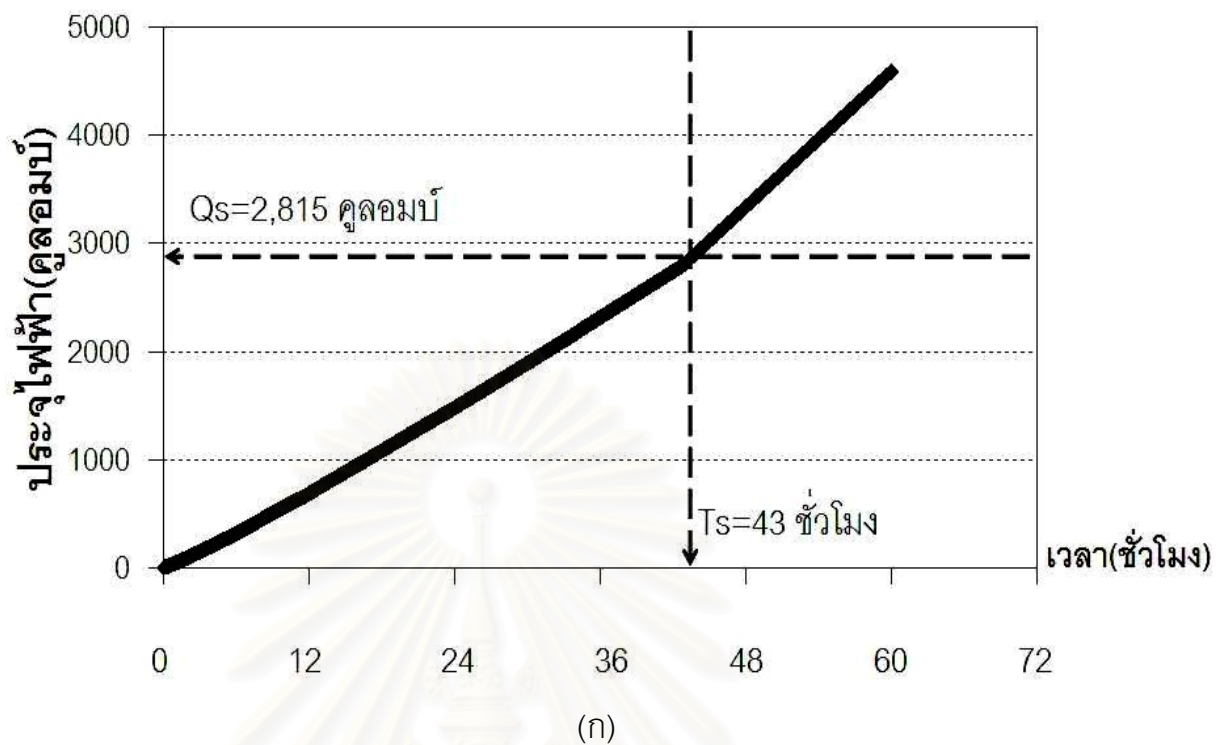
รูปที่ 4.5 ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 เทียบกับปริมาณของโพรงแคลพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



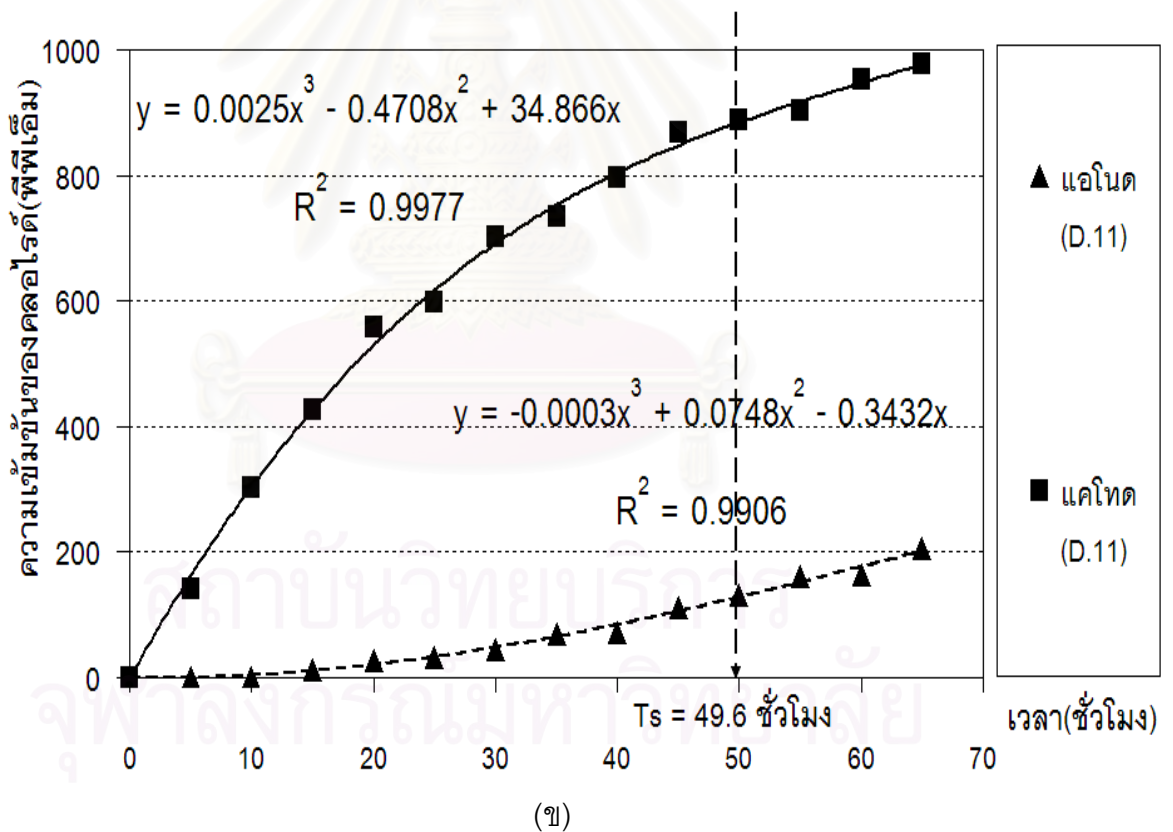
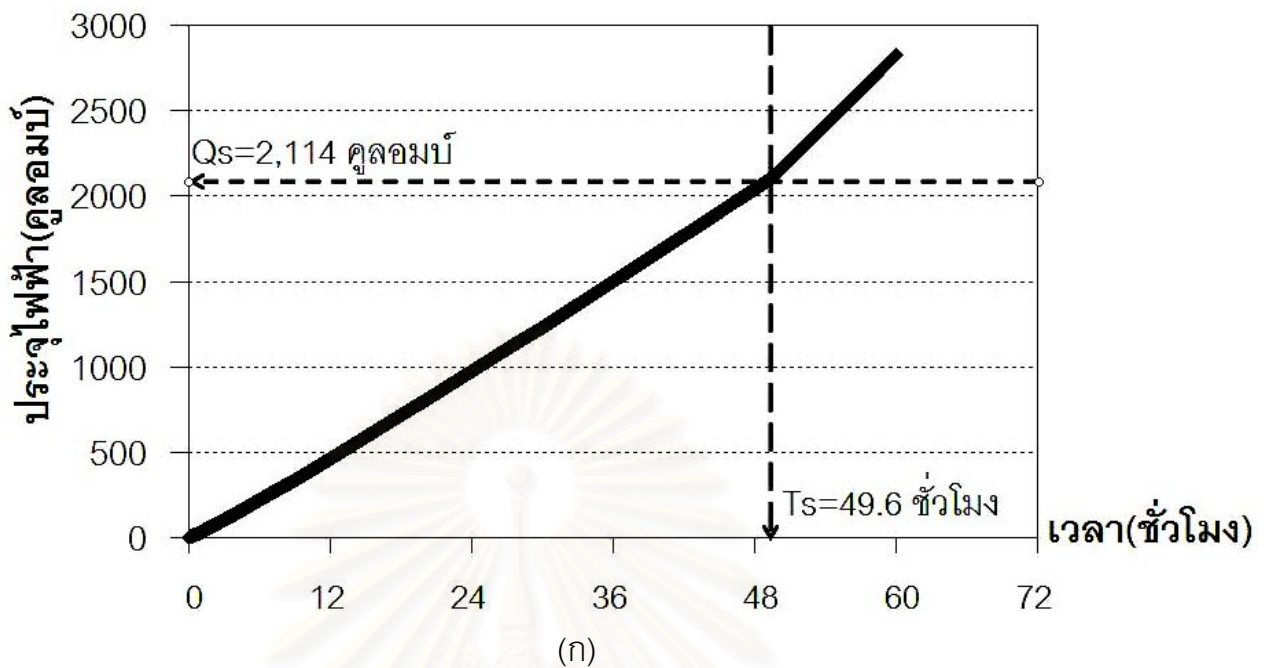
รูปที่ 4.6 ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 91 วันเทียบกับปริมาณของโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



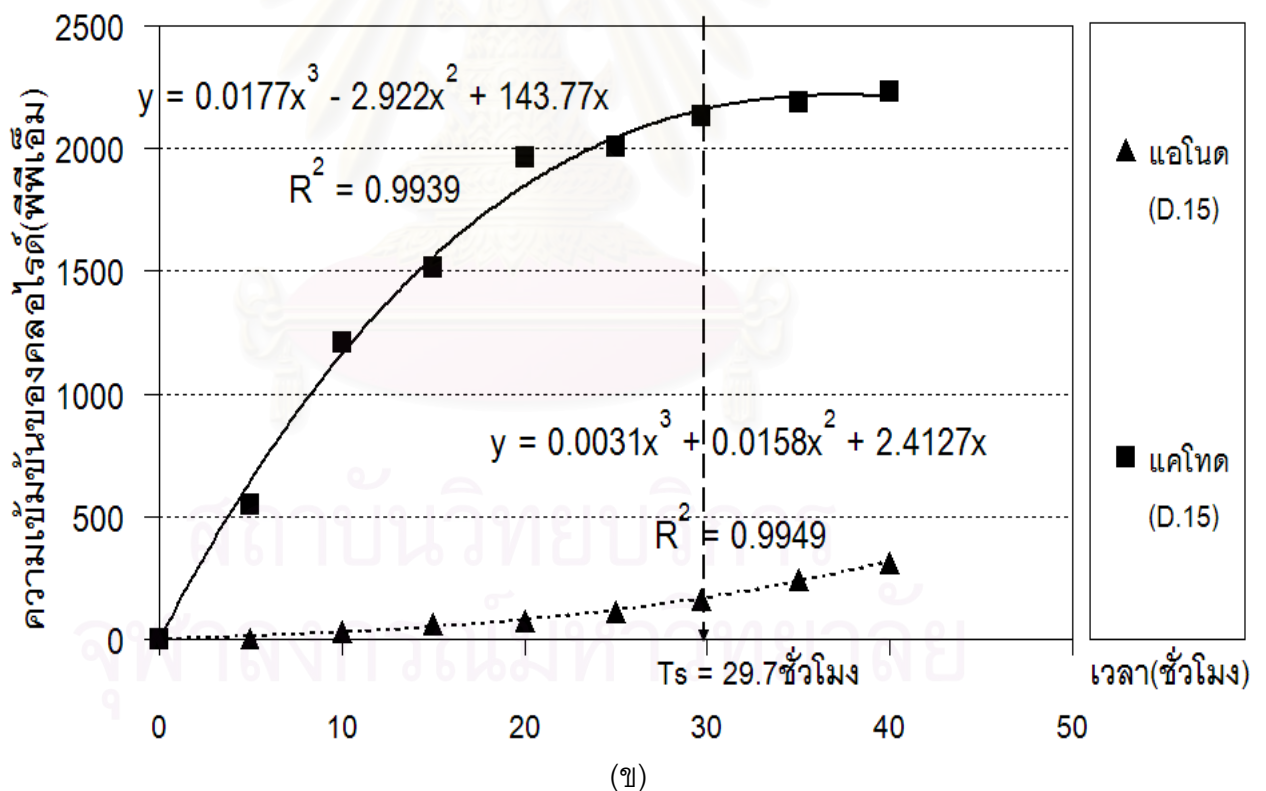
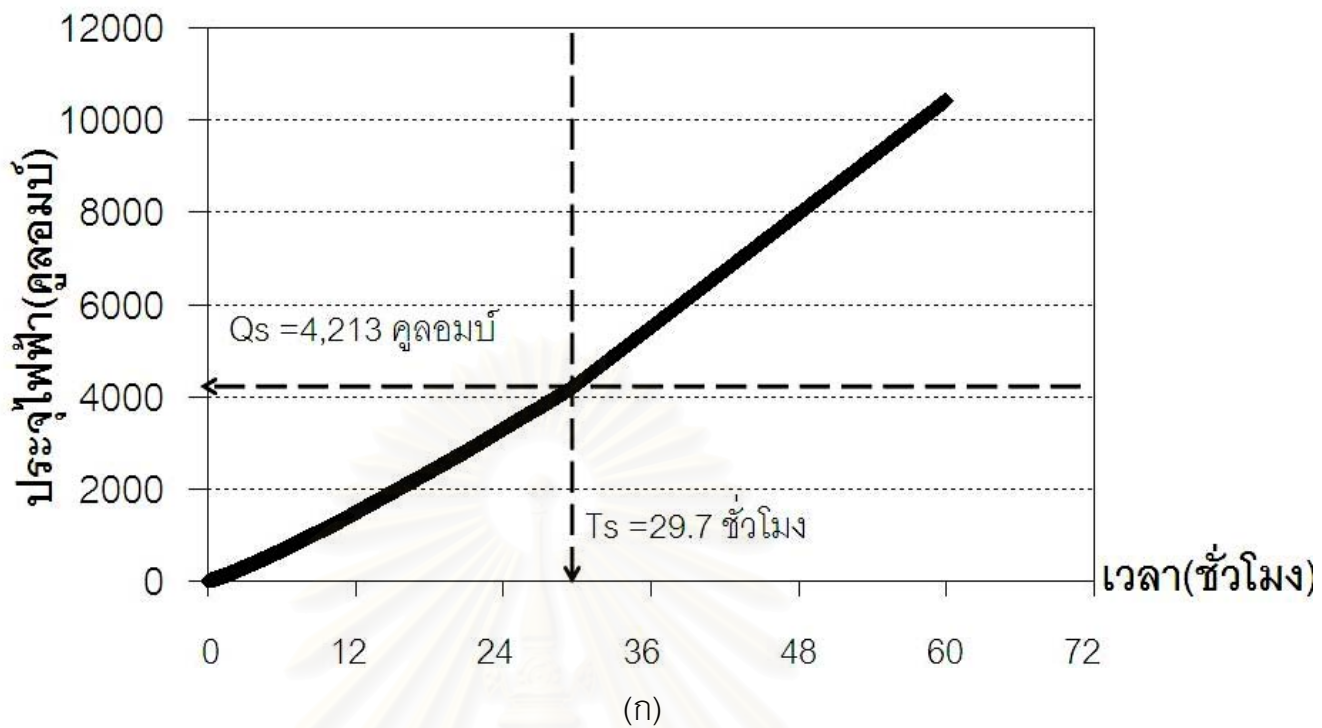
รูปที่ 4.7(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.4 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 และรูปที่ 4.7 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.4



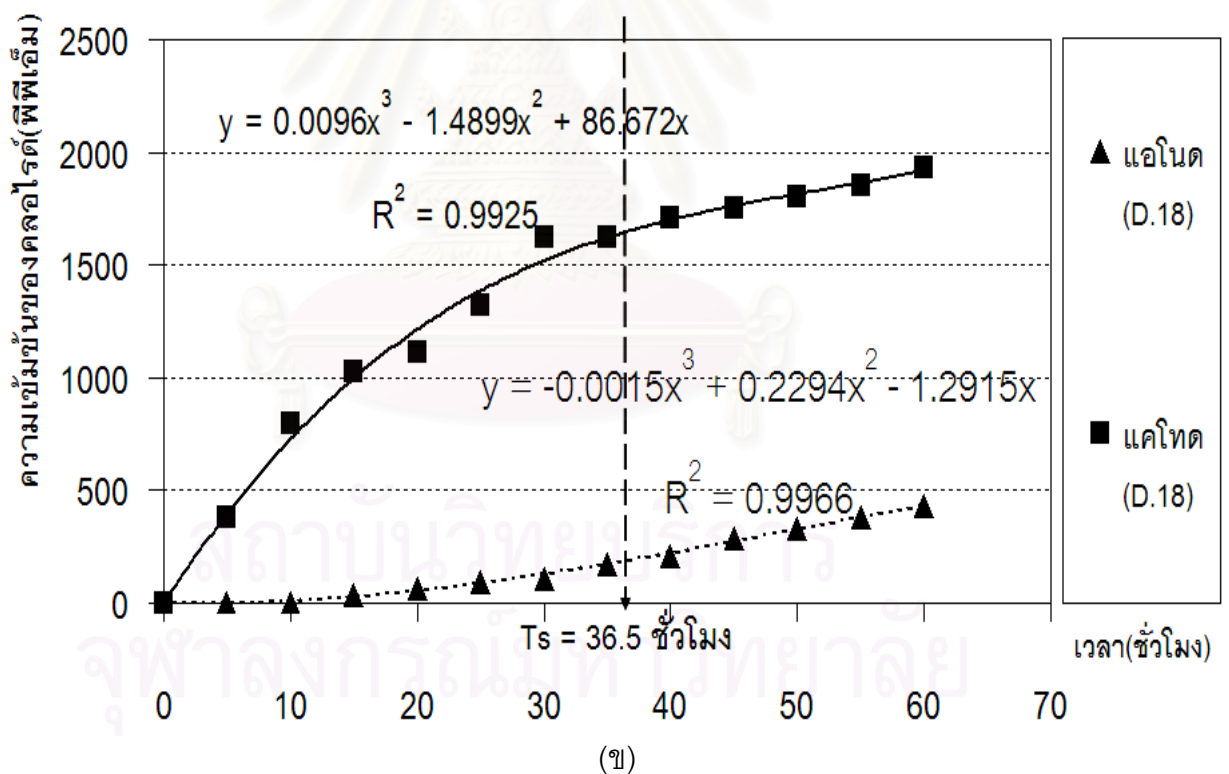
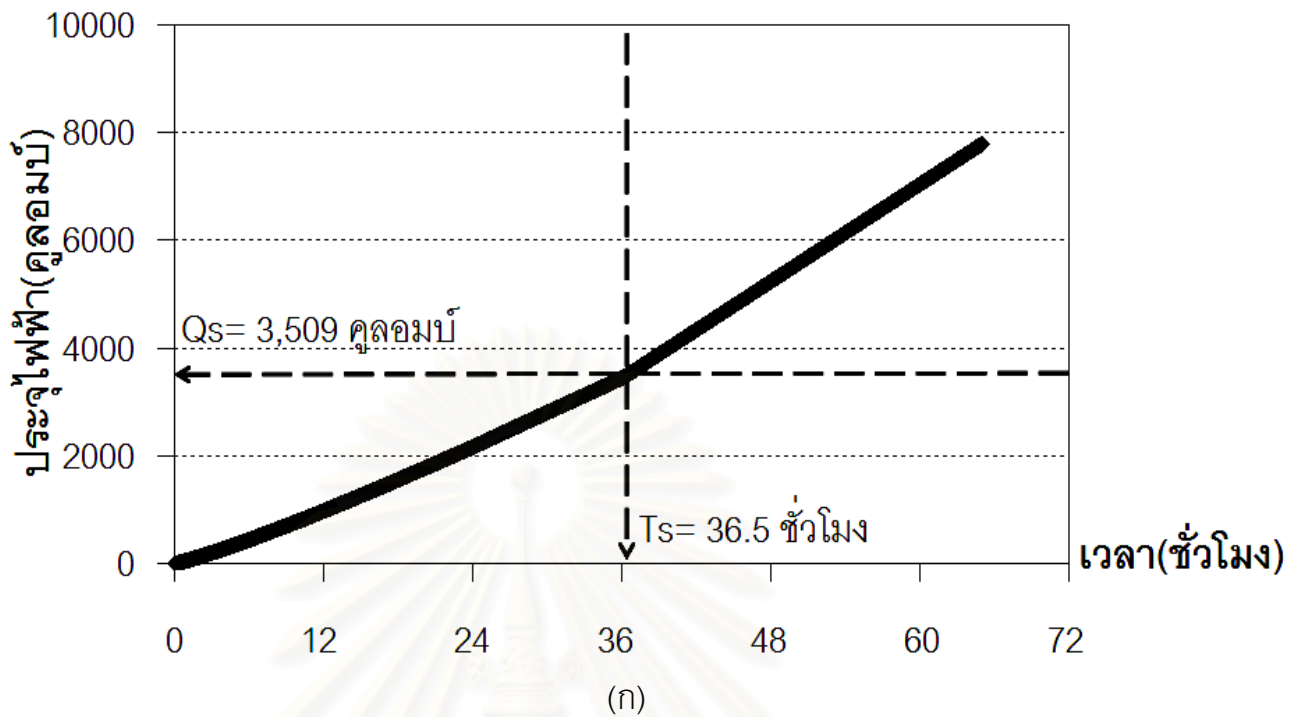
รูปที่ 4.8(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.7 (OPC65% + FA35%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และรูปที่ 4.8 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนไฮดรัสและแอโนไฮดรัสเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.7



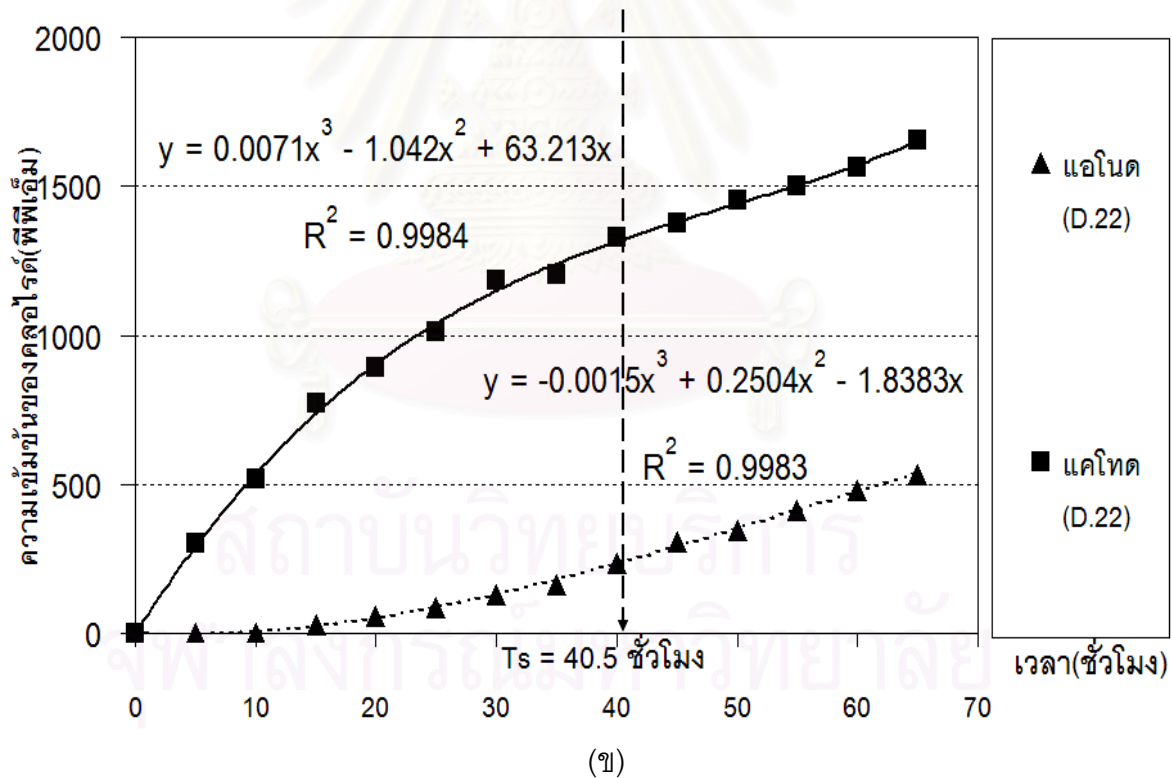
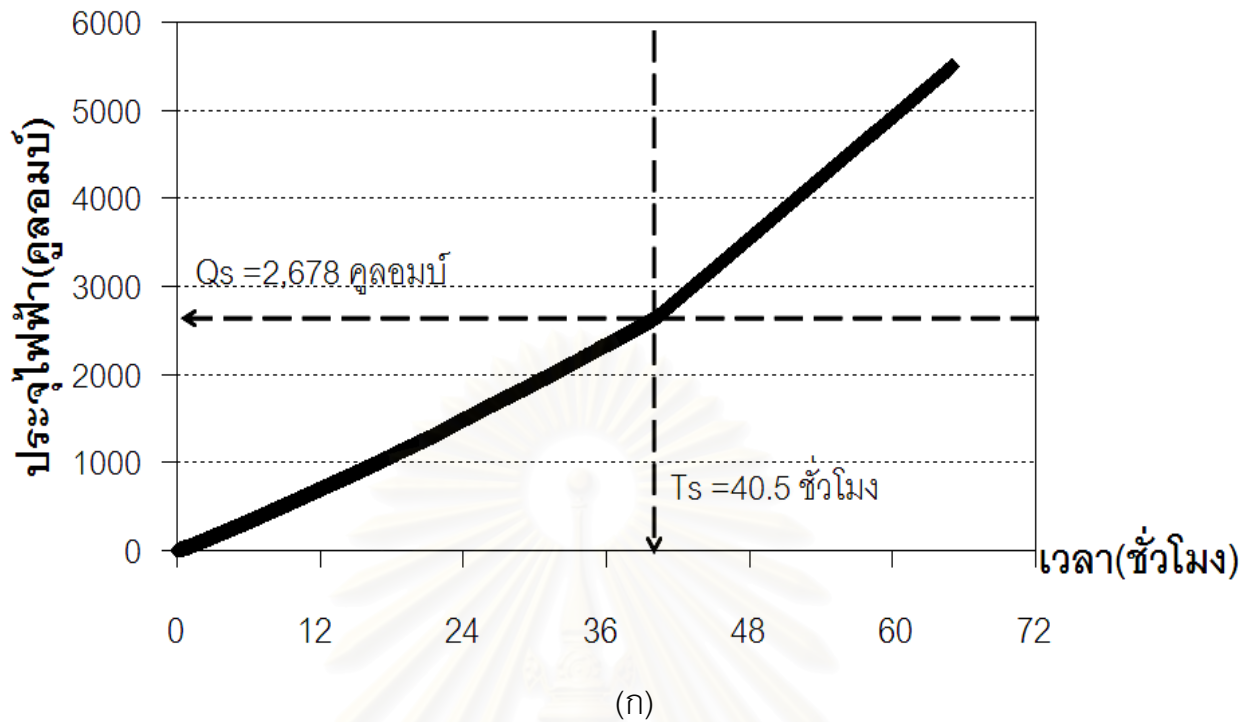
รูปที่ 4.9(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.11 (OPC65%+ RHA10%+FA25%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และรูปที่ 4.9 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนโดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.11



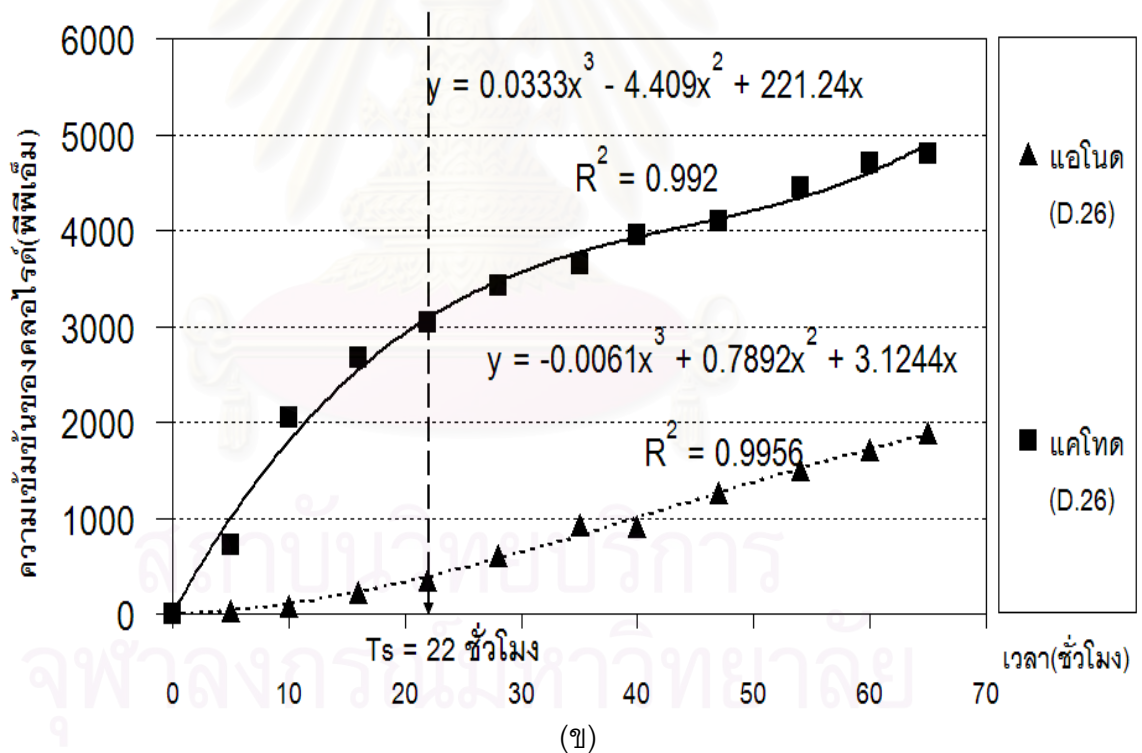
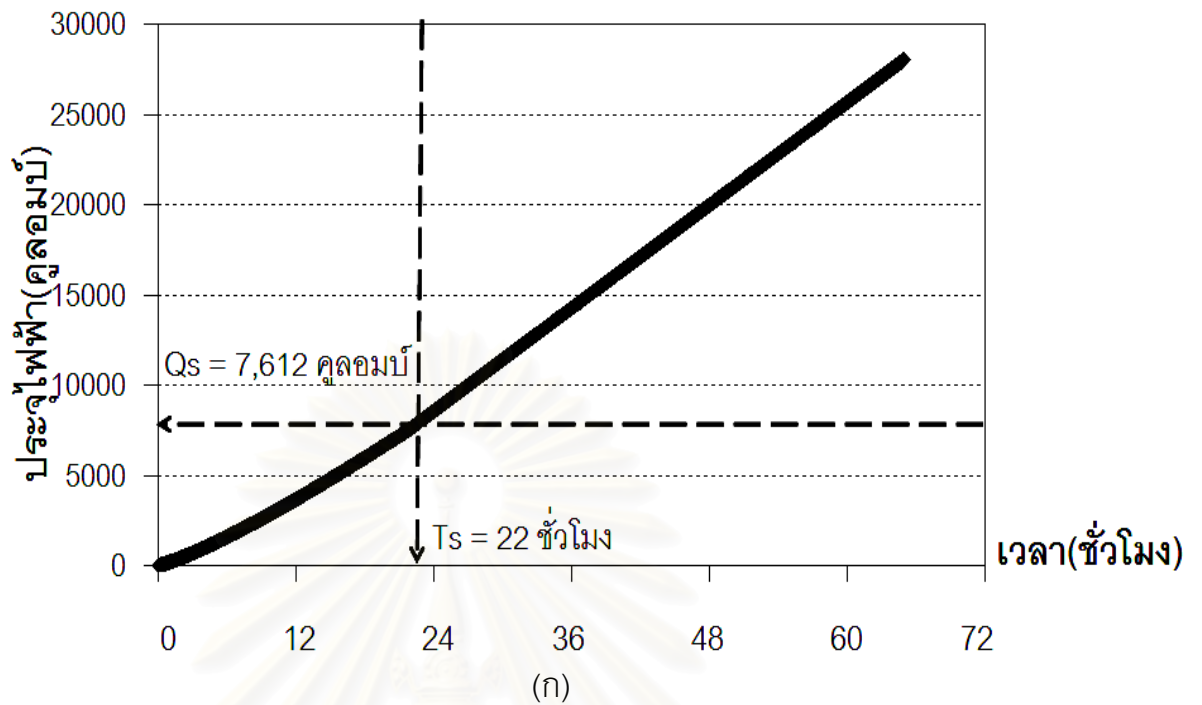
รูปที่ 4.10(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.15 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ รูปที่ 4.10(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนโอดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.15



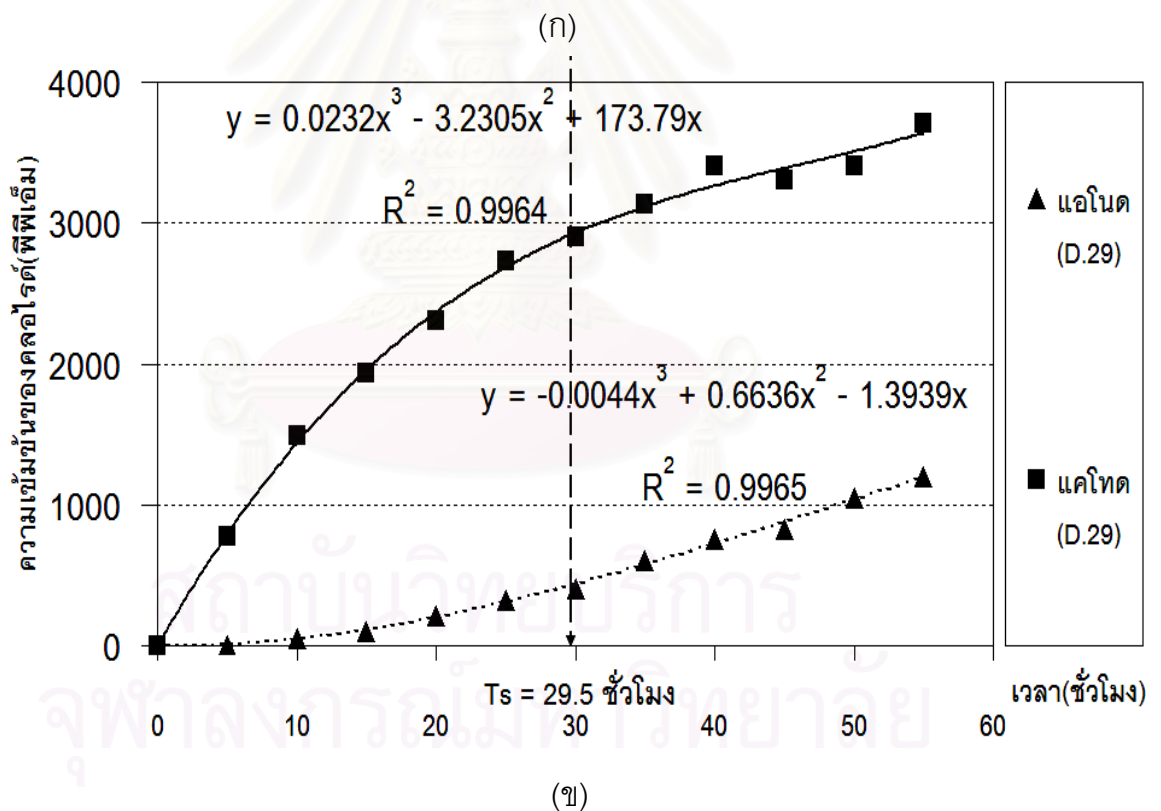
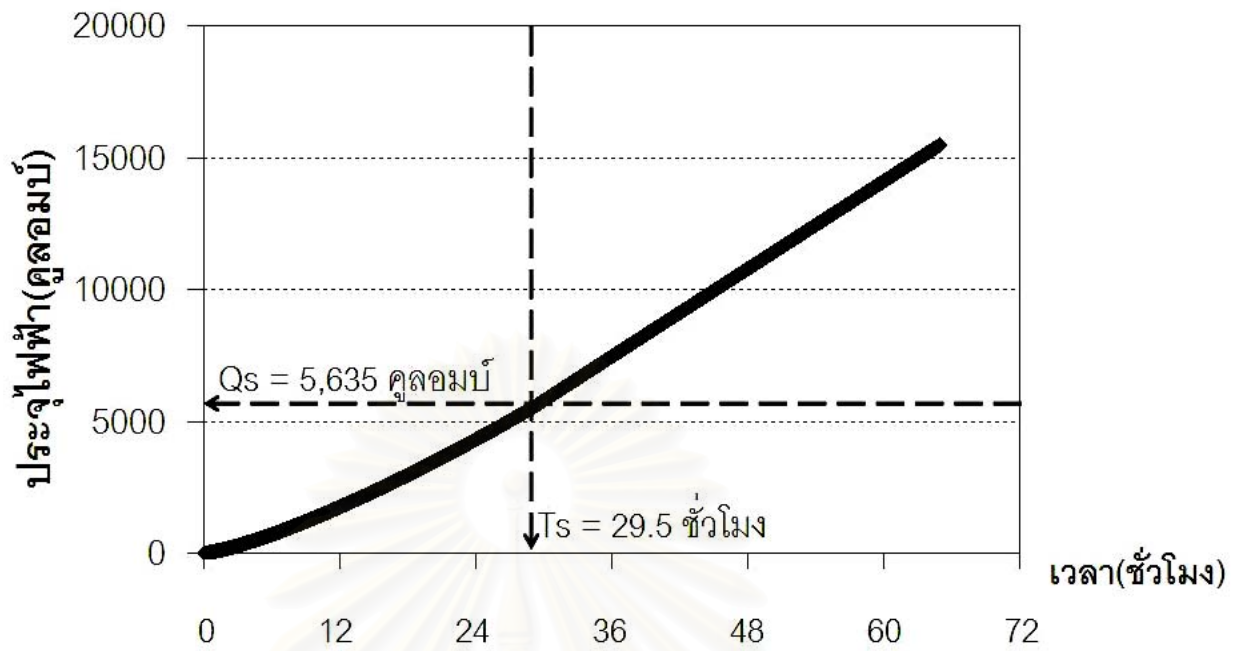
รูปที่ 4.11(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.18 (OPC85%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และรูปที่ 4.11 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่หัวแอนโอดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.18



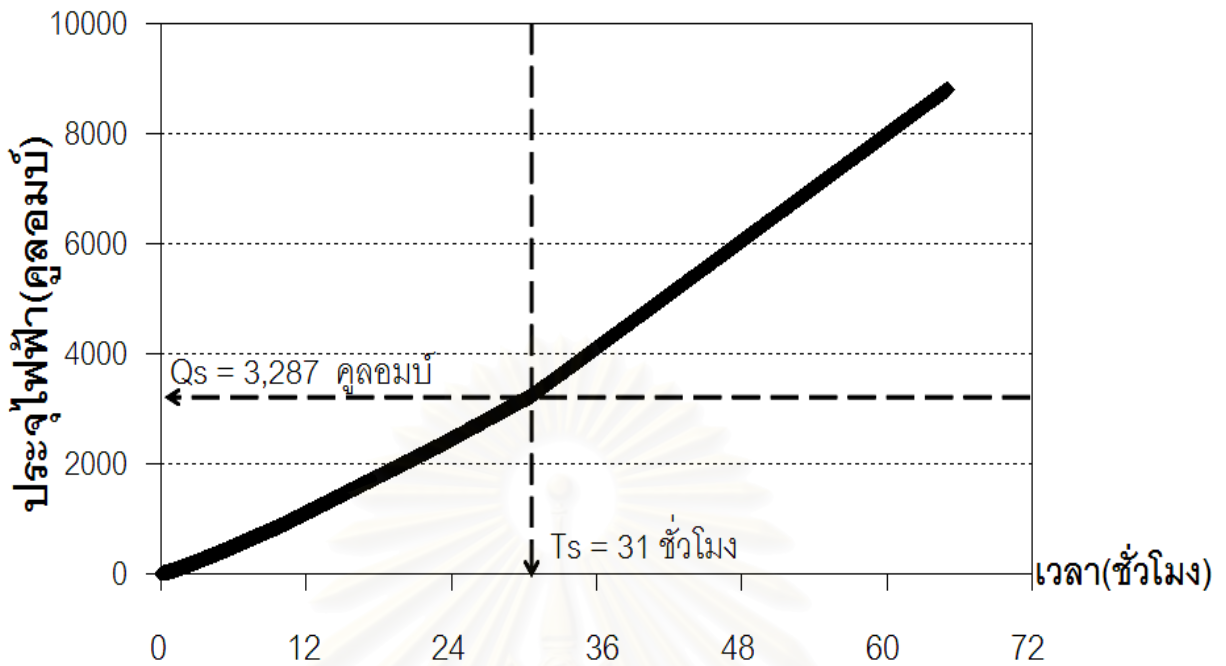
รูปที่ 4.12(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.22 (OPC65%+ RHA10%+FA25%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และรูปที่ 4.12 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนโดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.22



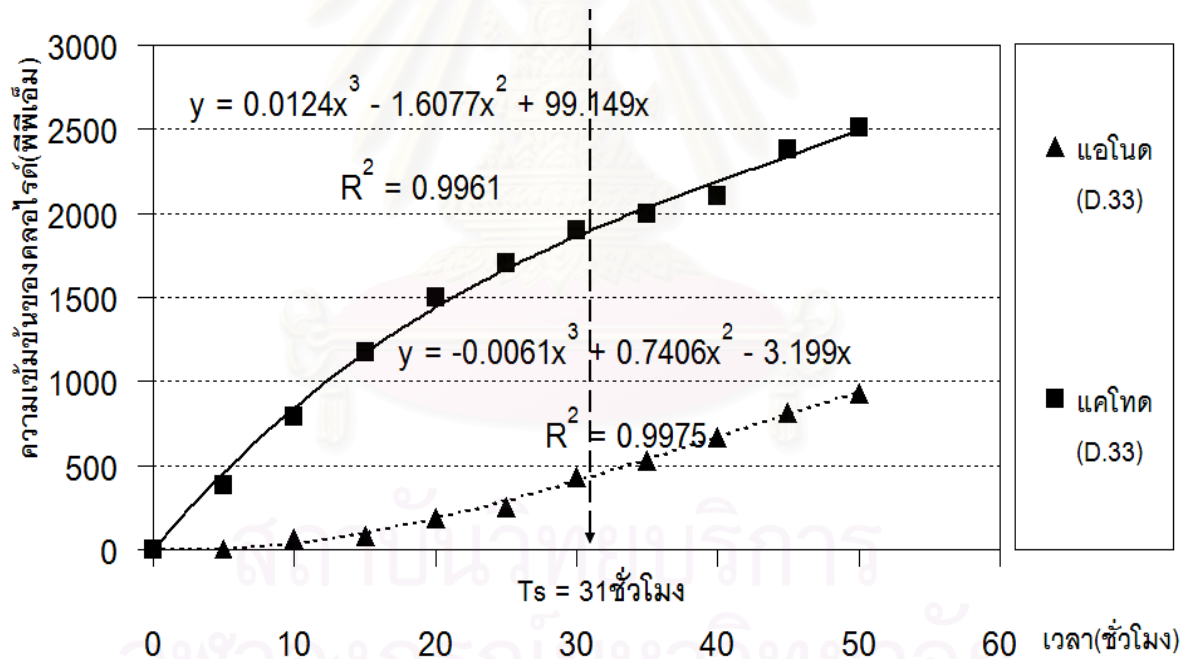
รูปที่ 4.13(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.26 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และรูปที่ 4.13 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.26



รูปที่ 4.14(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.29 (OPC65%+FA35%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และรูปที่ 4.14(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่หัวแอนไฮโดรและแอนไฮโดรเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.29

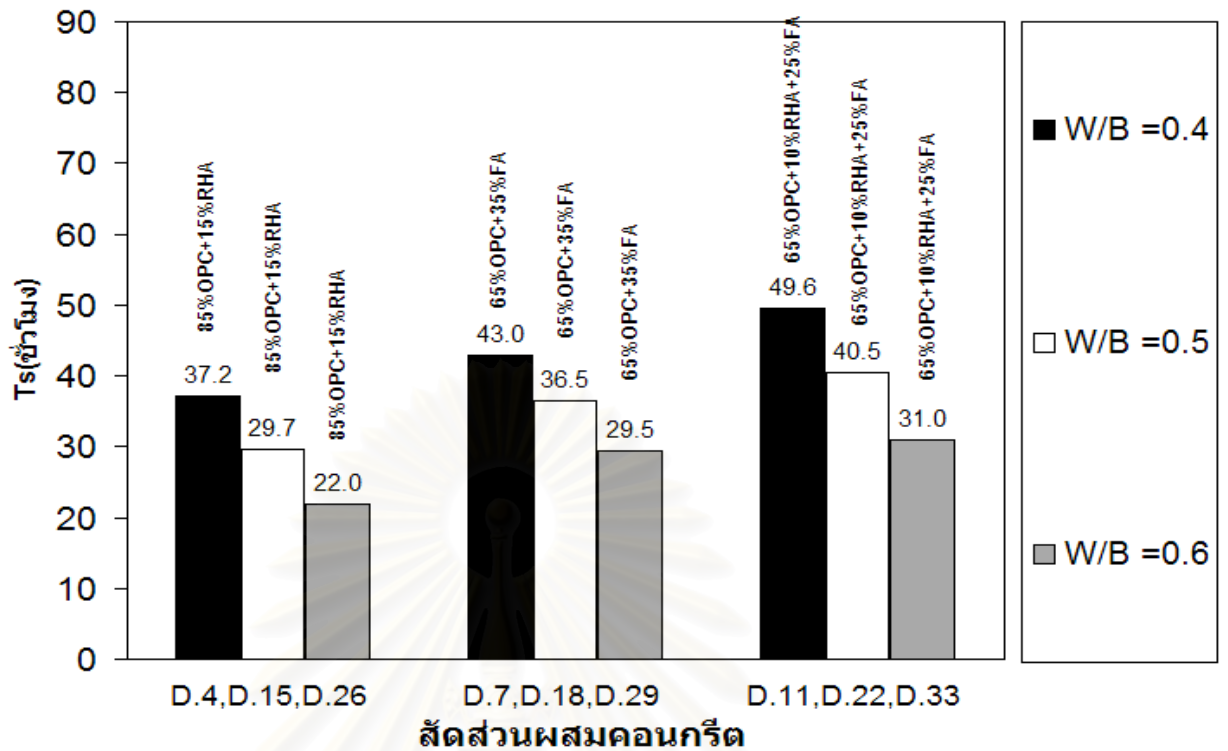


(ก)

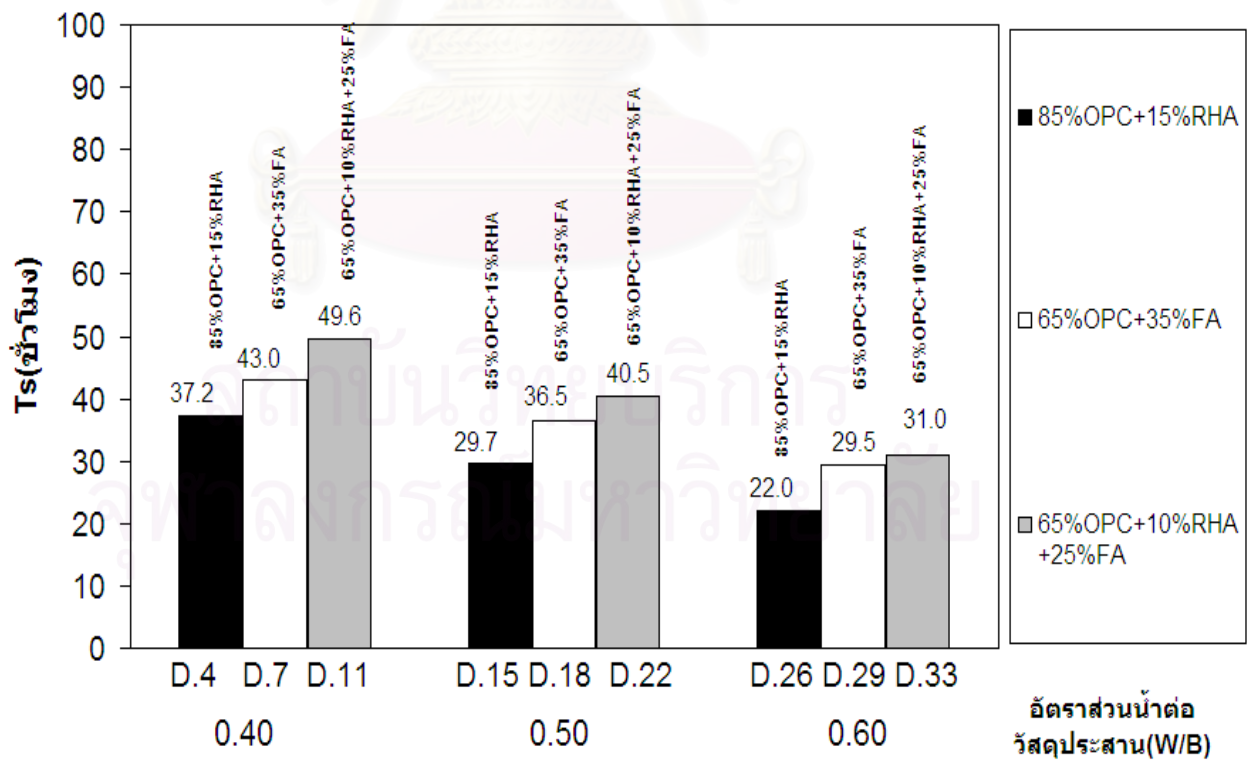


(ข)

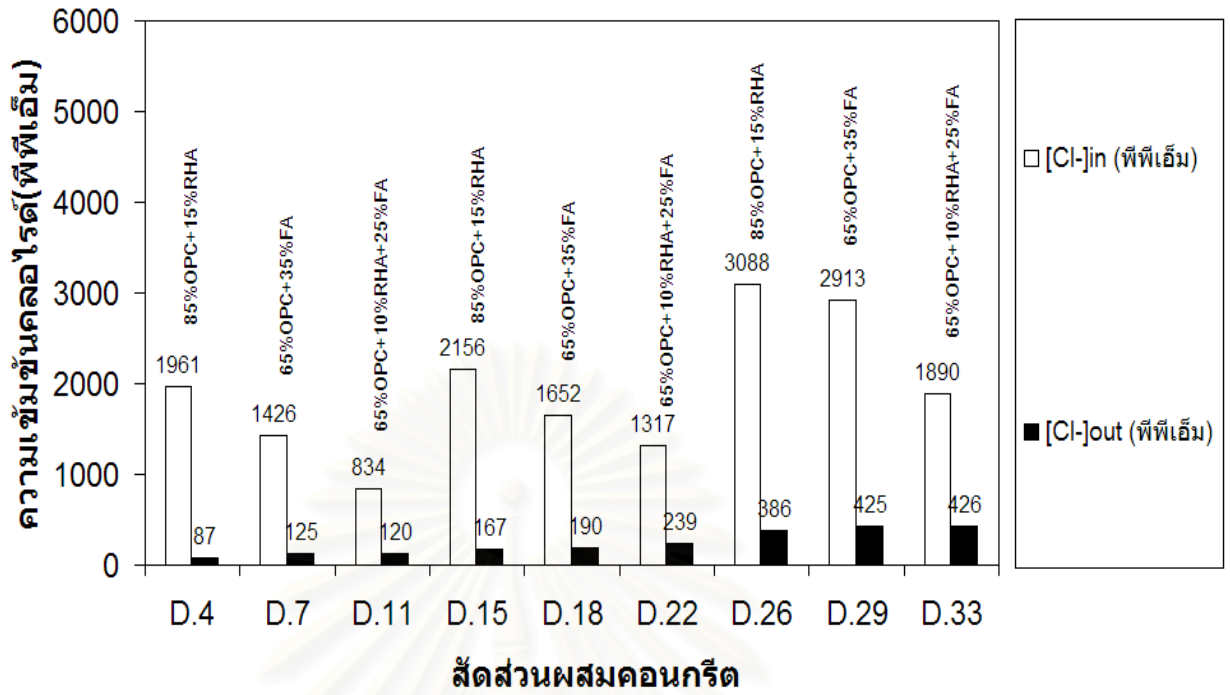
รูปที่ 4.15(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (T_s) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.33 (OPC65%+ RHA10%+FA25%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และรูปที่ 4.15(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนโดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.33



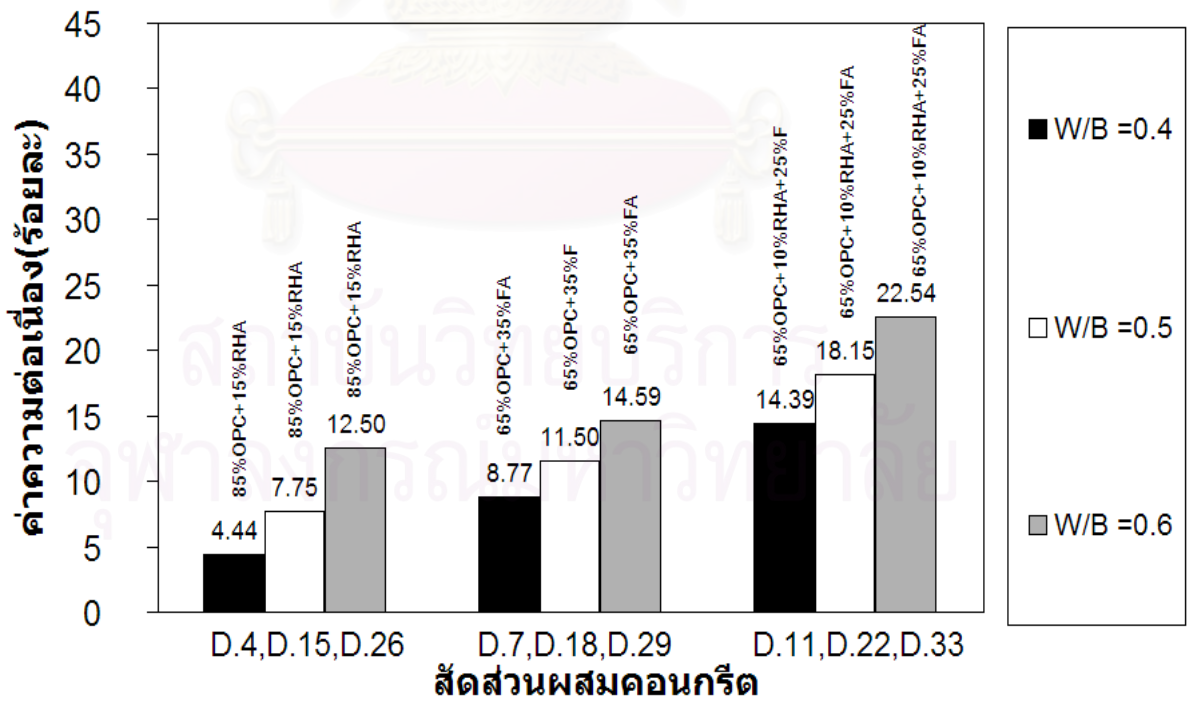
รูปที่ 4.16 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



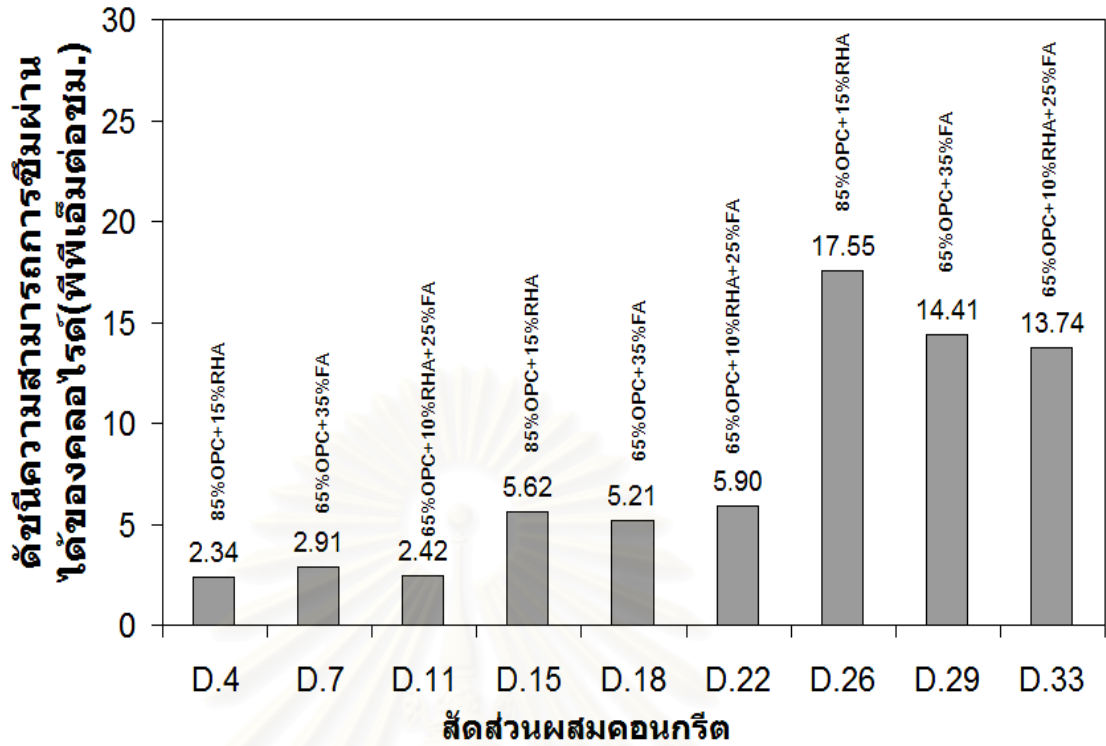
รูปที่ 4.17 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามชนิดของวัสดุประสานที่ใช้



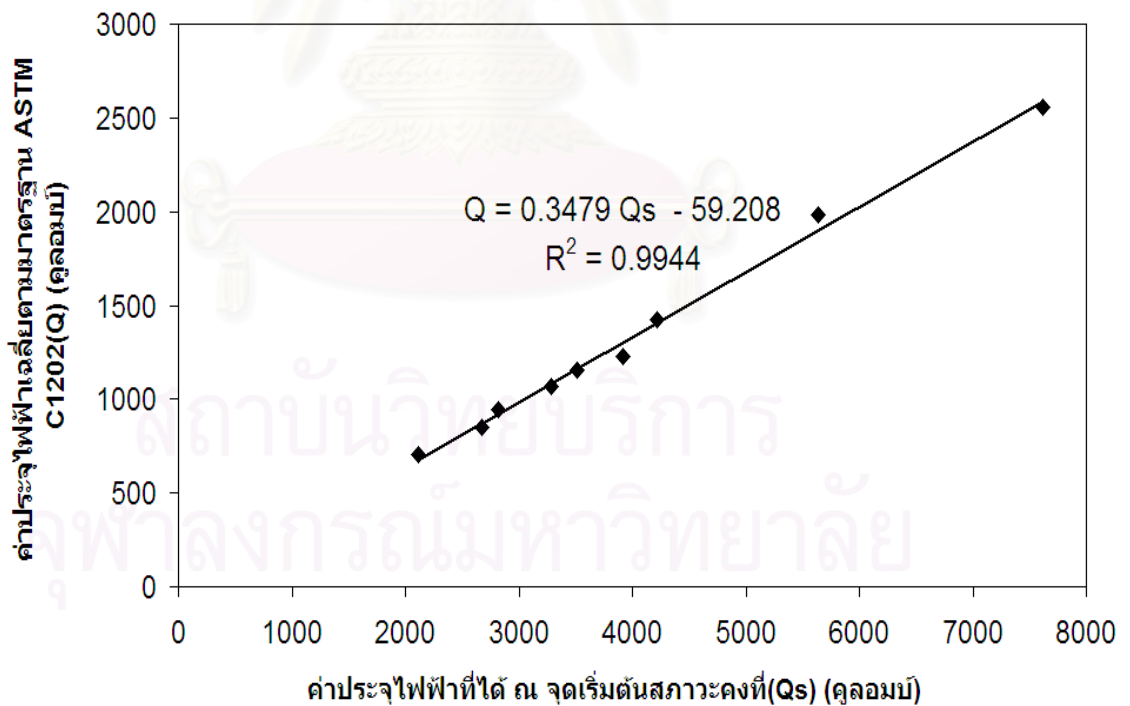
รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้าและออกที่ได้น จุดเริ่มต้นสภาวะคงที่ในแต่ละสัดส่วนผสม



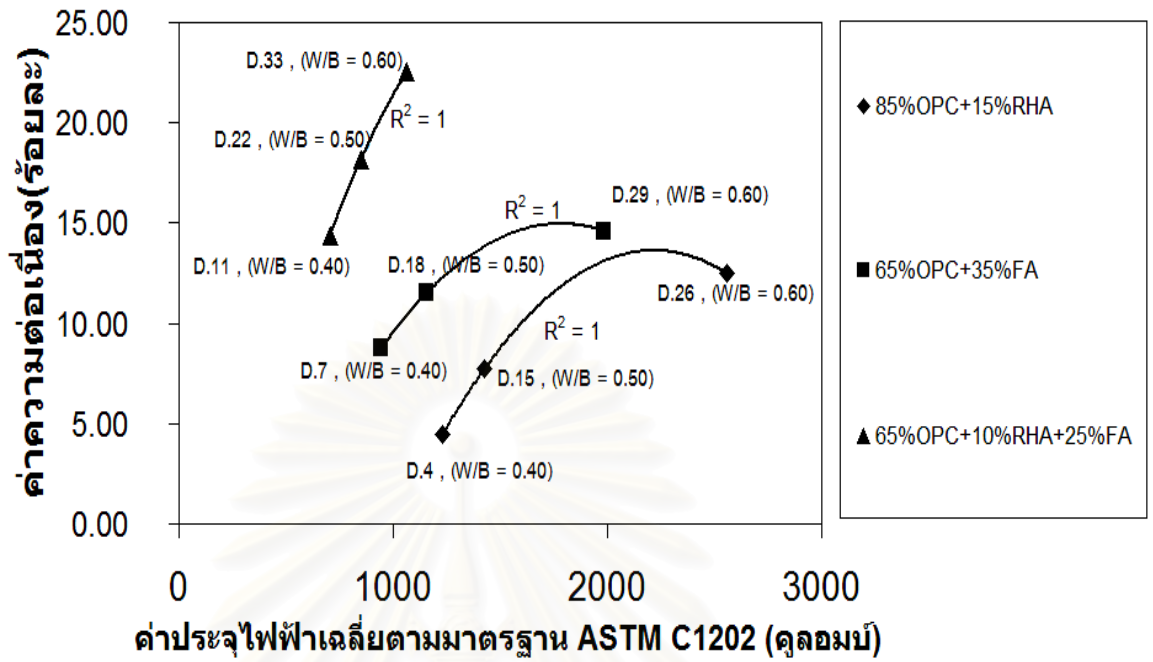
รูปที่ 4.19 ค่าร้อยละของความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสม



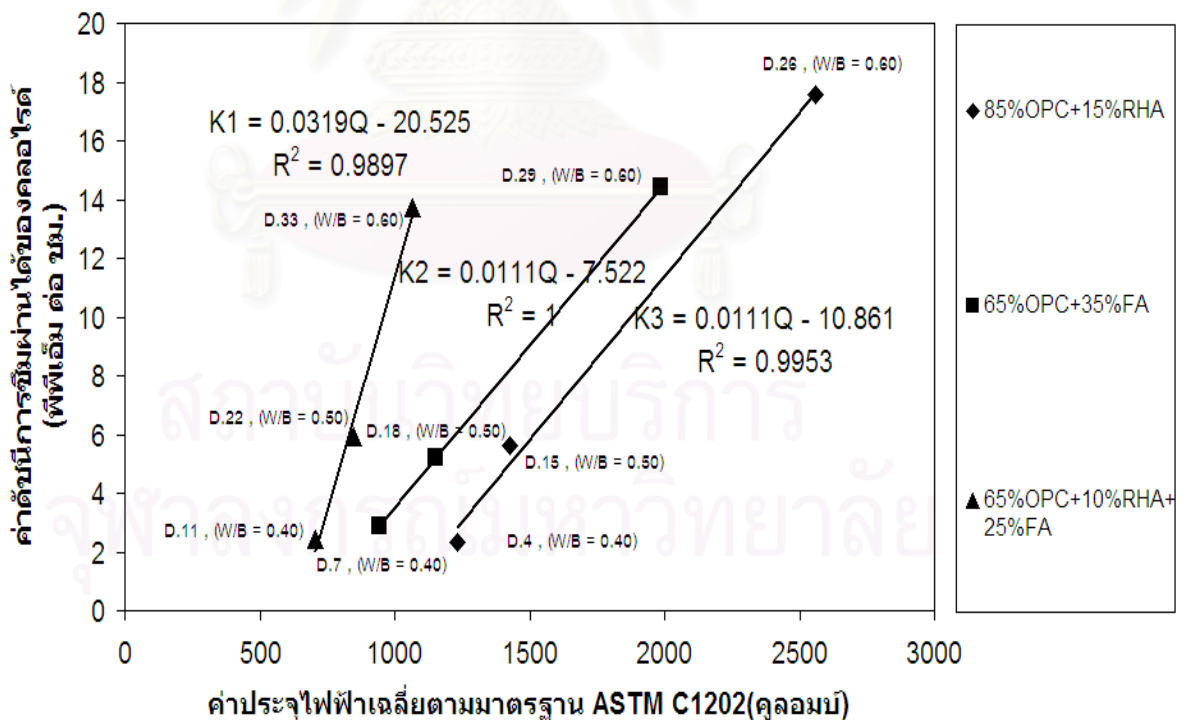
รูปที่ 4.20 ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสม



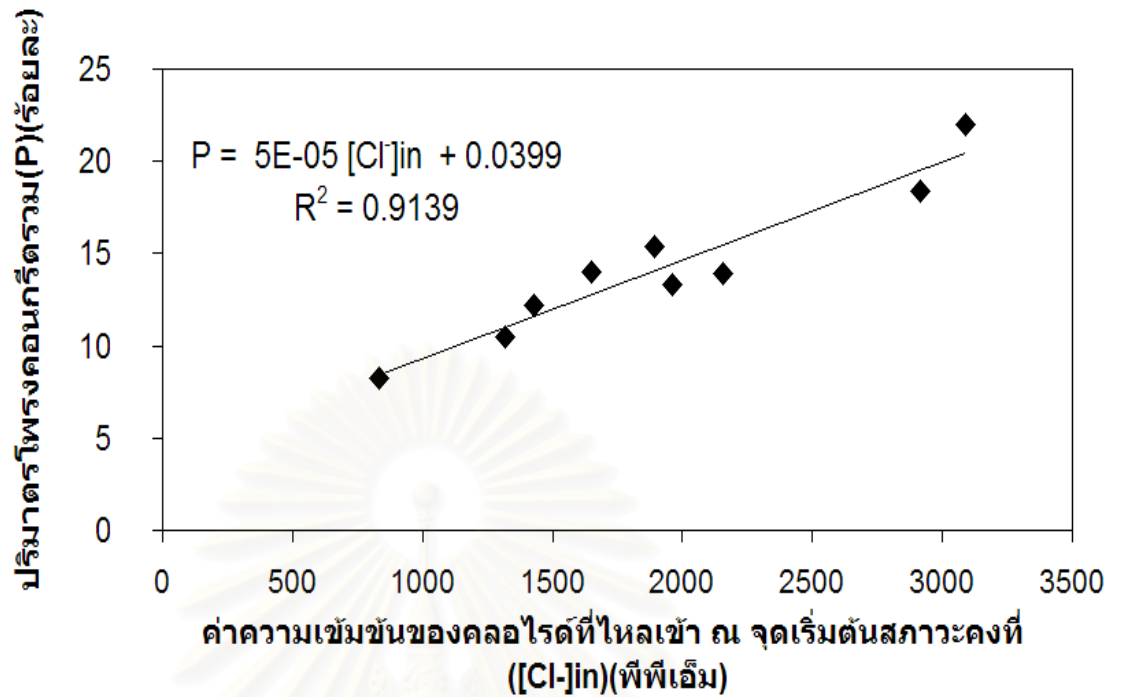
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Qs) เทียบกับ ประจุไฟฟ้า เฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Q)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่อนื่องเทียบกับประจุไฟฟ้า ASTM C1202



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์เทียบกับค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ย ตามมาตรฐาน ASTM C1202



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสถานะคงที่ ($[Cl^-]_{in}$) เมื่อเทียบกับ ปริมาณโพรงคอนกรีตรวมที่ได้จากวิธีเอ็มไอพี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 ทิวไป

ถึงแม้ว่าการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์ นั้นเป็นวิธีใหม่แต่ก็มีแนวโน้มที่น่าสนใจในการนำไปพัฒนาเพื่อที่จะนำไปใช้ในการทดสอบสัดส่วนผสมคอนกรีตซึ่งสัมผัสต่อสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ในเรื่องของระบบโพรงภายในเนื้อคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นเรื่องของปริมาตรรวมของโพรง หรือ ความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตต่อไป

จากการผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ผ่านมาในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับนั้น พอจะสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การทดลองด้วยวิธีประยุกต์ สามารถใช้ในการขยายผลการทดลองค่าคูลอมบ์ (Coulomb Charge Passed) ได้เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากผลการทดสอบที่ได้จากสัดส่วนผสมที่ใช้วัสดุปอซโซลานร่วมกันคือแก้วแกลบร่วมกับแก้วลอย ให้ค่าระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) มากกว่าสัดส่วนผสมที่ใช้วัสดุปอซโซลานชนิดเดียว เช่นเดียวกับอัตราการเพิ่มของความเข้มข้นที่ช้าแอนโดมิค่าน้อยกว่าซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี และการทดสอบกำลังอัดเช่นกัน

5.1.2 การทดลองด้วยวิธีประยุกต์สามารถอธิบายความต่อเนื่องของโพรงในคอนกรีตได้น่าพอใจแต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบยาวนานพอควร เนื่องจากต้องรอจนกว่าก้อนตัวอย่างจะเข้าสู่สภาวะคงที่

5.1.3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบอาจเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่าง และก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นเล็กน้อยที่ช้าแอนโดจากปฏิกิริยาเคมี

5.1.4 ผลการทดสอบในแง่วัสดุประสานที่ใช้พบว่า แก้วแกลบมีคุณสมบัติในการปรับปรุงกำลังอัดในระยะต้นคือที่ 14 วัน สูงขึ้น ในขณะที่แก้วลอยมีคุณสมบัติในการปรับปรุงกำลังอัดในระยะปลายหรือที่ 91วัน ให้สูงขึ้น ดังนั้นผลการทดสอบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานมากกว่าหนึ่งชนิดคือแก้วแกลบ และแก้วลอยเป็นวัสดุประสานร่วมกันจึง พบว่าผลการทดสอบกำลังอัดทั้งในระยะต้นและระยะปลายมีแนวโน้มที่ดีขึ้นมากกว่าการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดเดียวอีกด้วย

5.1.5 ในสภาพที่เกิดขึ้นจริงพบว่าการที่อนุภาคคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าสู่ผิวคอนกรีตและไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้นั้นไม่ได้เกิดจากโพรงคอนกรีตที่ตันเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะเกิดจากอนุภาคคลอไรด์ที่เคลื่อนที่เข้าไปก่อนส่วนหนึ่งนั้นถูกยึดจับด้วยประจุบวกที่เกิดขึ้นของผนังของโพรงคอนกรีต (Pore Walls Effect) ซึ่งอนุภาคประจุบวกเหล่านี้จะทำให้อนุภาคของคลอไรด์มีการสะสมมากขึ้นที่บริเวณผิวและหนาแน่นมากขึ้น (Surface Condensation)^[28-29] ทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้าและเกิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและทำให้เกิดอุปสรรคต่ออนุภาคคลอไรด์ที่จะเคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างในเวลาต่อมา ด้วยเหตุนี้เองอาจจะส่งผลทำให้ผลของการหาปริมาณโพรงคอนกรีตที่ไม่มีความต่อเนื่องเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ เพราะว่าแทนที่คลอไรด์จะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้เนื่องจากโพรงตัน แต่คลอไรด์กลับไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้เนื่องจากเจอแรงผลักของประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ นอกจากนี้แล้วความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นอีกอย่างหนึ่งคือ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีระยะเวลาที่นาน และมีความร้อนเกิดขึ้นจึงเป็นไปได้ที่อาจจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณโพรงภายในเนื้อคอนกรีตอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดสอบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเคลื่อนที่ของอนุภาคคลอไรด์นั้นพบว่าอนุภาคคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ที่ถูกกระแสไฟฟ้าเร่งให้เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่อิมมิตัวอยู่ในสารละลายบางส่วนอาจมีการถูกยึดจับ ด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Binding) ทำให้เปลี่ยนแปลงเป็นคลอไรด์ที่ถูกตรึงให้อยู่กับที่ (Fixed Chloride) ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ หรือที่เรียกว่า เกลือของฟรีเดิลท์ (Friedel's Salts) ซึ่งวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ได้ดีนั้นจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานมากกว่าเพื่อเป็นคอนกรีตที่ทนต่อน้ำทะเล เนื่องจากสามารถที่จะปกป้องไม่ให้อนุภาคของคลอไรด์อิสระเคลื่อนที่เข้าสู่เหล็กเสริมในระดับที่ลึกเพิ่มขึ้นได้ โดยองค์ประกอบทางเคมีที่รู้จักกันดีว่าสามารถเปลี่ยนอนุภาคคลอไรด์อิสระให้กลายเป็นเกลือของฟรีเดิลท์ได้ คือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) สำหรับการทดลองนี้พบว่ามีการใช้วัสดุประสานที่มีทั้งเถ้าแกลบและเถ้าลอยร่วมกันจึงน่าสนใจที่จะเจาะก้อนตัวอย่างหลังจากที่ทำการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์แล้ว เพื่อนำมาซึ่งได้จากก้อนตัวอย่างนั้นมาทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content) ที่เป็นประเภทปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนที่ได้ หรือคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) และปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนที่ไม่ได้ หรือ คลอไรด์ที่ถูกตรึงให้อยู่กับที่ (Fixed Chloride) ที่ระดับความลึกต่าง ๆ กันจากนับจากผิวของก้อนตัวอย่าง โดยตลอดความหนาของ

ก่อนตัวอย่าง เพื่อดูศักยภาพในด้านเคมีว่าในแต่ละสัดส่วนผสมนั้นมีความสามารถในการ
ต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้มากน้อยต่างกันเพียงใด เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์นั้น
ไม่สามารถตอบคำถามในเชิงปฏิกิริยาเคมีในแต่ละสัดส่วนผสมได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Bear J. and Braester C.. Fundamental of Transport Phenomenon in Porous Media. Amsterdam: Elsevier, 1972.
2. Rose D.A.. Water Movement in Unsaturated Porous Materials. RILEM Bulletin. (29) (1965): 119-124.
3. The Concrete Society. A Review of Methods and Experience. Report of a Concrete-Society Working Party. Concrete Society Technical Report No.31 London (Aug.,1988): 95-96.
4. Washburn. The Dynamics of Capillary Flow. The Physics Review. XVII(3) (Mar.,1921): 273-283
5. Min-Hong Zhang and V.Mohan Malhotra. High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as Supplementary Cementing Material. ACI Materials Journal Vol .Nov-Dec (1996): 629-636.
6. Nabil Bouzoubaa, Alain Bilodeau, Vasantthy Sivasundaram, et al. ACI Material-Journal Vol.Jan-Feb (2004): 19-29.
7. ASTM C1202. Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion-Penetration. Annual Book of American Society for Testing Materials Standards Vol.C04.02 (1993): 620-625.
8. Caijun Shi. Another Look at the Rapid Chloride Permeability Test. CJS Technology-Inc. L7M2Z2. 2116 Upland Dr. , Burlington, Ontario, Canada , 1998.
9. Andrade C., Alonso C.,and Goni S.. Possibilities for Electrical Resistivity to Universally Characterise Mass Transport Processes in Concrete. Economic and Durable Construction Through Excellence 2, (1993): 1639-1652.
10. Andrade C. and Sanjuan M.A.. Experimental Procedure for the calculation of the Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Migration Tests. Advance in Cement Research 6, 23 (1993): 127-134.
11. Chung-Chia Yang. Relationship between Migration Coefficient of Chloride Ions and Charge Passed in Steady State. ACI Materials Journal Vol. Mar-Apr (2004): 124-130
12. Neville A.M.. Properties of Concrete. London : Pitman Books Ltd., 1981.

13. Powers T.C.. Structure and Physical Properties of Hydrated Portland Cement Paste. Journal of the American Ceramic Society 41(1) (Jan.,1958): 1-6.
14. Diem Paul. Determination of Capillary Absorptiveness of very dense concrete. Betonwerk und Fertigteil-Technik 52(11) (Nov.,1986): 719-724.
15. Metha P.K., and Manmohan D.. Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes. Chemistry of Cement 7th International Congress (1980): 5-6.
16. Midgley H.G. and Illuston J.M.. Some Comments on the Microstructure of Hardened Cement Pastes. Cement and Concrete Research (13) (1983): 197-206.
17. Nieminen Pertti and Romu Marti. Porosity and Frost Resistance of Clay Bricks Proceeding 8th International Brick/Block Masonry Conference. Ireland (1988): p.103-109.
18. Parrott L.J. and Killoh D.C.. Prediction of Cement Hydration. The Chemistry and Chemically Related Properties of Cement, British Ceramic Proceeding (35) (Sept.,1984): 41-53.
19. Parrott L.J.. Effect of Changes in U.K. Cement upon Strength and Recommended Curing Times. Concrete, Journal of the Concrete Society (Sept.,1985): 22-24.
20. Metha and P.Kumar. Concrete: Structures, Properties and Materials. Prentice-Hall-Inc. Englewood Cliff, New Jersey (Jan.,1986): 450-451.
21. Van Brakel J.V., Modry S., and Svata M.. Mercury Porosimetry. State of Art. Powder-Technology (29) (1981):1-12.
22. Lowell S. and Shields J.E.. Powder Surface Area and Porosity. Second Edition, p.205-216. New Yorks : Chapman and Hall, 1984.
23. Washburn E.W.. Note on Method of Determining the Distributions of Pore Sizes in Porous Materials. Proc.Natl.Acad.Sci. (7) (1921): 115-116.
24. Diamond S.. Methodologies of Pore Sizes Distribution Measurements in Hydrated Cement Pastes: Postulates, Peculiarities, and Problems. Malts, Res.Soc., Proc.Symp. on Pore Struct. and Perm.Cem.Mtls. (137) (1989): 83-89.
25. Winslow D.N.. Advances in Experimental Techniques for Mercury Intrusion Porosimetry. Surface and Colloid Science (29) p.259-282. NY: Egon Matijevic and Robert J.Good, 1984.

26. Hearn N. and Hooton R.D.. Sample Mass and Dimension Effects on Mercury Intrusion Porosimetry Results. Cem.Concr. Res. (22) (1992): 970-980.
27. Winslow D.N. and Lowell C.W.. Measurement of Pore Sizes Distributions in Cements, Aggregates and Soils. Powder Technology (29) (1981) :1-12.
28. Tsuyoshi Maruya, Yasunori MATSUOKA, et al.. Simulation of Chloride Movement in Hardened Concrete. Concrete Library of JSCE No.20 (Dec.,1992): 57-70.
29. Tsuyoshi Maruya, Yasunori MATSUOKA, et al.. Modelling of Chloride Ion Movement in the Surface Layer of Hardened Concrete. Concrete Library of JSCE No.32 (Dec., 1998): 69-84.
30. Detwiler R.J., Kjellsen K.O. and Gjorv O.E.. Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different temperature. ACI Materials Journal 88, 1 (1991): 19-24.
31. Alford N.M. and Rahman A.A.. An Assesment of Porosity and Pore Sizes in Harden Cement Pastes. J. Mater.Sci. 16, (1981): 3105-3114.
32. Kalousek G.L. and Benton E.J.. Mechanism of Sea Water Attack on Cement Pastes. ACI Jour. Proc. 67 (1970): 187-191.
33. คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ความคงทนของคอนกรีต, หน้า 40-57.
34. Powers T.C.. Structure and Physical Properties of Hydrated Portland Cement Paste. Journal of the American Ceramic Society 41(1) (Jan.,1958): 1-6.
35. Feldman R.F. and Sereda P.J.. A Model for Hydrated Portland Cement Paste as Deduced from Sortion- Length Change and Mechanical Properties. RILEM-Bulletin 1(6):509-520. Paris (Nov.-Dec., 1968).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

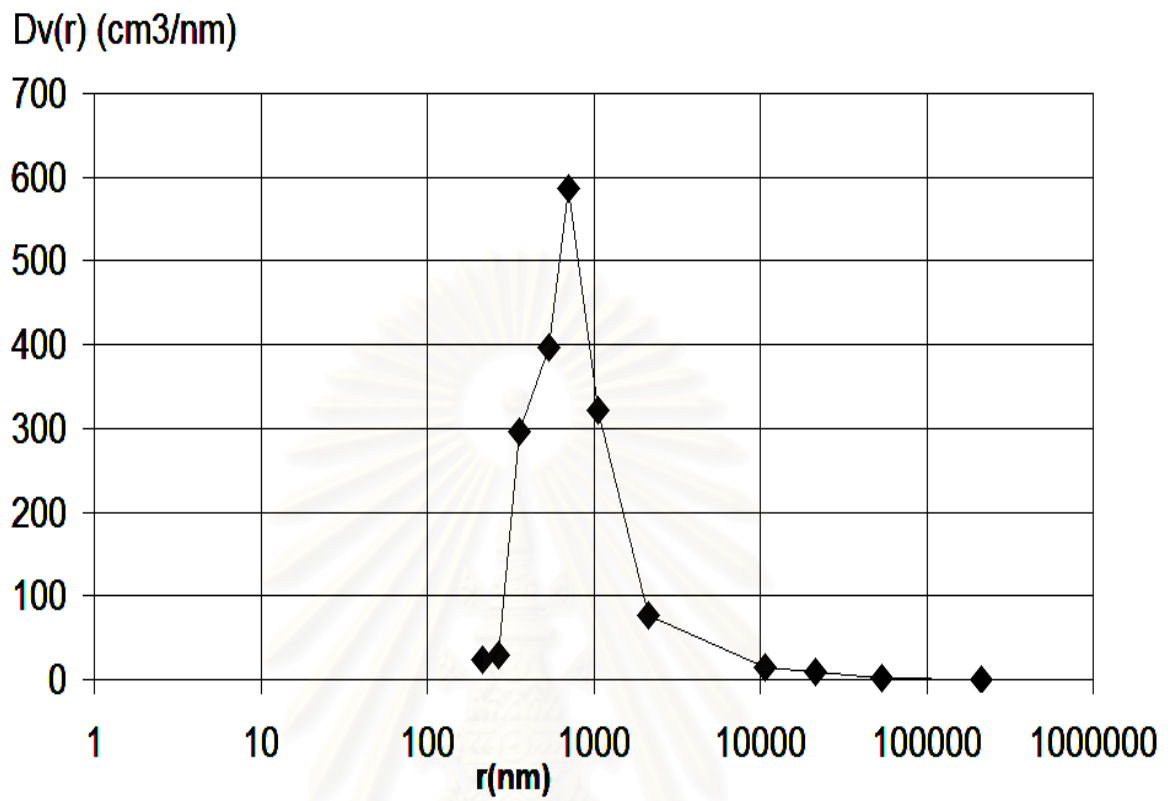
ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณค่าการกระจายขนาดของโพรงโดยวิธีเอ็มไอพี

ในห้องทดสอบโดยวิธีเอ็มไอพีจะต้องมีการทำการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับความดันที่ใช้ในการอัดพรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีตของก้อนตัวอย่าง และจะมีการเพิ่มความดันขึ้นทีละน้อยเรื่อยๆ โดยจะบันทึกค่าปริมาตรของพรอทที่ถูกอัด (V) และที่ความดัน (P) โดยในแต่ละขั้นตอนที่มีการเพิ่มความดัน (ΔP) จะทำให้ปริมาตรของพรอทถูกอัดเข้าไปสู่โพรงคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็นปริมาตร (ΔV) จากสมการ (2.4) ถึง (2.8) ทำให้เราสามารถคำนวณหาการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ในรูปแบบความสัมพันธ์ของการกระจายสะสมของปริมาตรโพรงคอนกรีตเทียบกับขนาดโพรงคอนกรีตที่มีรัศมี (r) ต่างๆกันหรือ การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ซึ่งถูกแทนด้วย $Dv(r)$ และสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตาราง ก.1 และสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ ก.1

ตารางก.1 แสดงการหาค่าการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตโดยวิธีเอ็มไอพี

P(psia)	ΔP (psia)	r(nm)	V(cm ³)	ΔV (cm ³)	$\frac{\Delta V}{\Delta P}$ (cm ³ /psia)	Dv(r) (cm ³ /nm)
50	50	213400	0.085	0.085	1.700	0.40
200	150	53350	0.142	0.057	0.380	1.42
500	300	21340	0.251	0.109	0.363	8.51
1000	500	10670	0.330	0.079	0.158	14.81
5000	4000	2134	0.461	0.131	0.0328	76.85
10000	5000	1067	0.633	0.172	0.0344	322.4
15000	5000	711.3	0.772	0.139	0.0278	586.25
20000	5000	533.5	0.825	0.053	0.0106	397.39
30000	10000	355.7	0.860	0.035	0.0035	295.19
40000	10000	266.8	0.862	0.002	0.0002	29.99
50000	10000	213.4	0.863	0.001	0.0001	23.43
60000	10000	177.8	0.863	0.000	-	-



รูปที่ ก.1 แสดงการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้จากค่าในตาราง ก1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบ

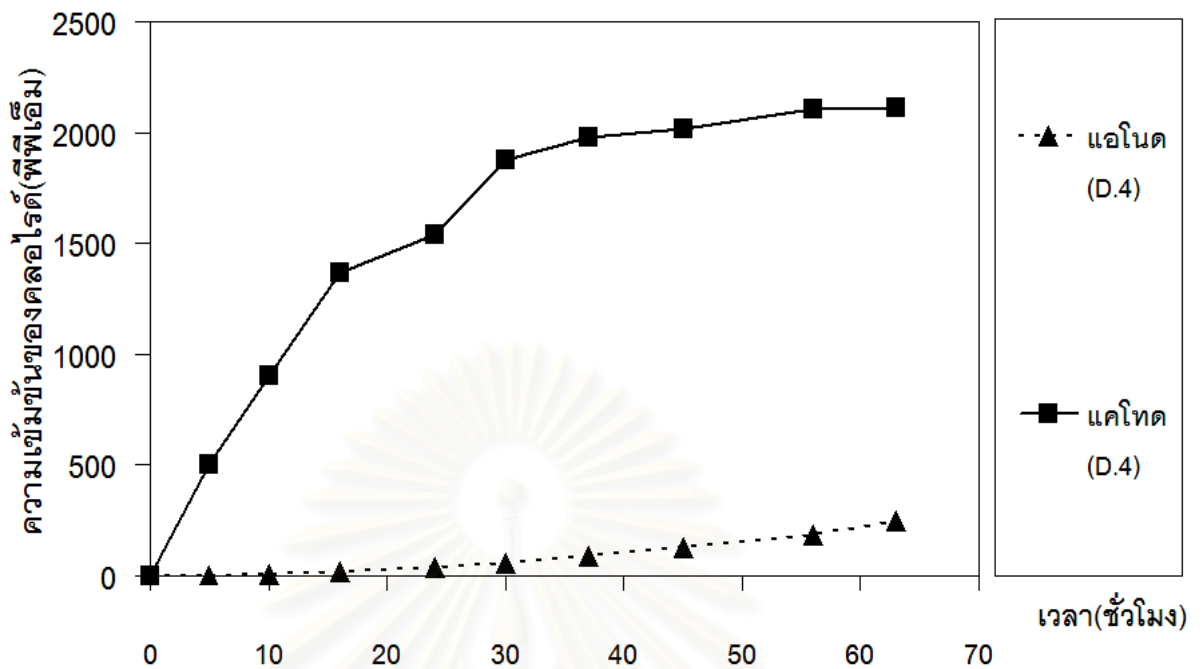
ข.1 ผลการทดสอบโดยวิธีประยุกต์

รูปที่ ข.1 - ข.9 ได้จากการนำค่าของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในสารละลายที่ชั่วแอตโนดและแคโทดที่ทำการทดสอบได้ ณ เวลาต่างๆกัน ของคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสมได้แก่ D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 โดยข้อมูลดิบก่อนที่นำมาวิเคราะห์ผลตามสมมติฐานในงานวิจัย

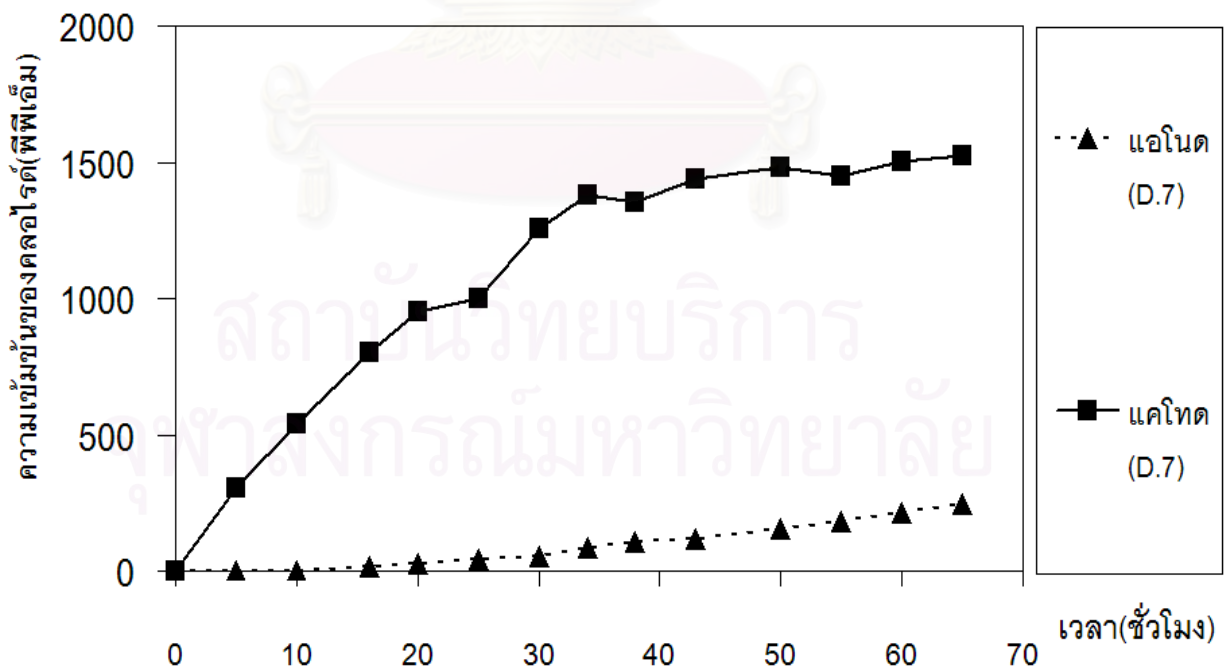
รูปที่ ข.10-ข.18 ได้จากการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านก้อนตัวอย่างทั้ง 9 สัดส่วนผสม ณ เวลาต่างๆแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณกลับเป็นประจุไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ซึ่งใช้ในการหาช่วงเวลาที่เป็นจุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts)

ข.2 ผลการทดสอบโดยวิธีเอ็มไอพี

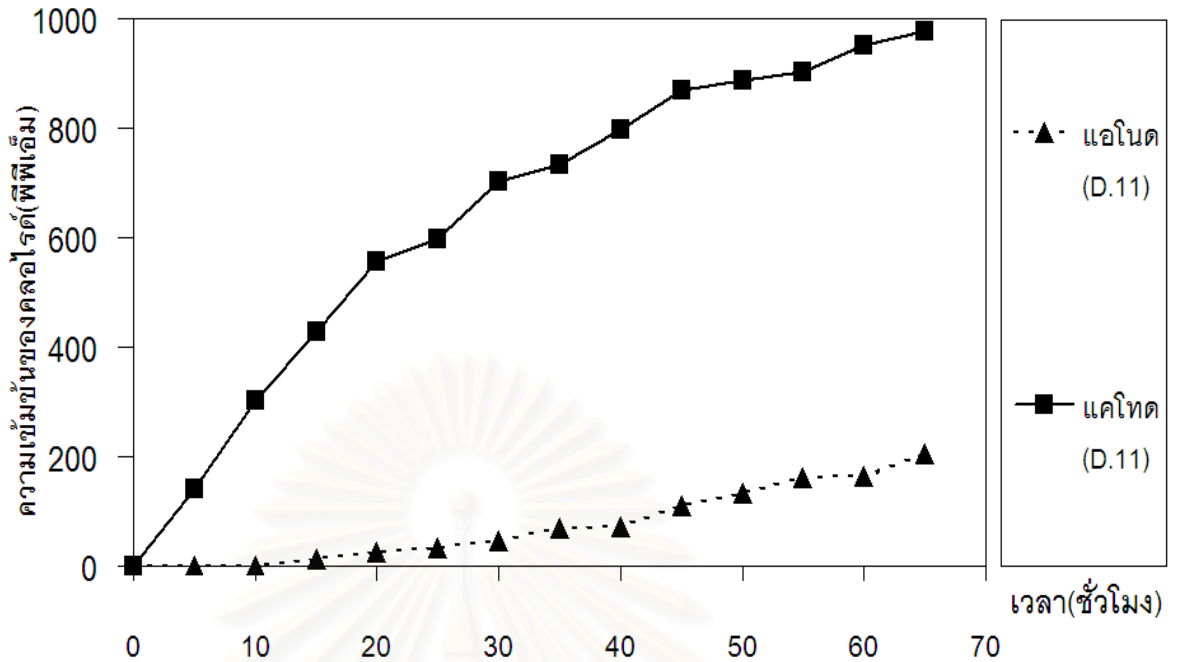
รูปที่ ข.19-ข.27 แสดงข้อมูลของกราฟการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตสะสม (Cumulative Pore Size Distribution) โดยวิธีเอ็มไอพีของคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



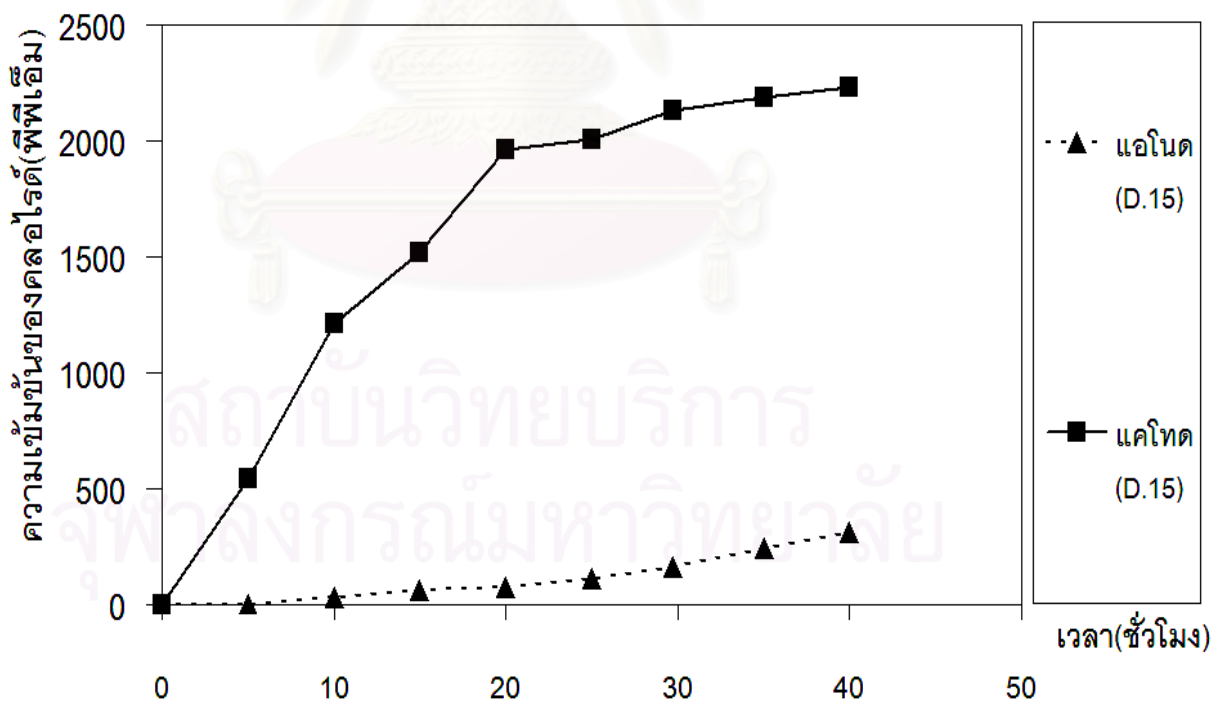
รูปที่ ข.1 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอนโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.4 (85%OPC+15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



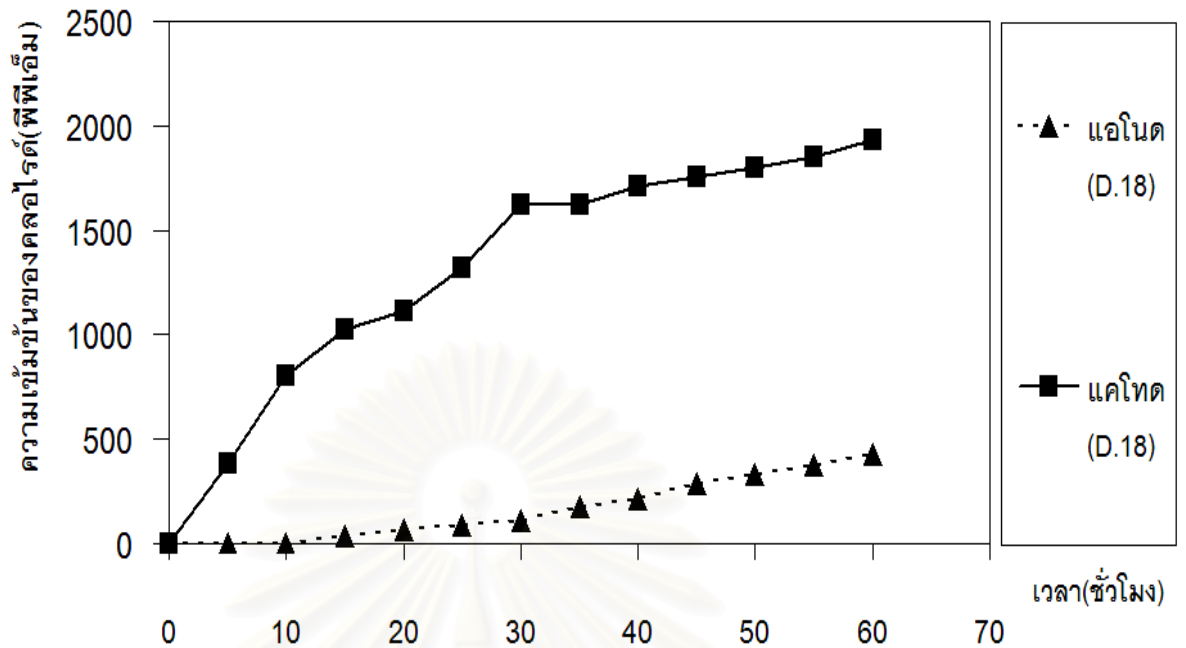
รูปที่ ข.2 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอนโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.7 (65%OPC+35%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



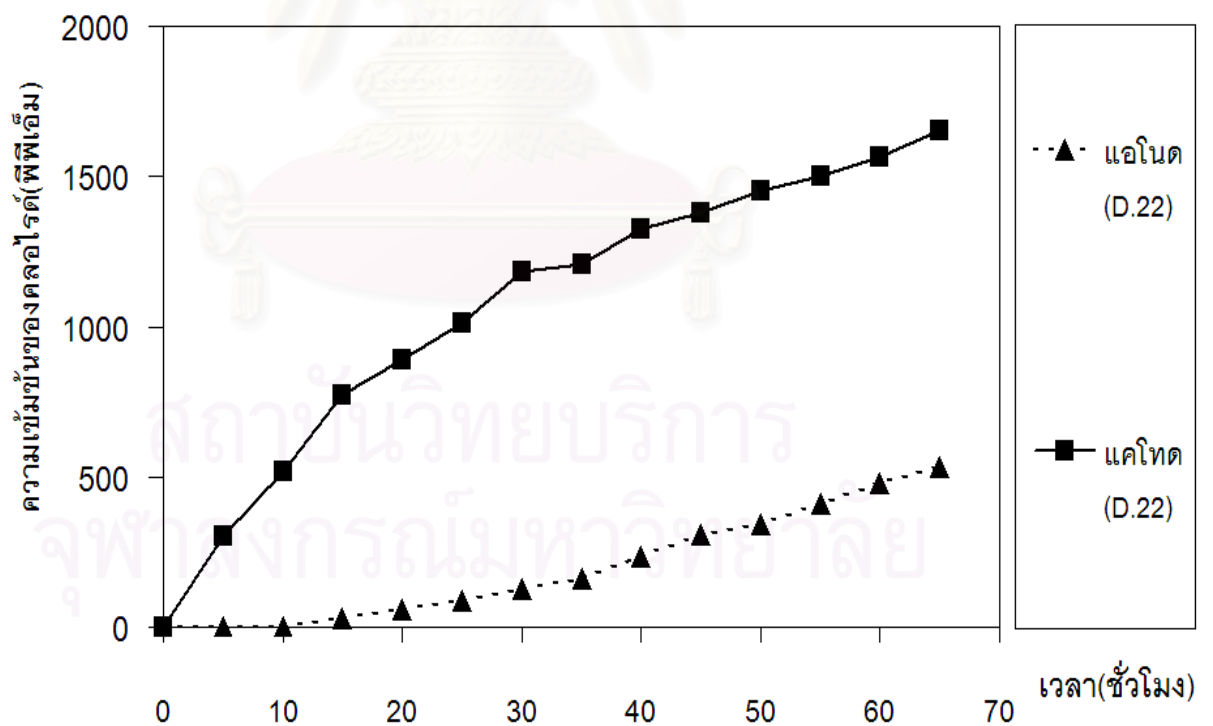
รูปที่ ข.3 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอมโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



รูปที่ ข.4 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอมโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.15 (85%OPC+15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

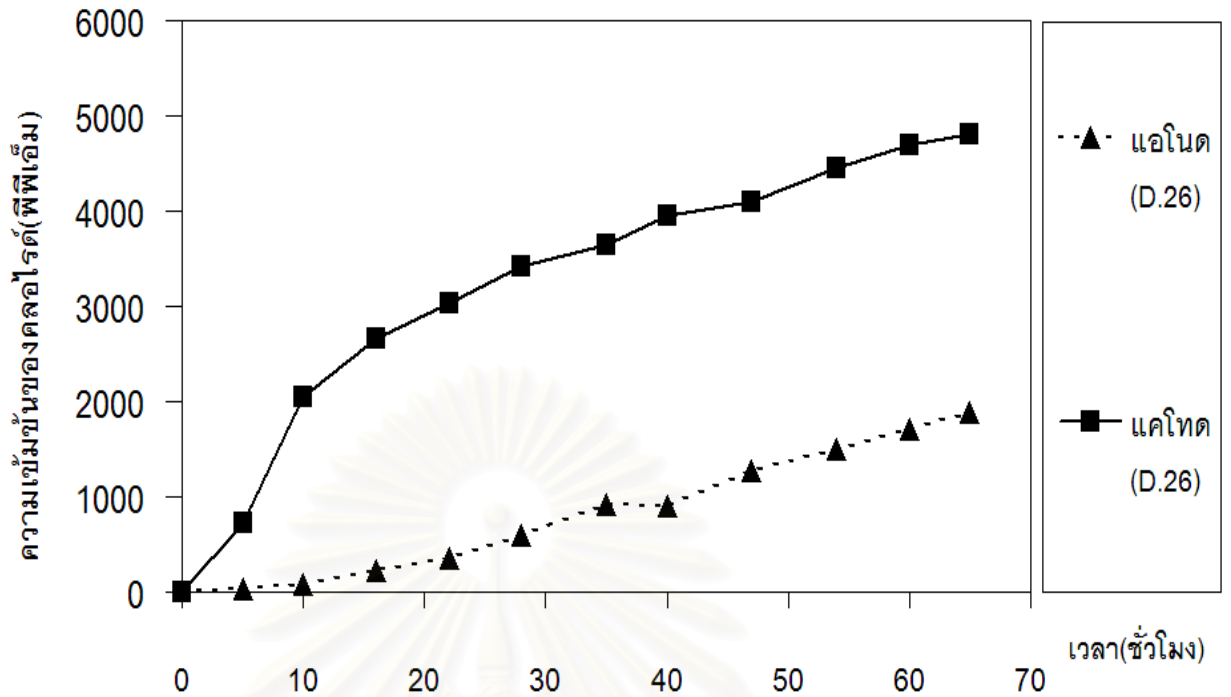


รูปที่ ข.5 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.18 (65%OPC+35%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

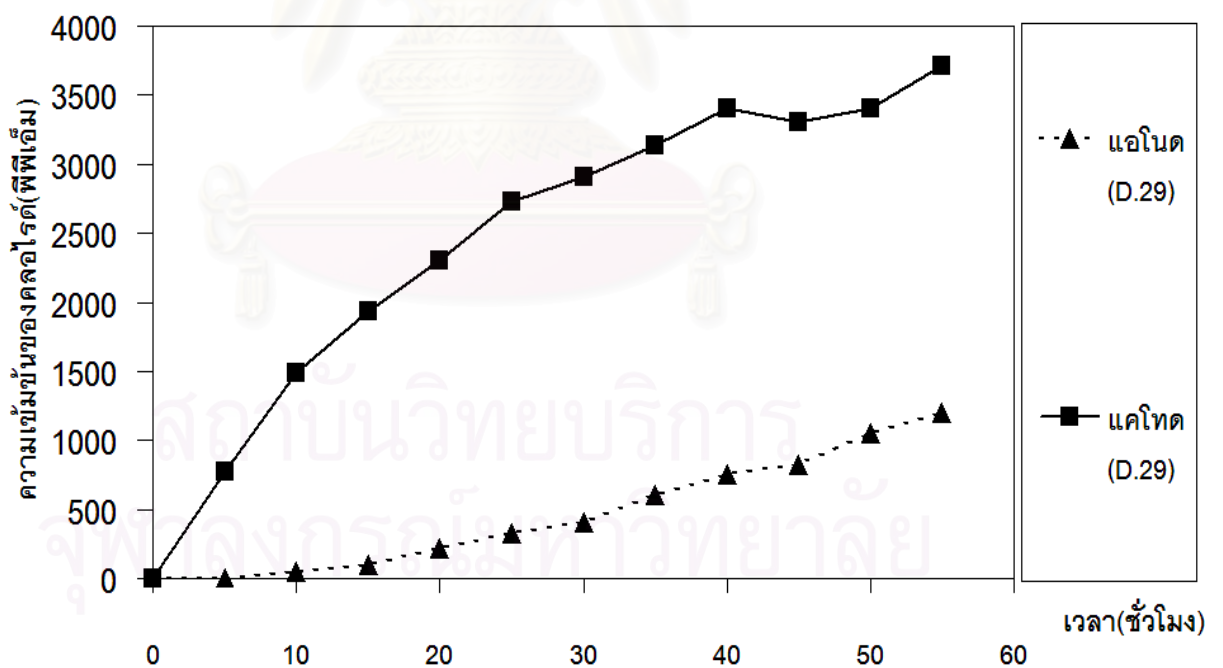


รูปที่ ข.6 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ

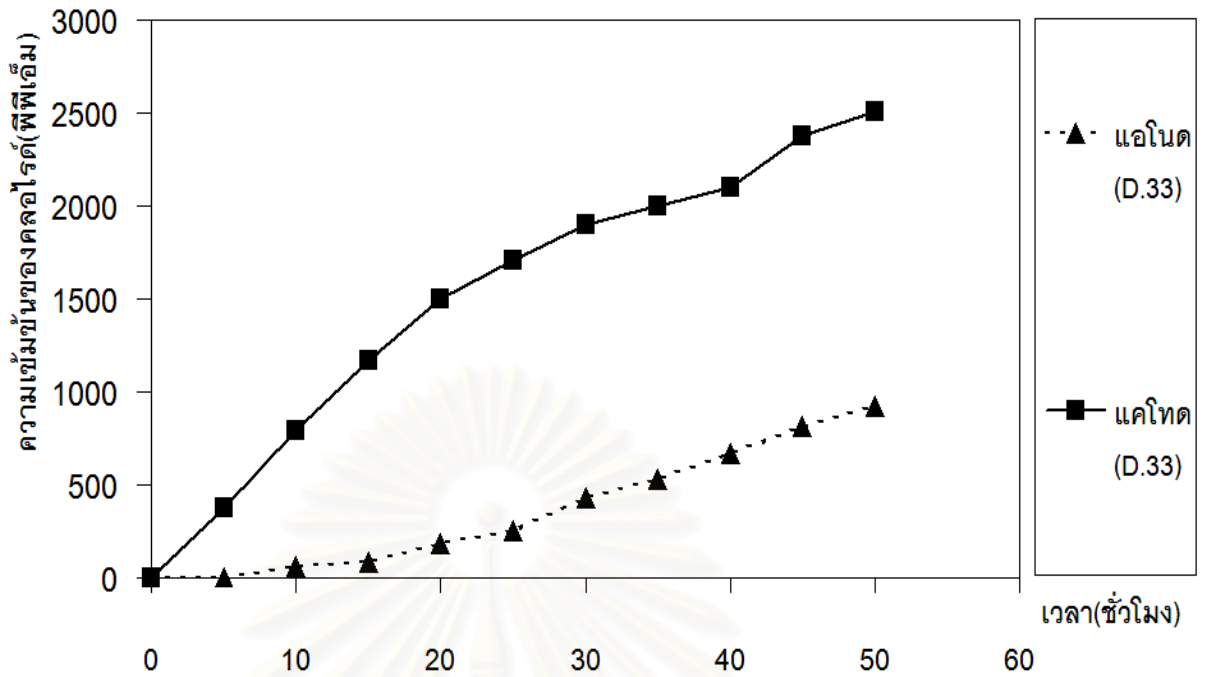
ของสัดส่วนผสม D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



รูปที่ ข.7 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอมโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของลัดส่วนผสม D.26 (85%OPC+15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

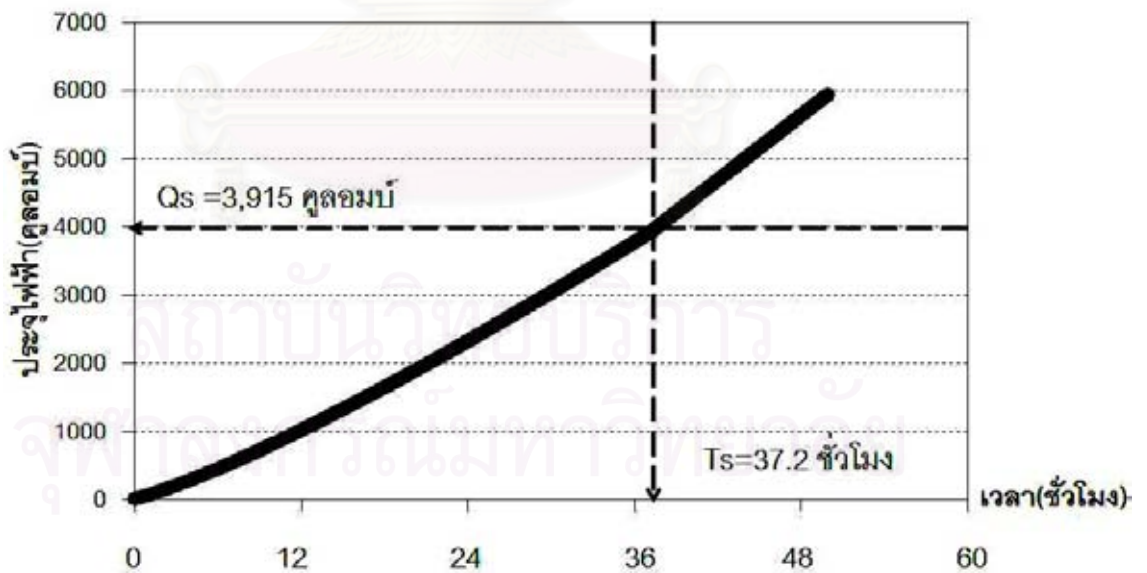


รูปที่ ข.8 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณขั้วแอมโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของลัดส่วนผสม D.29 (65%OPC+35%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



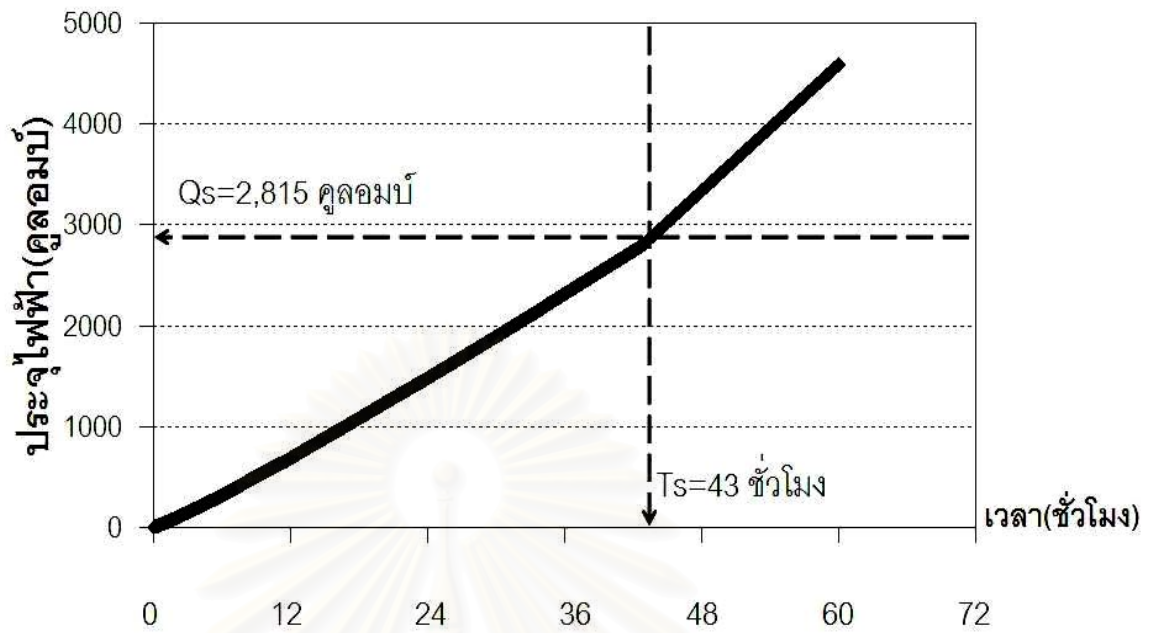
รูปที่ ๙.๙ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวแอนโตนและแคโทดที่เวลาต่างๆ

ของสัดส่วนผสม D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

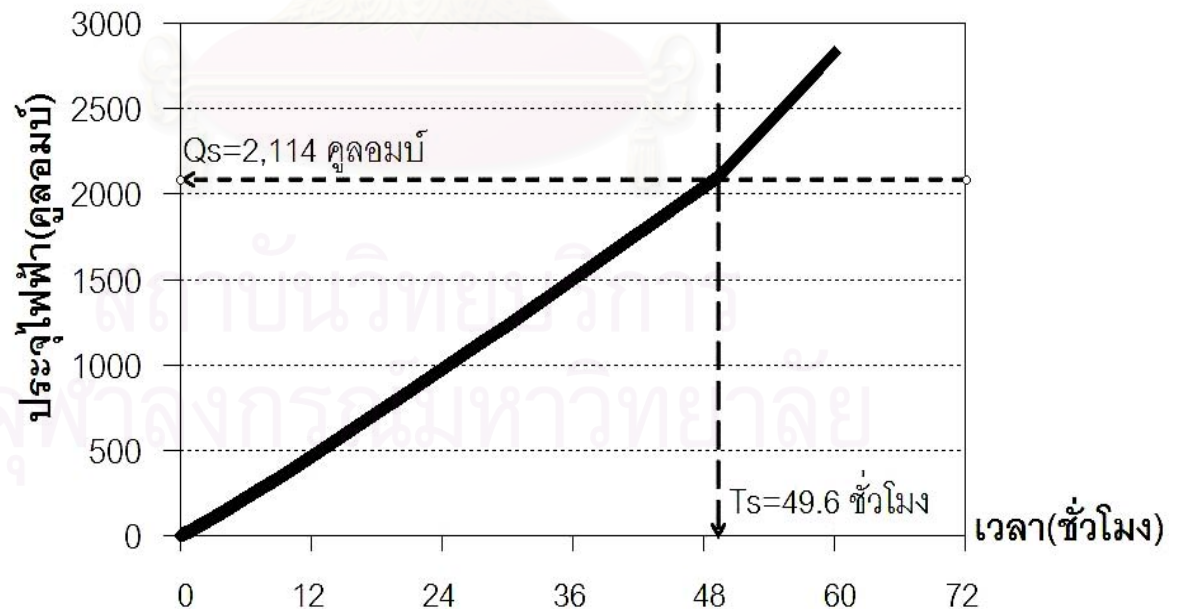


รูปที่ ๙.๑๐ การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของสัดส่วนผสม D.4

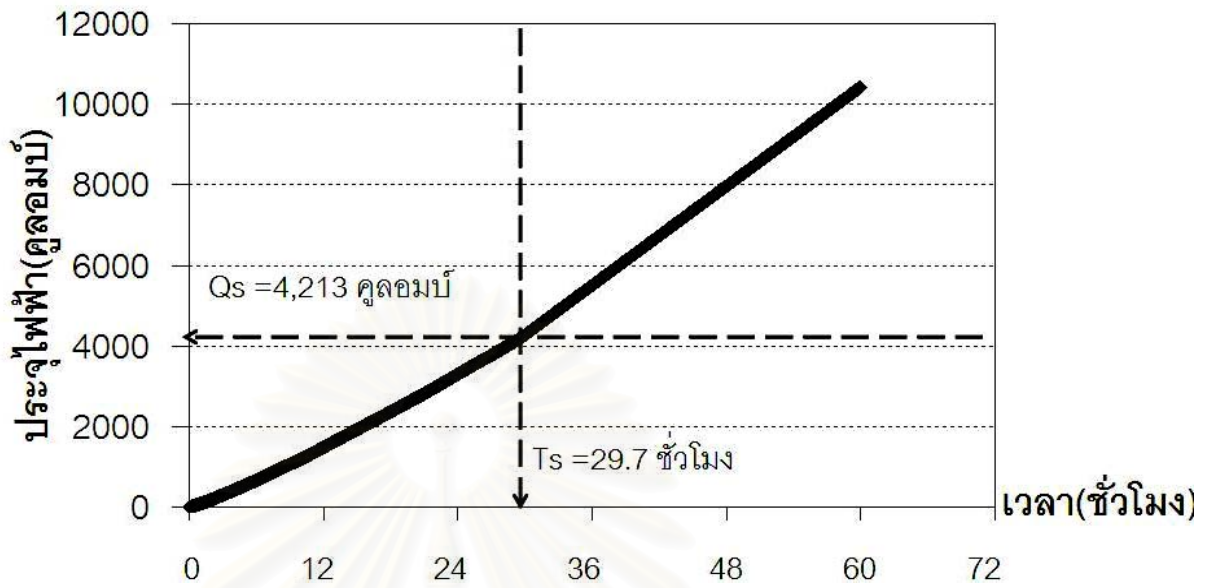
(85%OPC+15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



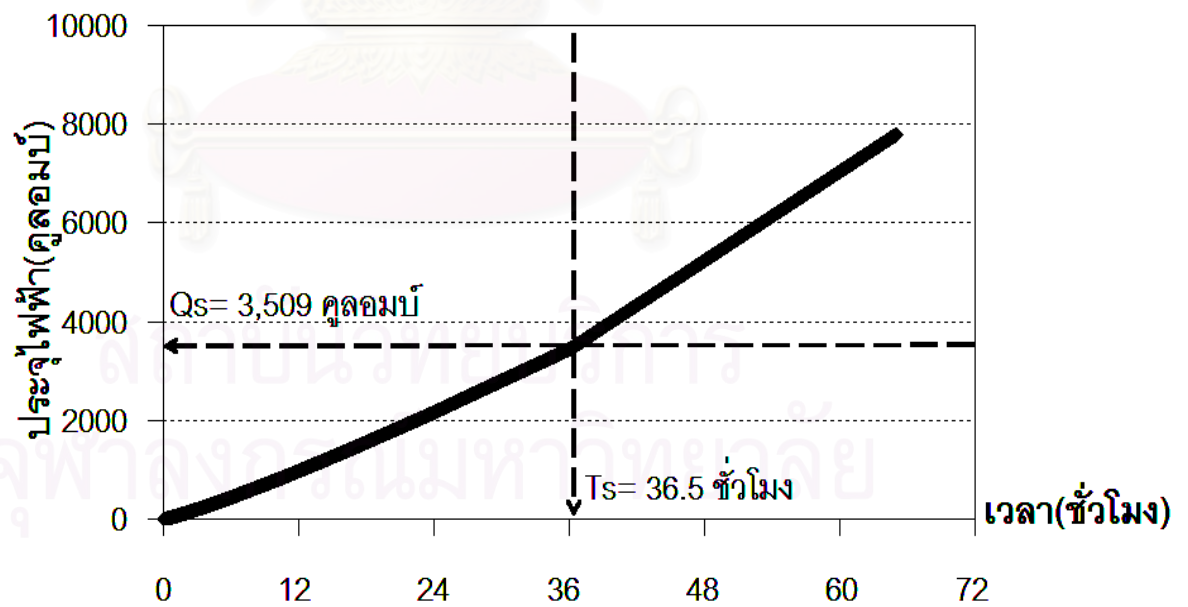
รูปที่ ข.11 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของสัดส่วนผสม D.7
(65%OPC+ 35%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



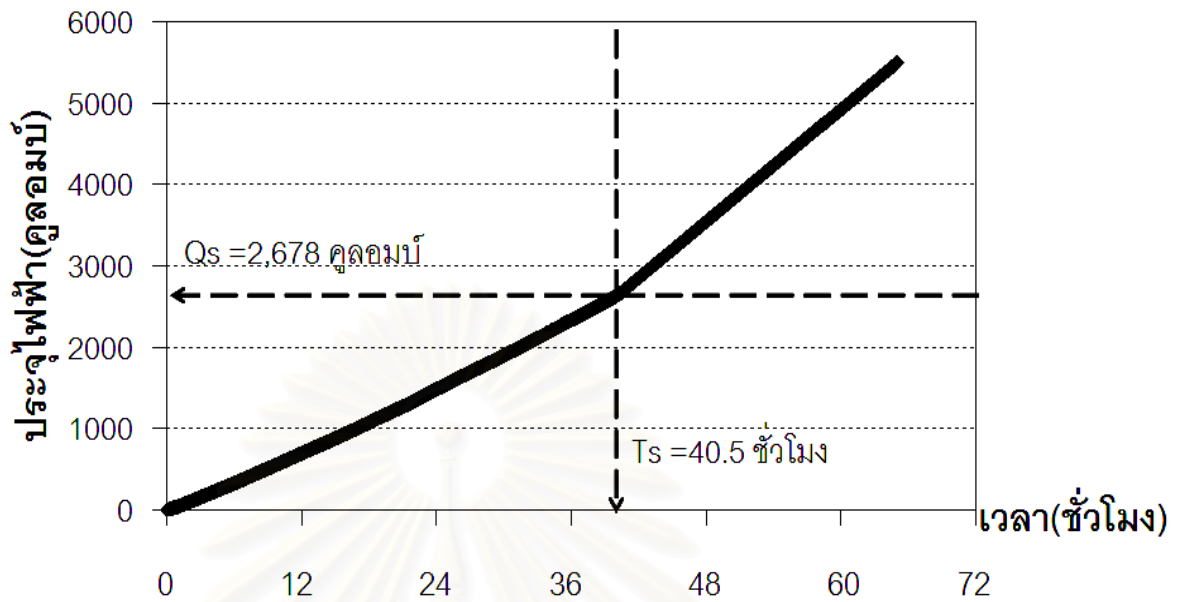
รูปที่ ข.12 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของสัดส่วนผสม D.11
(65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



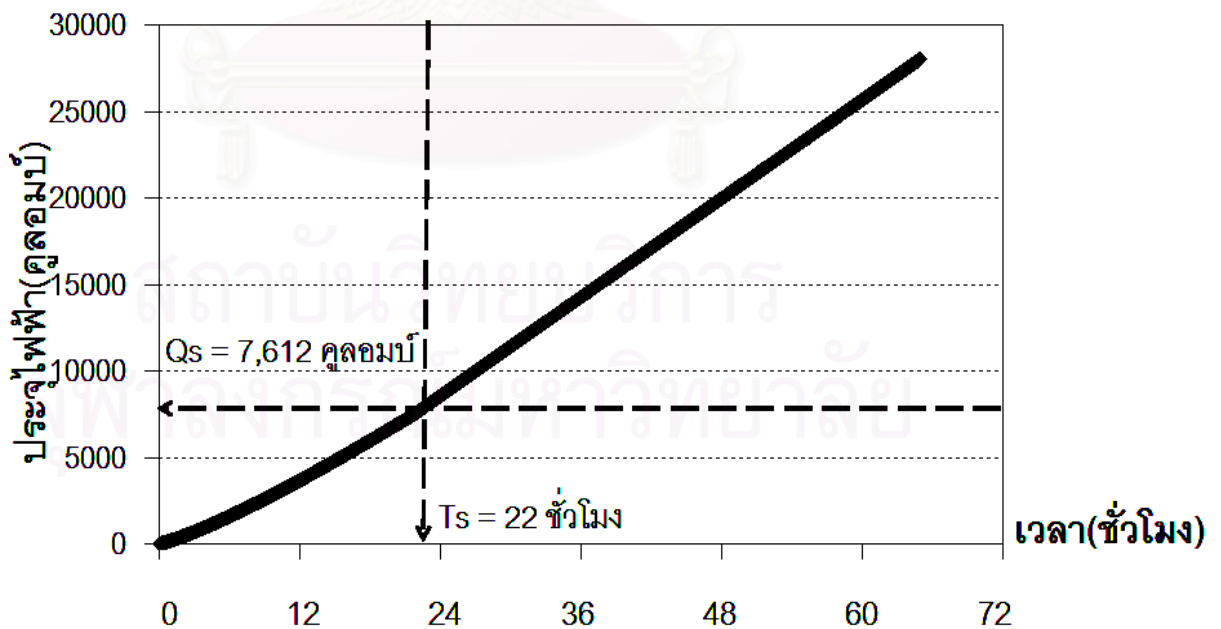
รูปที่ ข.13 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของลัดส่วผสม D.15
(85%OPC+15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



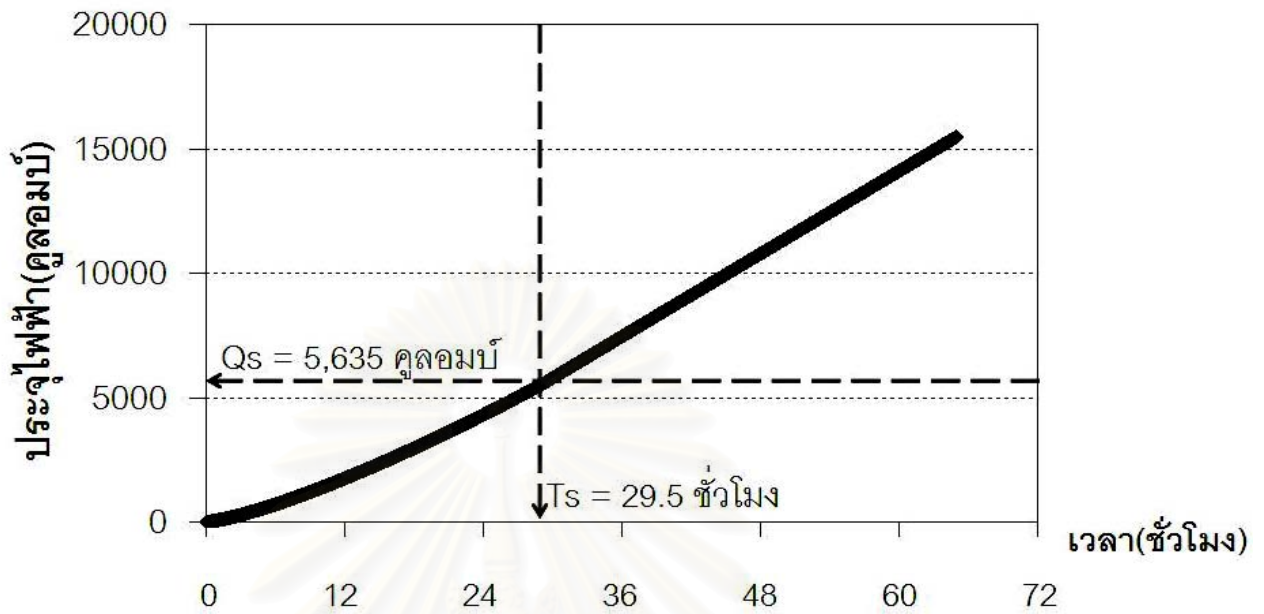
รูปที่ ข.14 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของลัดส่วผสม D.18
(65%OPC+ 35%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



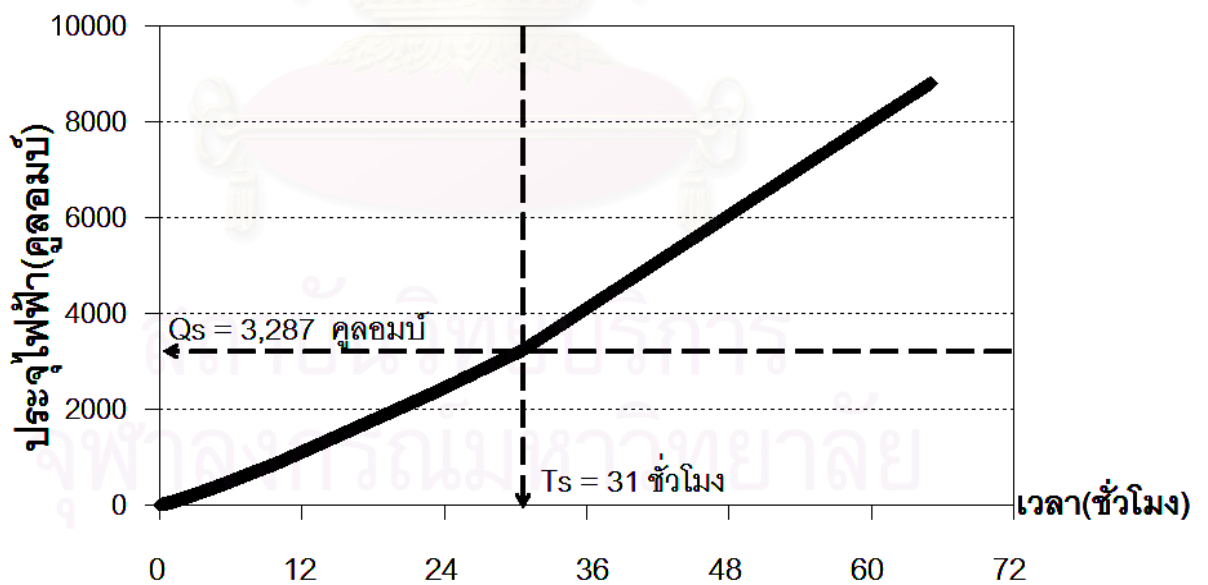
รูปที่ ข.15 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Qs) และระยะเวลา (Ts) ของสัดส่วนผสม D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



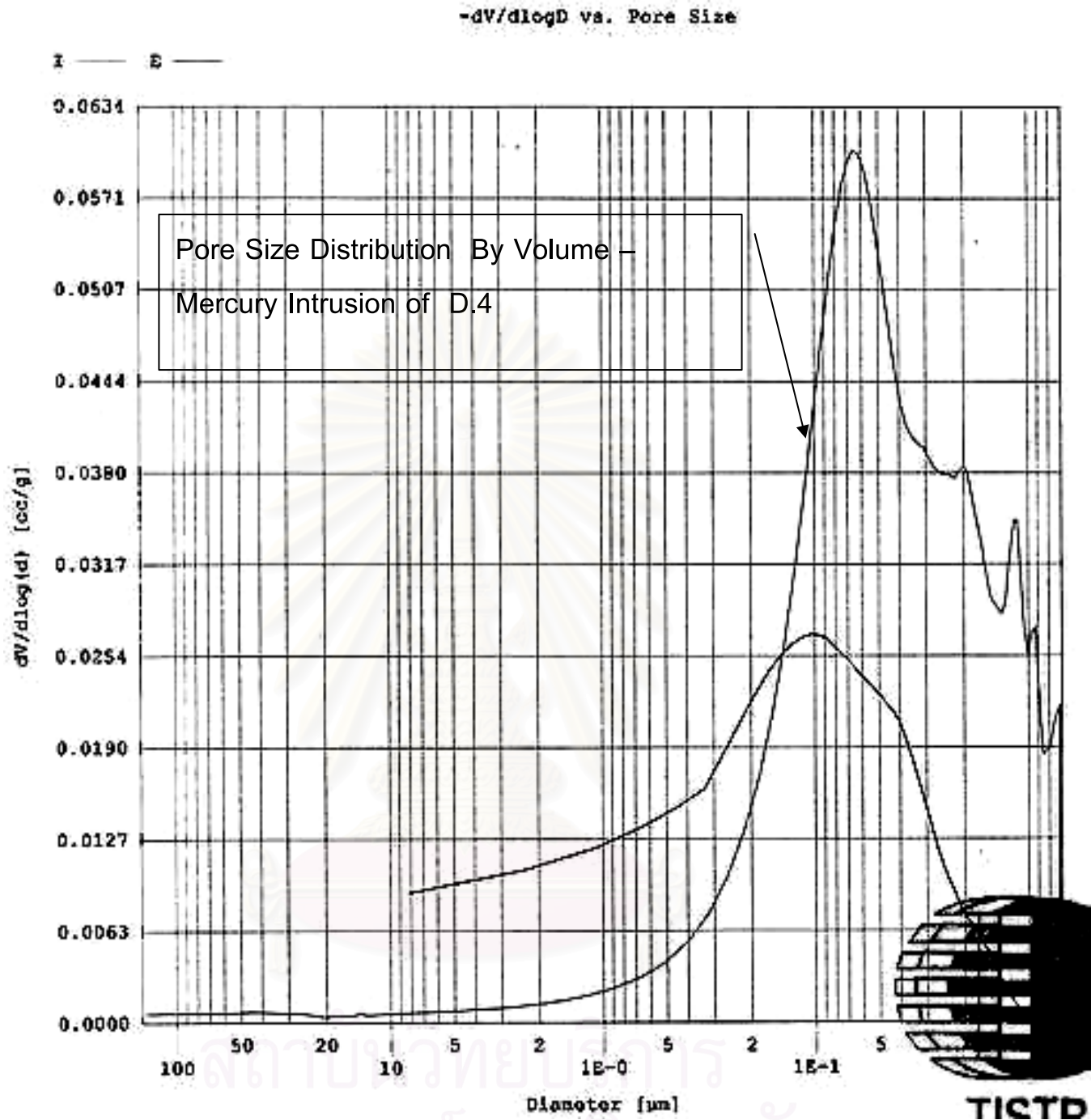
รูปที่ ข.16 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Qs) และระยะเวลา (Ts) ของสัดส่วนผสม D.26 (85%OPC+15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



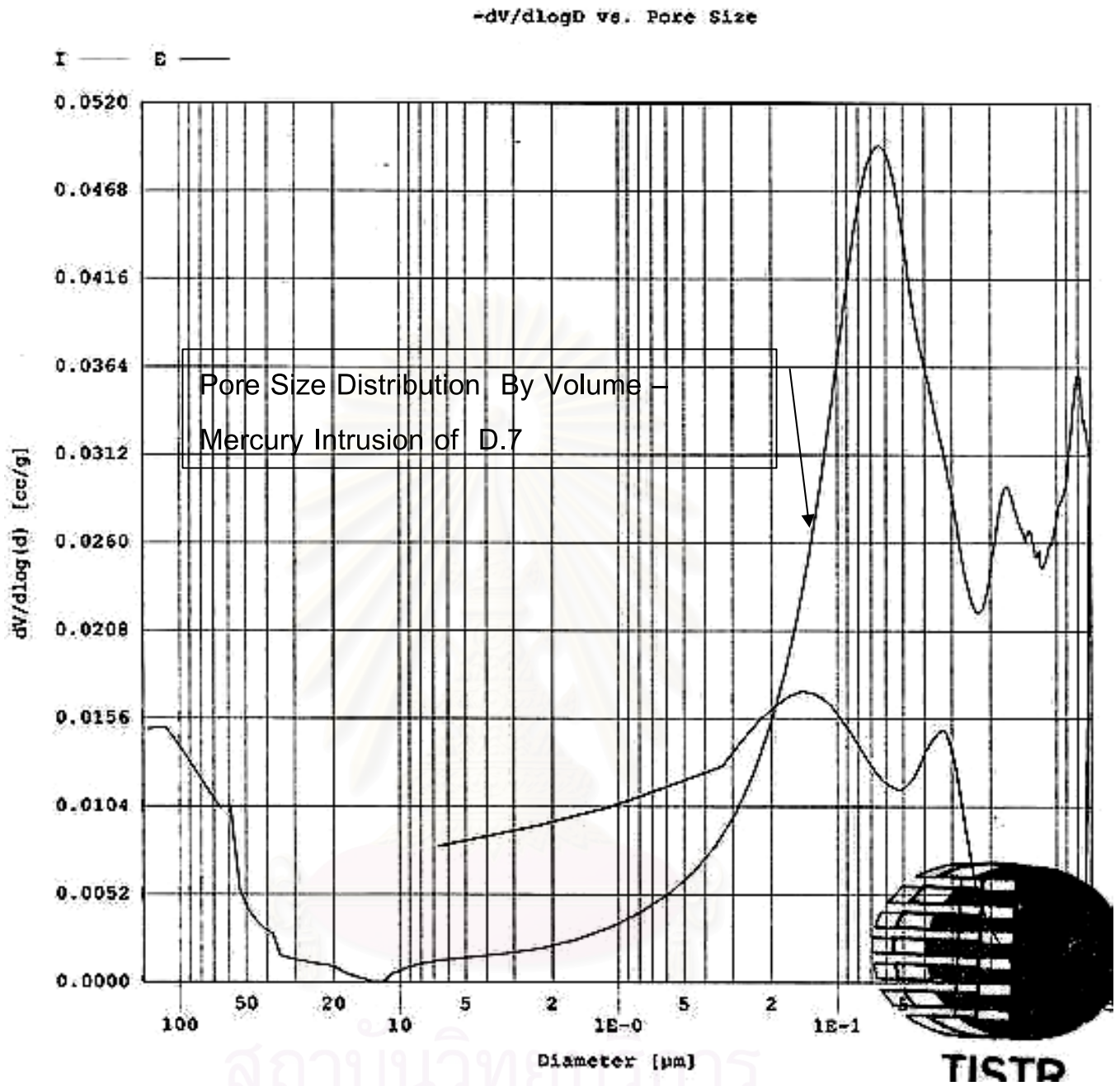
รูปที่ ข.17 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของสัดส่วนผสม D.29 (65%OPC+ 35%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



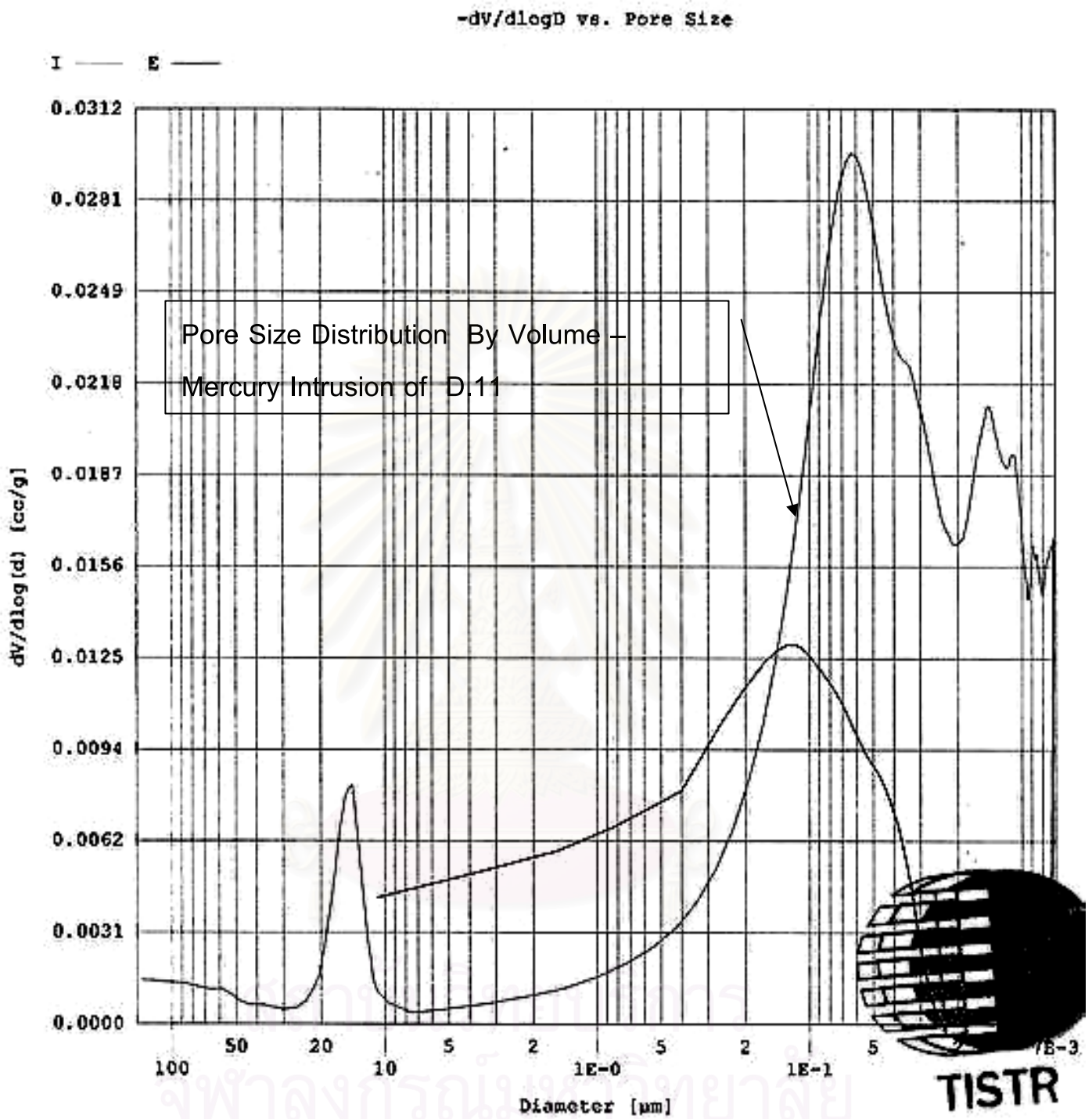
รูปที่ ข.18 การหาค่าประจุไฟฟ้า (Q_s) และระยะเวลา (T_s) ของสัดส่วนผสม D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



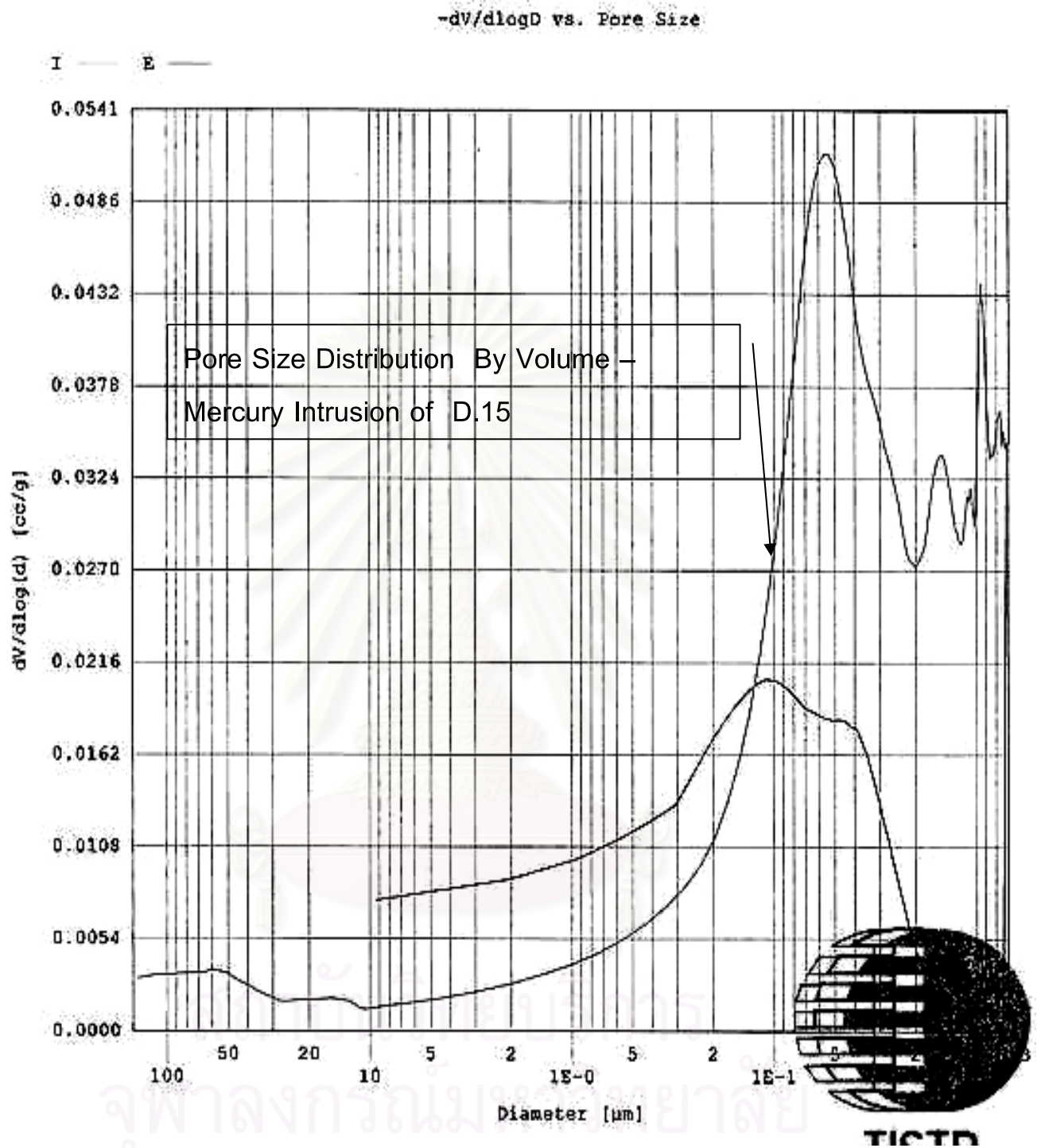
รูปที่ ข.19 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของสัดส่วนผสม D.4 (85% OPC + 15%RHA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



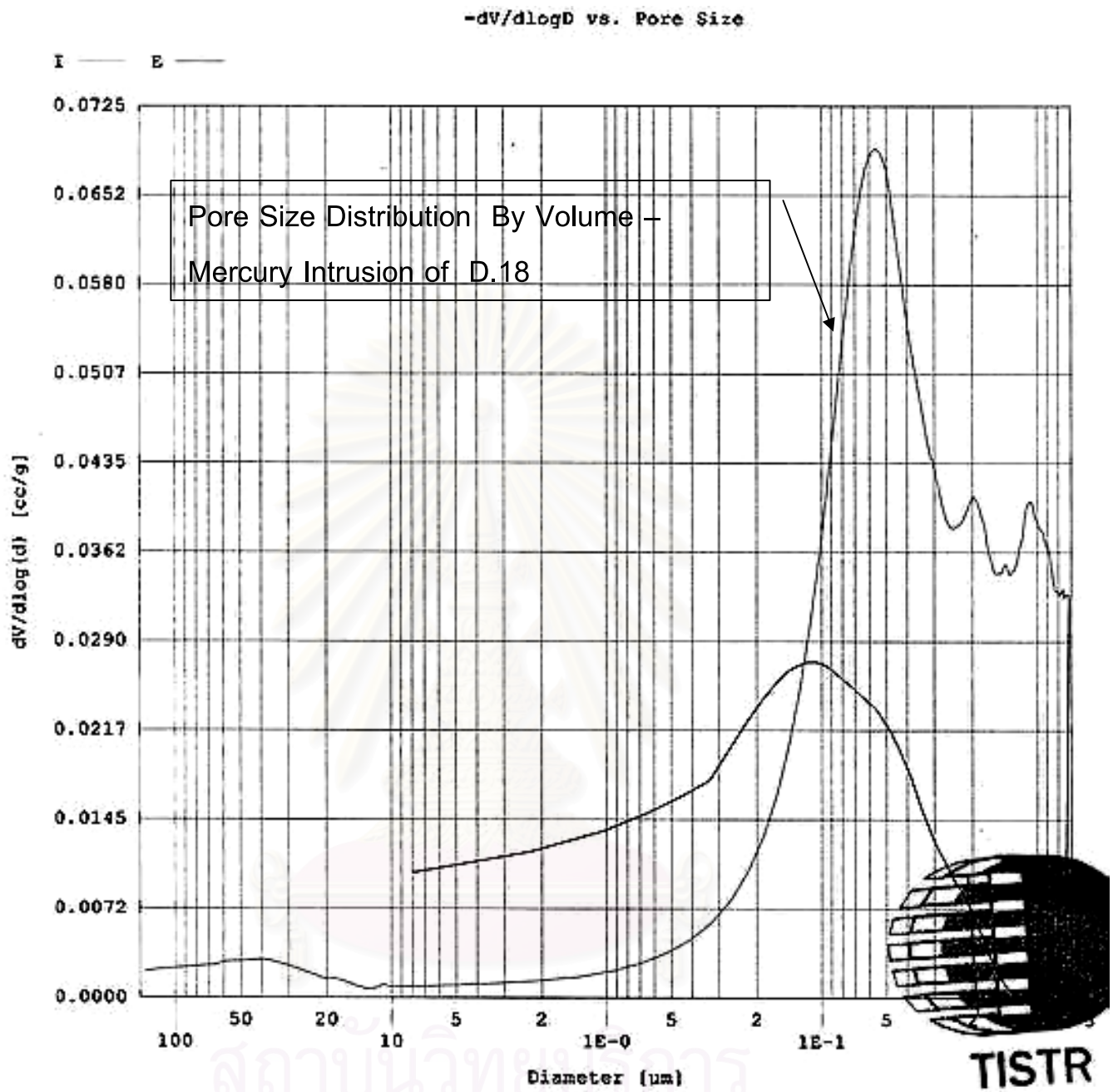
รูปที่ ข.20 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของสัดส่วนผสม D.7 (65% OPC + 35%FA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



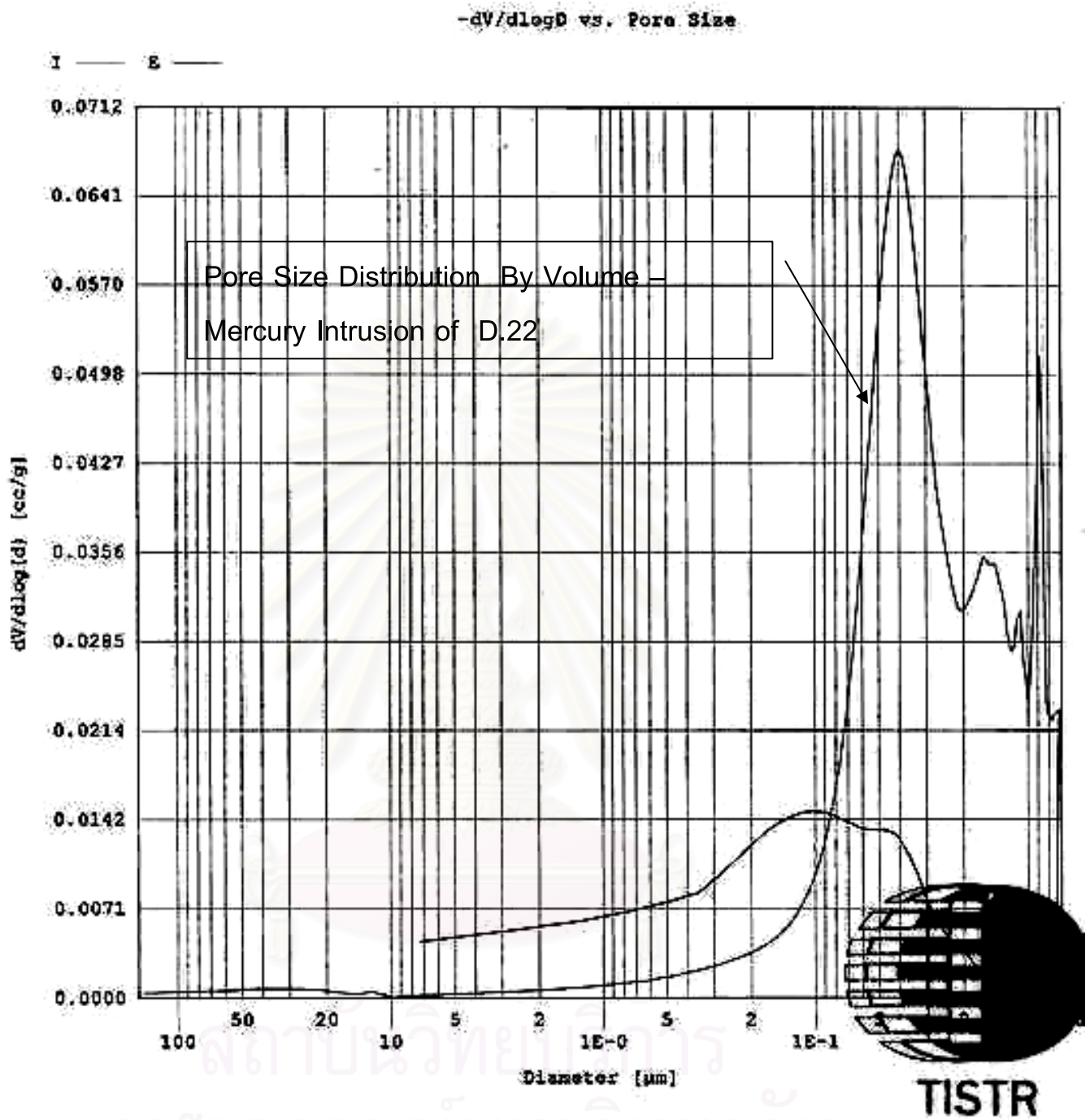
รูปที่ ข.21 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของสัดส่วนผสม D.11 (65% OPC + 10%RHA+25%FA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40



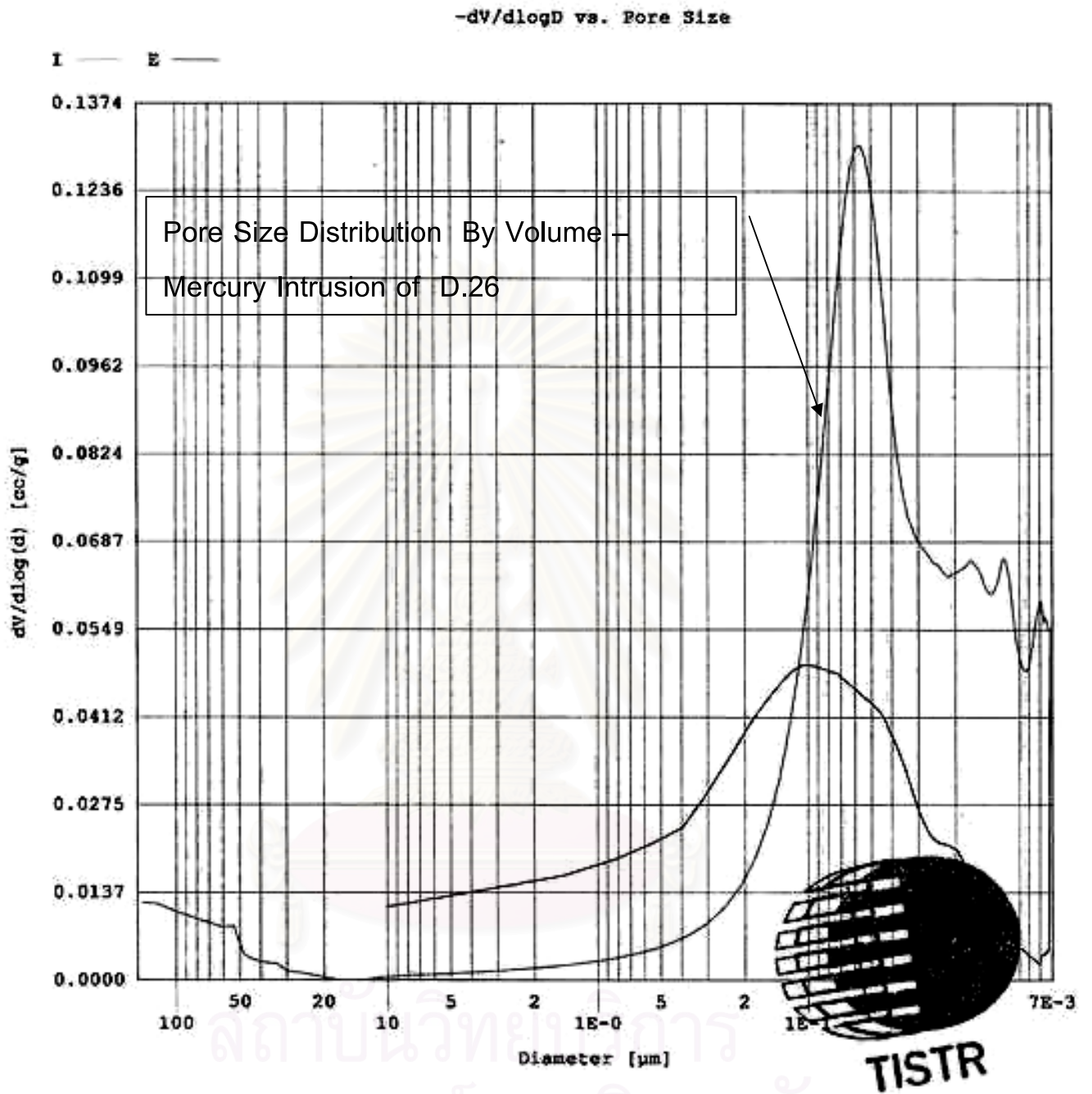
รูปที่ ข.22 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของสัดส่วนผสม D.15 (85% OPC + 15%RHA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



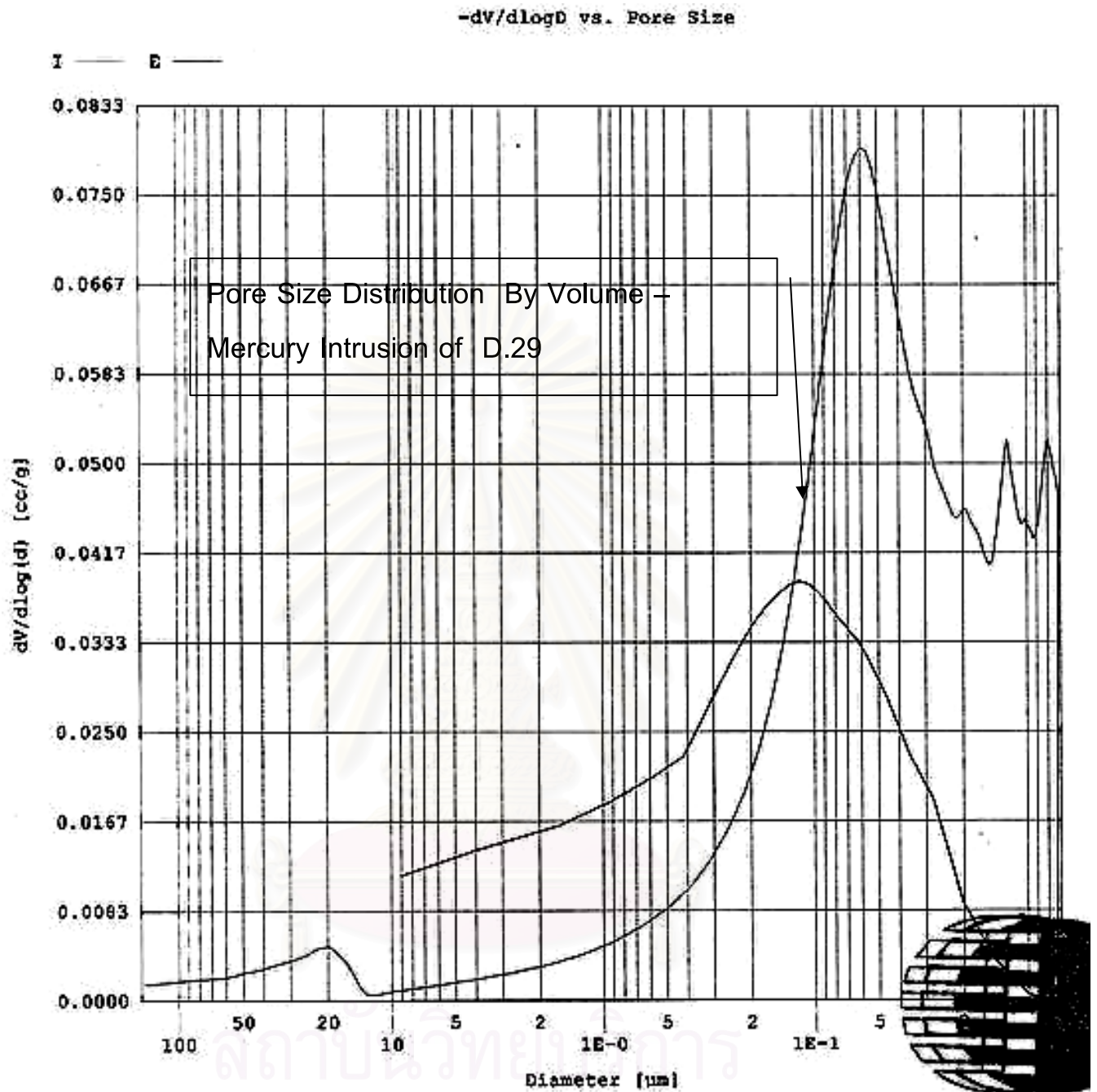
รูปที่ ข.23 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของลัดส่วนผสม D.18 (65% OPC + 35%FA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



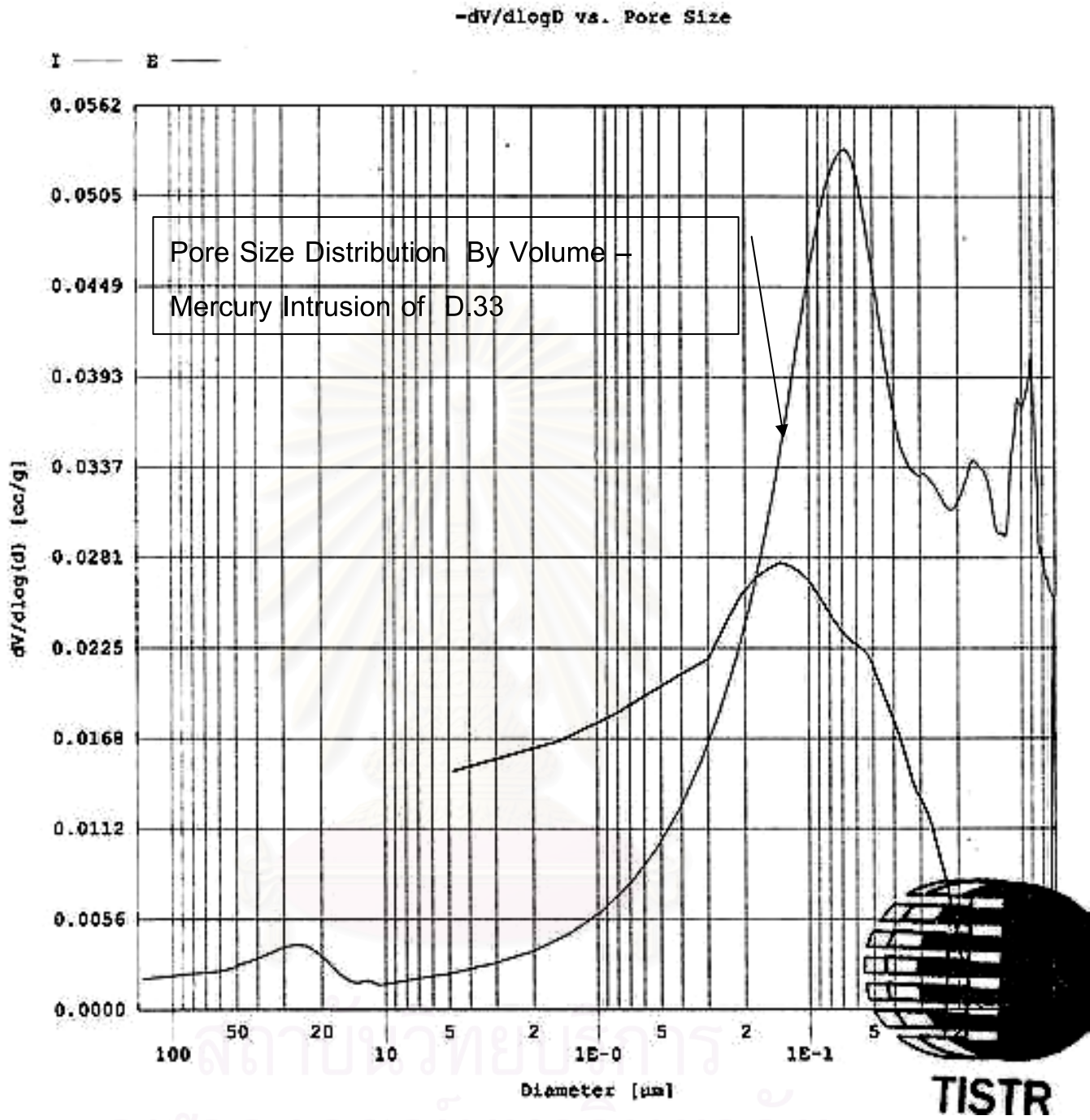
รูปที่ ข.24 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของสัดส่วนผสม D.22 (65% OPC+10%RHA+25%FA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



รูปที่ ข.25 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของลัดส่วนผสม D.26 (85% OPC + 15%RHA) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



รูปที่ ข.26 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของลัดส่วนผสม D.29 (65% OPC + 35%FA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60



รูปที่ ข.27 การหาค่าการกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของสัดส่วนผสม D.33 (65% OPC+10%RHA+25%FA)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมพงษ์ ธีรานพ เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ.2518 ที่กรุงเทพมหานคร ได้รับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนเพาะปัญญาและโรงเรียนวัดอ้อมน้อย ตามลำดับ ได้รับการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดนวลนรดิศ และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2547 ประวัติเคยทำงานในตำแหน่งวิศวกรประจำแผนกควบคุมคุณภาพ บริษัทนครหลวงคอนกรีต จำกัด ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2540 ถึงปี 2543 หลังจากนั้นได้เข้ารับราชการในตำแหน่งวิศวกรโยธา 3 ฝ่ายควบคุมโรงมหรสพ สำนักงานคณะกรรมการควบคุมอาคาร กรมโยธาธิการ (เดิม) ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึงปี 2546 และ ปัจจุบันปฏิบัติราชการอยู่ในตำแหน่งวิศวกรโยธา 5 สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง พระราม 6



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย