

### 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 ในขณะที่เถ้าแกลบจะต้องมีการนำไปบดเสียก่อนเนื่องจากในช่วงแรกเถ้าแกลบที่ได้รับมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีสีเทา

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

ทดสอบในครั้งนี้ใช้การบดแห้งทั้งหมด โดยในการบดแต่ละครั้งจะบดได้ประมาณ 2.5 กิโลกรัม และใช้ระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

### 3.1.2 มวลรวม

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

### 3.1.3 สัดส่วนผสม

สัดส่วนผสมคอนกรีตออกแบบตามวิธี ACI โดยไม่ใช้สารผสมเพิ่ม โดยมีทั้งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและปูนซีเมนต์ผสมปอซโซลาน ในที่นี้การแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเถ้าลอย อยู่ที่ร้อยละ 15 25 และ 35 สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเถ้ากลบอยู่ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 นอกจากนี้ยังมีสัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุประสาน สามชนิดอันได้แก่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและเถ้ากลบร่วมกัน ในที่นี้สัดส่วนการแทนที่ของเถ้ากลบอยู่ที่ร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่อยู่ที่ร้อยละ 15 และ 25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้อยู่ที่ 0.40 0.50 และ 0.60 และมีค่าความยุบตัวอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 10 เซนติเมตร สัดส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 3.2

ในการออกแบบนั้นมีการควบคุมค่าความชื้นเหลว (Consistency) ของคอนกรีตด้วยการพิจารณาจากค่าการยุบตัว (Slump) ให้มีค่าประมาณ  $7.5 \pm 2.5$  ซม. เนื่องจากเป็นค่าการยุบตัวที่ใช้กันมากที่สุดในงานโครงสร้างทั่วไปอีกทั้งยังสะดวกในการหล่อก้อน-ตัวอย่างเนื่องจากไม่แข็งหรือเหลวจนเกินไป นอกจากนี้ยังมีการควบคุมปริมาณหินที่ใช้ในแต่ละสัดส่วนผสมให้มีค่าคงที่ เนื่องจากต้องการให้ปริมาตรของส่วนละเอียด (Fine Part) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการศึกษานั้นมีค่าเท่ากันทุกสัดส่วนผสม โดยส่วนละเอียดในที่นี้หมายถึง ส่วนที่ประกอบด้วย วัสดุประสาน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่ม

### 3.1.4 การเตรียมก้อนตัวอย่าง

ทำการผสมคอนกรีตและหล่อในแบบรูปทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร และมีความสูง 200 มิลลิเมตร แล้วทำการจี้คอนกรีตสดในแบบหล่อรูปทรงกระบอกให้แน่นด้วยเครื่องสั่นคอนกรีต (Vibrator) หลังจากคอนกรีตแข็งตัวจึงแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในบ่อบ่ม แล้วจึงนำขึ้นจากบ่อบ่มเมื่ออายุครบตามที่ต้องการทดสอบ

## 3.2 การทดสอบ

### 3.2.1 การทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202

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

ก้อนตัวอย่างที่เตรียมจะทำการทดสอบด้วยวิธีนี้จะถูกนำมาตัดด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร (Diamond Saw) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและมีความหนา 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 เพื่อจะดูผลของปฏิกิริยาปอซโซโลนิคของวัสดุประสานในสัดส่วนผสมต่างๆที่มีผลต่อกำลังอัดในระยะต้นและระยะปลายที่

แตกต่างกัน และเชื่อมโยงผลของกำลังอัดเข้ากับการวิเคราะห์ผลของปริมาณของโพรงที่ได้จากวิธีประยุกต์ และวิธีเอ็มไอพี ว่าสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร

ก่อนคอนกรีตที่ครบตามอายุจะถูกนำมาทดสอบกำลังอัด โดยก่อนจะครบกำหนดในการทดสอบจะต้องนำก้อนตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่มล่วงหน้าเพื่อให้ตัวอย่างแห้ง แล้วจึงนำมาทำการปรับให้หน้าตัดผิวสัมผัสหัวท้ายให้เรียบด้วยการเคลือบหัว (Capping) ด้วยผงกำมะถันต้ม มีความหนาประมาณ 1.5 ถึง 3 มิลลิเมตร เพื่อช่วยให้การถ่ายแรงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตามมาตรฐาน ASTM C 617 หลังจากการเคลือบหัวเสร็จควรทิ้งไว้อย่างต่ำประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวเคลือบกำมะถันแห้งเสียก่อน เนื่องจากหากนำไปทดสอบทันทีที่กำมะถันเคลือบหัวยังไม่แห้งดีพบว่าค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าต่ำลงกว่าความเป็นจริง 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.) เข้าสู่เนื้อของก้อนคอนกรีตที่อิมตัวด้วยน้ำ และทำให้อนุภาคคลอไรด์ (Cl) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ต่อกับขั้วลบ (Up Stream or Cathode Solution) นั้นพยายามเคลื่อนที่ไปในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่อกับขั้วบวก (Down Stream or Anode Solution) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) ทั้งนี้พบว่าหากดำเนินการทดสอบวิธีประยุกต์โดยใช้รายละเอียดต่างๆเช่นเดียวกันกับที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C1202 จะพบอุปสรรคและปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้ ความหนาของก้อนตัวอย่างที่ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นหนาถึง 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการทดสอบอาจกินเวลานานมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการทดสอบคอนกรีตที่มีคุณสมบัติต้านทานการซึมผ่านสูง ดังนั้นความหนาที่เลือกใช้ในวิธีประยุกต์ จึงเลือกใช้ความหนาเพียง 35 มิลลิเมตรเท่านั้น หรือ การใช้ความต่างศักย์สูงถึง 60 โวลต์จะทำให้เกิดความร้อนซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้สูงขึ้น<sup>[8]</sup> ทำให้มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มีการบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ มีค่าสูงเกินความเป็นจริงและยากต่อการสังเกตระยะเวลาที่ก้อนตัวอย่างเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Ts) นอกจากนี้ความร้อนภายในสารละลายเองยังก่อให้เกิดก๊าซคลอรีนซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายที่บริเวณขั้วแอโนดอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยเหตุนี้ความต่างศักย์ที่ใช้ในวิธีประยุกต์จึงมีค่าเพียง 24 โวลต์เท่านั้น ซึ่ง Chung-Chia Yang



<sup>[11]</sup> 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 นั้นใช้ระยะเวลาสั้นๆ เพียง 6 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์จึงเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบเป็น 60 ถึง 90 ชั่วโมง หรือจนกว่าก้อนคอนกรีตตัวอย่างจะเข้าสู่สภาวะคงที่(Ts)

ขั้นตอนในการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์ นั้นมีการเตรียมการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่อิมมัวด้วยน้ำและติดตั้งเครื่องมือทดสอบ ขั้นตอนการเก็บข้อมูลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆกันตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ และ ขั้นตอนการวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคลอไรด์ระหว่างสารละลายภายในชั่วคราวและแอโนด การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบด้วยวิธีประยุกต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

ในขั้นตอนการเตรียมก้อนตัวอย่างที่อิมมัวด้วยน้ำ จะดำเนินการโดยนำตัวอย่างที่อายุครบ 91 วัน ขึ้นมาจากบ่อบ่มและตัดให้ได้ขนาดด้วยเลื่อยหัวเพชร (Diamond Saw) ก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบผิวรอบๆหน้าตัดทรงกระบอกด้วยอีพอกซีซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน (Insulation) เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นบริเวณขอบรอบนอกของหน้าตัดคอนกรีตซึ่งอาจจะทำให้ประจุไฟฟ้าบางส่วนเคลื่อนที่โดยไม่ผ่านหน้าตัดก้อนตัวอย่างซึ่งผลก็คือจะทำให้ค่ากระแสที่บันทึกได้มีความคลาดเคลื่อน หลังจากนั้นเมื่ออีพอกซีแห้งก้อนตัวอย่างที่เคลือบอีพอกซีแล้วจะถูกนำไปในบ่อบ่มอีกครั้งเพื่อให้อิมมัวด้วยน้ำ ส่วนในขั้นตอนต่อไปเป็นการติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยก้อนตัวอย่างที่อิมมัวดังกล่าวจะถูกนำมาประกบด้วยเซลล์ลิธียมซึ่งทำด้วยอะคริลิกทั้งสองด้านของหน้าตัดโดยเซลล์ลิธียมด้านซ้ายบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.3 N ส่วนเซลล์ลิธียมด้านขวาบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

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

การเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าจะดำเนินการสุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายไปพร้อมๆกันโดยเว้นระยะห่าง  
ทุกๆ 5 ถึง 7 ชั่วโมง

ในขั้นตอนการวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคลอไรด์จะดำเนินการทันที  
หลังจากทดสอบเสร็จ สารละลายที่สุ่มเก็บทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบหาความเข้มข้นของ  
คลอไรด์ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า "อโตไตเตรเตอร์ (Auto Titrator)" ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่ง  
ใช้หลักการของวิธีการไตเตรท เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์โดยใช้สารละลายซิลเวอร์-  
ไนเตรทความเข้มข้น 0.10 M ซึ่งเครื่องมือวัดชนิดนี้มีความละเอียดในการวัดความเข้มข้นของ  
คลอไรด์ไอออนสูงถึง  $\pm 0.01$  พีพีเอ็ม

ผลการทดสอบในการหาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เวลาต่าง ๆ โดยวิธีประยุกต์นี้ซึ่งได้ทำ  
การทดสอบกับสัดส่วนผสมทั้งหมด 9 สัดส่วนผสม (D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26  
D.29 และ D.33) เพื่อการศึกษาผลจากปฏิกิริยาปอซโซโลนิกของวัสดุประสานแต่ละชนิดที่มีต่อ  
โพรงคอนกรีตจึงต้องเลือกทดสอบที่อายุ 91 วันเพราะภายหลังจากนี้ปริมาณโพรงจะถือว่ามีการ  
เปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ จากการทดสอบด้วยเครื่องอโตไตเตรเตอร์  
ทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอดและแคโทดที่เวลาต่างๆกันของสัดส่วนผสม  
ทั้ง 9 สัดส่วนผสม(D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 ตามลำดับ) ดัง-  
แสดงในตารางที่ 3.6 – 3.14 และเมื่อนำค่าจากตารางมาสร้างกราฟจะได้รับความสัมพันธ์ ดังแสดง  
ในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.1-ข.9 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีการเก็บบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดคอนกรีตไว้ทุกๆ 1  
นาที ตั้งแต่เริ่มทดสอบในช่วงที่คอนกรีตยังอยู่ในสภาวะไม่คงที่ (Non-Steady State) จนกระทั่ง  
ก่อนตัวอย่างคอนกรีตเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) หลังจากนั้นจึงคำนวณหาค่าปริมาณ  
ประจุไฟฟ้า(Qs) ซึ่งหมายถึงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านก่อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มทดสอบจน  
เกิดสภาวะคงที่ภายในก่อนตัวอย่างจากพื้นที่ใต้กราฟกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลา ซึ่งได้แสดงค่า  
ของประจุไฟฟ้า(Qs) ไว้ทั้งหมด 9 สัดส่วนผสม ดังแสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.10-ข.18  
ตามลำดับ ในแต่ละรูปพบว่าจุดที่เริ่มเกิดสภาวะคงที่เส้นกราฟจะมีการหักมุม หรือ อาจมีการ  
เปลี่ยนแปลงความชันจากช่วงแรกซึ่งอยู่ในสภาวะไม่คงที่ซึ่งกราฟจะมีลักษณะโค้งเล็กน้อย แต่เมื่อ  
เข้าสู่สภาวะคงที่แล้วพบว่าเส้นกราฟจะการเปลี่ยนแปลงคือจะมีความชันคงที่ และเห็นได้ชัดเจน  
มากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าให้ยาวนานขึ้นจากรยะเวลา Ts

### 3.2.4 การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี (Mercury Intrusion Porosimetry)

การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี ได้ดำเนินการเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทดสอบด้วยวิธีประยุกต์  
เท่านั้น 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 วันขึ้นจากบ่อบ่มแล้วตัดด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร (Diamond Saw) ให้มีขนาดเล็กประมาณ  $1.00 \times 1.00 \times 1.00$  ลบ.ซม. หลังจากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสประมาณ 24 ชั่วโมงจนมีน้ำหนักคงที่ซึ่งถือได้ว่าสามารถไล่น้ำในโพรงตัวอย่างจนหมด 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
<b>คุณสมบัติทางกายภาพ</b>			
• ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.23	2.51
• พื้นที่ผิวจำเพาะ(ตร.ซม. / กรัม)	3,633	11,450	2,363
<b>องค์ประกอบทางเคมี(ร้อยละโดยน้ำหนัก)</b>			
• SiO <sub>2</sub>	20.19	87.74	33.03
• Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.38	0.79	18.56
• Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.34	3.03	17.74
• CaO	62.67	1.84	20.17
• TiO <sub>2</sub>	0.32	0.09	0.45
• MgO	1.77	0.40	2.46
• Na <sub>2</sub> O	0.14	0.34	1.56
• K <sub>2</sub> O	0.33	2.66	2.76
• P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.00	0.23
• SO <sub>3</sub>	2.76	0.84	2.69
• LOI	1.73	2.27	0.34

ที่มา ข้อมูลตารางที่ 3.1 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการไฟฟ้าฝ้ายผลิต (กฟผ.) บางกรวย



ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัม ต่อ ลูกบาศก์เมตร)

สัดส่วน	W/B	ปูนซีเมนต์	เถ้ากลบ	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 สัดส่วนผสมที่นำไปทดสอบด้วยวิธีประยุกต์ 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 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.4

สัดส่วนผสม D.4 ( 85% OPC + 15% RHA ) , W/B = 0.40		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์ (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแคโทด (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

ตารางที่ 3.7 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัตส่วนผสม D.7

D.7 ( 65%OPC +35% FA) , W/B = 0.40		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอด (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

ตารางที่ 3.8 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณขั้วแอโนดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.11

D.11 ( 65%OPC+10% RHA+5% FA) , W/B = 0.40		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณขั้วแอโนด (พีพีเอ็ม)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณขั้วแคโทด (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

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





ตารางที่ 3.10 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนโดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.18

สัดส่วนผสม D.18 ( 65%OPC +35% FA ) , W/B = 0.50		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนโด (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

ตารางที่ 3.11 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.22

สัดส่วนผสม D.22 ( 65%OPC+10% RHA+5% FA) , W/B = 0.50		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอด (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

ตารางที่ 3.12 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.26

สัดส่วนผสม D.26 ( 85% OPC + 15% RHA ) , W/B = 0.60		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนโอด (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

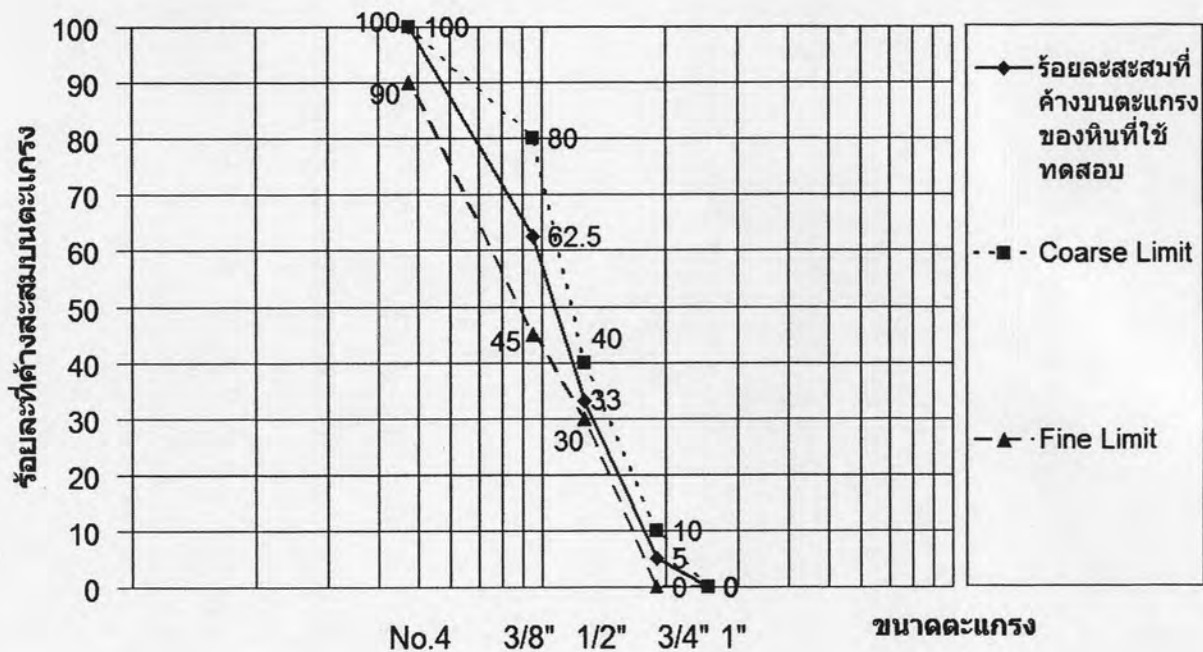
ตารางที่ 3.13 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนด์และแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.29

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

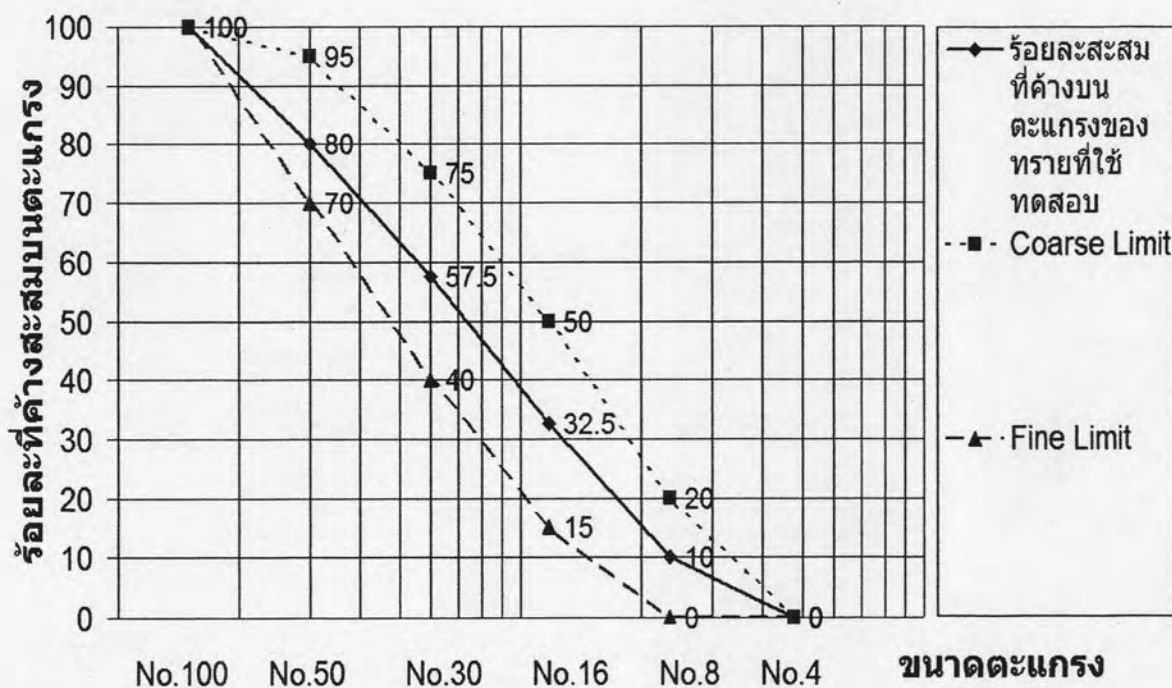


ตารางที่ 3.14 ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณหัวแอนโดและแคโทดที่เวลาต่างๆ ของสัดส่วนผสม D.33

สัดส่วนผสม D.33 ( 65%OPC+10% RHA+5% FA) , W/B = 0.60		
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นคลอไรด์บริเวณหัวแอนโด (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



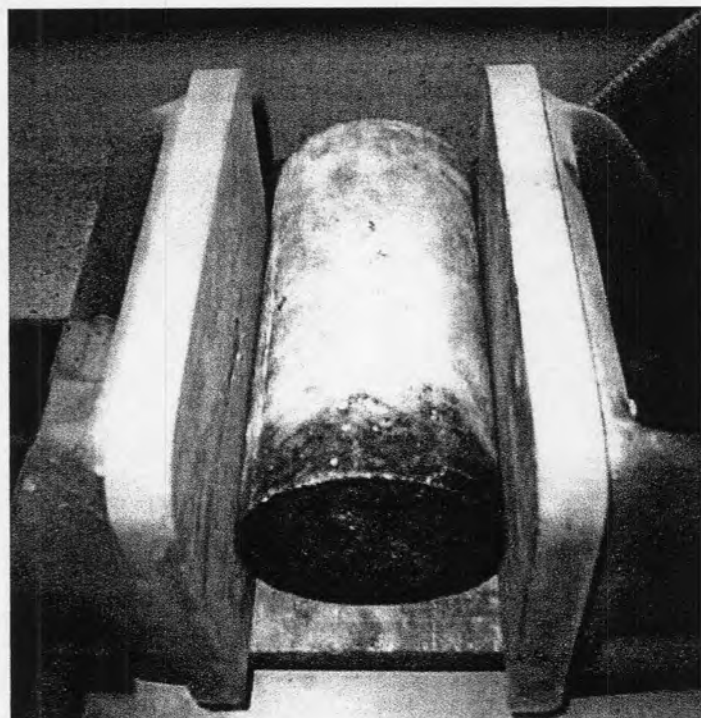
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1ก แผนภูมิคละของวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33

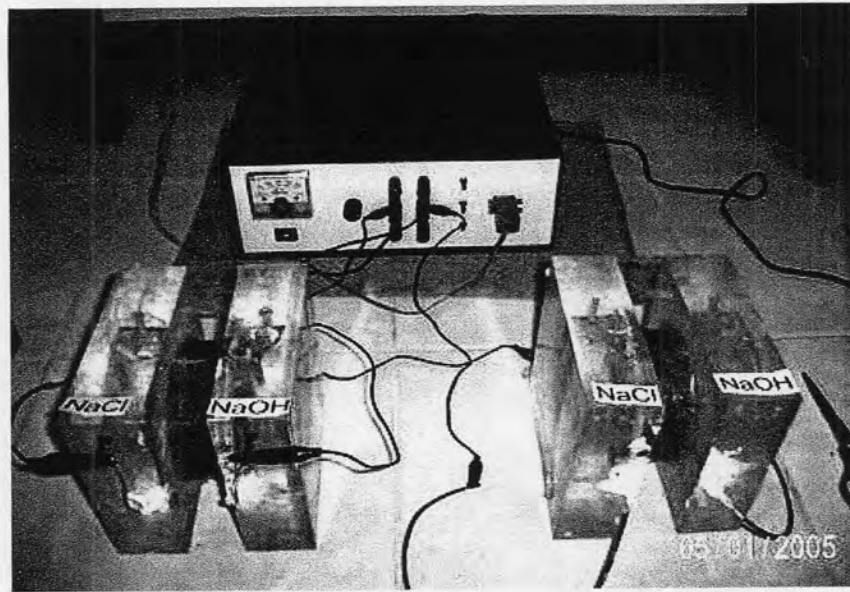
รูปที่ 3.1ข แผนภูมิคละของวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33



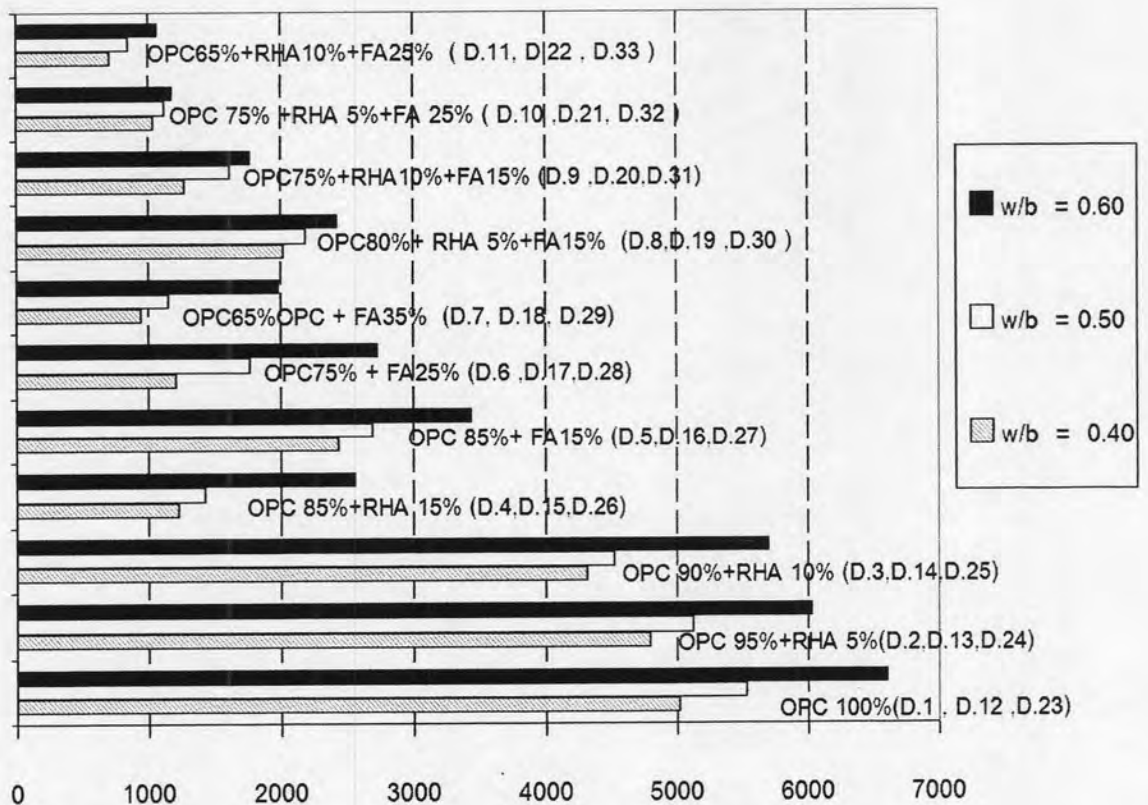
รูปที่ 3.2 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยเลื่อยหัวตัดเพชร (Diamond Saw)



รูปที่ 3.3 ก้อนตัวอย่างที่ถูกเตรียมสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202

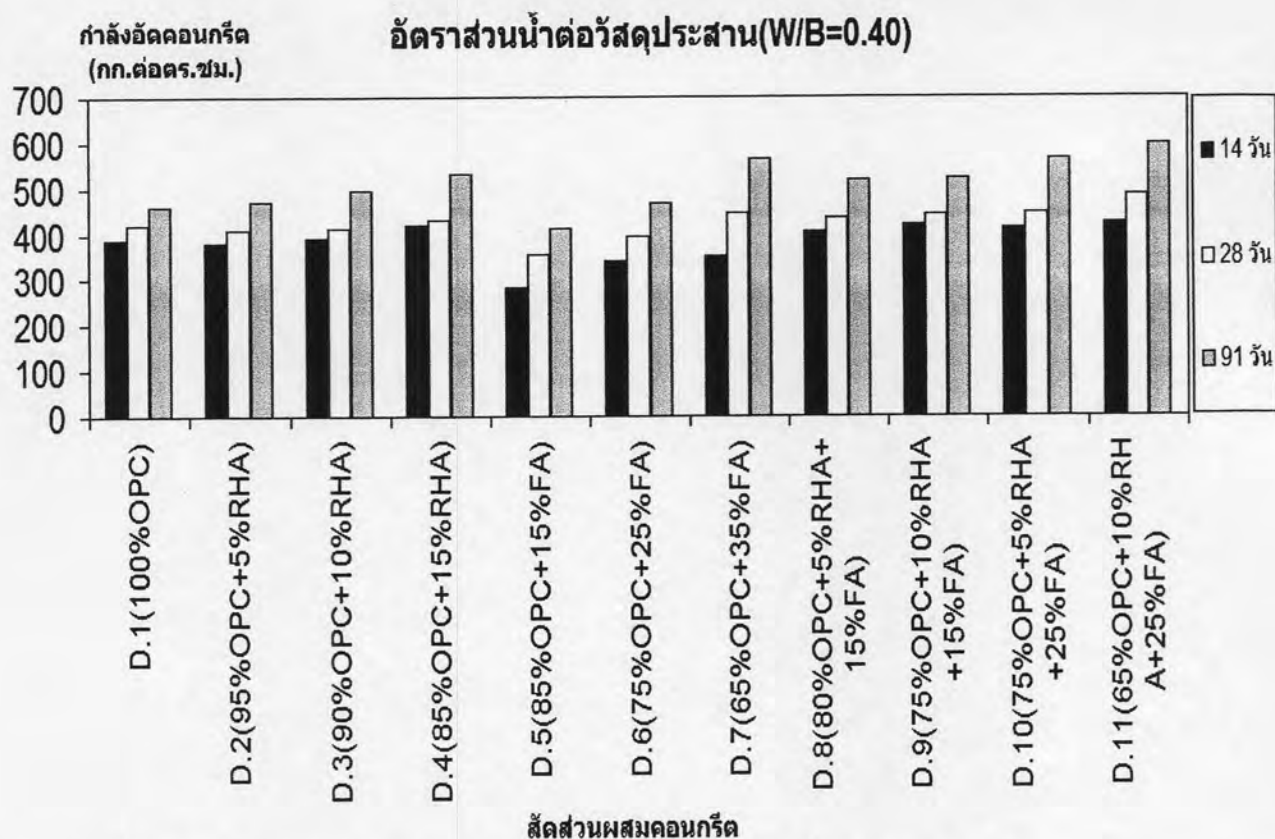


รูปที่ 3.4 การติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับตัวอย่างในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202

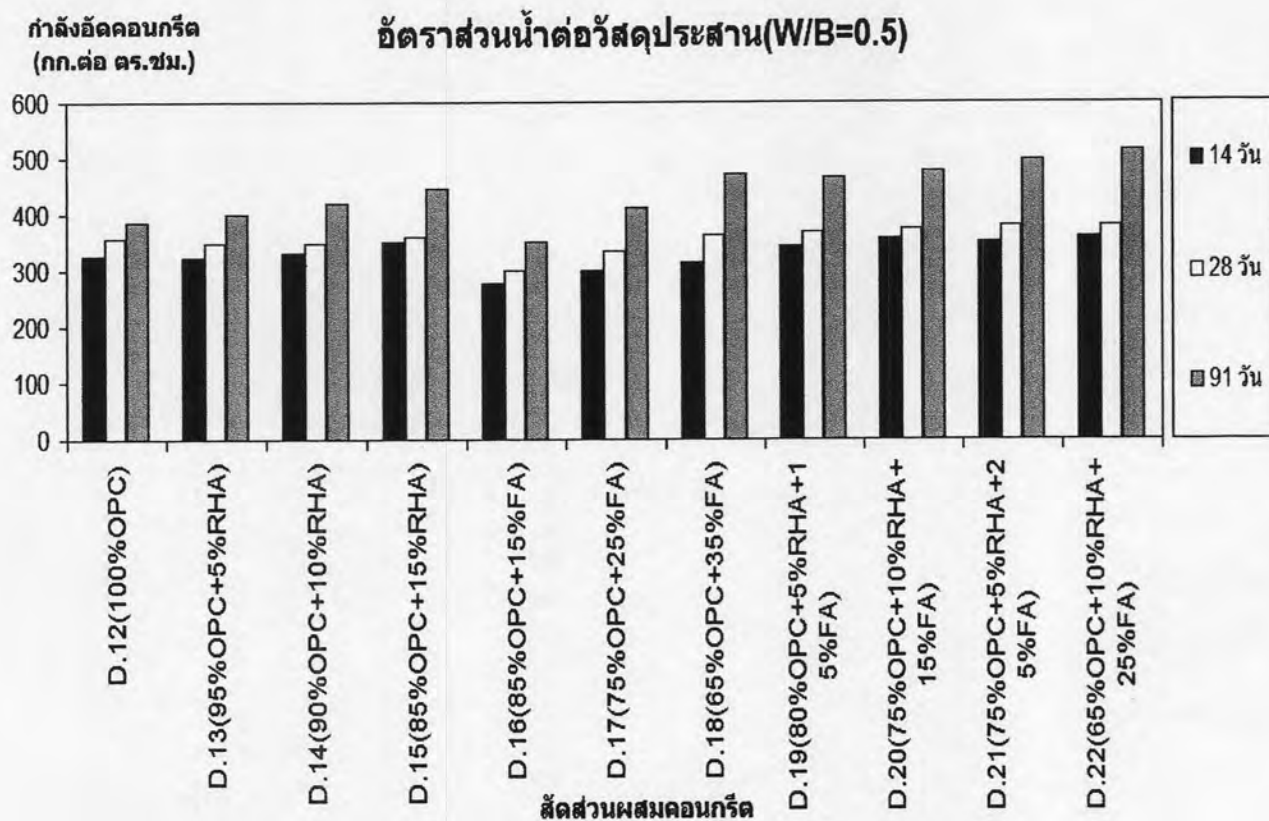


รูปที่ 3.5 ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยซึ่งเป็นการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Coulomb Charge Passed)(คูลอมบ์)

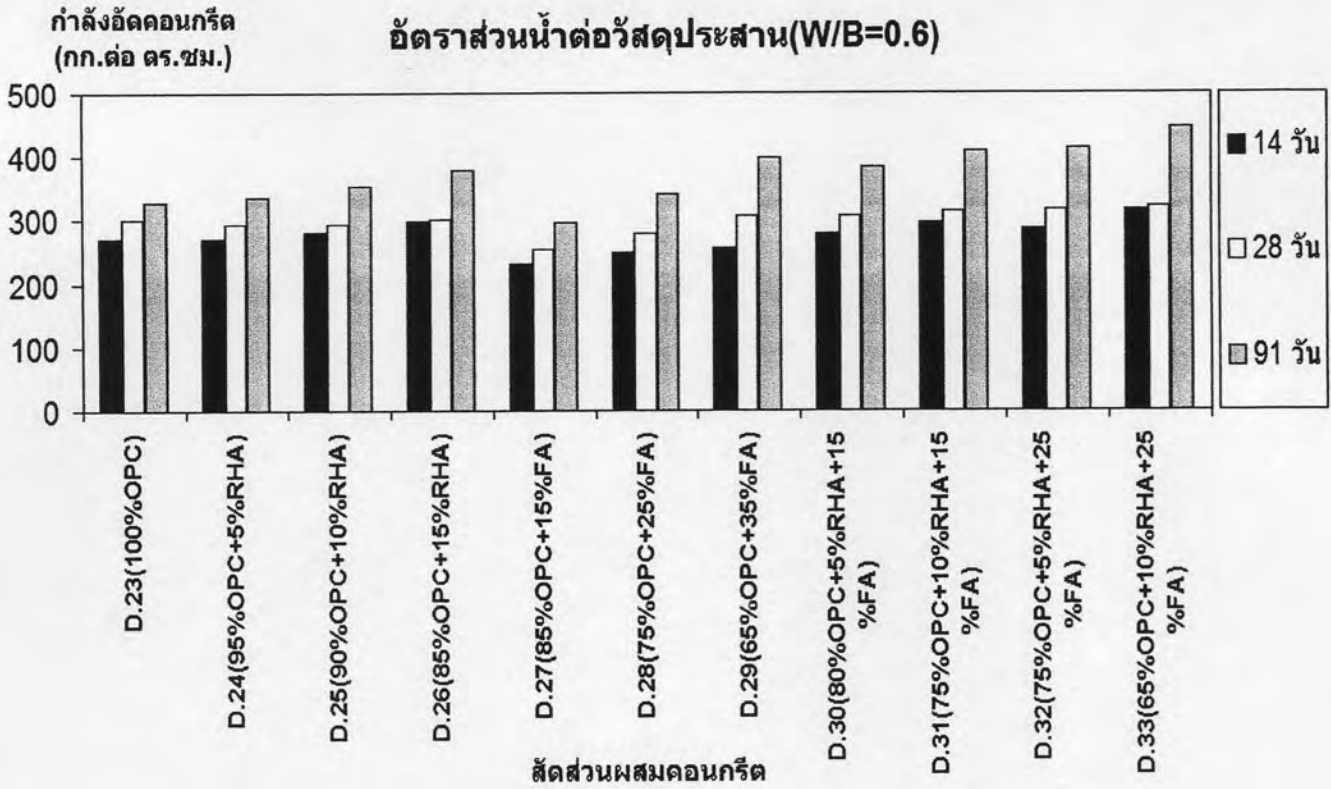




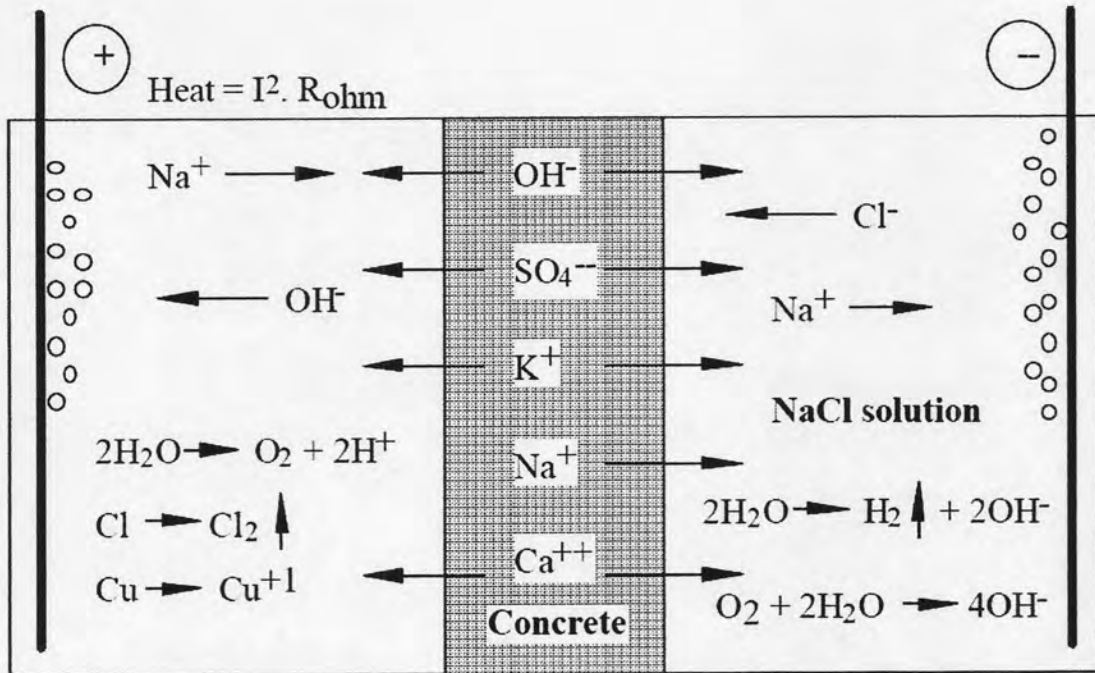
รูปที่ 3.6 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 ที่ 14 28 และ 91 วัน



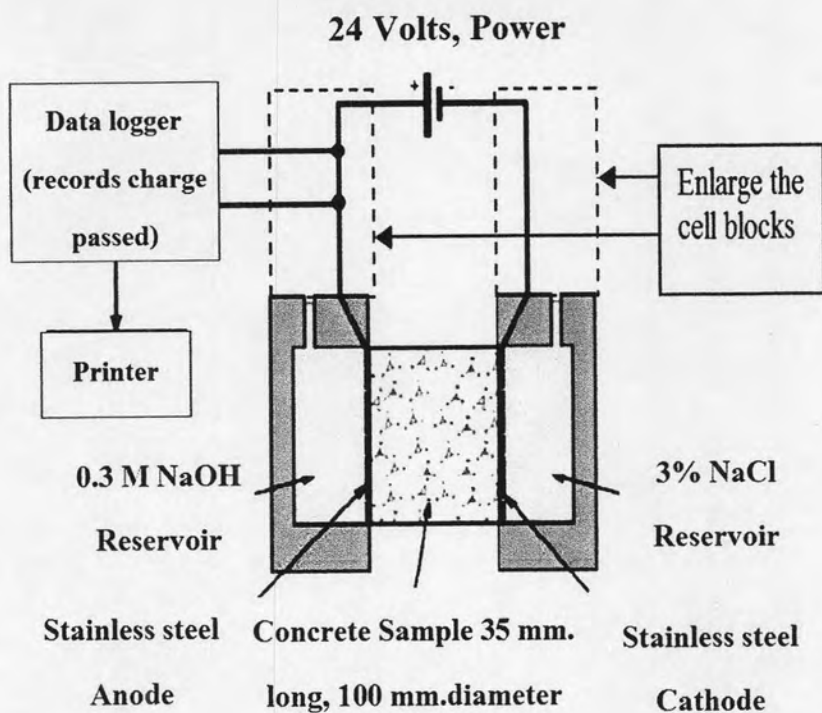
รูปที่ 3.7 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ 14 28 และ 91 วัน



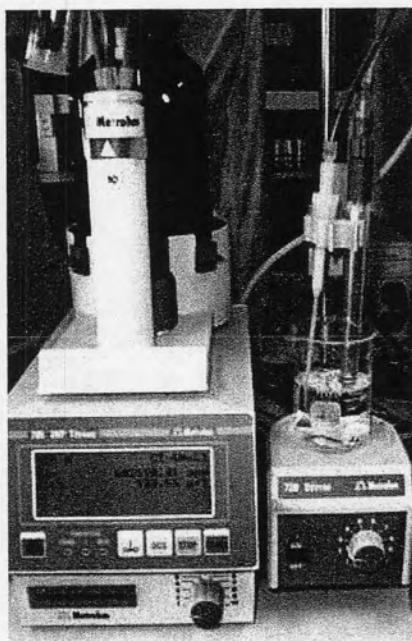
รูปที่ 3.8 กำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 ที่ 14 28 และ 91 วัน



รูปที่ 3.9 การเกิดก๊าซคลอรีน (Cl<sub>2</sub>) ที่ขั้วบวก



รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบด้วยวิธีประยุกต์เพื่อหาค่าปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความเข้มข้นของคลอไรด์