

## บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย โดยในที่นี่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและแบบบดละเอียดรวมไปถึงวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสยืดหยุ่น และวิธีการทดสอบความต้านทานของคอนกรีต ได้แก่ การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมคลอไรด์ผ่านคอนกรีต การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และการหดตัวแห้งของคอนกรีต

### 3.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ

- 3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
- 3.1.3 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร
- 3.1.4 เถ้านหิน จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 3.1.5 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- 3.1.6 มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว
- 3.1.7 สารลดน้ำพิเศษ (Super plasticizer)
- 3.1.8 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.1.9 เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. (RB12)

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.2 เครื่องบดวัสดุ
- 3.2.3 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 สำหรับวิเคราะห์ขนาด
- 3.2.4 ขวดแก้วเลอชาเตอลิเอร์ (Le Chatelier)
- 3.2.5 ตู้อบปรับอุณหภูมิ
- 3.2.6 เครื่องผสมคอนกรีต
- 3.2.7 ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
- 3.2.8 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 20 ซม.
- 3.2.9 แบบหล่อแท่งคอนกรีตขนาด กว้าง 7.5 ซม. สูง 7.5 ซม. ยาว 28.5 ซม.

3.2.10 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2.11 อุปกรณ์วัดการหดตัว (Compressometer)

3.2.12 อุปกรณ์การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก

3.2.13 ชุดทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยวิธีเร่งตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (2012)

3.2.14 ชุดทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่ฝังในคอนกรีต โดยการเร่งการแทรกซึมคลอไรด์อิออนด้วยกระแสไฟฟ้า

3.2.15 เครื่องทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.2.16 เครื่องวัดการหดตัวของคอนกรีต

### 3.3 วิธีการศึกษา

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร นำมาอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำมาผสมร่วมกับเถ้าถ่านหิน จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน (CR : FA) เท่ากับ 30 : 70 โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (OFC) และแบบบดละเอียด (FFC) โดยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินแบบบดละเอียดนั้น จะนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนดังกล่าวมาบดรวมกัน ด้วยเครื่องบดวัสดุ จนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3

#### 3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

##### 1. การทดสอบขนาดผลและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

การทดสอบขนาดผลและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM 136 (2006) โดยมวลรวมละเอียดใช้ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100 และถาด ส่วนมวลรวมหยาบใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 3", 1½", 3/4", 1/2", 3/8", ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100 และถาด นำไปคำนวณ โมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus) และการกระจายตัวของมวลรวม

## 2. การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวม

การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 127 (2012) และ ASTM C 128 (2012) ตามลำดับ

## 3. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5, กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ผสมในอัตราส่วน 30 : 70 โดยน้ำหนักที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (OFC) และแบบบดละเอียด (FFC) โดยใช้ขวดแก้วเลอชาเตอลิเอร์ (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2014) โดยอาศัยหลักการแทนที่ปริมาตรของวัสดุผงด้วยของเหลว การทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทดสอบ

## 4. การทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร

การทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร หรือตะแกรงเบอร์ 325 เป็นการหาร้อยละของปริมาณอนุภาคของวัสดุที่ค้างบนตะแกรง ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 (2008) โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและแบบบดละเอียด นำตัวอย่างประมาณ 1 กรัม มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ด้วยน้ำสะอาดโดยมีกระบอกฉีดน้ำ (Spray nozzle) ที่สามารถควบคุมแรงดันน้ำได้ จนขนาดวัสดุที่เล็กกว่า 45 ไมโครเมตรลอดผ่านไปหมด จากนั้นนำตัวอย่างวัสดุที่ค้างบนตะแกรงอบให้แห้งจะได้วัสดุที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง

## 5. ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5, กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและแบบบดละเอียด โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer Microtrac II (Standard Range Analyzer: Model 7997-10: Size 0.1 to 1000 microns)

## 6. องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5, กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าถ่านหิน และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน CR : FA เท่ากับ 30 : 70 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

### 3.3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบมอร์ต้าร์

สำหรับการทดสอบมอร์ต้าร์ ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการกระตุ้นกำลังในปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังแสดงในตาราง 3.1 มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (Super plasticizer) ร้อยละ 1 เพื่อควบคุมค่าการไหล (flow) ให้อยู่ในช่วง 105 - 115 การทดสอบจะใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐานที่มีความกว้างด้านละ 5 ซม. ถอดแบบภายหลังการหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำและนำไปทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน เพื่อหาปริมาณสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังอัดมอร์ต้าร์สูงสุด

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (Mix Proportion)

Mixes	Mix Proportion (by weight)						W/B	Flow (%)
	CR	FA	Sand	Water	Super P	NaOH		
FACR-C0	30	70	275	27.6	3.2	0	0.29	105
FACR-C0.5	30	70	275	27.6	3.2	0.5	0.29	105
FACR-C1	30	70	275	27.6	3.2	1	0.29	105
FACR-C2	30	70	275	27.6	3.2	2	0.29	105
FACR-C3	30	70	275	27.6	3.2	3	0.29	105

### 3.3.4 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3.2 คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ซึ่งจะนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาผสมกันในอัตราส่วน (CR : FA) เท่ากับ 30 : 70 โดยน้ำหนัก (ใช้สัญลักษณ์ OFC) และนำมากระตุ้นกำลัง 3 วิธี ได้แก่ เติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ใช้สัญลักษณ์ OFC-C), บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบ (ใช้สัญลักษณ์ OFC-H), และบดรวมกันจนละเอียด มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 (ใช้สัญลักษณ์ FFC) มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 550 กก/ม<sup>3</sup> ส่วนคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ใช้สัญลักษณ์ CTI) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ใช้สัญลักษณ์ CTV) มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 500 กก/ม<sup>3</sup> และควบคุมคอนกรีตทั้งสองกลุ่มให้มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ในการควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 17.5 ± 2.5 ซม.

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mixes	Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> )								W/B	Slump (cm.)
	CR	FA	Cement	Fine Agg	Coarse Agg	Water	SP*	NaOH		
CTI	-	-	500	820	1040	126	4	-	0.25	20.0
CTV	-	-	500	820	1040	126	4	-	0.25	19.0
OFC	165	385	-	720	915	135	5.5	-	0.25	20.0
OFC-C	165	385	-	720	915	135	5.5	5.5	0.25	18.5
OFC-H	165	385	-	720	915	135	5.5	-	0.25	20.0
FFC	165	385	-	755	960	135	5.5	-	0.25	19.0

หมายเหตุ SP\* คือ สารลดน้ำพิเศษ (โดยในสารลดน้ำพิเศษมีน้ำอยู่มีน้ำอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

### 3.3.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

CTI หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 500 กก/ม<sup>3</sup>

CTV หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 500 กก/ม<sup>3</sup>

OFC หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเข้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในสัดส่วน 30 : 70 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 550 กก/ม<sup>3</sup>

OFC-C หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเข้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในสัดส่วน 30 : 70 โดยน้ำหนัก และเติมสาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเป็นสารเร่งกำลัง ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 550 กก/ม<sup>3</sup>

OFC-H หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเข้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในสัดส่วน 30 : 70 โดยน้ำหนัก และบ่มความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบ ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 550 กก/ม<sup>3</sup>

FFC หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเข้าถ่านหินในสัดส่วน 30:70 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน และบดรวมกันจนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 3 มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 550 กก/ม<sup>3</sup>

### 3.3.6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

#### 1. การทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

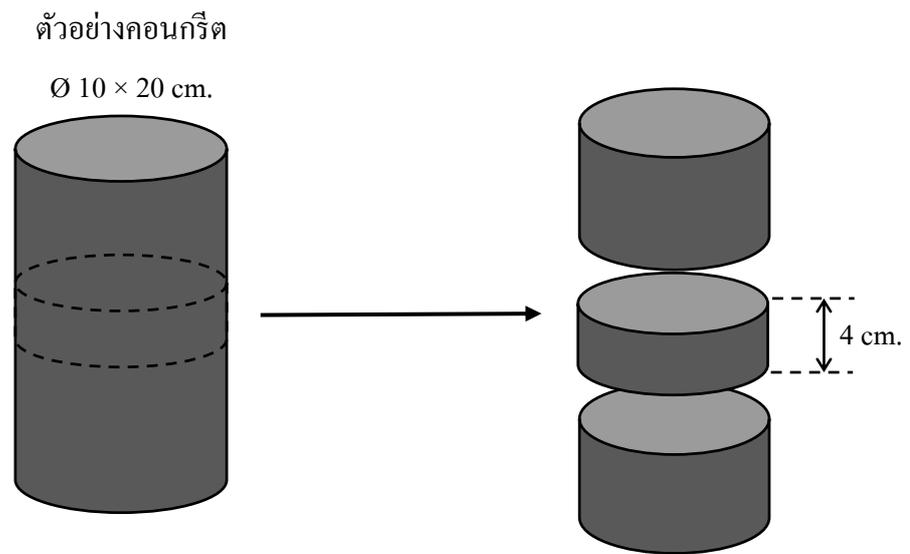
ทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเข้าถ่านหิน และคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 โดยใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทำการแกะแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำ และทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 (2014) ที่อายุ 1, 3, 7, 28, 90 และ 180 วัน และทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM C 469 (2014) ที่อายุ 7 และ 28 วัน

#### 2. การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 496 (2011) ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยการทดสอบจะวางคอนกรีตแนวนอนเพื่อรับแรงกดตามแกน แรงอัดที่ส่งผ่านทำให้เกิดแรงดึงขึ้นซึ่งเกือบคงที่ตลอดหน้าตัด

### 3.3.7 การทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

การทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต อาศัยหลักการไหลของน้ำที่คงที่ ด้วยการให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตด้วยแรงดันน้ำคงที่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน การเตรียมตัวอย่างจะใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่มีอายุครบตามกำหนดการทดสอบยกตัวอย่างขึ้นจากบ่ม 2 วัน นำมาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้มีความสูง 4 ซม. ซึ่งจะได้ตัวอย่างของคอนกรีตที่มีความสม่ำเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนบนที่อาจมีการเข้มน้ำและส่วนล่างของตัวอย่างที่อาจมีมวลรวมมากเกินไปเนื่องจากการกระทุ้งที่อาจทำให้มวลรวมตกไปอยู่ในส่วนล่างของตัวอย่าง (รูปที่ 3.1) ทำความสะอาดผิวรอบตัวอย่างคอนกรีตให้ปราศจากฝุ่น หลังจากนั้นนำไปหล่ออีพ็อกซี่ (Epoxy) ให้มีความหนาประมาณ 2.5 ซม. โดยรอบตัวอย่างและมีความสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 3.2) ทิ้งไว้ให้อีพ็อกซี่แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

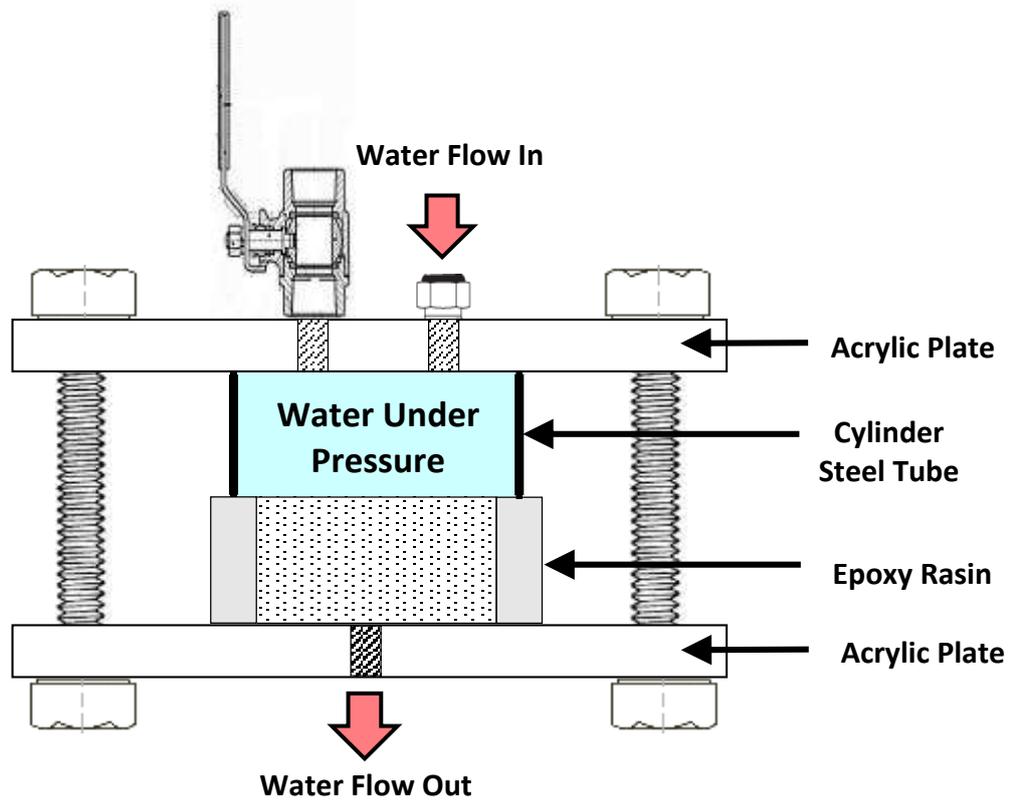


รูปที่ 3.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่หล่ออีพ็อกซี่ (Epoxy)

หลังจากนั้น นำตัวอย่างมาประกอบเข้าชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (Housing Cell) (รูปที่ 3.3) เติมน้ำลงไปในชุดทดสอบที่ประกอบแล้วได้ฟองอากาศภายในเซลล์ให้เหลือน้อยที่สุด และนำชุดทดสอบ (รูปที่ 3.4) มาติดตั้งกับเครื่องทดสอบหาการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เติมน้ำลงในหลอดแก้ว (Manometer) การทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตใช้แรงดันน้ำคงที่ 5 Bars หรือ 0.5 MPa (Chan และ Wu, 2000) เพื่อให้ น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต

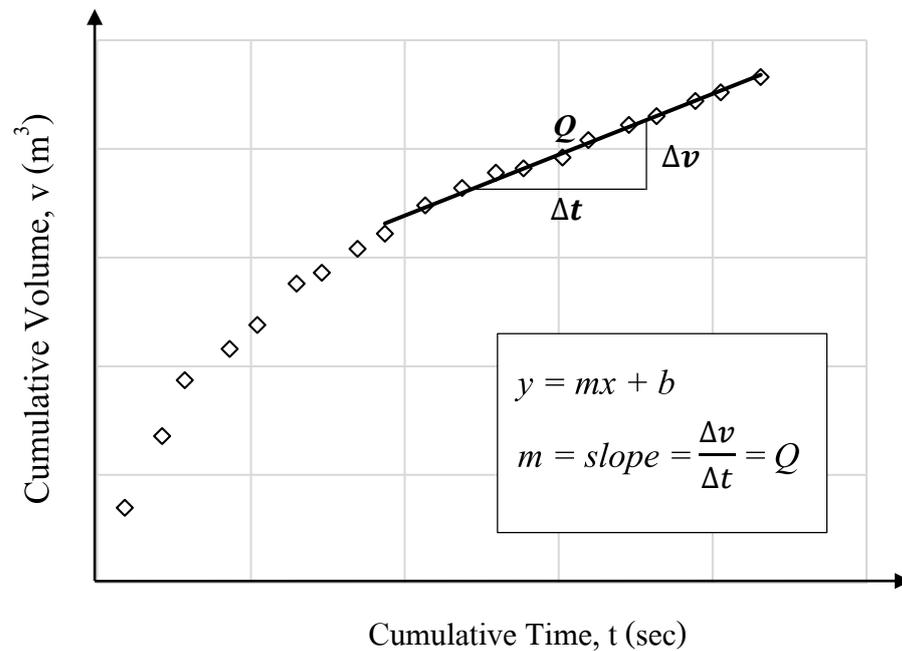


รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต



รูปที่ 3.4 การประกอบชุดทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตและเวลาโดยอ่านค่าของน้ำในหลอด Manometer และนำค่าไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลสะสมผ่านคอนกรีตกับเวลา (รูปที่ 3.5) จนปริมาณน้ำที่ไหลสะสมผ่านคอนกรีตกับเวลา มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น นำค่าความชันจากสมการเชิงเส้นตรง (Linear Regression Equation) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของน้ำ ( $Q$ ) นำค่าอัตราการไหลของน้ำมาแทนค่าในสมการของ Darcy's law ดังแสดงในสมการที่ 3.1 เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (Ludirdja และคณะ, 1989)



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลสะสมผ่านคอนกรีตกับเวลา

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (3.1)$$

โดยที่	$K$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (m/s)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )
	$L$	คือ ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (m)
	$g$	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )
	$Q$	คือ อัตราการไหลของน้ำ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	$P$	คือ แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ( $\text{N/m}^2$ )
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต ( $\text{m}^2$ )

### 3.3.8 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยวิธีการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า

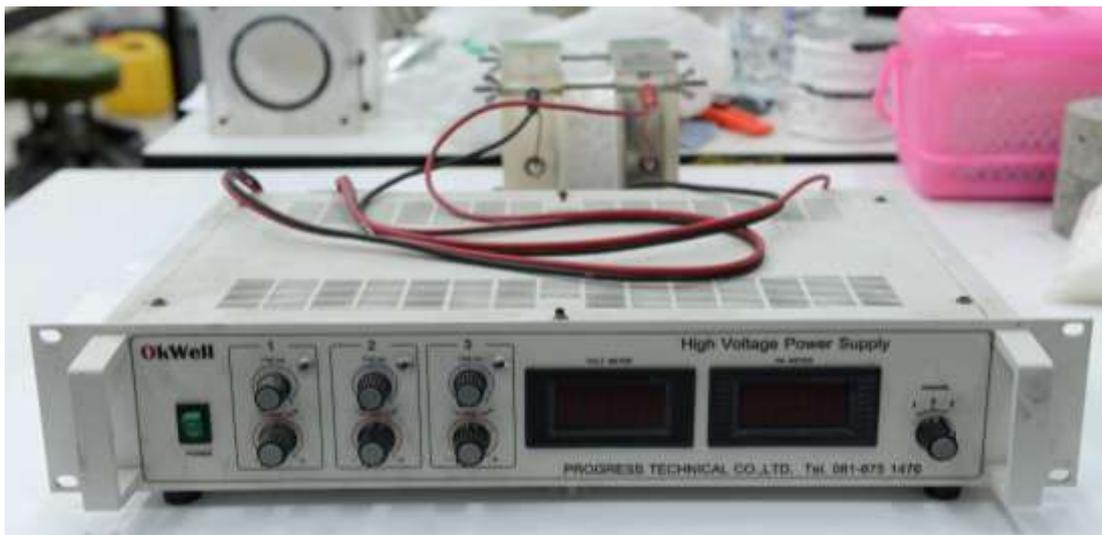
เตรียมตัวอย่างโดยนำคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. นำมาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของคอนกรีตให้มีความสูง 5 ซม. จากนั้นนำมาประกอบกับชุดทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ (รูปที่ 3.6) โดยเคลือบผิวรอบตัวอย่างด้วยซิลิโคน แล้วประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบ (รูปที่ 3.7) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (2012) ซึ่งจะทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าแรงดัน 60 โวลต์ ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตอ่านกระแสไฟฟ้าเป็นแอมแปร์ เก็บข้อมูลทุก 30 นาที เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานคลอไรด์ ตามสมการที่ 3.2 ซึ่งอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าสะสมของตัวอย่างคอนกรีต (Total charge passed) หน่วยเป็นคูลอมป์

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.2)$$

- โดยที่  $Q$  คือ ประจุไฟฟ้าสะสมที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (Coulomb)  
 $I_0$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาเริ่มทำการทดสอบ (Ampere)  
 $I_t$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้า ณ เวลาเวลาใดๆ นับจากเริ่มการทดสอบ (Ampere)



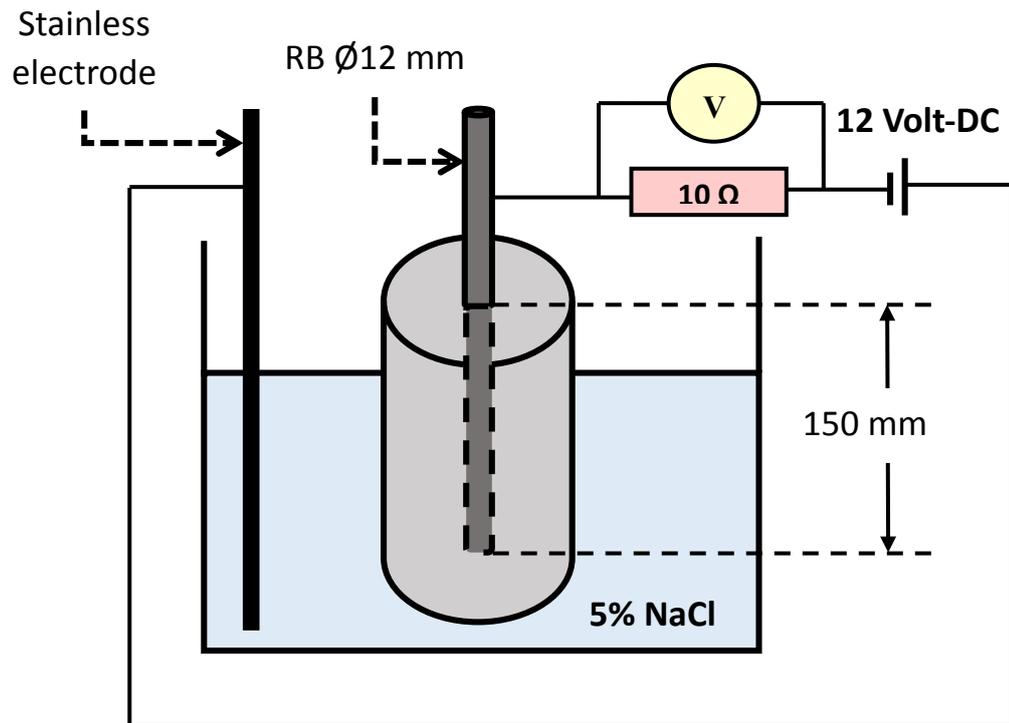
รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

### 3.3.9 การทดสอบการกัดของของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตโดยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งประยุกต์จากการทดสอบตามมาตรฐาน NT Build 356 (1989) ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยทำการฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 12 มม. ที่มีความยาวประมาณ 20 ซม. ฝังลงในเนื้อคอนกรีตลึก 15 ซม. ที่บริเวณศูนย์กลางหน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต เพื่อให้เหล็กมีระยะหุ้มของคอนกรีตเท่าๆ กัน ประมาณ 5 ซม. แล้วทำการถอดแบบหล่อหลังหล่อคอนกรีตเสร็จ 24 ชั่วโมง นำไปบ่มในน้ำ และทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน นำไปทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ให้ระดับของสารละลายอยู่ต่ำกว่าระดับผิวตัวอย่างคอนกรีต 5 ซม. จากนั้นต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 12 โวลต์ เข้าสู่ก่อนตัวอย่างทดสอบโดยนำขั้วบวกไปต่อเครื่องตัวต้านทาน 10 โอห์ม แล้วเชื่อมเข้ากับเหล็กที่ฝังในคอนกรีต และขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นสแตนเลส ซึ่งมีความเป็นอิเล็กโตรด (รูปที่ 3.8 และ 3.9) จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจร โดยวัดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน 10 โอห์ม ทุกๆ 6 ชั่วโมง วันละ 4 ครั้ง และวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านติดต่อกันเป็นเวลา 7 วัน นับจากวันที่เริ่มทำการทดสอบ



รูปที่ 3.8 การต่อวงจรของการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริม



รูปที่ 3.9 การติดตั้งตัวอย่างเข้ากับชุดทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

### 3.3.10 การทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแห้ง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 (2008) และ ASTM C 490 (2011) ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  ซม<sup>3</sup> โดยทำการถอดแบบหลังจากการหล่อคอนกรีตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างแห้งคอนกรีตแช่น้ำ จนมีอายุครบ 72 ชั่วโมง แล้วจึงนำตัวอย่างแห้งคอนกรีตขึ้นจากน้ำและเช็ดผิวตัวอย่างคอนกรีตด้วยผ้า และวัดความยาวเริ่มต้นทันที โดยใช้ชุดทดสอบการหดตัวที่มีไดอัลเกจแบบอนาล็อกที่สามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.0001 นิ้ว (รูปที่ 3.10) หลังจากนั้นนำตัวอย่างแห้งคอนกรีตไปใส่ไว้ในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าร้อยละ  $50 \pm 5$  และวัดการหดตัวที่อายุ 1, 3, และ 7 วัน และทุกๆอายุ 14 วัน จนครบอายุ 182 วัน และนำไปคำนวณค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$L = \frac{L_x - L_i}{L_G} \quad (3.3)$$

โดยที่	$L$	คือ ค่าการหดตัวแห้ง ( $\times 10^{-6}$ inch/inch)
	$L_i$	คือ ความยาวเริ่มต้น
	$L_x$	คือ ความยาวที่เวลาใดๆ
	$L_G$	คือ ความยาวของแท่งเกจ (Gauge length)



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ทดสอบค่าการหดตัวของคอนกรีต