

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผงหินปูน ทราย แก้วกันเตา และน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2532 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ไม่จับตัวเป็นก้อน
2. เถ้าลอย (Fly ash) ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง และจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง แหล่งละ 1 ชนิด
3. แก้วกันเตา (Bottom Ash) ใช้แก้วกันเตาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง จำนวน 3 ชนิด ซึ่งมีชนิดของถ่านหินต่างกัน ได้แก่ BA-HS (Hunter Valley / Spring Creek), BA-HM (Hunter Valley / Melawan) และ BA-CL (Clermont) โดยนำแก้วกันเตาไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับให้อยู่ในสภาพค่าการกักเก็บน้ำ
4. ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-furnace slag)
5. ผงหินปูนขนาดความละเอียด 8 ไมโครเมตร ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม
6. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง
7. น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา

#### 3.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่สำคัญ ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ มีดังนี้

- 3.2.1 เครื่องผสมคอนกรีต (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 เครื่องผสมคอนกรีต

### 3.2.2 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีต (ภาพที่ 3.2)



ภาพที่ 3.2 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีต

### 3.2.3 เครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (ภาพที่ 3.3)



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความยาว

### 3.2.4 เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.01 กรัม (ภาพที่ 3.4)



ภาพที่ 3.4 เครื่องชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.01 กรัม

## 3.3 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดของวิธีการศึกษาได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน และคุณสมบัติด้านการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน โดยทำการประเมินความต้านทานซัลเฟต ใน 2 ลักษณะซึ่งได้แก่ การขยายตัว (Expansion) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

ในการศึกษาครั้งนี้คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ได้ทำการศึกษาได้แก่

3.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.1.2 ความละเอียดของวัสดุโดยใช้วิธีของเบลน (Blaine Fineness) ตามมาตรฐาน ASTM C204

3.3.1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C188

3.3.1.4 ถ่ายภาพอนุภาคของวัสดุประสาน โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM)

3.3.1.5 ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้ากั้นเตา (WR) กระทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri and Tangtermsirikul [26] หลังจากนั้นหาความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสภาวะค่าการกักเก็บน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1

$$\rho_{WR} = \rho_{OD} \times (1 + WR) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\rho_{WR}$  คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสภาวะค่าการกักเก็บน้ำ

$\rho_{OD}$  คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ

WR คือ ค่าการกักเก็บน้ำ (%)

### 3.3.2 คุณสมบัติด้านกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุบ่มภายในต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้มวลรวมละเอียด คือ ทรายล้วน และแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา 3 ชนิด คือ BA-HS BA-HM และ BA-CL ในทรายร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 โดยน้ำหนัก ซึ่งสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  มม. โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วจากนั้นนำไปบ่มภายใต้ 2 กรณี คือ บ่มในน้ำและบ่มในอากาศภายในห้องปฏิบัติการซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 60 และอุณหภูมิประมาณ  $30^{\circ} - 35^{\circ}\text{C}$  ตลอดเวลาจนถึงวันที่ทดสอบ โดยจะทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 91 วัน

### 3.3.3 คุณสมบัติด้านการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต

#### 3.3.3.1 การหดตัวแบบอโตจีนัส

##### 1) การเตรียมตัวอย่าง

ใช้คอนกรีต ขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28.5$  เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน โดยใช้กาวอีพ็อกซีติดที่หัวน็อตเพื่อป้องกันการเคลื่อนของน็อต จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มใส 2-3 รอบ แล้วหุ้มตามด้วยฟลอยด์ 1-2 ชั้น เพื่อไม่ให้มีอากาศและความชื้นเข้าไปได้ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แบบตัวอย่างในการเคลือบด้วยฟิล์มใสและห่อหุ้มด้วยฟลอยด์

##### 2) อายุการบ่มและอายุทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส

หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีต โดยถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำขึ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นของแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีต วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวแล้ว นำขึ้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2$  °C โดยวางขึ้นตัวอย่างบนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชั้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1 3 5 7 14 21 28 42 และ 56 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวของคอนกรีตที่อายุบ่มต่างๆกัน โดยในการวัดการหดตัวแต่ละอายุนั้น จะต้องนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อทำการเปลี่ยนแปลง

การคำนวณร้อยละของการหดตัวของคอนกรีตที่อายุบ่มนั้น โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรก และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ จะนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวของคอนกรีต (Autogenous Shrinkage) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.2)

$$\text{การหดตัว (\%)} = [(L_i - L_t) / L_s] \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ  $L_i$  คือความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีต (มิลลิเมตร)

$L_t$  คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุต่างๆที่ต้องการวัดการหดตัว (มิลลิเมตร)

$L_s$  คือ ความยาวมาตรฐานของตัวอย่างคอนกรีต เท่ากับ 280.50 (มิลลิเมตร)

3.3.3.2 การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างคอนกรีต ใช้ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 37.5x37.5x285 มม. โดยในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตใช้ขึ้นตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 3 ชั้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยการหดตัวของตัวอย่างคอนกรีต

2) อายุการบ่มและอายุทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีต โดยถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปบ่มในน้ำ 7 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2$  °C เมื่อเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำ นำขึ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นของแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำขึ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวแล้ว นำขึ้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2$  °C โดยวางขึ้นตัวอย่างบนโต๊ะให้มี

ระยะห่างของแต่ละชั้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1 3 5 7 14 21 28 42 และ 56 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้งที่ อายุบ่มต่างๆกัน

การคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบแห้งนั้น โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรกหลังจากบ่มในน้ำ 7 วัน และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ จะนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.3)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (4.3)$$

โดย  $\Delta L$  คือค่าการหดตัวแบบแห้ง (%)

$L_x$  คือค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานหลังจากบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ (มม.)

$L_i$  คือค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มม.)

$L_g$  คือค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มม.

### 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้คือ ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด และผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย โดยตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรโดยน้ำหนัก ที่ใช้ทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ส่วนตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรโดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต และตารางที่ 3.3 แสดงการแทนที่เถ้าก้นเตาในทรายของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรโดยน้ำหนัก ที่ใช้ทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม. (กก.)						
	C	FA	S	BA	G	W	Ad
W35OPC	483	0	748	0	1003	169	5.8
W55OPC	372	0	748	0	1003	205	0
W35BA-HS10	483	0	673	65	1003	169	5.8
W35BA-HS30	483	0	524	195	1003	169	5.8
W35BA-HM10	483	0	673	60	1003	169	5.8

W35BA-HM30	483	0	524	180	1003	169	5.8
W35BA-CL10	483	0	673	66	1003	169	5.8
W35BA-CL30	483	0	524	198	1003	169	5.8
W55BA-HS10	372	0	673	65	1003	205	0
W55BA-HS30	372	0	524	195	1003	205	0
W55BA-HM10	372	0	673	60	1003	205	0
W55BA-HM30	372	0	524	180	1003	205	0
W55BA-CL10	372	0	673	66	1003	205	0
W55BA-CL30	372	0	524	198	1003	205	0
W35FA30	320	137	748	0	1003	160	5.5
W55FA30	250	107	748	0	1003	196	0
W35FA30BA-HS10	320	137	673	65	1003	160	5.5
W35FA30BA-HS30	320	137	524	195	1003	160	5.5
W35FA30BA-HM10	320	137	673	60	1003	160	5.5
W35FA30BA-HM30	320	137	524	180	1003	160	5.5
W35FA30BA-CL10	320	137	673	66	1003	160	5.5
W35FA30BA-CL30	320	137	524	198	1003	160	5.5
W55FA30BA-HS10	250	107	673	65	1003	196	0
W55FA30BA-HS30	250	107	524	195	1003	196	0
W55FA30BA-HM10	250	107	673	60	1003	196	0
W55FA30BA-HM30	250	107	524	180	1003	196	0
W55FA30BA-CL10	250	107	673	66	1003	196	0
W55FA30BA-CL30	250	107	524	198	1003	196	0

หมายเหตุ :

C: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, FA: เถ้าลอย, S: ททราย, BA: เถ้าก้นเตา, G: หิน, W: น้ำ, Ad: สารผสมเพิ่ม

WxFA30BA-yz หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าก้นเตาชนิด y แทนที่ในทรายเท่ากับร้อยละ z โดยปริมาตร เมื่อใช้ w/b เท่ากับ x โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรโดยน้ำหนัก ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต

	ส่วนผสมของคอนกรีต (กก./ม. <sup>3</sup> )
--	--

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย (FA)	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก (SL)	ผงหินปูน (LP)	ทราย	หิน	น้ำ
OPC	332	-	-	-	970	1080	182
C80FA20	266	67	-	-	970	1080	182
C80FA40	199	133	-	-	970	1080	182
C70SL30	232	-	100	-	970	1080	182
C50SL50	166	-	166	-	970	1080	182
C95LP5	315	-	-	17	970	1080	182
C90LP10	299	-	-	33	970	1080	182
C80FA15LP5	266	50	-	66	970	1080	182
C80FA10LP10	266	33	-	33	970	1080	182
C60FA35LP5	199	117	-	17	970	1080	182
C60FA30LP10	199	100	-	33	970	1080	182
C70SL25LP5	232	-	83	17	970	1080	182
C70SL20LP10	232	-	67	33	970	1080	182
C50SL45LP5	166	-	149	17	970	1080	182
C50SL40LP10	166	-	133	33	970	1080	182

**หมายเหตุ**

- C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
- LP หมายถึง ผงหินปูน
- FA หมายถึง เถ้าลอย
- SL หมายถึง ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
- LP5 หมายถึง แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
- FA20 หมายถึง แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด
- SL30 หมายถึง แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (กรัม) และแก้วกันเตาที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนิสและแบบแห้งของคอนกรีตผสมแก้วกันเตา

สัญลักษณ์	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน	ทราย	แก้วกันเตา		
			BA-HS	BA-HM	BA-CL
W35BA0	0.35	100%	-	-	-
W35BA-HS10	0.35	90%	10%vol. ทราย	-	-
W35BA-HS30	0.35	70%	30%vol. ทราย	-	-
W35BA-HM10	0.35	90%	-	10%vol. ทราย	
W35BA-HM30	0.35	70%	-	30%vol. ทราย	
W35BA-CL10	0.35	90%	-	-	10%vol. ทราย
W35BA-CL30	0.35	70%	-	-	30%vol. ทราย
W55BA0	0.55	100%	-	-	-
W55BA-HS10	0.55	90%	10%vol. ทราย	-	-
W55BA-HS30	0.55	70%	30%vol. ทราย	-	-
W55BA-HM10	0.55	90%	-	10%vol. ทราย	
W55BA-HM30	0.55	70%	-	30%vol. ทราย	
W55BA-CL10	0.55	90%	-	-	10%vol. ทราย
W55BA-CL30	0.55	70%	-	-	30%vol. ทราย