บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

1. ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันปริมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

2. ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na_2O, TiO_2, P_2O_5 และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO_2	17 – 25
Al_2O_3	3 – 8
Fe_2O_3	0.5 – 0.6
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
$Na_2O + K_2O$	0.5 – 1.3
TiO_2	0.1 – 0.4
P_2O_5	0.1 – 0.2
SO_3	1 – 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalaium Silicate)	$3\ CaO \cdot SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\ CaO \cdot SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\ CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

เปอร์เซ็นต์สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ สามารถคำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ชนิดต่างๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้นๆ โดยใช้สูตรการคำนวณของ Bogue ดังนี้

ปริมาณ $C_3S = 4.07\ (CaO) - 7.60\ (SiO_2) - 6.72\ (Al_2O_3) - 1.43\ (Fe_2O_3) - 2.85\ (SO_3)$

ปริมาณ $C_2S = 2.87\ (SiO_2) - 0.754\ (C_3S)$

ปริมาณ $C_2S = 2.65\ (Al_2O_3) - 1.69\ (Fe_2O_3)$

ปริมาณ $C_4AF = 3.04\ (Fe_2O_3)$

ตัวเลขในวงเล็บคือเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมดและปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime

ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก

ออกไซด์ต่างๆ (%) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		สารประกอบหลักคำนวณจากสมการของ Bogue
CaO	64.73	C_3S = 4.07 x (64.73 – 1.60) – 7.60 x (21.20)
SiO_2	21.20	– 6.72 x (5.22) – 1.43 x (3.08) – 2.85 x (2.01)
Al_2O_3	5.22	= 50.6%
Fe_2O_3	3.08	
MgO	1.04	C_2S = 2.87 x (21.20) – 0.754 x (50.60)
SO_3	2.01	= 22.7%
Na_2O	0.19	
K_2O	0.42	C_3A = 2.65 x (5.22) – 1.69 x (3.08)
Loss of Ignition (LOI)	1.45	= 8.6%
Insoluble Residue	0.66	
Free Lime	1.60	C_4AF = 3.04 x (3.08)
		= 9.4%

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ จะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของซีเมนต์ดังนี้

$2(3\ CaO\cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3\ CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 + Heat$ (229.31 kJ)

$2(2\ CaO\cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3\ CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 + Heat$ (89.60 kJ)

$3\ CaO\cdot Al_2O_3 + CaSO_4\cdot 2H_2O^{*} \rightarrow 3\ CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_4\cdot 31H_2O + Heat$ (234.35 kJ)

$44CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3 + CaSO_4\cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3\ CaO(Al_2O_3\cdot Fe_2O_3)\cdot 3CaSO_4 + Heat$ **(230.63 kJ)**

* หมายเหตุ $CaSO_4\cdot 2H_2O$ (ยิปซัม) ที่อยู่ในปฏิกิริยาของ $CaO\cdot Al_2O_3$ นี้เกิดจากการใส่ยิปซัมเข้าไประหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ $CaO\cdot Al_2O_3$ ก่อให้เกิดชั้นของ Etringite บนผิวอนุภาค $CaO\cdot Al_2O_3$ เพื่อช่วยหน่วงปฏิกิริยาของ $CaO\cdot Al_2O_3$ ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป

เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักสำเร็จ 80%

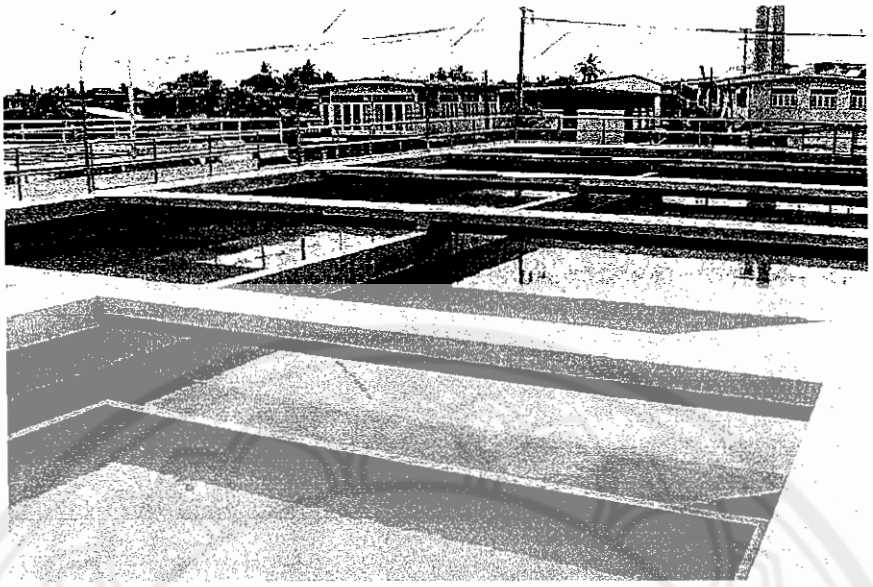
สารประกอบ	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

2.2 เถ้าตะกอนน้ำประปา

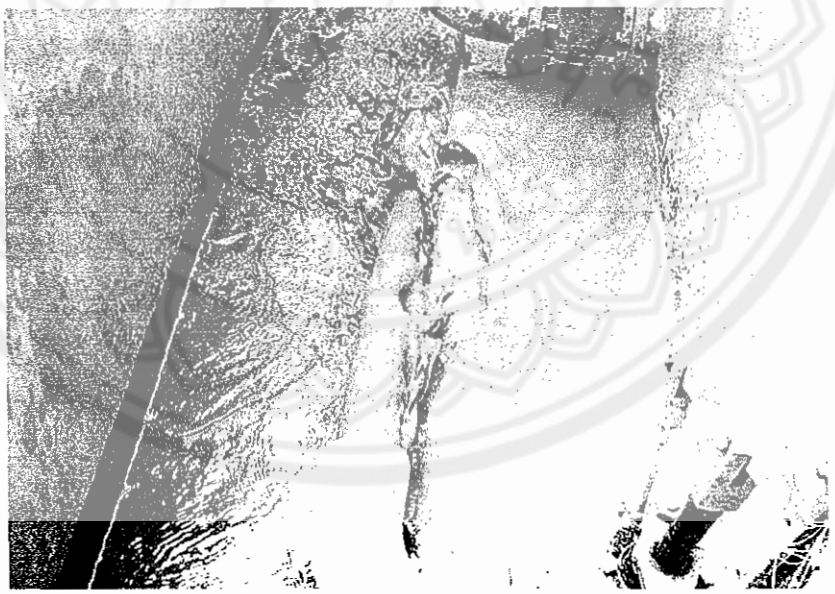
ตะกอนน้ำประปา คือ ตะกอนที่เหลือจากการผลิตน้ำประปาจากขั้นตอนการกำจัดตะกอนความขุ่น โดยใช้สารเคมีซึ่งจะทำการจับตัวกับตะกอนแขวนลอยในน้ำทำให้เกิดฟลอค (floc) จับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้นปล่อยให้เกิดการตกตะกอนจมสู่ก้นถังตกตะกอน ซึ่งสารเคมีที่ใช้คือ สารส้ม $(Al_2SO_4)_3\,14H_2O$

สำหรับตะกอนน้ำประปาที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของกองการประปา เทศบาลนครพิษณุโลกนั้น มีการระบายตะกอนออกจากถังตกตะกอน 1 ครั้ง/สัปดาห์ ดังรูปที่ 2.1และ 2.2 โดยใช้ สารส้มประมาณ 600 – 800 กิโลกรัม/วัน ในฤดูร้อนและฤดูหนาว และใช้สารส้มประมาณ 1500 – 2000 กิโลกรัม ในฤดูฝน (แล้วแต่สภาพความขุ่นของน้ำ) ซึ่งผลิตน้ำประปาประมาณ 40000 ลูกบาศก์เมตร/วัน

ตะกอนน้ำประปาที่ใช้ในการทดลองนำมาจากถังตกตะกอนที่ 1 ของกองการประปาเทศบาลนครพิษณุโลกในวันที่ 21 ธันวาคม 2545 โดยมีการใช้สารส้มในวันนั้นประมาณ 650 กิโลกรัม



รูปที่ 2.1 ถังตกตะกอนของกองการประปา เทศบาลนครพิษณุโลก



รูปที่ 2.2 การระบายตะกอนออกจากถังตกตะกอน

การเตรียมเถ้าตะกอนน้ำประปาจะมี 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การเผาในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
2. การร่อน เพื่อเลือกเฉพาะเถ้าตะกอนน้ำประปาที่มีอนุภาคละเอียดมาใช้งาน โดยเถ้าตะกอนน้ำประปาที่จะนำมาใช้ในการทดลองจะเป็นเถ้าตะกอนน้ำประปาที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

2.3 มาตรฐานสำหรับเถ้าลอยและสารปอซโซลานธรรมชาติที่จะใช้เป็นสารผสมเพิ่มคอนกรีต (ASTM C618 – 97a) [9]

เถ้าลอย คือ เถ้าอนุภาคเล็กที่เกิดจากกากที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน

สารปอซโซลาน คือ สารประกอบซิลิกา หรือ อลูมินา ที่มีคุณสมบัติซีเมนต์น้อย หรือไม่มี แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ และจะเกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติซีเมนต์การแบ่งประเภทของสารปอซโซลานเป็นดังนี้

CLASS N คือ วัตถุดิบ หรือ เถ้าของสารปอซโซลานธรรมชาติที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด

CLASS F คือ เถ้าลอยที่ผลิตจากถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) ที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดเถ้าลอยประเภทนี้จะมีคุณสมบัติปอซโซลาน

CLASS C คือ เถ้าลอยที่ผลิตจากถ่านหินประเภทลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) ที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด เถ้าลอยประเภทนี้นอกจากจะมีคุณสมบัติปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติซีเมนต์อีกด้วย โดยบางครั้งอาจจะมีปริมาณหินปูนมากกว่า 10%

ข้อกำหนดคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอยและสารปอซโซลานแต่ละประเภทเป็นไปตามตารางที่ 2.5 และ ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM 618 – 97a

Chemical Composition	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3$ และ Fe_2O_3), min%	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max%	3.0	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI), max%	10.0	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.5	1.5	1.5

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดกายภาพตามมาตรฐาน ASTM 618 – 97a

ข้อกำหนดทางกายภาพ	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
ความละเอียด : ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนเปียก, max%	34	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์			
7 วัน, min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75	75
28 วัน, min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75	75
ความต้องการน้ำ : max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	115	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave, max%	0.8	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)			
- ความหนาแน่น, max จากค่าเฉลี่ย %	5	5	5
- ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325, max จากค่าเฉลี่ย %	5	5	5
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325)	-	225	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน, max % ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03	0.03

2.4 Pozzolanic reaction [3]

สารประกอบในสารปอซโซลานซึ่งได้แก่ SiO_2 และ Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ จะได้ผลิตผลเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ดังสมการ

$$3\,Ca(OH)_2 + 2\,SiO_2 \longrightarrow 3\,CaO{\cdot}2\,SiO_2{\cdot}3\,H_2O$$

$$3\,Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \longrightarrow 3\,CaO{\cdot}2\,Al_2O_3{\cdot}3\,H_2O$$

อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาปอซโซลานิกนี้จะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ จึงต้องใช้เวลาระยะหนึ่งกว่าปฏิกิริยาจะสมบูรณ์

สำหรับสารปอซโซลานนั้นเหมาะสำหรับงานงานกรีตหลา มีอัตราการพัฒนากำลังอัดช้าเนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ แต่ให้แรงอัดในระยะหลังเท่ากันหรืออาจมากกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา โดยบ่มชื้นให้นานกว่าปกติ

2.5 มอร์ต้า (Cement Mortar) [7]

มอร์ต้า คือ ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับทรายมาตรฐาน โดยสัดส่วนของวัสดุแห้งมอร์ต้ามาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบตาม ASTM C 109 คือ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกประเภทให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็น 0.485 สำหรับปูนซีเมนต์อย่างอื่นให้ใช้ปริมาณน้ำมากพอที่จะให้ค่าการไหลเป็น 110 ±5%

ทรายมาตรฐาน

ใช้ทรายมาตรฐานชนิด Graded Sand ตามมาตรฐาน ASTM C778 ซึ่งมีคุณสมบัติและขนาดคละดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดคละของทรายมาตรฐาน

Characteristics	Graded Sand
Grading, percent passing sieve:	
1.18 mm (No. 16)	100
850 μm (No. 20)	-
600 μm (No. 30)	96 to 100
425 μm (No. 40)	65 to 75
300 μm (No. 50)	20 to 30
150 μm (No. 100)	0 to 4
Difference in air content of mortars made with washed and unwashed sand, max, %air	1.5
Source of Sand	Ottawa, IL

หมายเหตุ เนื่องจากทรายที่ขนาดแตกต่างกันจะทำให้ความข้นเหลวของมอร์ต้าเปลี่ยนแปลง จึงควรระวังทรายมาตรฐานที่คัดขนาดและคลุกเคล้าดีแล้วเกิดการแยกตัว ในการเทเอาทรายออกจากถุงลงในถังเก็บหรือในการตักทรายจากถุงหรือถังเก็บ ต้องระวังอย่าให้เป็นกองสูงหรือเป็นหลุมเพราะทรายเม็ดโตจะไหลลงไปรวมกัน ถังเก็บทรายควรมีขนาดใหญ่พอที่จะไม่เกิดสภาพเช่นนี้ ห้ามเอาทรายออกจากถังเก็บโดยวิธีทำช่องที่ก้นถังแล้วปล่อยให้ทรายไหลออกมาเอง

2.6 คุณสมบัติทางกลและความคงทนของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบ

บุรฉัตรและพีรชล [4] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบโดยคุณสมบัติที่ศึกษาคือ องค์ประกอบทางเคมี, คุณสมบัติทางกายภาพ, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง, ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น, การหดตัวแบบออโตจิเนียสและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผล (0.4, 0.5 และ 0.6) และร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50)

จากการศึกษาพบว่ามอร์ต้าผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงสูงสุด เมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นความสามารถด้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด การหดตัวแบบออโตจิเนียส การหดตัวแบบแห้งและความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเพิ่มขึ้น

2.7 การใช้ขี้เถ้าขยะมูลฝอยในคอนกรีต

กฤษฎาและคณะ [1] ได้ทำการทดลองนำเถ้ากระดาษและเถ้าใบไม้ ซึ่งเตรียมโดยการนำวัสดุไปเผาในเตาแล้วบดเป็นเวลา 45 นาที นำมาเป็นส่วนผสมของมอร์ต้า โดยในการทดลองจะใช้ w/b เท่ากับ 0.3 เปอร์เซ็นต์แทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 5 – 30 % ทำการทดสอบการไหล เวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุด ค่ากำลังอัดที่ 3, 7 และ 28 วัน และหาคุณสมบัติของเถ้าทั้งสองพบว่าทั้ง PA และ LA จะมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) แต่ค่า LOI สูงกว่า OPC เถ้าทั้งสองมีลักษณะพื้นผิวคล้ายกับ OPC แต่จะมีความละเอียดสูงกว่าส่วนประกอบทางเคมี พบว่า LA มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3, Fe_2O_3 ใกล้เคียงกับ OPC ส่วน LA จะมี SiO_2 และ Fe_2O_3 น้อยกว่า OPC แต่มี Al_2O_3 มากกว่า OPC และในการทดสอบพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์แทนที่ของ LA เพิ่มขึ้น ค่าเวลาการก่อตัวจะช้าลง ส่วนเมื่อเปอร์เซ็นต์แทนที่ของ PA เพิ่มขึ้น ค่าเวลาการก่อตัวจะเร็วขึ้นและเมื่อเปอร์เซ็นต์แทนที่ของ PA และ LA เพิ่มขึ้น ค่าการไหลจะลดลงและค่ากำลังอัดที่ 3, 7 และ 28 วัน ยังคงต่ำกว่ามอร์ต้ามาตรฐานทุกสัดส่วนการแทนที่