เฟอร์โรซีเมนต์

Ferrocement

นายกิตติศักดิ์ เกษตรธรรม

นายปรีดา โยธะคง

นายศักดิ์ดา ตาทิพย์

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ... 10 ก.ค. 2543
เลขทะเบียน ... 4310158
เลขเรียกหนังสือ ... TP
884.L5
ก1675ฟ
มหาวิทยาลัยนเรศวร
2542

โครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2542

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรมโยธา

หัวข้อโครงงานวิศวกรรมโยธา	: เฟอร์โรซีเมนต์		
ผู้ดำเนินงาน	: นายกิตติศักดิ์	เกษตรธรรม	รหัส 39360227
	: นายปรีดา	โยธะคง	รหัส 39361290
	: นายศักดิ์ดา	ตาทิพย์	รหัส 39361423
ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมโยธา	: รศ. วิชัย	ฤกษ์ภูริทัต	
สาขาวิชา	: วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	: วิศวกรรมโยธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์	
ปีการศึกษา	: 2542		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานวิศวกรรมโยธาฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรมโยธา

..... ประธานกรรมการ
(รศ. วิชัย ฤกษ์ภูริทัต)

..... กรรมการ
(อาจารย์วรางค์ลักษณ์ ซ่อนกลิ่น)

.....หัวหน้าภาค
(ผศ.สมบัติ ชื่นชูกลิ่น)

หัวข้อโครงงานวิศวกรรมโยธา : เฟอร์โรซีเมนต์
ผู้ดำเนินงาน : นายกิตติศักดิ์ เกษตรธรรม รหัส 39360227
: นายปรีดา โยธะคง รหัส 39361290
: นายศักดิ์ดา ตาทิพย์ รหัส 39361423
ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมโยธา : รศ. วิชัย ฤกษ์ภูริทัต
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา : วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา : 2542

บทคัดย่อ

โครงงานวิศวกรรมฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติของเฟอร์โรซีเมนต์ เพื่อนำมาทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์ขนาดเล็ก เปรียบเทียบกับเรือที่ทำจากวัสดุอื่น ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ในด้านราคา น้ำหนัก ข้อดีข้อเสีย และเพื่อเผยแพร่วัสดุเฟอร์โรซีเมนต์ให้เป็นที่รู้จักให้มากขึ้น

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ โดยการทดสอบคุณภาพวัสดุ การทดสอบจะกระทำหลังการบ่มจนได้ระยะเวลา 1 วัน, 3วัน, 7วัน, และ 28 วัน โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาซีเมนต์, การทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาซีเมนต์ และการทดสอบกำลังรับแรงดัดของแผ่นพื้นเฟอร์โรซีเมนต์ตัวอย่างขนาด กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร

จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำวัสดุเฟอร์โรซีเมนต์ทำเรือที่มีขนาด ยาว 4 เมตร กว้าง 1 เมตร หนา 2.5 เซนติเมตร รับน้ำหนักบรรทุกได้ 433 กิโลกรัม ราคาทั้งสิ้น 2,684 บาท

Project title	: Ferrocement			
Name	: Mr. Kittisak	Kasettum	code	39360227
	Mr. Preeda	Yothakhong	code	39361290
	Mr. Sakda	Tathip	code	39361423
Protect advisor	: Asso. Prof. Vichai	Rurkpuritat		
Major	: Civil Engineering			
Department	: Civil Engineering			
Academic year	: 1999			

Abstract

The purpose of this project is to study the properties of ferrocement for making a small ferrocement boat and compare with the other kind of boat in term of cost, weight, advantage and disadvantage, and the final is to spread the ferrocement to public.

The properties of materials have been found out by means of laboratory testing. Materials have been tested after curing in 1 days, 3 days, 7 days, and 28 days period. Compression test of cement mortar, tensile test of cement mortar and flexural test of ferrocement plate 30 cm. wide and 50 cm. long.

Ferrocement material can be used for building a small ferrocement boat 4 meter long, 1 meter wide, 2.5 cm. thickness. The load capacity is 433 kg with 2,684 baht of cost.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการโครงงานขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วิชัย ฤกษ์ภูริทัต ที่กรุณาให้คำปรึกษา ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของเนื้อหาวิชาการ ขอบเขตและรูปแบบของโครงงาน ตลอดจนคำชี้แนะต่าง ๆ เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการปฏิบัติและแก้ไขให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ท่านอื่น ๆ และพนักงานภาควิศวกรรมโยธาทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการโครงงาน

สุดท้ายนี้คณะผู้ดำเนินการโครงงานขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ทุนการศึกษาและความรักความเข้าใจตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่เรียน เล่น มาด้วยกันและคอยให้กำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

นายกิตติศักดิ์ เกษตรธรรม
นายปรีดา โยธะคง
นายศักดิ์ดา ตาทิพย์

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ (ไทย)		ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ)		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		จ
สารบัญรูป		ช
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	หลักการและทฤษฎี	4
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม	16
บทที่ 4	ผลการทำโครงงานวิศวกรรม	49
บทที่ 5	วิเคราะห์และสรุปผล	64
บรรณานุกรม		69
ภาคผนวก		70
ประวัติผู้แต่ง		148

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์กำหนดส่วนขนาดคละของทราย 17
ตารางที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดกำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์มาตรฐาน 24
ตารางที่ 3.3 เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตามาตรฐาน 25
ตารางที่ 3.4 การประมาณราคาวัสดุ 32
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการหาขนาดคละของทราย 51
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 1 วัน 53
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน 53
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน 54
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน 54
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 1 วัน 56
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน 56
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน 57
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน 57
ตารางที่ 5.1 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเฟอร์โรซีเมนต์ 67
ตารางที่ ผ1 ปริมาณความต้องการและการบริโภคปูนซีเมนต์ 72
ตารางที่ ผ2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 74
ตารางที่ ผ3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ 75
ตารางที่ ผ4 ตัวอย่างการคำนวณสารประกอบหลัก 76
ตารางที่ ผ5 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 78
ตารางที่ ผ6 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ 80% 86
ตารางที่ ผ7 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน มอก. 15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517) 92
ตารางที่ ผ8 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน มอก. 15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517) 94
ตารางที่ ผ9 คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม 97
ตารางที่ ผ10 การแบ่งประเภทของมวลรวมและลักษณะตาม มอก. 566 107
ตารางที่ ผ11 ลักษณะผิวของมวลรวมตาม มอก. 566 108
ตารางที่ ผ12 ตัวอย่างการทดลองหาขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ 109

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ผ13 การวิเคราะห์ขนาดคละ 112

ตารางที่ ผ14 คุณสมบัติของมวลรวมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต 118

ตารางที่ ผ15 ประเภทของการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม 120

ตารางที่ ผ16 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม 121

ตารางที่ ผ17 ข้อกำหนดขนาดคละของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต 122

ตารางที่ ผ18 ข้อกำหนดสิ่งเจือปน ของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต 122

ตารางที่ ผ19 ขอบเขตและผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำ 127

ตารางที่ ผ20 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโดยสารประกอบเพิ่มต่างๆ 131

ตารางที่ ผ21 สรุปคุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่างๆ ตามข้อกำหนดมาตรฐาน 145

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เรือเฟอร์โรซีเมนต์ยาว 54 ฟุต ในฮ่องกง	8
รูปที่ 2.2 Ferrocement sampan ในประเทศไทย	8
รูปที่ 2.3 600 DWT oil Barge launched ปี 1974 ในเกาหลี	9
รูปที่ 2.4 เรือที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์ ในประเทศนิวซีแลนด์	9
รูปที่ 2.5 เรือ Cox's Bazar ในประเทศบังกลาเทศ	10
รูปที่ 2.6 เรือเฟอร์โรซีเมนต์หางยาว ในประเทศไทย	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างเรือกระทะ ในประเทศอินเดีย	11
รูปที่ 2.8 เรือกระทะที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์	11
รูปที่ 2.9 หลังคา "monopod" ในประเทศฟิลิปปินส์	12
รูปที่ 2.10 หลังคาบ้านเฟอร์โรซีเมนต์ในเมือง Orissa ในประเทศอินเดีย	12
รูปที่ 2.11 หลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ ใน Auroville City, Pomdicherry ในประเทศอินเดีย	13
รูปที่ 2.12 หลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ในหอประชุม ในสหภาพโซเวียต	13
รูปที่ 2.13 หลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ โรงเพาะช่ำทางการเกษตร ในสหภาพโซเวียต	14
รูปที่ 2.14 หลังคาโค้งที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์ มีช่วงหลังคา 17 เมตร ที่เมือง Leningrad ในสหภาพโซเวียต	14
รูปที่ 2.15 ไซโลที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์ ในประเทศไทย	15
รูปที่ 2.16 การนำมอร์ตาซีเมนต์มาทำโอ่ง ในประเทศไทย	15
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขอบเขตส่วนขนาดคละของทราย	18
รูปที่ 3.2 Hexagonal Wire Mesh	19
รูปที่ 3.3 Weld Wire Mesh	19
รูปที่ 3.4 Woven Mesh	20
รูปที่ 3.5 Expanded Metal Mesh	20
รูปที่ 3.6 Watson Mesh	21
รูปที่ 3.7 น้ำยาผสมปูนกันซึม	21
รูปที่ 3.8 วัสดุทากันซึม	22
รูปที่ 3.9 การเรียงตัวของขนาดคละที่ต่างกัน	23
รูปที่ 3.10 แสดงแบบแปลนและหน้าตัดของเรือ	26
รูปที่ 3.11 รูปประกอบการคำนวณหาปริมาตรของเรือ	27

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.12 รูปประกอบการคำนวณปริมาตรของเรือส่วนที่ถูกน้ำแทนที่ 28
รูปที่ 3.13 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก 29
รูปที่ 3.14 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก A 29
รูปที่ 3.15 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก C 30
รูปที่ 3.16 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก D 30
รูปที่ 3.17 การดัดเหล็ก 33
รูปที่ 3.18 การดัดเหล็ก 33
รูปที่ 3.19 การดัดเหล็ก 34
รูปที่ 3.20 การดัดเหล็ก 34
รูปที่ 3.21 การผูกเหล็กเสริม 35
รูปที่ 3.22 การผูกเหล็กเสริม 35
รูปที่ 3.23 การใส่ลวดตาข่าย 36
รูปที่ 3.24 การใส่ลวดตาข่าย 36
รูปที่ 3.25 การใส่ลวดตาข่าย 37
รูปที่ 3.26 การใส่ลวดตาข่าย 37
รูปที่ 3.27 แบบเทพื้นท้องเรือ 38
รูปที่ 3.28 การปรับระดับแบบพื้นท้องเรือ 38
รูปที่ 3.29 การเทพื้นท้องเรือ 39
รูปที่ 3.30 การเทพื้นท้องเรือ 39
รูปที่ 3.31 การฉาบปูนตัวเรือ 40
รูปที่ 3.32 การฉาบปูนตัวเรือ 40
รูปที่ 3.33 การตกแต่งผิว 41
รูปที่ 3.34 การตกแต่งผิว 41
รูปที่ 3.35 การตกแต่งผิว 42
รูปที่ 3.36 การตกแต่งผิว 42
รูปที่ 3.37 การตกแต่งผิว 43
รูปที่ 3.38 การตกแต่งผิว 43
รูปที่ 3.39 การบ่มเรือ 44

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.40 การบ่มเรือ	44
รูปที่ 3.41 การทาวัสดุกันซึม	45
รูปที่ 3.42 การทาวัสดุกันซึม	45
รูปที่ 3.43 การทาสี	46
รูปที่ 3.44 การทาสี	46
รูปที่ 3.45 การทาสี	47
รูปที่ 3.46 การขนย้าย	47
รูปที่ 3.47 การขนย้าย	48
รูปที่ 3.48 การขนย้าย	48
รูปที่ 4.1 การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย	49
รูปที่ 4.2 การหาขนาดคละของทรายโดยวิธีร่อนด้วยตะแกรง	50
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการกระจายขนาดคละของทราย	51
รูปที่ 4.4 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์	52
รูปที่ 4.5 การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์	53
รูปที่ 4.6 การทดสอบหาค่ากำลังดัดของมอร์ตาซีเมนต์เสริมเหล็ก	58
รูปที่ 4.7 การทำตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาซีเมนต์เสริมเหล็ก	58
รูปที่ 4.8 วิธีการทดสอบหาค่าโมเมนต์ดัด	59
รูปที่ 4.9 การทดสอบการลอยตัวของตัวอย่างรูปกล่อง	60
รูปที่ 4.10 การทดสอบการลอยตัวของตัวอย่างรูปกล่อง	60
รูปที่ 4.11 การทดสอบการลอยตัวของเรือเฟอร์โรซีเมนต์	61
รูปที่ 4.12 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์	61
รูปที่ 4.13 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์	62
รูปที่ 4.14 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์	62
รูปที่ 5.1 ปัจจัยในการทำเฟอร์โรซีเมนต์ที่ดี	65
รูปที่ 5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของเฟอร์โรซีเมนต์	66
รูปที่ ผ1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์	73
รูปที่ ผ2 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ	77
รูปที่ ผ3 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก	78

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ผ4 ขั้นตอนการก่อตัวและของแข็งตัวของคอนกรีต 81

รูปที่ ผ5 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต 82

รูปที่ ผ6 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A 84

รูปที่ ผ7 ภาพขยายของ Momosulphate และ Ettringite 85

รูปที่ ผ8 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ 88

รูปที่ ผ9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น 89

รูปที่ ผ10 การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ 91

รูปที่ ผ11 แผนภาพแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในเนื้อมวลรวมและขบวนการย่อย
แปรสภาพจะเป็นตัวพิจารณาคุณสมบัติของมวลรวม ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติ
ของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว 98

รูปที่ ผ12 การระเบิดหิน 100

รูปที่ ผ13 แผนภาพแสดงขั้นตอนการโม่หิน 101

รูปที่ ผ14 เรือดูดทรายขึ้นล้างบนตะแกรง 102

รูปที่ ผ15 ลักษณะของกองเก็บทราย 102

รูปที่ ผ.16 ภาพตัดชั้นหน้าดิน 103

รูปที่ ผ.17 เรือดูด ดูดทรายในแอ่งน้ำ 103

รูปที่ ผ.18 ตะแกรงแยกกรวด 104

รูปที่ ผ.19 รูปร่างของหินที่มีระดับความแบนที่แตกต่างกัน 105

รูปที่ ผ20 เครื่องมือทดสอบความแบนของหิน (Thickness gauge) 105

รูปที่ ผ21 รูปร่างของหินที่มีระดับความยาวเรียวแตกต่างกัน 106

รูปที่ ผ22 เครื่องมือทดสอบความยาวเรียวของหิน 106

รูปที่ ผ23 การแบ่งชนิดของมวลรวมตามรูปร่างของอนุภาค 107

รูปที่ ผ24 ขนาดต่างๆ ของมวลรวม 109

รูปที่ ผ25 การเรียงตัวของมวลรวมขนาดคละต่างๆ กัน 111

รูปที่ ผ26 มวลรวมที่มีขนาดคละดี จะใช้ปริมาณน้ำสำหรับการผสมน้อย 111

รูปที่ ผ27 แผนภาพส่วนคละของมวลรวม 113

รูปที่ ผ28 ลักษณะแผนภาพของมวลรวมที่มีขนาดคละขาดตอน 114

รูปที่ ผ29 สภาพความชื้นของมวลรวม 115

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ผ30 ปริมาตรเพิ่มปรากฏของมวลรวมละเอียด 116

รูปที่ ผ31 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณมวลรวมละเอียด 117

รูปที่ ผ32 อิทธิพลของคุณสมบัติของมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต 119

รูปที่ ผ33 การแบ่งส่วนตัวอย่างโดยใช้ Riffle Sample 119

รูปที่ ผ34 วิธีแบ่งสี่ 120

รูปที่ ผ35 การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม 130

รูปที่ ผ36 ผลของการกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน 134

รูปที่ ผ37 คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป 137

รูปที่ ผ38 ลักษณะการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ 138

รูปที่ ผ39 อนุภาคของซีเมนต์จะจับตัวอยู่ในกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ 139

รูปที่ ผ40 การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่ม
ประเภทลดน้ำ 139

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิศวกรรม

เนื่องจากเรือที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นเรือที่ทำมาจากไม้ พลาสติก ไฟเบอร์กลาส สังกะสี หรือเหล็กก็ตาม ล้วนแต่มีราคาค่อนข้างสูง อายุการใช้งานไม่ยาวนานเพราะวัสดุที่นำมาทำเรือดังกล่าวมีคุณสมบัติไม่คงทน เช่น ไม้จะผุพังเมื่อถูกน้ำเป็นระยะเวลานาน พลาสติกจะเปราะแตกง่ายเมื่อสัมผัสกับแสงแดดเป็นเวลานาน สังกะสีและเหล็กจะเกิดสนิมเหล็กเมื่อสัมผัสน้ำ และราคาค่อนข้างแพง

จากการศึกษาในวิชาคอนกรีตเทคโนโลยีทำให้ได้ทราบถึงคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งน่าจะนำมาใช้ในการทำเรือได้

ดังนั้นโครงงานนี้ได้จัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นแนวทางในการนำซีเมนต์มอร์ตามาใช้ทำเรือเพราะคุณสมบัติมีความเหมาะสมไม่ว่าจะเป็นอายุการใช้งานที่ยาวนาน ราคาของวัสดุที่ไม่แพงมากนักและขั้นตอนการทำที่ง่ายไม่ยุ่งยาก ซึ่งโครงงานนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนตั้งแต่เตรียมงาน การคำนวนการประมาณราคาวัสดุ วิธีการทำตลอดทั้งสรุปเปรียบเทียบ ข้อดีและข้อเสียของเรือเฟอร์โรซีเมนต์กับเรือชนิดอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิศวกรรม

1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์ถึงลักษณะปัญหาการนำเฟอร์โรซีเมนต์มาประยุกต์ใช้

1.2.2 เพื่อนำเสนอข้อมูลและข้อเสนอแนะในการพัฒนาการนำเฟอร์โรซีเมนต์มาใช้

1.2.3 จัดทำเอกสารเสนอแนะแนวทางในการนำเฟอร์โรซีเมนต์มาใช้งาน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่ม

1.3.2 ได้เรียนรู้ถึงขั้นตอนการดำเนินงานในการนำเฟอร์โรซีเมนต์มาประยุกต์ใช้

1.3.3 ทำให้เกิดการนำงานด้านเฟอร์โรซีเมนต์มาใช้อย่างกว้างขวางและถูกวิธี

1.3.4 ทำให้งานทางด้านเฟอร์โรซีเมนต์เป็นที่รู้จักมากขึ้น มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ ต่อไป

1.4 ขอบเขตของโครงงานวิศวกรรม

1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีเรื่องแรงลอยตัว เพื่อคำนวณออกแบบเรือเฟอร์โรซีเมนต์

1.4.3 ศึกษาราคาของวัสดุที่นำมาใช้ในการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์

1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและพฤติกรรมของเฟอร์โรซีเมนต์

1.5.2 ศึกษาคุณสมบัติของเฟอร์โรซีเมนต์

1.5.3 ศึกษาข้อมูลทางด้านราคาของวัสดุในการทำเฟอร์โรซีเมนต์

1.5.4 วิเคราะห์ปัญหาในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเฟอร์โรซีเมนต์

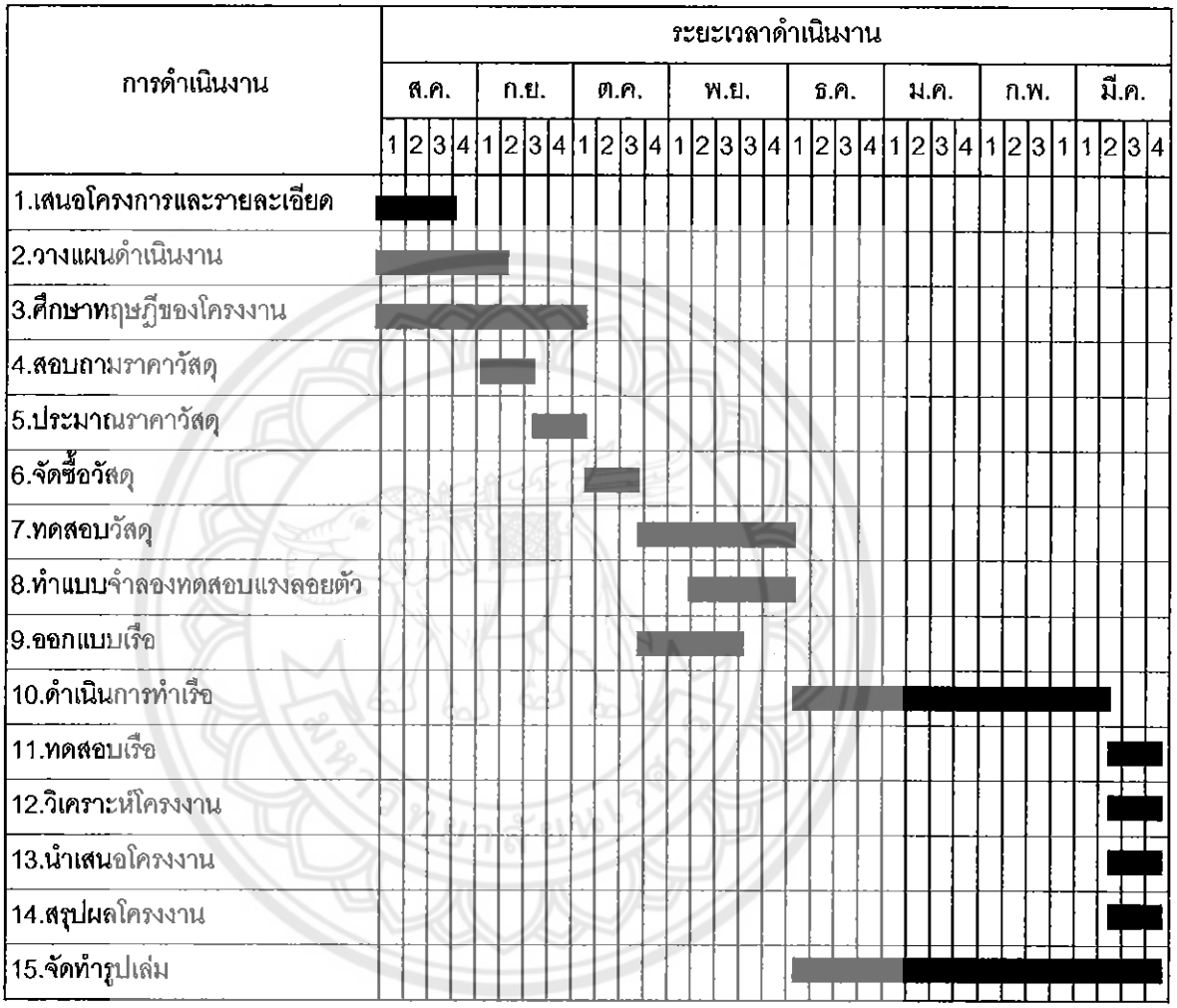
1.5.5 รวบรวมเรียบเรียงข้อมูล

1.5.6 พิมพ์รายงานและสรุปผลโครงงานวิศวกรรม

1.6 รายละเอียดงบประมาณของโครงงาน

1.6.1 ค่าวัสดุในการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์	1,800	บาท
1.6.2 ค่าวัสดุในการทำรายงาน	700	บาท
1.6.3 ค่าฟิล์มถ่ายรูป ล้างอัดรูป	500	บาท
รวม	3,000	บาท

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงงาน



บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ความหมายของเฟอร์โรซีเมนต์

เฟอร์โรซีเมนต์ เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วๆไป คือเหล็กเสริมที่ใช้เป็นเหล็กเส้นใยเล็ก ๆ จากนั้นจะพ่นหุ้มเหล็กเสริมนี้ด้วยมอร์ตา ดั้งนั้น เฟอร์โรซีเมนต์ จะบางกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป และลวดตะแกรงสามารถดัด ทำให้เกิดรูป ต่างๆ ได้หลายรูปแบบ

การผลิตคอนกรีตประเภทนี้มักใช้ในประเทศกำลังพัฒนาเพราะต้องใช้แรงงานผลิต ซึ่งเหมาะกับงานบางประเภท เช่น การทำเรือ สระว่ายน้ำขนาดเล็ก ไซโล ถังเก็บน้ำและหลังคารูปทรงต่าง ๆ คุณสมบัติประการสำคัญของ เฟอร์โรซีเมนต์ คือ มีความสามารถต้านทานต่อการแตกร้าวได้ดีกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

มอร์ตาที่ใช้ในงาน เฟอร์โรซีเมนต์นี้ประกอบด้วย ปูน ซีเมนต์ ทรายที่มีขนาดคละ และวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางประเภท เช่น ขี้เถ้าบางชนิด บางทีจะใส่กรวดขนาดเล็กลงไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของตะแกรง อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ จะใช้ 1.5 – 2.5 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.35 – 0.55

ส่วนตะแกรง มีการใช้วัสดุหลายประเภท เช่น ตะแกรงกรงไก่ เหล็กเสริมขนาดเล็ก ๆ ที่เชื่อมกันเป็นตะแกรง รวมไปถึงวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ เช่น ไม้ไผ่ เป็นต้น

The Academy Concrete Institute (ACI) ได้ลงความเห็นเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ว่า "เฟอร์โรซีเมนต์เป็นชนิดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเปลือกบาง โดยใช้ hydraulic cement ใช้เสริมเป็นชั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง และฉาบติดกับตาข่ายขนาดเล็ก (small diameter mesh) ตาข่ายอาจจะทำจากวัสดุจำพวกเหล็กหรือวัสดุอื่นที่เหมาะสม"

เบื้องหลังของแนวความคิดของเฟอร์โรซีเมนต์ คือ เฟอร์โรซีเมนต์นั้นสามารถทนต่อการยืด (Strain) ใกล้เคียงคอนกรีตเสริมเหล็ก และขนาดของการยืดขึ้นอยู่กับการกระจายของเหล็กเสริมที่กระจายอยู่ทั่วทั้งมวลของคอนกรีต เฟอร์โรซีเมนต์ใช้เป็นวัสดุโครงสร้างได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น ไม้ เหล็ก เพราะสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดได้ตามต้องการ ไม่ต้องถูกจำกัดเหมือนวัสดุอื่นทำได้สะดวก รวดเร็ว ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับวัสดุอย่างอื่น เฟอร์โรซีเมนต์

เป็นวัสดุพิเศษในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะมีพฤติกรรมแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ในลักษณะความแข็งแรง หลักการและความแปลกของเฟอร์โรซีเมนต์ เป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจ และนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

2.2 ประวัติความเป็นมาของเฟอร์โรซีเมนต์

ความเป็นมาของเฟอร์โรซีเมนต์เป็นเรื่องหนึ่งที่น่าสนใจ เมื่อปี 1848 Josep Louis Lambot ได้สร้างเรือพาย กระถางต้นไม้ ที่นั่ง และสิ่งอื่น ๆ อีก จากวัสดุที่เขาเรียกว่า "Ferciment" และได้นำเผยแพร่ในปี 1852 Lambot ได้กล่าวว่า การประดิษฐ์ของเขาเป็นผลิตภัณฑ์ตัวใหม่ที่สามารถแทนที่ไม้ ซึ่งข้อเสียของไม้ก็คือเมื่อสัมผัสน้ำนาน ๆ จะผุพัง แปรรูปยาก ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งโครงสร้าง โดยเขาได้ใช้ลวดเหล็กมาสานกันเป็นตาข่ายจนเป็นแผ่น จากนั้นเขาก็ใช้ปูนซีเมนต์ฉาบทับลวดตาข่ายที่เขาทำขึ้นมา

ปัจจุบันเรือของ Lambot เหลืออยู่ที่พิพิธภัณฑ์ Brignoles ในประเทศฝรั่งเศส ซึ่งมีขนาดกว้าง 4 ฟุต (1.22 เมตร) ยาว 12 ฟุต (3.66 เมตร) หนา 1 - 1.5 นิ้ว (25 – 38 มิลลิเมตร) จากนั้นในปี 1887 Gabellini และ Boon ได้นำเทคนิคการสร้างเรือของ Lambot ทำเรือใบ Zeemeeuw ที่มีชื่อเสียงมาก

ช่วงต้นของการพัฒนาเฟอร์โรซีเมนต์ ชาวฮอลันดาได้สร้างเรือเฟอร์โรซีเมนต์บรรทุกขี้เถ้าถ่านหินและขยะมูลฝอยสามารถบรรทุกได้ถึง 50 – 60 ตัน ในปี 1900 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้สร้างเรือคอนกรีตลำแรกขึ้นโดยตั้งชื่อว่า "concrete" มีความยาว 18 ฟุต (5.5 เมตร) และมีความหนา ¾ นิ้ว (19 มิลลิเมตร) โดยติดตั้งเครื่องยนต์ขนาดเล็ก มีความเร็วประมาณ 10 ไมล์ทะเล

ในปี 1940 Pier Luigi Nervi วิศวกรชาวอิตาเลียน ได้นำแนวคิดของ Lambot มาใช้ เมื่อเขาได้ทดลองและสังเกตเห็นว่าการเสริมเหล็กลวดตาข่ายในมอร์ตาเป็นวัสดุที่พิเศษทางกล จะมีการยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตา ลวดตาข่าย และเหล็กเสริม สามารถต้านทานต่อแรงกระแทก ในปี 1947 Nervi ได้สร้างโรงเก็บของเล็ก ๆ (Store House)ด้วยเฟอร์โรซีเมนต์ จากนั้นเขาก็ได้ทำหลังคาเฟอร์โรซีเมนต์คลุมสระว่ายน้ำที่โรงเรียนนายเรือ ด้วยความยาว 50 ฟุต (15 เมตร) และหลังคาที่ Turin Exhibition Hall ซึ่งเป็นหลังคาที่มีความยาว 300 ฟุต (91 เมตร)

ในปี 1958 สหภาพโซเวียตได้สร้างหลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ที่มีขนาดทั้งหมดประมาณ 108 ล้านตารางฟุต (10 ล้านตารางเมตร) มีความหนา 0.8 นิ้ว (20 มิลลิเมตร) ช่วงห่างของแปประมาณ 79 – 98 ฟุต (24 – 30 เมตร) ใช้สำหรับห้องขนาดใหญ่ อาคารนิทรรศการ ศูนย์การค้า ภัตตาคาร โรงเรียนเพาะช่ำของเกษตรกร

ในปี 1960 หลักฐานของเฟอร์โรซีเมนต์ปรากฏขึ้นอย่างมากมาย ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ในสหราชอาณาจักร นิวซีแลนด์และออสเตรเลีย มีเรือเฟอร์โรซีเมนต์ประมาณ 1,000 ลำ และมีการทำเพื่อการแข่งขันกันขึ้นในหลายประเทศ

ความสนใจเกี่ยวกับเฟอร์โรซีเมนต์ได้มากขึ้นซึ่ง New Zealand Ferro Cement Marine Association (NZFCMA) โดย Richard Hartly ในปี 1968 ด้วยการสนับสนุนของประชาชนชาว Auckland จุดมุ่งหมายเบื้องต้นของสมาคมเพื่อความก้าวหน้าทางด้านการส่งเสริมและการช่วยเหลือสิ่งก่อสร้างเกี่ยวกับเฟอร์โรซีเมนต์ในทะเล ได้จัดพิมพ์วารสารออกมาเผยแพร่

ในระหว่างนั้นองค์การสหประชาชาติ แสดงความสนใจในการใช้เฟอร์โรซีเมนต์สร้างเรือตกปลาในประเทศกำลังพัฒนา โครงการสร้างเรือเฟอร์โรซีเมนต์เริ่มในเอเชีย แอฟริกา แถบแปซิฟิก และลาตินอเมริกา ในปี 1968 FAO ได้เตรียมจัดการแนะแนวเทคนิคในการสร้างเรือเฟอร์โรซีเมนต์ในหลายประเทศที่กำลังพัฒนา ในปี 1972 FAO ได้ให้การสนับสนุนในการสัมมนาในระดับนานาชาติ ในหัวเรื่อง การออกแบบและการสร้างเรือตกปลาเฟอร์โรซีเมนต์ ในเมืองWellington ประเทศนิวซีแลนด์ การสัมมนาร่วมกันนานาชาติซึ่งเป็นองค์กรที่มีชื่อเสียงในเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ จากทั้งหมดของโลก จุดมุ่งหมายของการสัมมนาคือการรวบรวมความทันสมัยของข้อมูลในเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ ในเรื่องเกี่ยวกับทักษะ วิธีการสร้าง ราคา ประสบการณ์การในการบริหาร และสิ่งใหม่ ๆ ของศิลปะ ของเรือและวัสดุที่สร้าง มีการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับเรือเฟอร์โรซีเมนต์ การออกแบบและการสร้าง

ในปี 1972 Nation Academy of Science ของ สหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้ง Ad Hoc Panel ในการให้ประโยชน์ในเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์กับประเทศกำลังพัฒนาโดย ศาตราจารย์ Jame P. Romualdi แห่งมหาวิทยาลัย Carnegie Mellon U.S.A. เป็นประธาน และผู้เข้าร่วมโครงการต้องเป็นผู้มีประสบการณ์ในการคิดค้นและประยุกต์เฟอร์โรซีเมนต์และอื่น ๆ

จากรายงานเมื่อต้นปี 1973 ได้ระบุถึงผลกระทบครั้งยิ่งใหญ่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เฟอร์โรซีเมนต์ ผู้เข้าร่วมได้ชี้ให้เห็นว่าเฟอร์โรซีเมนต์เป็นวัสดุเทคโนโลยีที่เหมาะสมและได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนา จากการรายงานระบุว่าประชาชนทั่วไปไม่เข้าใจนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้

การศึกษาเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ในทวีปเอเชียการสนับสนุนจาก Asian Institute of Technology (AIT) และ U.S. National Academy of Science (NAS) จัดตั้งขึ้นในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในเดือนพฤศจิกายน 1974 ได้ศึกษาถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีของเฟอร์โรซีเมนต์มีส่วนในประเทศที่กำลังพัฒนา วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ นักบริหารและนักธุรกิจ ให้โอกาสแก่พวกเขาเพื่อการแลกเปลี่ยนประสบการณ์เกี่ยวกับเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ ได้มีการแนะนำต้นกำเนิด เพื่อส่ง

เสริมให้ทั่วโลกรู้จักกว้างขวางมากยิ่งขึ้น เผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ในรายละเอียดอื่น เดือนตุลาคม ปี 1976 International Ferrocement Information Center (IFIC) ได้สร้างขึ้นที่ Asian Institute of Technology กรุงเทพ ฯ ประเทศไทย ด้วยการสนับสนุนของ International Development Research Center (IDRC) ของแคนาดาและ The United States Agency for International Development (USAID) ตลอดทั้งการพัฒนาเศรษฐกิจแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภายใต้คณะกรรมการจากรัฐบาลไทยและรัฐบาลของประเทศนิวซีแลนด์

เอกสารเกี่ยวกับเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งโดยทั่วไปมีต้นกำเนิดมาจากประเทศนิวซีแลนด์ โดย New Zealand Ferro Cement Marine Association (NZFCMA) ได้รับการพัฒนามากขึ้นโดย IFIC ซึ่งปัจจุบันได้เผยแพร่ทั้งในเรื่องเครื่องมือ และข้อมูลเฟอร์โรซีเมนต์ของศูนย์

ในต้นปี 1977 the Academy Concrete Institute (ACI) ได้จัดตั้งคณะกรรมการ เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องเฟอร์โรซีเมนต์ ปัจจุบันเป็นที่ชัดเจนว่าเฟอร์โรซีเมนต์ เป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สร้างได้หลายอย่าง และเป็นที่คาดหวังว่าจะมีการนำเฟอร์โรซีเมนต์ไปใช้ประโยชน์มากขึ้นในประเทศไทย

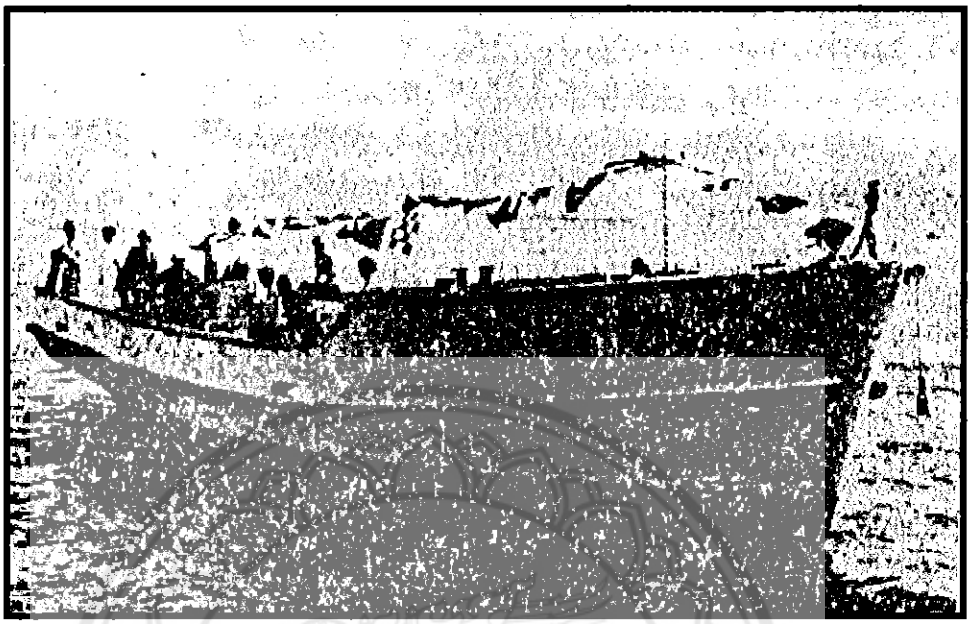
2.3 องค์ประกอบของเฟอร์โรซีเมนต์

แผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งเป็นแผ่นบาง ๆ ประกอบด้วยชั้นลวดตาข่าย ฉาบด้วยซีเมนต์มอร์ตาที่เป็นปูนเค็ม (high ratio of cement to sand) และมีการบ่มที่ถูกต้อง ส่วนประกอบหลักของเฟอร์โรซีเมนต์ได้แก่

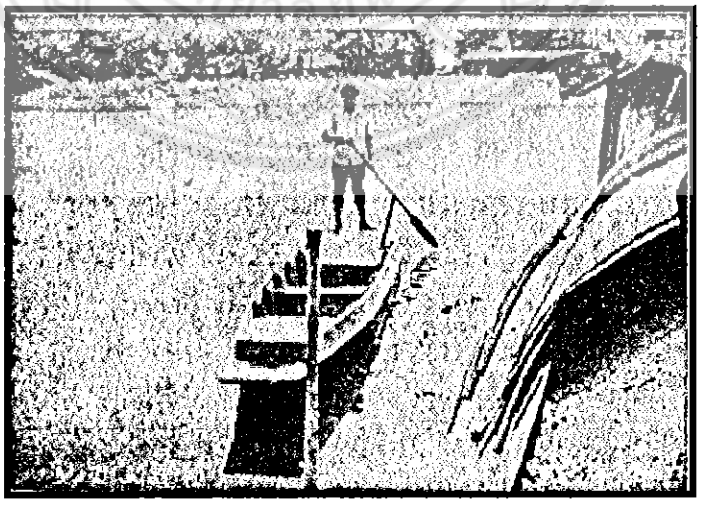
- ลวดตาข่าย (Wire Mesh)
- เหล็กเสริม (Skeletal Steel)
- ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)
- มวลรวม (Aggregates)
- น้ำ (Water)
- สารป้องกันการซึม (Waterproofing)

2.4 หลักฐานการนำเฟอร์โรซีเมนต์ไปใช้

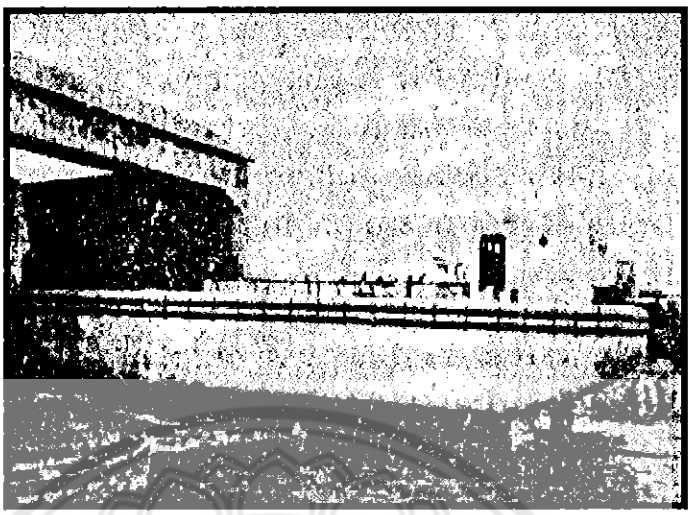
มีหลักฐานแสดงให้เห็นว่าเฟอร์โรซีเมนต์ได้ถูกพบและเผยแพร่ขยายอย่างกว้างขวาง ถึงประโยชน์ที่แตกต่างกัน และมีการนำไปใช้ที่แตกต่างกัน ประโยชน์หลัก ๆ ของเฟอร์โรซีเมนต์ได้แก่ การนำไปสร้างเรือ หลังคา โรงเก็บของ แท็งก์น้ำ บ้านพัก



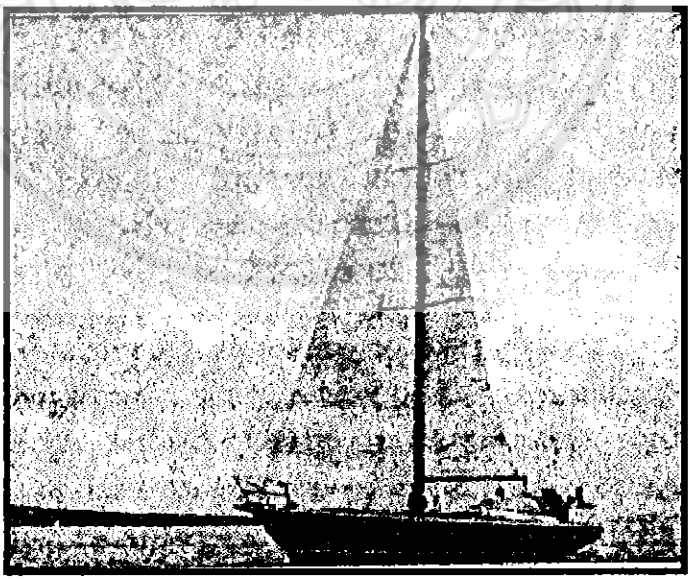
รูปที่ 2.1 เรือเฟอร์โรซีเมนต์ ยาว 54 ฟุต ในฮ่องกง



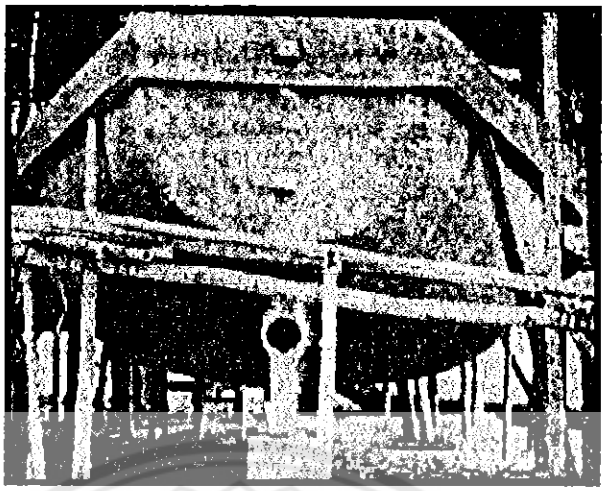
รูปที่ 2.2 Ferrocement sampan ในประเทศไทย



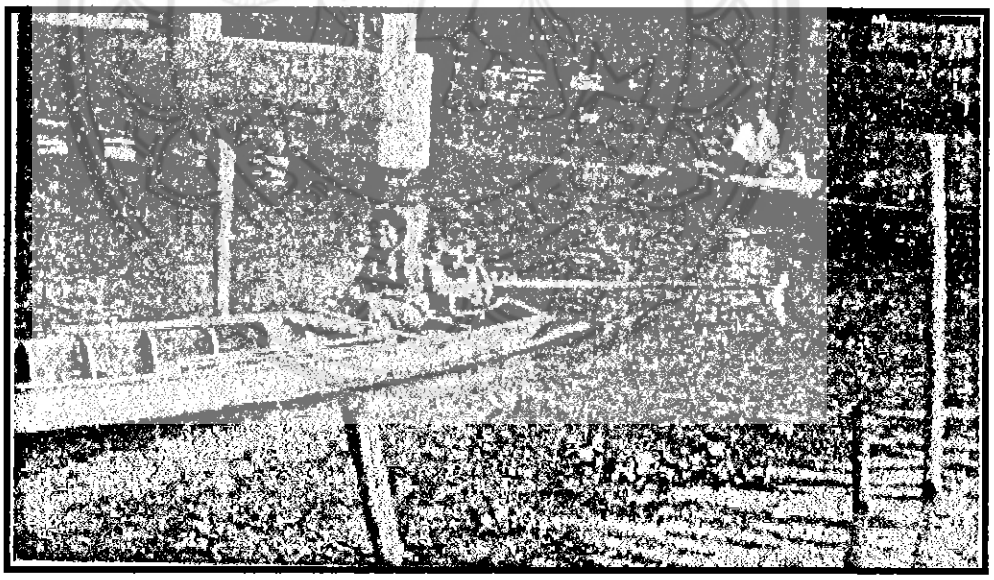
รูปที่ 2.3 600 DWT oil Barge launched ปี 1974 ในเกาหลี



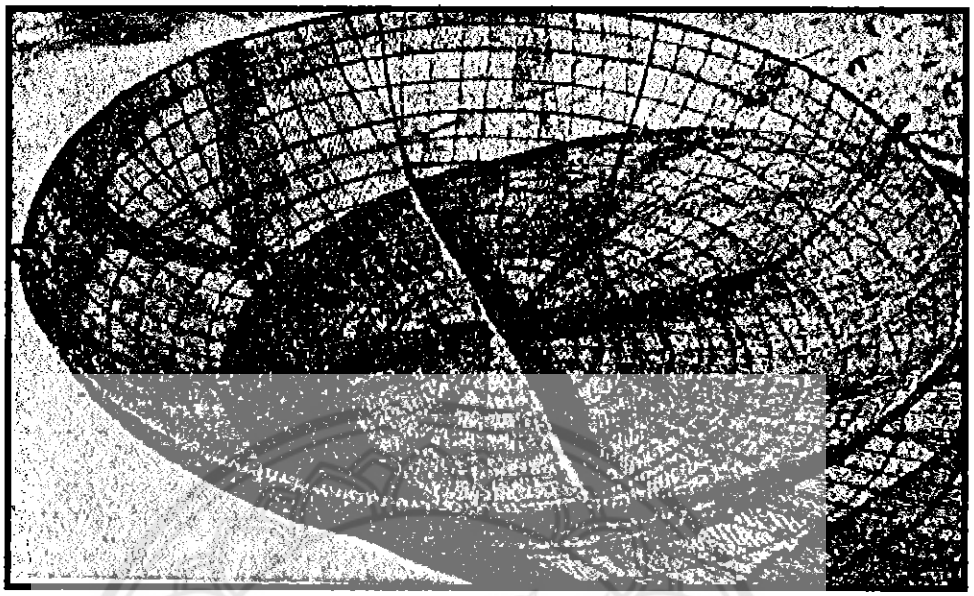
รูปที่ 2.4 เรือที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์ ในประเทศนิวซีแลนด์



รูปที่ 2.5 เรือ Cox's Bazar ในประเทศบังกลาเทศ

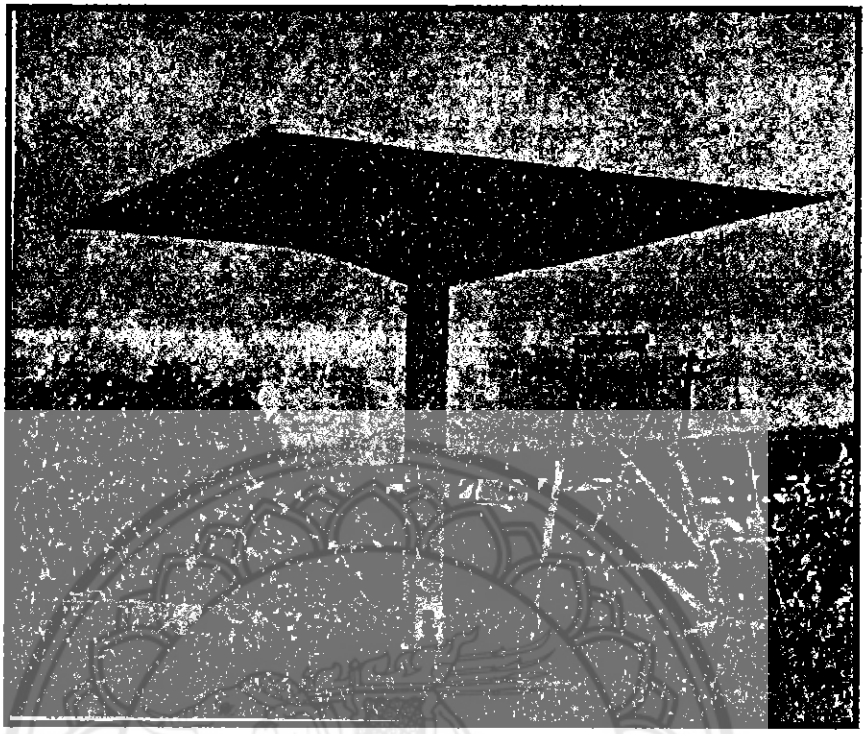


รูปที่ 2.6 เรือเฟอร์โรซีเมนต์หางยาว ในประเทศไทย

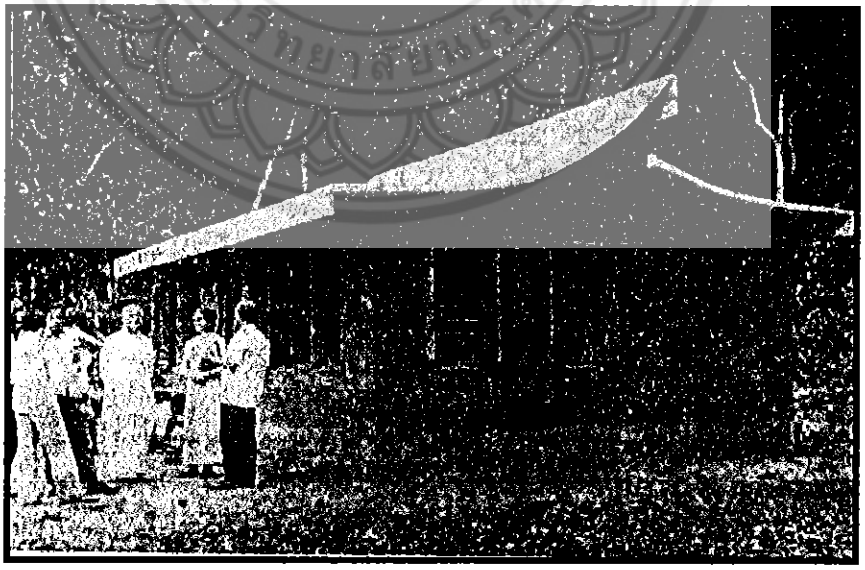


รูปที่ 2.7 โครงสร้างเรือกระทะ ในประเทศอินเดีย

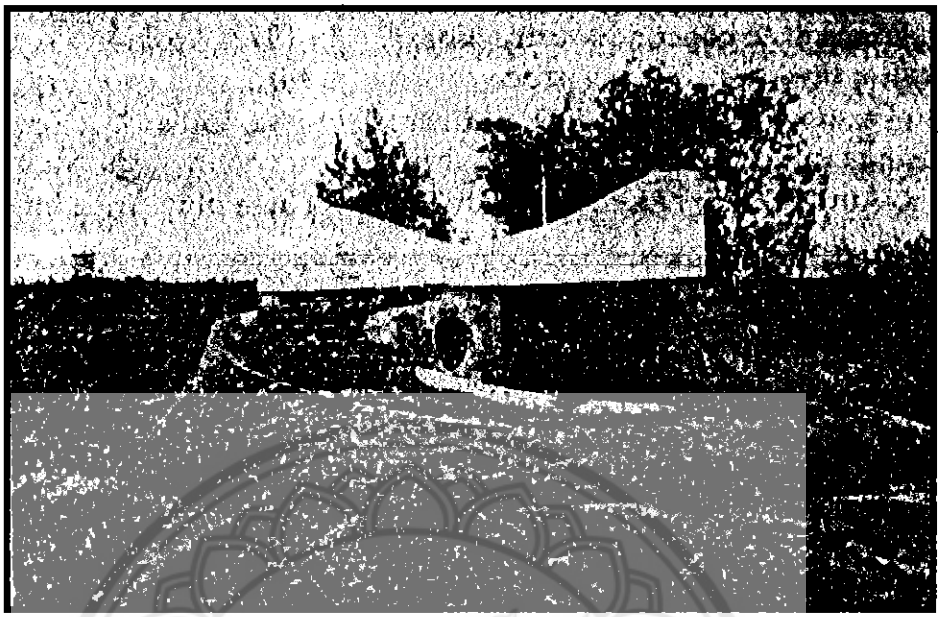
รูปที่ 2.8 เรือกระทะที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์



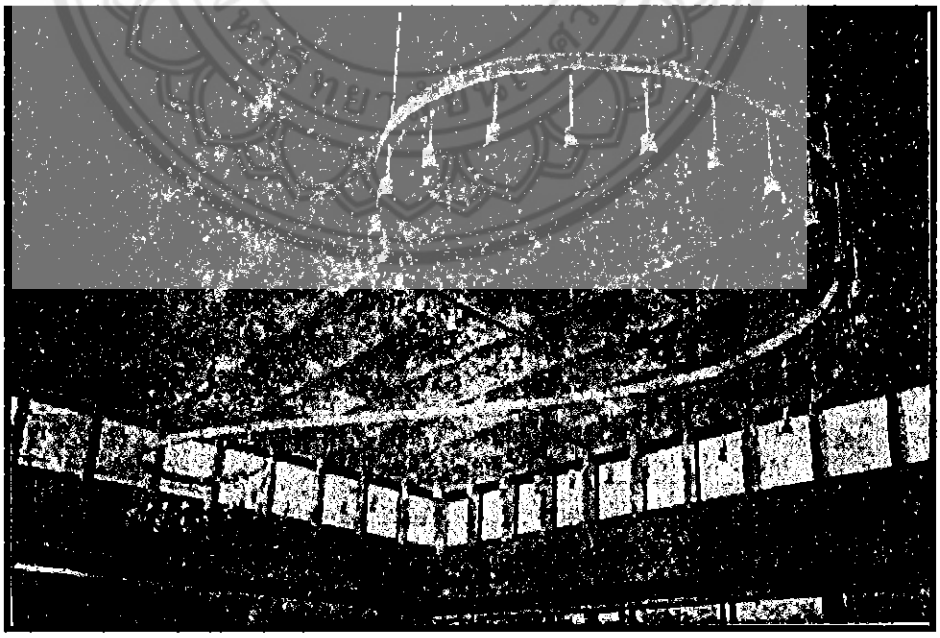
รูปที่ 2.9 หลังคา "monopod" ในประเทศฟิลิปปินส์



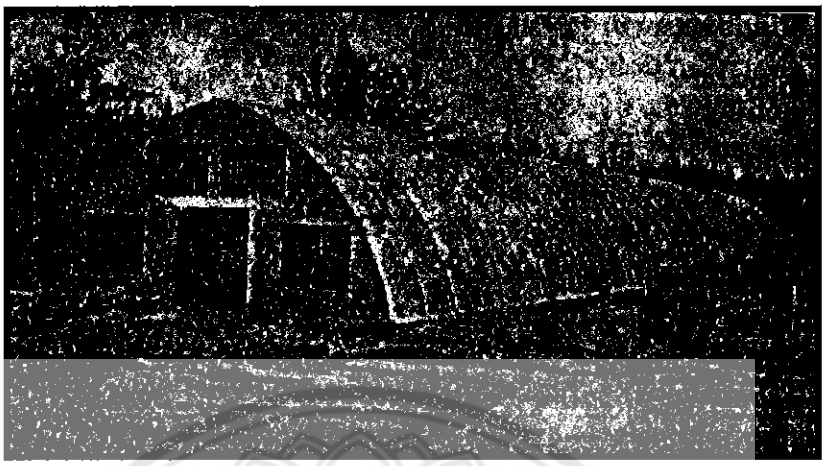
รูปที่ 2.10 หลังคาบ้านเฟอร์โรซีเมนต์ในเมือง Orissa ในประเทศอินเดีย



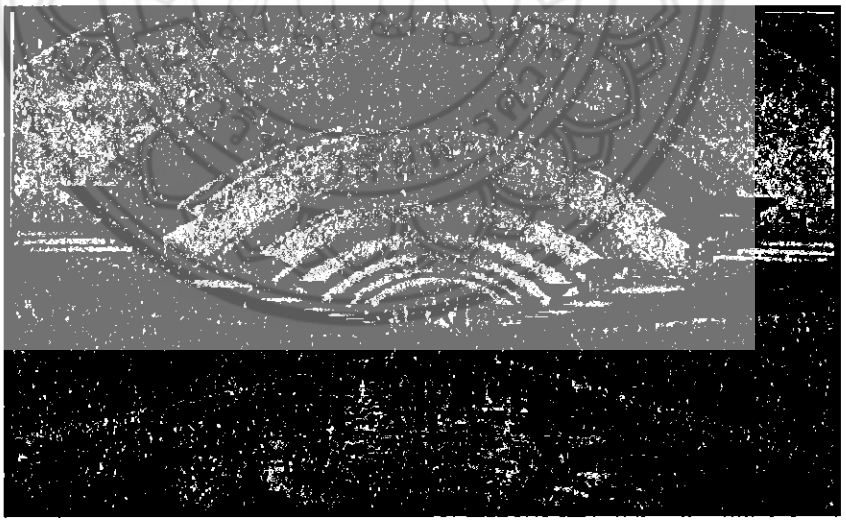
รูปที่ 2.11 หลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ ใน Auroville City, Pomdicherry ในประเทศอินเดีย



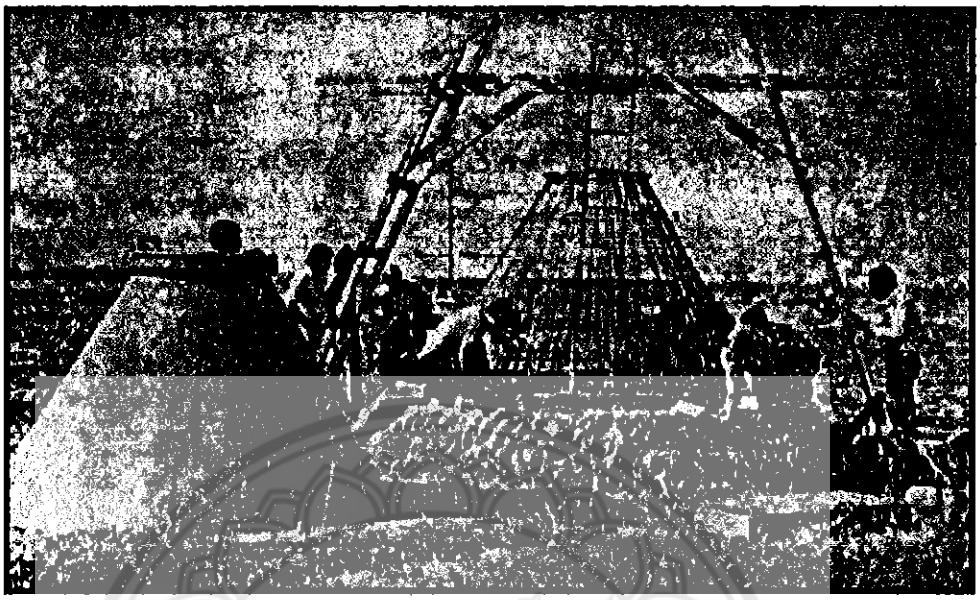
รูปที่ 2.12 หลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ในหอประชุม ในสหภาพโซเวียต



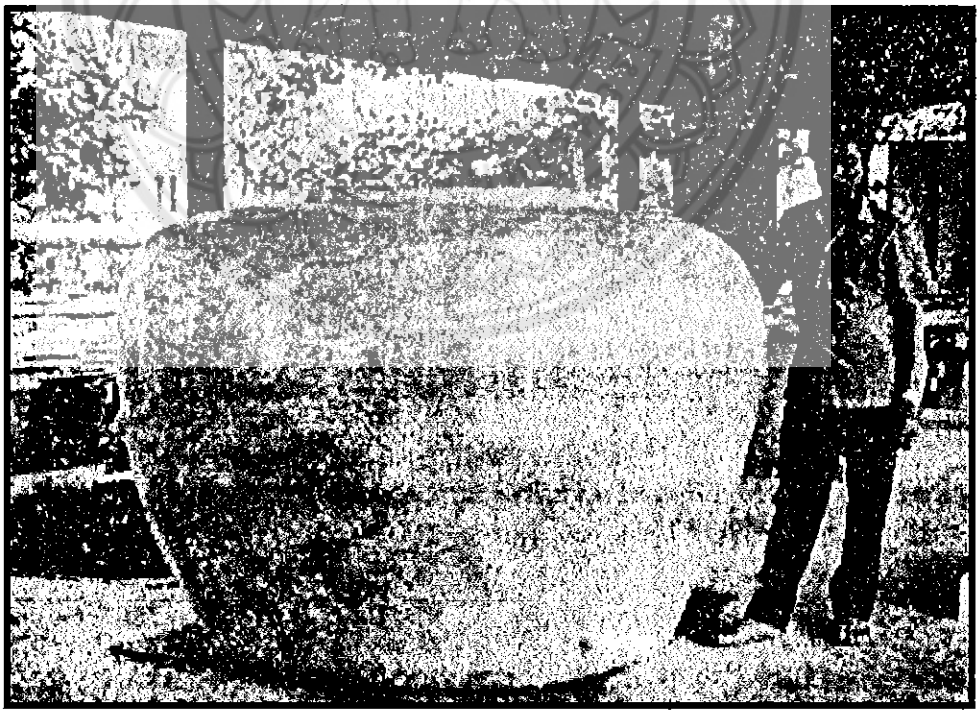
รูปที่ 2.13 หลังคาเฟอร์โรซีเมนต์ โรงเพาะชำทางการเกษตร ในสหภาพโซเวียต



รูปที่ 2.14 หลังคาโค้งที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์ มีช่วงหลังคา 17 เมตร ที่เมือง Leningrad ในสหภาพโซเวียต



รูปที่ 2.15 ไซโลที่ทำจากเฟอร์โรซีเมนต์ ในประเทศไทย



รูปที่ 2.16 การนำมอร์ตาซีเมนต์มาทำโอ่ง ในประเทศไทย

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินโครงงานวิศวกรรม

3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

เฟอร์โรซีเมนต์ส่วนมากจะมีความบาง ประกอบด้วยเหล็กแกน ลวดตาข่าย ปูน ทราย และสารผสมเพิ่ม รายละเอียดต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ทำเฟอร์โรซีเมนต์มีดังต่อไปนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (cement)

ปูนซีเมนต์ (cement) เป็นตัวที่ทำให้เกิดแรงยึดเกาะ (bond) ระหว่างวัสดุอื่นๆ ปูนซีเมนต์มีหลายชนิด แต่โดยทั่วไปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นที่รู้จักและหาซื้อได้ง่ายและใช้กันอยู่ทั่วไป ตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดเร็วในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ข้อควรระวังคือไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันปูนประเภทนี้จะถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverlized Fuel Ash (PFA) และ Ground Granular Blast Furnace Slack (GGBS)

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี C_3A ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดช้า และให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1

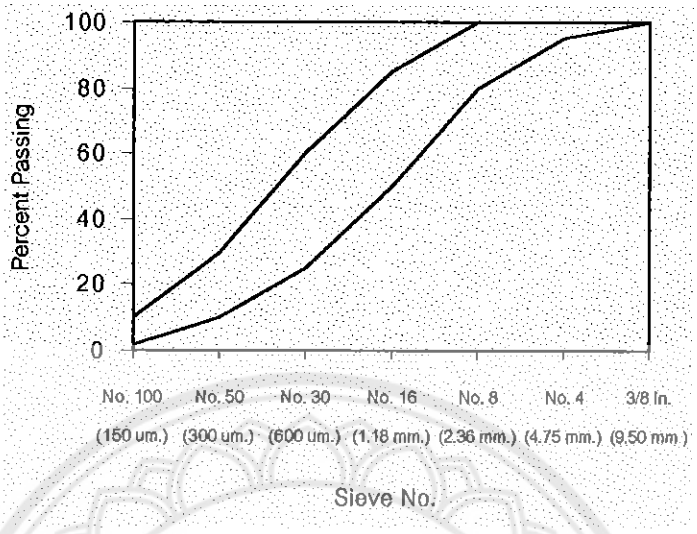
ในการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์นี้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ซึ่งมีความเหมาะสม เพราะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะชนิดอื่นๆ

3.1.2 ทราย (Sand)

ทรายเป็นวัสดุที่มีราคาถูกที่สุดในจำนวนวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของเฟอร์โรซีเมนต์ แต่ก็เป็นองค์ประกอบที่ใช้มากที่สุด ดังนั้นการเลือกใช้ทรายจึงมีความสำคัญ เพราะถ้าทรายที่ใช้มีคุณภาพไม่ดี ก็จะทำให้งานเฟอร์โรซีเมนต์นั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีเช่นกัน ทรายที่ดีต้องมีความสะอาด มีความแข็งแรง และต้องมีสารอินทรีย์ปนอยู่ไม่เกินกำหนด และส่วนขนาดคละของทรายที่ดีควรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามตาราง 3.1 และอยู่ในขอบเขตของรูปที่ 3.1 ข้างล่างนี้

Sieve	Percent Passing
3/8 in.(9.50 mm.)	100
No. 4 (4.75 mm.)	95 to 100
No. 8 (2.36 mm.)	80 to 100
No. 16 (1.18 mm.)	50 to 85
No. 30 (600 μm.)	25 to 60
No. 50 (300 μm.)	10 to 30
No. 100 (150 μm.)	2 to 10

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์กำหนดส่วนขนาดคละของทราย



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขอบเขตส่วนขนาดคละของทราย

3.1.3 น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้สำหรับผสมซีเมนต์ และใช้ในการบ่ม (Curing) ต้องเป็นน้ำสะอาดและไม่มีสารประกอบอินทรีย์ และสารเคมีที่ทำให้คุณสมบัติของมอร์ตา (Mortar) เลวลง ไม่ควรใช้น้ำทะเลเป็นอย่างยิ่ง

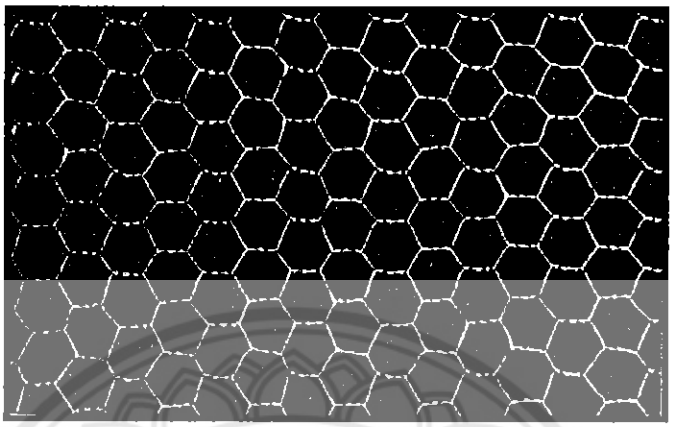
3.1.4 เหล็กเสริม (Skeletal Steel)

เหล็กที่ใช้เป็นเหล็กแกนทำโครงเรือ ใช้เหล็กกลม ขนาด 6 มม. และ 9 มม. โดยที่ผิวของเหล็กนั้นต้องไม่มีคราบน้ำมัน จาระบี ไม่เป็นสนิม และไม่มีสิ่งสกปรก เพราะจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเหล็กและมอร์ตานั้นไม่ดี และเหล็กต้องมีความแข็งแรงได้มาตรฐาน โดยสามารถทดสอบได้ง่ายๆ โดยดัดเหล็กเป็นรูปตัวยู (U) และเหยียดให้ตรง และดัดเป็นรูปตัวยูและเหยียดให้ตรงอีกครั้งหนึ่ง ถ้าไม่มีรอยแตก (Crack) ให้เห็นหลังจากดัดก็ถือว่าเหล็กนั้นใช้ได้

3.1.5 ลวดตาข่าย (Wire Mesh)

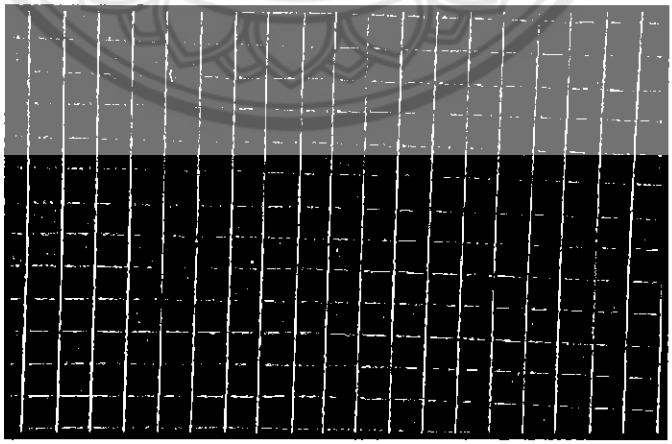
ลวดตาข่ายนั้นก็เป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญในการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์ มีอยู่หลายชนิดทั้งแบบถักและแบบเชื่อม ดังต่อไปนี้

3.1.5.1 Hexagonal Wire Mesh หรือรู้จักในชื่อ Chicken Wire Mesh เป็นลวดตาข่ายชนิดถัก นิยมใช้กันมากเพราะมีราคาถูก และง่ายต่อการดัดเป็นรูปร่างต่างๆ ตามแบบ



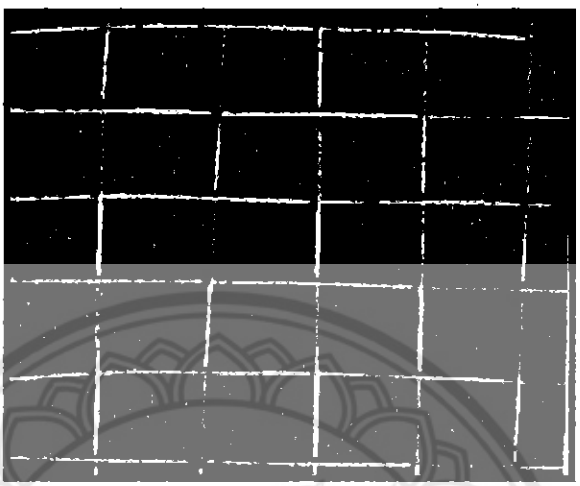
รูปที่ 3.2 Hexagonal Wire Mesh

3.1.5.2 Weld Wire Mesh เป็นลวดตาข่ายชนิดเชื่อม มีกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ต่ำถึงปานกลาง แต่มีความแข็งมากกว่า Hexagonal Wire Mesh ลวดตาข่ายชนิดนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จุดเชื่อมต่อจะเป็นจุดที่มีความอ่อนแอ (Weak Spot) เพราะมีความผิดพลาดในขั้นตอนการเชื่อมมาตั้งแต่ที่โรงงาน และลวดตาข่ายชนิดนี้ก็ยังยากต่อการดัดให้เป็นรูปร่างต่างๆ ตามแบบ



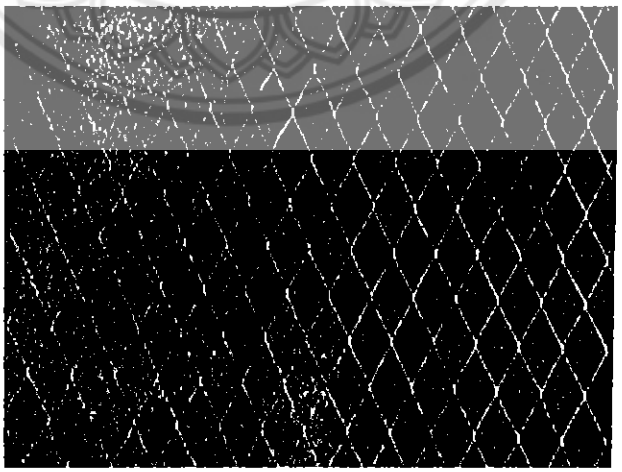
รูปที่ 3.3 Weld Wire Mesh

3.1.5.3 Woven Mesh เป็นลวดตาข่ายชนิดถัก ตาข่ายจะไม่ตรงจะเป็นคลื่น และยากต่อการดัดให้เหยียดตรง และให้เป็นรูปร่างตามแบบ



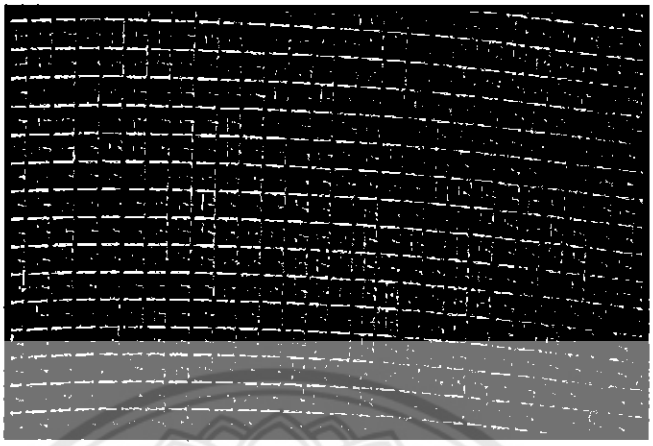
รูปที่ 3.4 Woven Mesh

3.1.5.4 Expanded Metal Mesh มีรูปร่างคล้ายเพชร ความแข็งแรง (Strength) ของ Expanded Metal Mesh น้อยกว่า Woven Mesh แต่เมื่อเทียบเป็นความแข็งแรงต่อราคาแล้ว Expanded Metal Mesh จะได้เปรียบ Woven Mesh



รูปที่ 3.5 Expanded Metal Mesh

3.1.5.5 Watson Mesh เป็นตาข่ายชนิดใหม่ มีกำลังรับแรงดึงสูง ตาข่ายมีความถี่มาก



รูปที่ 3.6 Watson Mesh

ในการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์ในครั้งนี้ใช้ Hexagonal Wire Mesh เพราะคุณสมบัติของ Hexagonal Wire Mesh ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

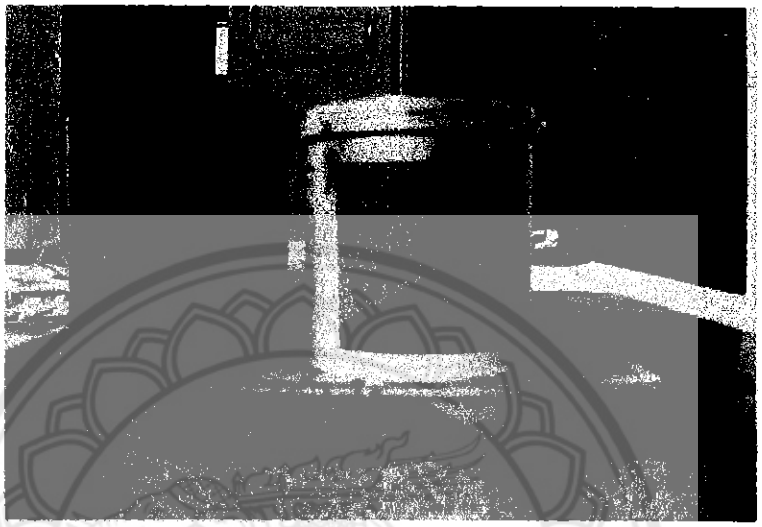
3.1.6 น้ำยาผสมปูนกันซึม (Water Proofing Chemical)

ต้องใช้น้ำยาผสมปูนกันซึมที่ได้มาตรฐาน ผสมตามอัตราส่วนที่บอกไว้ข้างกระป๋อง เพื่อป้องกันการซึมของน้ำเข้ามาในตัวเรือ

รูปที่ 3.7 น้ำยาผสมปูนกันซึม

3.1.7 วัสดุทากันซึม (Water Proofing)

ใช้วัสดุทากันซึมที่ได้มาตรฐาน ผสมและใช้ตามคำแนะนำข้างกระป๋อง



รูปที่ 3.8 วัสดุทากันซึม

3.2 การทดสอบวัสดุ

ก่อนที่จะนำวัสดุต่างๆ มาใช้ทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์ ก็ต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุก่อนว่ามีคุณสมบัติดีพอที่จะนำมาใช้หรือเปล่า ซึ่งการทดสอบวัสดุก็มีดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย (Organic Impurities in Fine Aggregate)

การทดสอบนี้เพื่อทดสอบเบื้องต้นว่าทรายที่จะนำมาเป็นวัสดุผสมทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์นั้นมีปริมาณสารอินทรีย์มากเกินกำหนดหรือไม่ ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์มีผลต่อการก่อตัวและกำลังอัดของคอนกรีต

สารอินทรีย์ในทรายมักจะเกิดจากซากพืชซากสัตว์ที่ผุเน่าแล้ว ถ้าในทรายมีปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไปอาจมีผลกระทบต่อการก่อตัวของปูนซีเมนต์นอกจากนั้น ยังมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ดังนั้นก่อนนำทรายไปผสมคอนกรีตจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบปริมาณสารอินทรีย์เบื้องต้นเสียก่อน การทดสอบปริมาณสารอินทรีย์เบื้องต้น ด้วยวิธีการการทดสอบความเข้มของสี

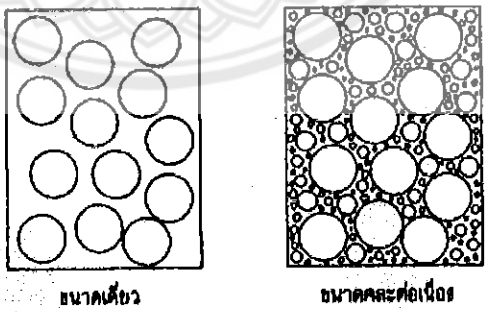
(Colormetric Test) ทำได้โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเปรียบเทียบสีของน้ำในขวดที่มีทรายกับสีของสารละลายมาตรฐานหรือแผ่นกระจกสีมาตรฐาน โดยถ้าสีของน้ำในขวดที่มีทรายเข้มกว่าสารละลายมาตรฐานหรือแผ่นกระจกสีมาตรฐานเบอร์ 3 ให้ถือในเบื้องต้นว่าทรายที่นำมาทดสอบนั้นมีสารอินทรีย์เจือปนมาก ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้

3.2.2 การหาขนาดคละของทรายโดยวิธีร่อนด้วยตะแกรง (Sieve Analysis)

การทดสอบนี้เพื่อหาขนาดคละของมวลรวม (Gradation) เพื่อควบคุมตรวจสอบให้ขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามที่กำหนดไว้ โดยคุณสมบัติดังกล่าวใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสม

ขนาดคละ (Gradation) คือการกระจายของขนาดต่าง ๆ ของอนุภาค ขนาดคละของมวลรวมนับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณเนื้อซีเมนต์เพสท์ที่ต้องการนำไปห่อหุ้มมวลรวมผลของขนาดคละที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตคือ

- ปริมาณซีเมนต์เพสท์ คอนกรีตที่มีขนาดคละของมวลรวมดี มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมรวมกันแล้วมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าจะต้องบรรจุอยู่ในช่องว่างมวลรวมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ดังรูปที่ การที่มวลรวมมีขนาดคละที่ดีดังกล่าว จะส่งผลให้ช่องว่างมวลรวมมีปริมาณน้อยลงปริมาณซีเมนต์เพสท์ที่ใช้เพื่อ ยึดมวลรวมและอุดช่องว่างจึงลดลง ทำให้ลดปริมาณของส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงได้



รูปที่ 3.9 การเรียงตัวของขนาดคละที่ต่างกัน

การวิเคราะห์ทำโดยการเก็บตัวอย่างมาปริมาณหนึ่งมาร่อนบนตะแกรงมาตรฐานขนาดต่าง ๆ ซึ่งวางเรียงกันตามขนาดช่องว่างของตะแกรงจากขนาดใหญ่สุดอยู่ด้านบนจนถึงขนาดเล็กสุดโดยใช้การเขย่าชุดตะแกรงดังกล่าว และนำผลที่ได้ใส่ค่าลงในตาราง และนำไปเขียนกราฟ

สำหรับทราย ปริมาณอนุภาคละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และเบอร์ 100 มีผลต่อความสามารถเทได้ การแต่งผิวหน้าและการเยิ้มของคอนกรีตสด (Bleeding) นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กยังช่วยให้คอนกรีตเกาะรวมตัวกันได้ดี ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคละเอียดคือ ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 อย่างน้อย 15% และเบอร์ 100 อย่างน้อย 5% แต่ต้องไม่ให้มีอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 5% เพราะอนุภาคขนาดเล็กนี้มัก ประกอบด้วยดินเหนียว ซึ่งมีผลคือจะต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้นในการผสมทำให้ปริมาณของคอนกรีตมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง (เกิดการหดตัว)

3.2.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาซีเมนต์(Test for Tensile Strength of Cement Mortars)

การทดสอบนี้ทำเพื่อทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) ของมอร์ตาซีเมนต์ (Cement Mortars) หรือที่เรียกว่าปูนสอโดยใช้ตัวอย่างแบบบริเคท (Briquet – Specimen)

การทดสอบหากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ โดยใช้ตัวอย่างแบบบริเคทนี้มิได้มีวัตถุประสงค์ที่จะหากำลังดึงหรือความแข็งแรงโดยตรง แต่การทดสอบครั้งนี้จะเป็นตัวแสดงให้ทราบถึงคุณสมบัติของซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบว่า ซีเมนต์ชนิดนั้นมีคุณภาพหรือได้มาตรฐานหรือไม่ และเหมาะสมที่จะเอาไปใช้ในงานคอนกรีตหรือไม่หากการทดสอบหากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ ได้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานแล้วก็ไม่สมควรที่จะนำซีเมนต์นั้นไปใช้ในงานคอนกรีตอีกต่อไป

มาตรฐาน ASTM C 150 ได้กำหนดถึงคุณภาพของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ โดยเมื่อทำการทดสอบหากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ซึ่งมีอัตราส่วนผสม 1 ส่วนของซีเมนต์ต่อ 3 ส่วน ของทรายมาตรฐานโดยน้ำหนักแล้วจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.2

อายุและสภาพการบ่ม	ชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์									
	ชนิดที่ 1		ชนิดที่ 2		ชนิดที่ 3		ชนิดที่ 4		ชนิดที่ 5	
	lb/in^2	kg/cm^2	lb/in^2	kg/cm^2	lb/in^2	kg/cm^2	lb/in^2	kg/cm^2	lb/in^2	kg/cm^2
1 วันในอากาศชื้น	-	-	-	-	275	19.3	-	-	-	-
1 วันในอากาศชื้น 2วันในน้ำ	150	10.5	125	8.8	375	26.3	-	-	-	-
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	275	19.3	250	17.5	-	-	175	12.3	250	17.5
1 วันในอากาศชื้น 27วันในน้ำ	350	24.5	325	22.8	-	-	300	21	325	22.8

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดกำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์มาตรฐาน

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

3.2.4 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาซีเมนต์ (Test for Compressive Strength of Cement Mortars)

เพื่อทำการทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์โดยการใช้ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 50 มม. (2 นิ้ว)

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาปูนซีเมนต์ เป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพของซีเมนต์วิธีหนึ่ง ว่าซีเมนต์ที่จะนำมาใช้งานนั้นมีคุณภาพได้มาตรฐานหรือไม่

กำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วนและทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด 2.75 ส่วนโดยน้ำหนักเตรียมและทดสอบตามวิธีมาตรฐานแล้วจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 3.3

อายุและสภาพการบ่ม	กำลังอัด (กก./ซม^2)				
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5
1 วันในอากาศชื้น	-	-	120	-	-
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ	85	70	210	-	-
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	150	130	-	55	105
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ	245	245	-	140	210

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตามาตรฐาน

ก่อนการทดสอบให้ทำการเช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง พร้อมทั้งทำความสะอาดตัวอย่าง และในการทดสอบให้ทดสอบในเครื่องทดสอบแรงกดทั่วไป โดยให้แรงอัดทางด้านข้างที่มีผิวเรียบทั้งสองด้าน ให้ทดสอบจะกระทั่งตัวอย่างแตกโดยใช้เวลาทดสอบระหว่าง 20 ถึง 80 วินาที

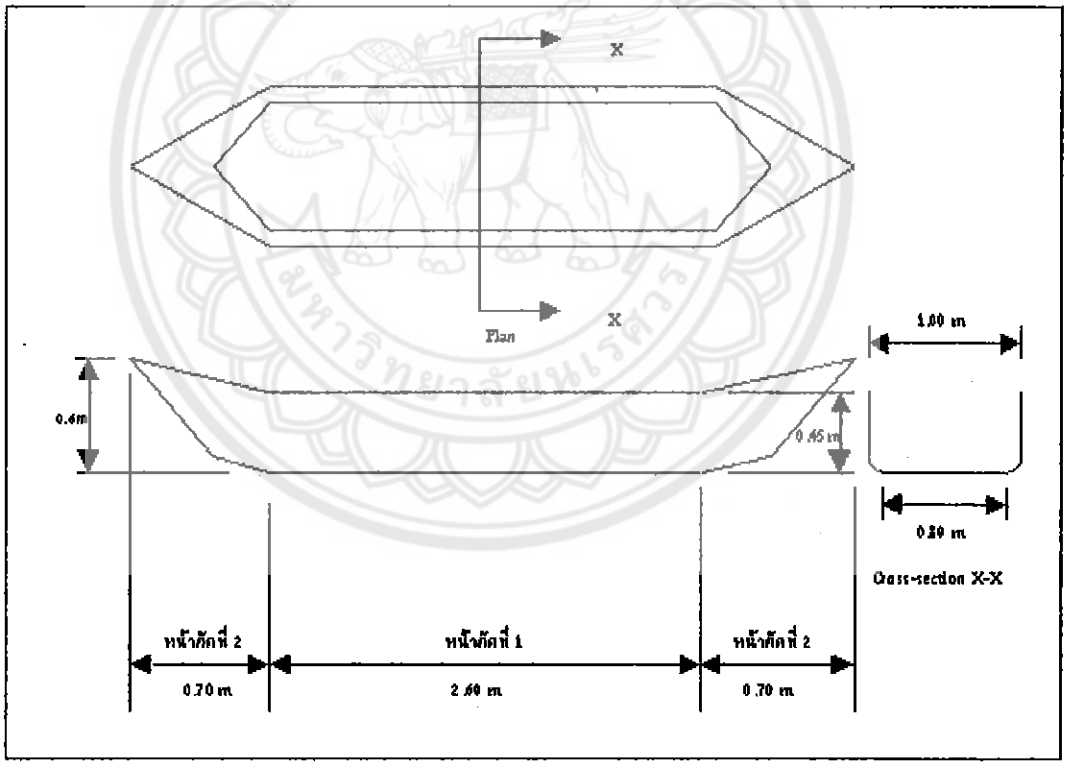
4310158 CE
TN
945
ด675 ฟ

3.3 การคำนวณแรงลอยตัวและปริมาณวัสดุ

3.3.1 รายการคำนวณแรงลอยตัว

ข้อมูลเกี่ยวกับตัวเรือ

•ความยาวของเรือ	:	4	เมตร
•ความกว้างของเรือ	:	1	เมตร
•ความลึกของเรือ	:	0.45	เมตร
•ความหนาของเรือ	:	2.50	เซนติเมตร
•ความลึกที่เรือจม	:	0.35	เมตร



รูปที่ 3.10 แสดงแบบแปลนและหน้าตัดของเรือ

3.3.1.1 การคำนวณหาน้ำหนักของเรือ

ในการคำนวณหาน้ำหนักเรือนั้น ต้องคำนวณหาปริมาตรของเรือ แบ่งการคำนวณปริมาตรของเรือออกเป็น 2 ส่วน ตามรูปด้านล่างคือในส่วนของหน้าตัดที่ 1 และ ในส่วนของหน้าตัดที่ 2

ปริมาตรของหน้าตัดที่ 1 = (0.45+0.45+0.80) x 2.60 x 0.025

= 0.111 m^3

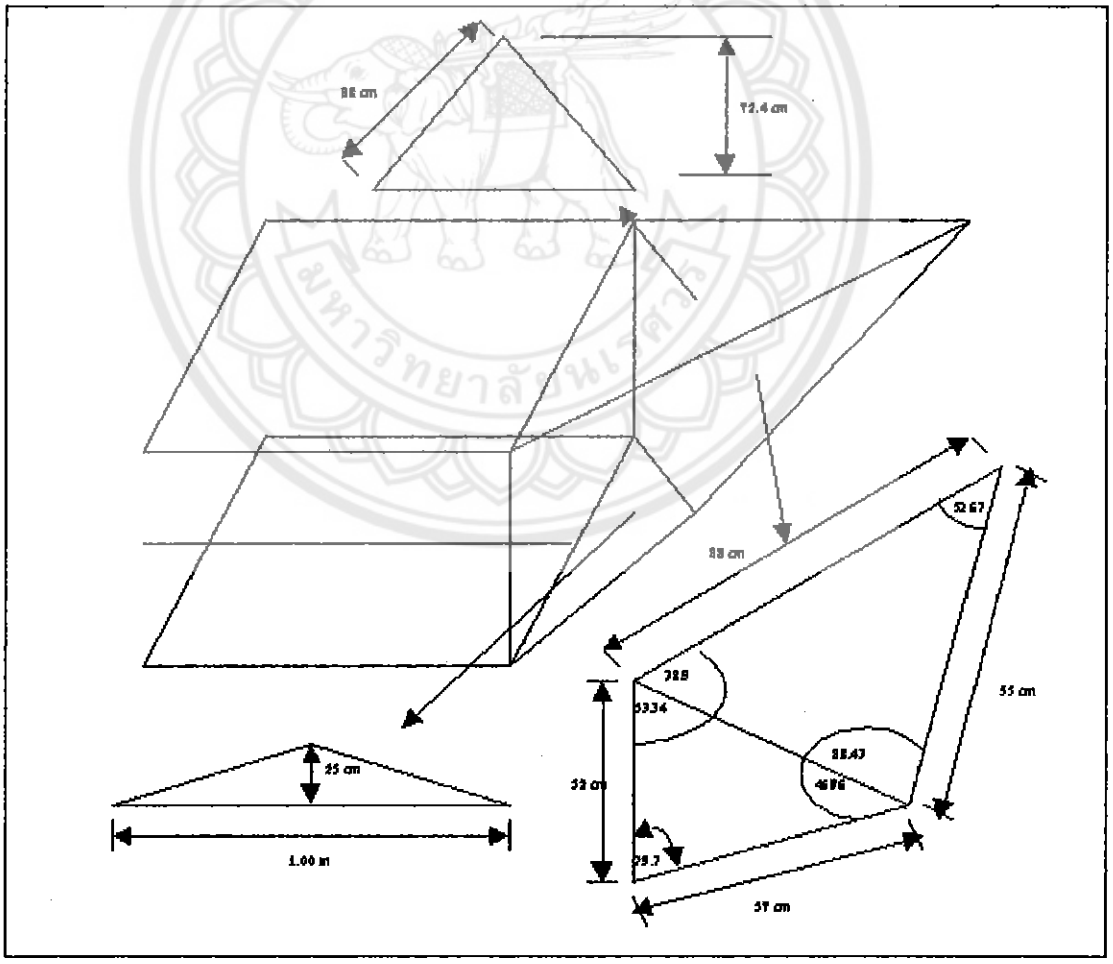
ปริมาตรของหน้าตัดที่ 2 = [2(((1/2)x0.57x0.52sin 79.7)+((1/2)x0.88x0.55sin52.67))

+ ((1/2) x1x 0.25)]x2x0.025+ 2(1/2)(0.724)(0.025)

= 0.0581 m^3

ปริมาตรรวมทั้งหมด = 0.111 + 0.058 = 0.169 m^3

น้ำหนักรวมทั้งหมดของเรือ = 0.169 m^3 x 2,400 kg/m^3 = 405.6 kg

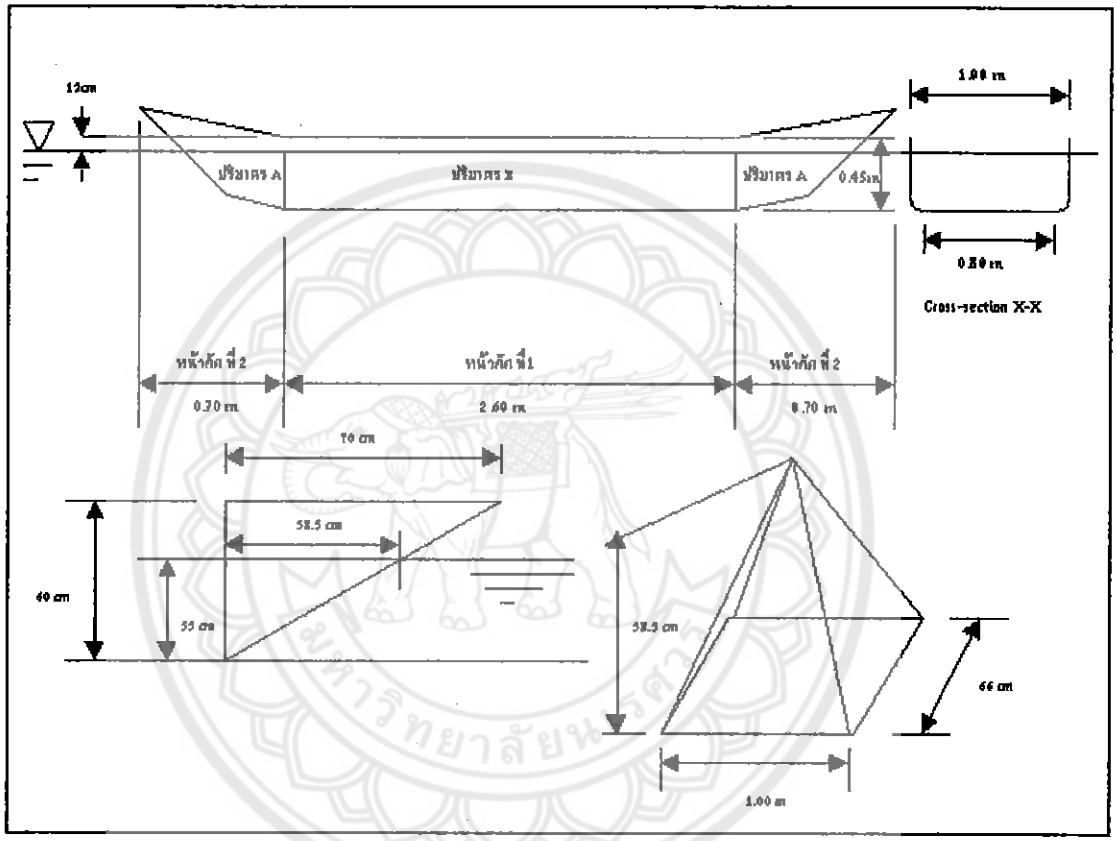


รูปที่ 3.11 รูปประกอบการคำนวณหาปริมาตรของเรือ

3.3.1.2 การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุก

ระยะฟันน้ำ = 12 cm

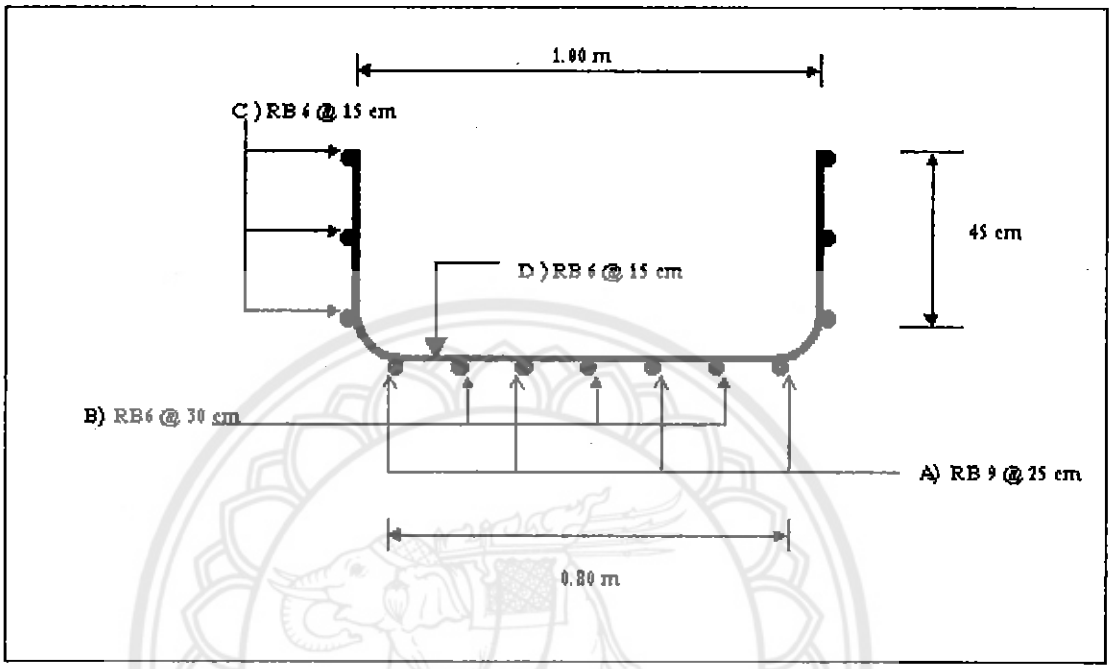
ปริมาตรของน้ำที่แทนที่ส่วนที่เรือจม = 2(ปริมตรA) + ปริมตร B



รูปที่ 3.12 รูปประกอบการคำนวณปริมาตรของเรือส่วนที่ถูกน้ำแทนที่

2xปริมาตร A	= (1/3)xพื้นที่ฐาน x สูง		
	= (1/3)x(1x0.66)x(0.385)	= 0.0847	m^3
ปริมาตร B	= (0.33 x 1)x2.60	= 0.858	m^3
ปริมาตรน้ำที่แทนที่ส่วนจม	= (0.0847+0.858)	= 0.943	m^3
น้ำหนักของน้ำที่แทนที่	= 0.943 m^3 x 1000 kg/m^3	= 943	kg
ฉะนั้นน้ำหนักบรรทุก	= 943- 405.6 -100 (ความคลาดเคลื่อน)	= 437.4	kg

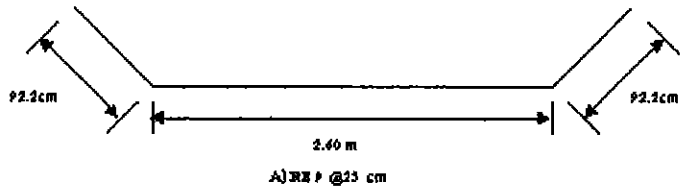
3.3.2 รายการคำนวณปริมาณวัสดุ



รูปที่ 3.13 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก

3.3.2.1 ปริมาณเหล็ก

-เหล็ก RB 9



รูปที่ 3.14 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก A

ใช้เหล็กยาว = 4(2.60 +2(0.92)+2.78)

= 40 m

เหล็ก 1 เส้น ยาว 10 m

ฉะนั้นใช้เหล็ก RB 9 จำนวน 4 เส้น

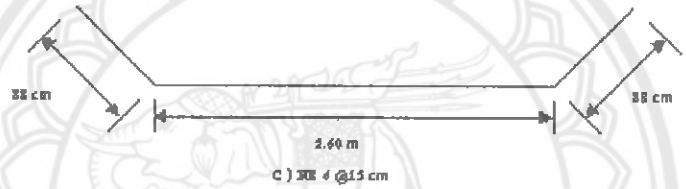
-เหล็ก RB 6

ใช้เหล็ก B) RB 6 @ 30cm ยาว = 3(2.60+2(0.92)+2.78)

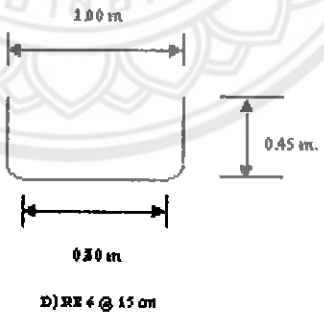
= 30 m

ใช้เหล็ก C) RB6 @ 15 cm ยาว = 6(2.60+2(0.88)+2.82)

= 60 m



รูปที่ 3.15 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก C



รูปที่ 3.16 รูปประกอบการคำนวณปริมาณเหล็ก D

ใช้เหล็ก(D) RB 6 @ 15 cm จำนวน	= (2.60/0.15) + 1	= 19 ท่อน
เหล็ก D) RB 6 @ 15 cm ยาว	= 2(0.45) + 0.8	= 1.7 m
ใช้เหล็กยาวทั้งหมด	= 19 x 1.7	= 32.3 m

เหล็ก 1 เส้นยาว 10 เมตร

เหล็ก 1 เส้น ใช้ทำ D) RB 6 @ 15 cm = 10/1.7 = 5 ท่อน

ฉะนั้น ต้องใช้เหล็กยาว 10 เมตรทั้งหมด D) RB 6 @ 15 cm = 4 เส้น

ใช้เหล็ก RB6 ทั้งหมด = B) RB 6 @ 30cm + C) RB 6 @ 15cm + D)RB 6 @ 15cm

= 3 เส้น + 6 เส้น + 4 เส้น

= 13 เส้น

3.3.2.2 ปริมาณลวดตาข่าย

ใช้ลวดตาข่ายทั้งหมด = 2(ปริมาตร / ความหนา)

= 2(0.169 / 0.025)

= 13.52 ตารางเมตร

ลวดตาข่ายชนิดที่ใช้มีความกว้าง = 0.9 เมตร

ฉะนั้น ใช้ ลวดตาข่ายยาวทั้งหมด = (13.52/ 0.9)+1(over lap)

= 16 เมตร

3.3.2.3 ปริมาณซีเมนต์ และทราย

cement : sand : water = 1.0 : 1.75 : 0.35

น้ำหนักทั้งหมด = 405.6 kg

น้ำหนักของซีเมนต์ = 405.6x(1/3.1) = 130.84 kg

น้ำหนักของทราย = 405.6x(1.75/3.1) = 228.97 kg

3.3.2.4 ลวดผูกเหล็ก

ใช้ลวดผูกเหล็กทั้งหมด 2 มัด

3.3.2.5 น้ำยาผสมปูนกันซึม

ใช้น้ำยาผสมปูนกันซึมทั้งหมด 1 แกลลอน

3.3.2.6 วัสดุทากันซึม

ใช้วัสดุทากันซึมทั้งหมด 1 กระป๋อง

3.3.2.7 สี

ใช้สีน้ำมันกระป๋องขนาดกลาง 1 กระป๋อง

3.3.3 รายการประมาณราคา

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคา (บาท)
1	เหล็ก				
	RB 6	13	เส้น	23	299
	RB 9	4	เส้น	45	180
2	ลวดตาข่าย	16	เมตร	30	480
3	ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	3	ถุง	110	330
4	ทราย	1	m^3	120	120
5	ลวดผูกเหล็ก	1	ม้วน	120	120
6	น้ำยาผสมปูนกันซึม	1	แกลลอน	80	80
7	วัสดุทากันซึม	1	กระป๋อง	80	80
8	สี	1	กระป๋อง	95	95
				รวม	1,784

ตารางที่ 3.4 การประมาณราคาวัสดุ

คนงานทำงานเต็มวันประมาณ 6 วัน ค่าแรงวันละ 150 บาท

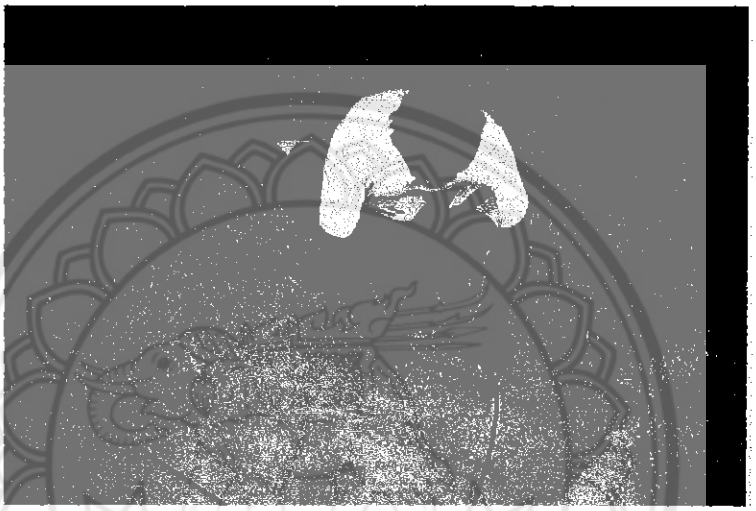
ดังนั้นค่าแรง = 6 x 150 = 900 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์ทั้งหมด = 1,784 + 900 = 2,684 บาท

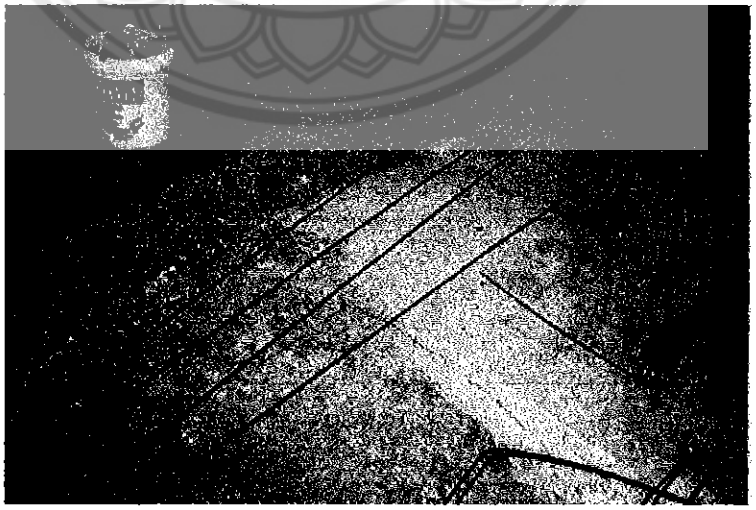
3.4 ขั้นตอนการทำเรือเฟอร์โรซีเมนต์

3.4.1 ดัดเหล็กเสริม

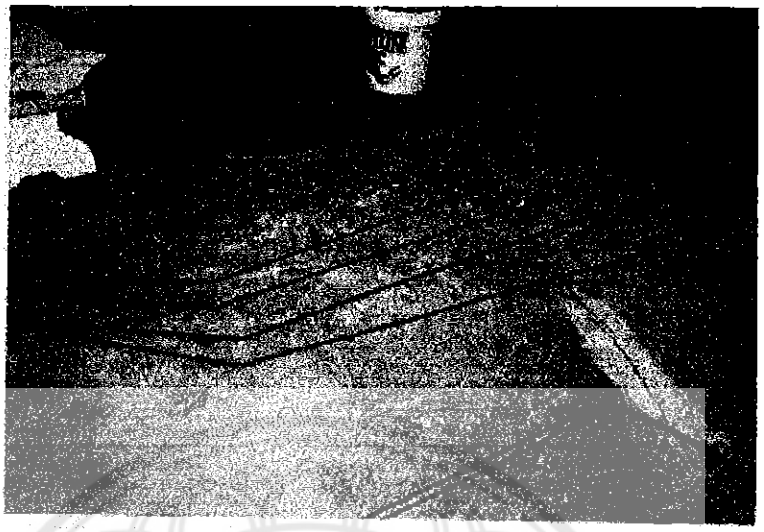
ดัดเหล็กเสริมกับโต๊ะดัดเหล็กให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ การที่จะรู้ได้ว่าเหล็กที่ดัดได้รูปร่างตามที่ต้องการหรือไม่นั้น ควรจะมีแบบไว้สำหรับเอาเหล็กที่ดัดแล้วมาทาบว่าตรงตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ตรงก็ทำการดัดให้ตรงตามแบบ



รูปที่ 3.17 การดัดเหล็ก



รูปที่ 3.18 การดัดเหล็ก

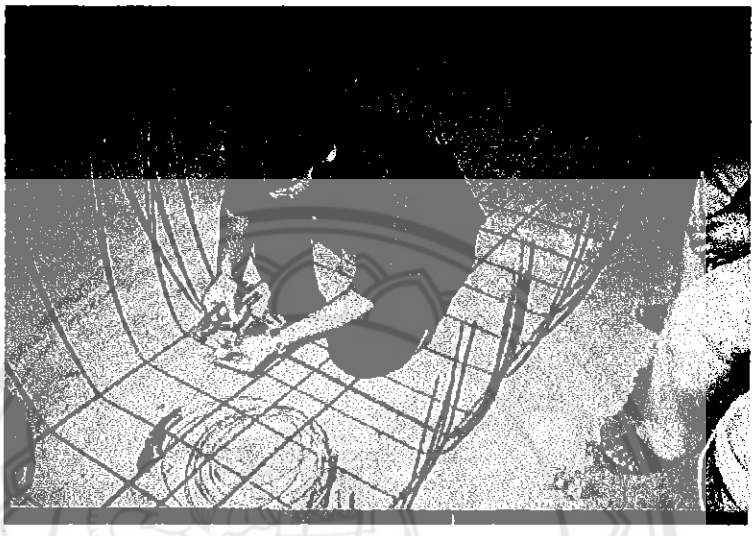


รูปที่ 3.19 การดัดเหล็ก

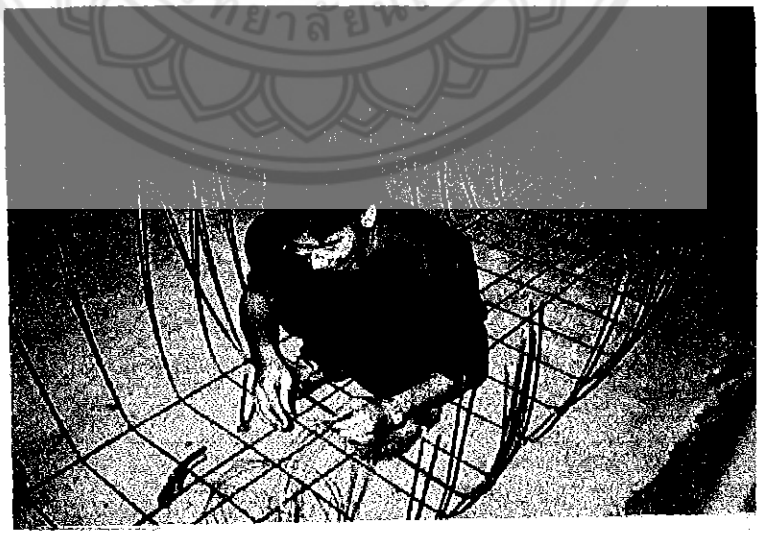
รูปที่ 3.20 การดัดเหล็ก

3.4.2 ผูกเหล็กเสริมเข้าเป็นโครงเรือ

นำเหล็กที่ดัดเรียบร้อยแล้วมาผูกเข้าด้วยกันให้เป็นรูปร่างของโครงเรือ การผูกเหล็กควรจะผูกให้แน่น



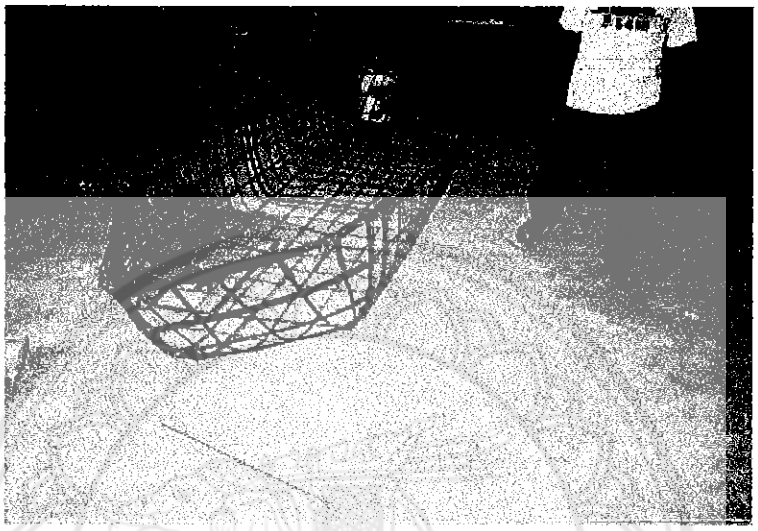
รูปที่ 3.21 การผูกเหล็กเสริม



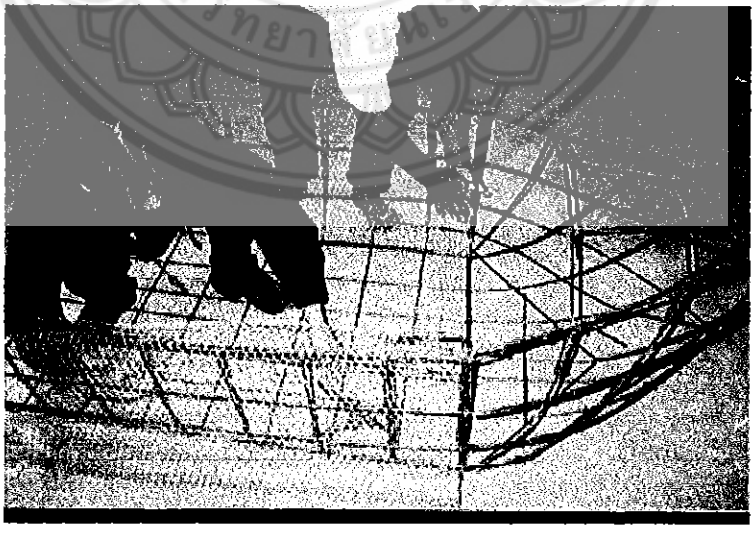
รูปที่ 3.22 การผูกเหล็กเสริม

3.4.3 ใส่ลวดตาข่าย

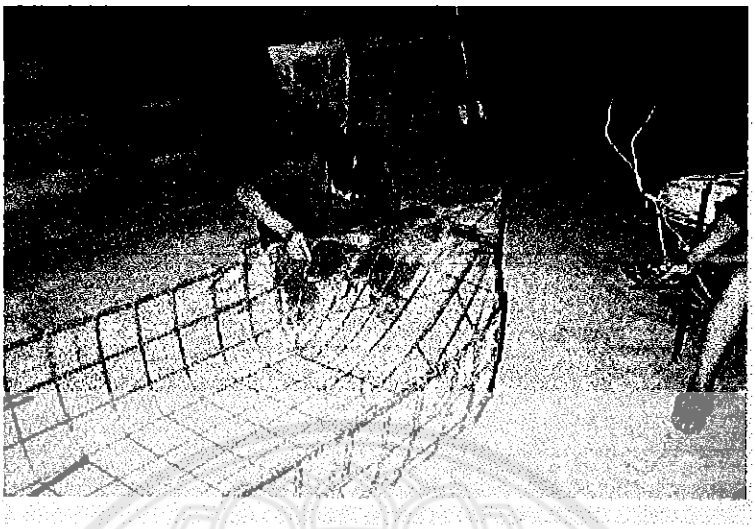
นำลวดตาข่ายมาใส่ในแบบโดยใส่ทั้งสองด้าน เพื่อเป็นตัวสำหรับให้มอร์ตาซีเมนต์มายึดเกาะ การใส่ลวดตาข่ายควรใส่ให้ตึงแน่นกับโครงเรือ



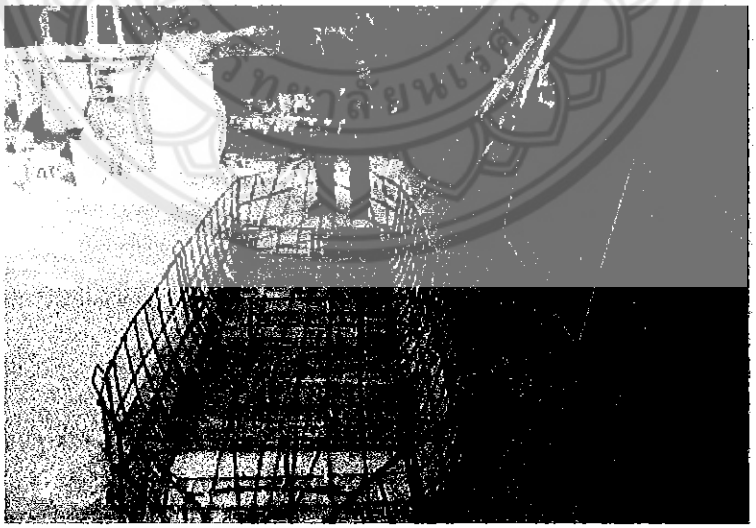
รูปที่ 3.23 การใส่ลวดตาข่าย



รูปที่ 3.24 การใส่ลวดตาข่าย



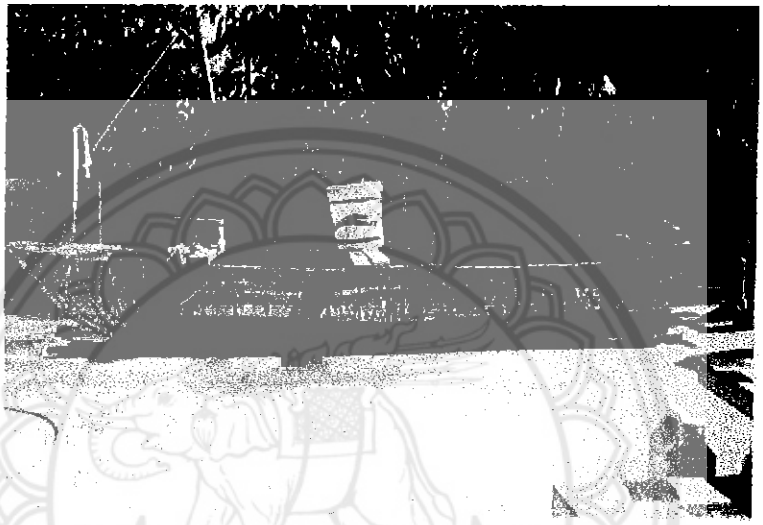
รูปที่ 3.25 การใส่ลวดตาข่าย



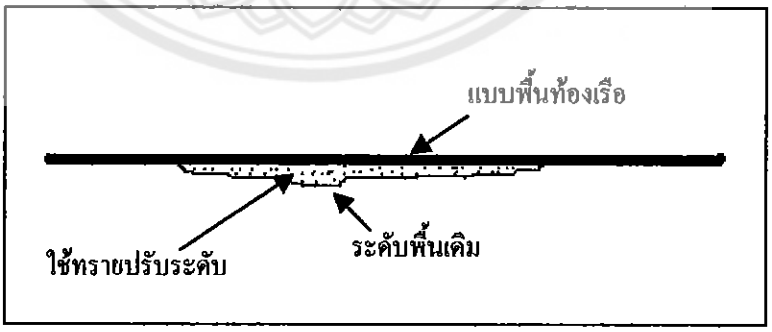
รูปที่ 3.26 การใส่ลวดตาข่าย

3.4.4 ทำแบบเตรียมเทพื้นท้องเรือ

ก่อนที่จะเทพื้นท้องเรือต้องเตรียมแบบก่อน แบบท้องเรือควรมีระดับที่สม่ำเสมอ เพราะถ้าพื้นท้องเรือมีระดับไม่สม่ำเสมอจะทำให้ส่วนพื้นท้องเรือมีความหนาไม่เท่ากัน จะมีผลทำให้เรือเอียงได้ ถ้าระดับที่ใช้ทำแบบพื้นท้องเรือไม่สม่ำเสมอ เราก็ทำการปรับระดับโดยใช้ทราย



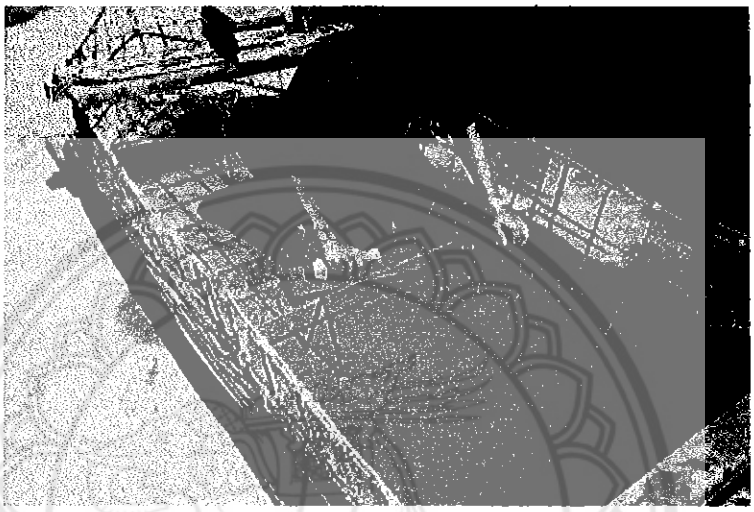
รูปที่ 3.27 แบบเทพื้นท้องเรือ



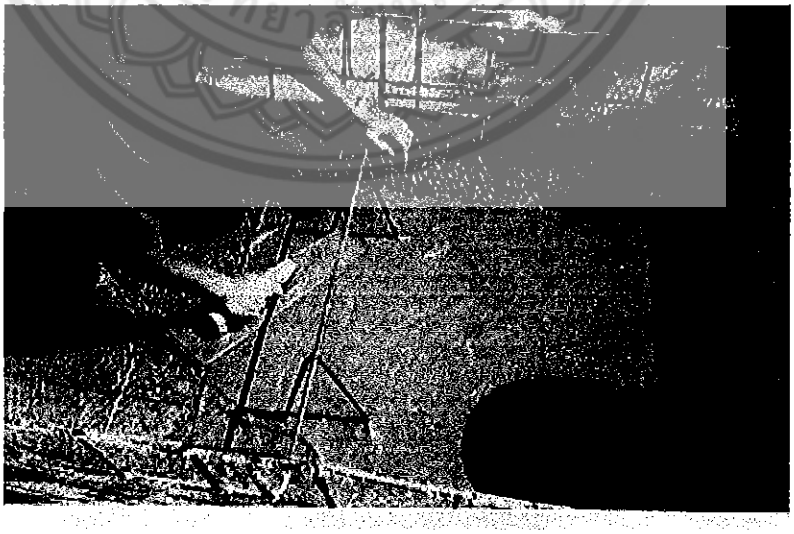
รูปที่ 3.28 การปรับระดับแบบพื้นท้องเรือ

3.4.5 เทพื้นท้องเรือ

เมื่อเทพื้นท้องเรือเสร็จ ก็ทำการฉาบปั่นปูนจนแน่น การที่จะรู้ว่าแน่นหรือไม่แน่นทำได้โดยการกดปูนที่เราปั่น ถ้ากดแล้วปูนไม่ยุบลงไปก็แสดงว่าแน่นแล้ว



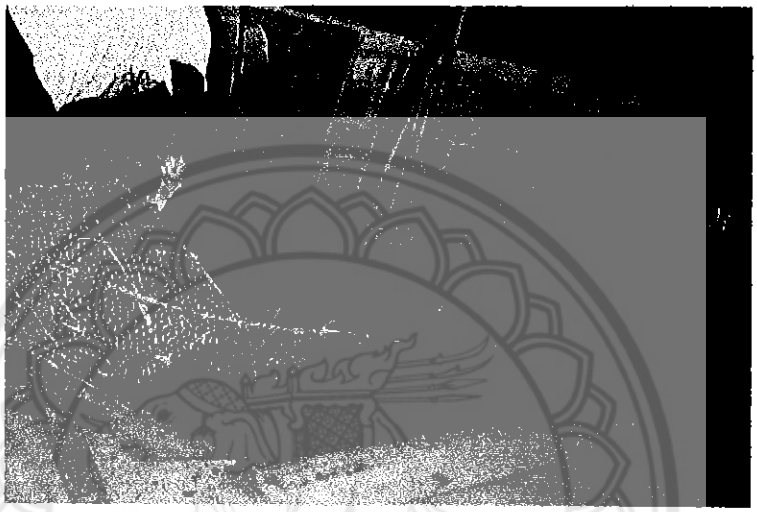
รูปที่ 3.29 การเทพื้นท้องเรือ



รูปที่ 3.30 การเทพื้นท้องเรือ

3.4.6 ฉาบปูนตัวเรือ

เมื่อปูนที่เทพื้นท้องเรือเริ่มเซ็ตตัวแล้ว ก็ทำการฉาบตัวเรือ แต่ก่อนที่จะฉาบตัวเรือควรใช้น้ำปูน (น้ำผสมกับปูนซีเมนต์) ทาที่ลวดตาข่ายก่อนเพื่อที่จะทำให้ปูนที่ฉาบเกาะติดกับลวดตาข่ายได้ดียิ่งขึ้น

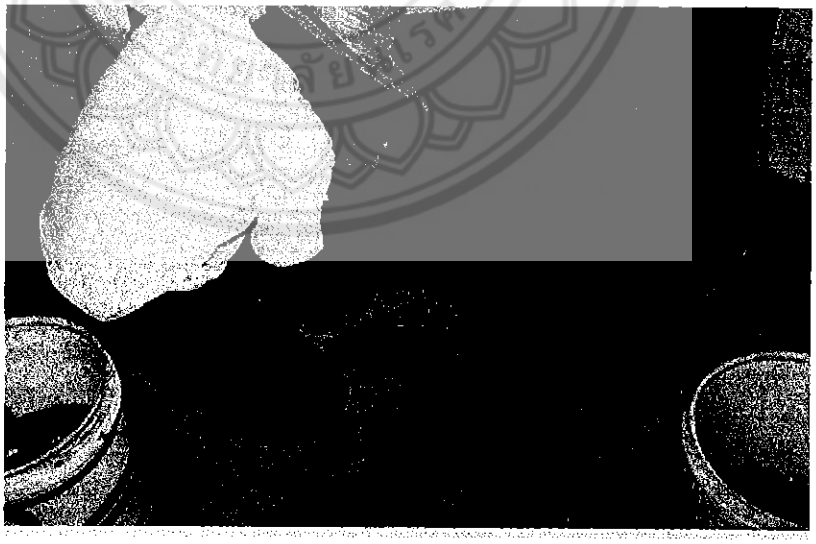


รูปที่ 3.31 การฉาบปูนตัวเรือ

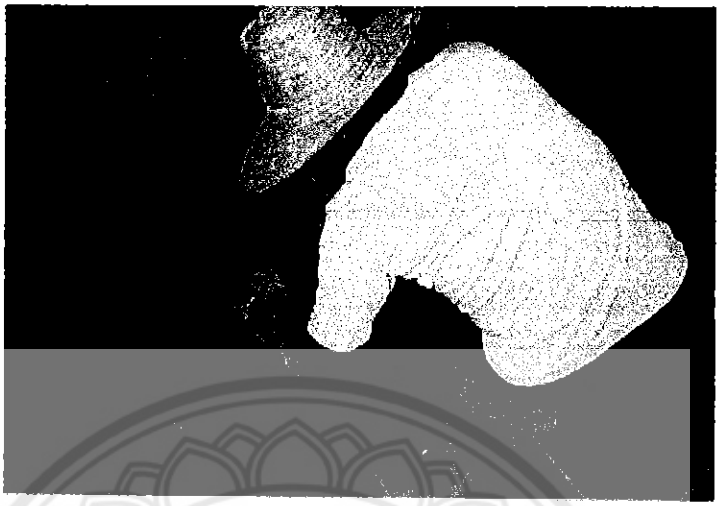
รูปที่ 3.32 การฉาบปูนตัวเรือ

3.4.7 การตกแต่งผิว

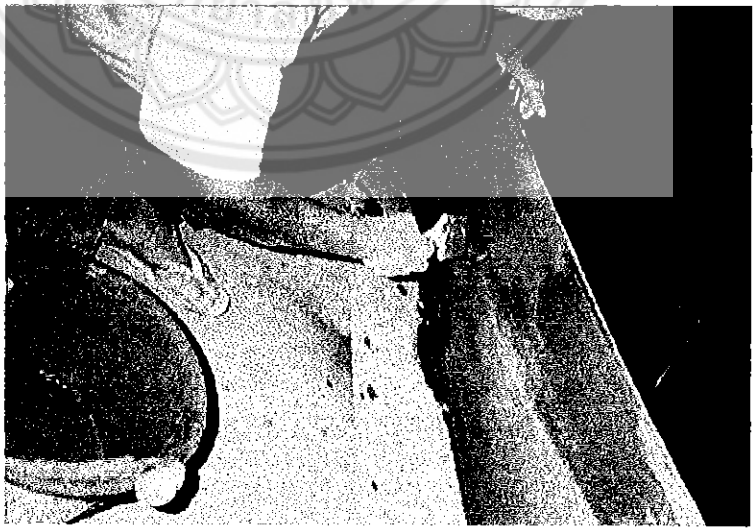
รูปที่ 3.33 การตกแต่งผิว



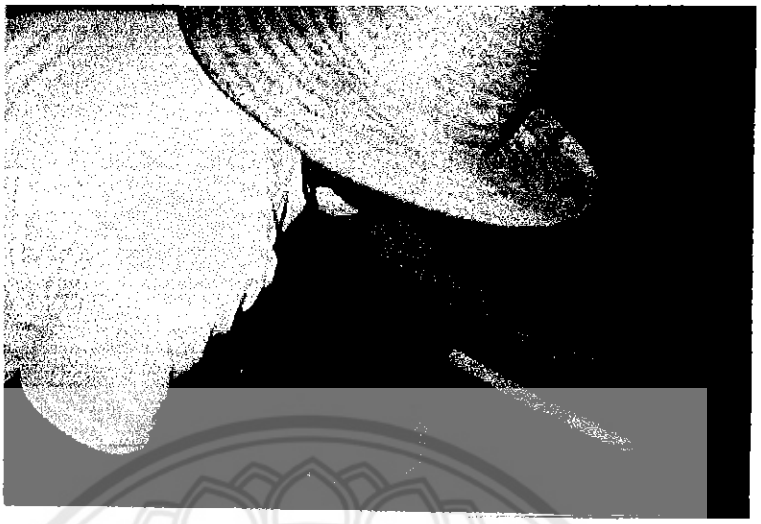
รูปที่ 3.34 การตกแต่งผิว



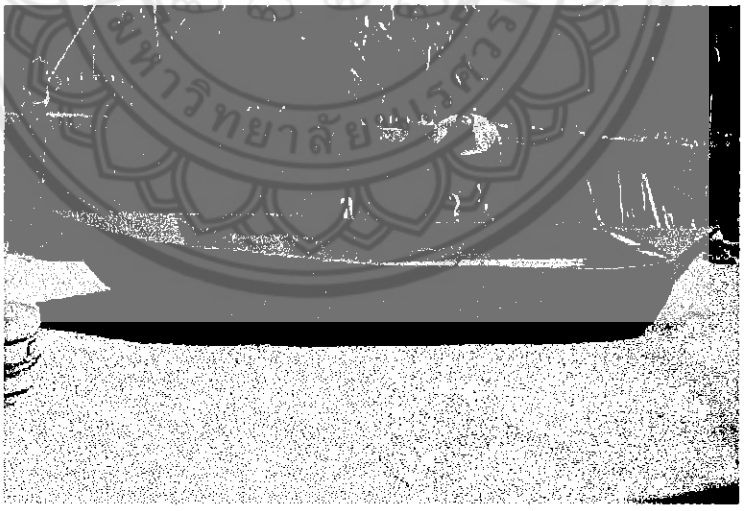
รูปที่ 3.35 การตกแต่งผิว



รูปที่ 3.36 การตกแต่งผิว



รูปที่ 3.37 การตกแต่งผิว

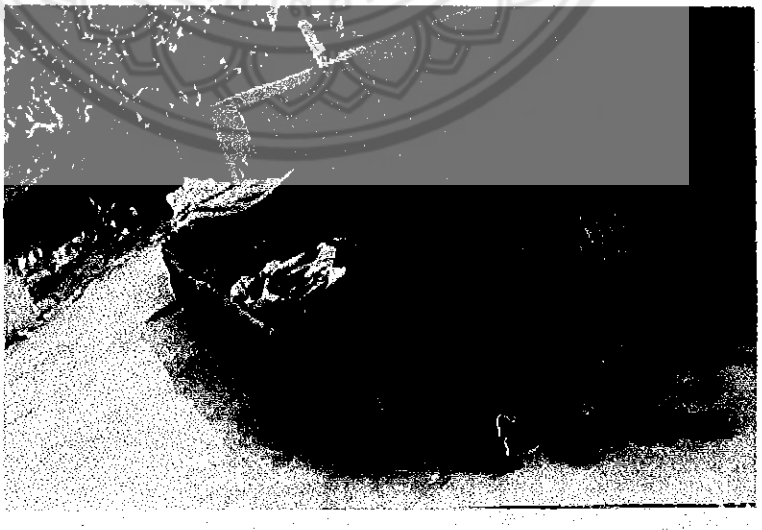


รูปที่ 3.38 การตกแต่งผิว

3.4.8 การบ่ม (Curing)

เมื่อทำตัวเรือเสร็จแล้วควรทำการบ่มเรือโดยใช้น้ำใส่เข้าไปในเรือ และใช้กระสอบเปียกน้ำคลุมเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกอย่างเร็ว เพราะถ้าน้ำระเหยออกอย่างเร็วจะทำให้ตัวเรือแตกได้ และการบ่มก็ยังช่วยให้ปูนมีความแข็งแรง

รูปที่ 3.39 การบ่มเรือ

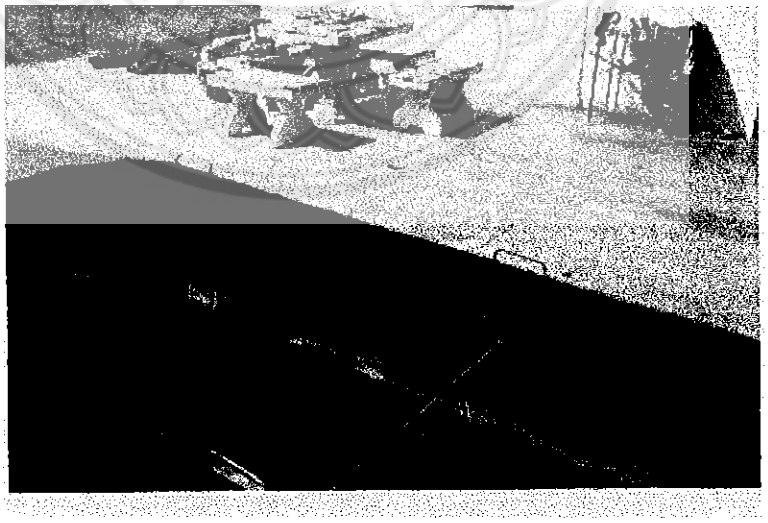


รูปที่ 3.40 การบ่มเรือ

3.4.9 ทาวัสดุกันซึม (Coating)

เมื่อบ่มเรือได้ตามอายุแล้วก้ทำการทาวัสดุกันซึม ก่อนที่จะทาวัสดุกันซึมควรทำความสะอาดตัวเรือก่อน

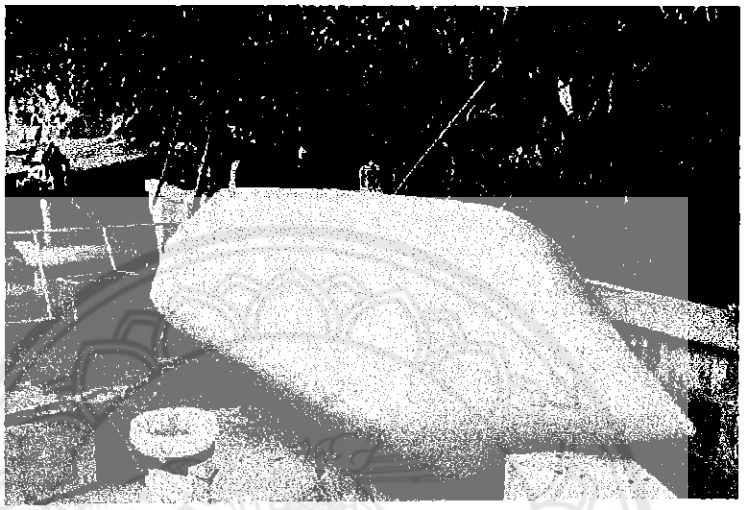
รูปที่ 3.41 การทาวัสดุกันซึม



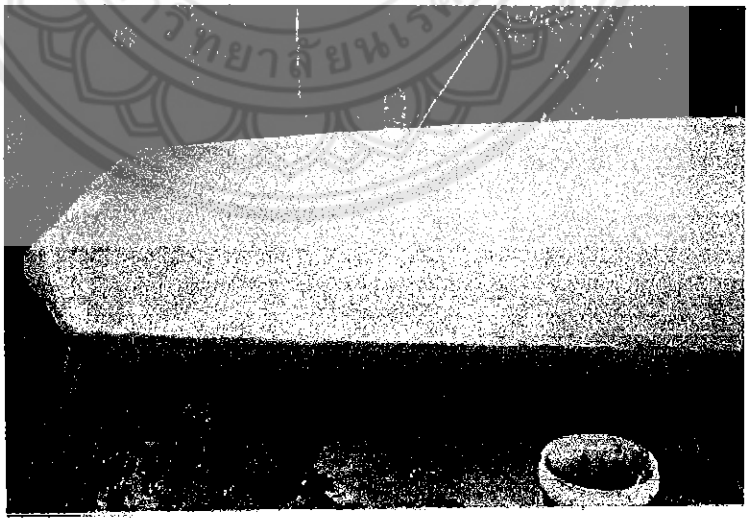
รูปที่ 3.42 การทาวัสดุกันซึม

3.4.10 ทาสี (Painting)

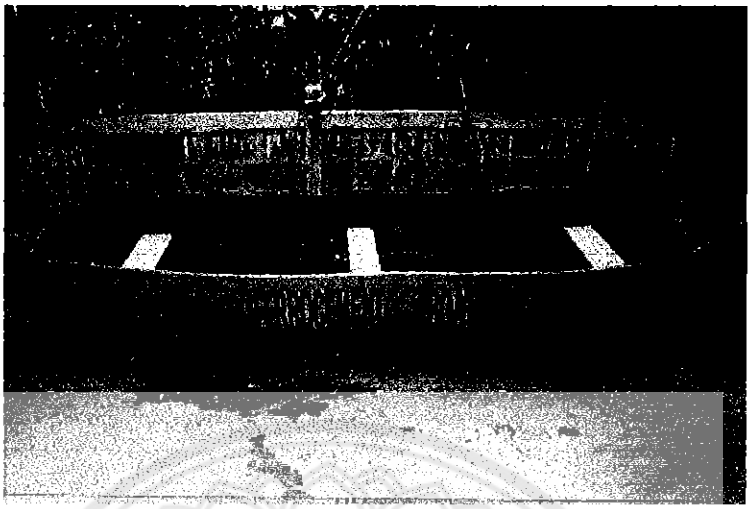
เมื่อทาวัสดุกันซึมเสร็จแล้ว เราก็ทำการทาสีโดยทาสีรองพื้นก่อน เมื่อสีรองพื้นแห้งเรียบร้อยแล้วก็ทำการทาสีน้ำมันทับอีกที



รูปที่ 3.43 การทาสี



รูปที่ 3.44 การทาสี



รูปที่ 3.45 การทาสี

3.4.11 การขนย้าย

รูปที่ 3.46 การขนย้าย

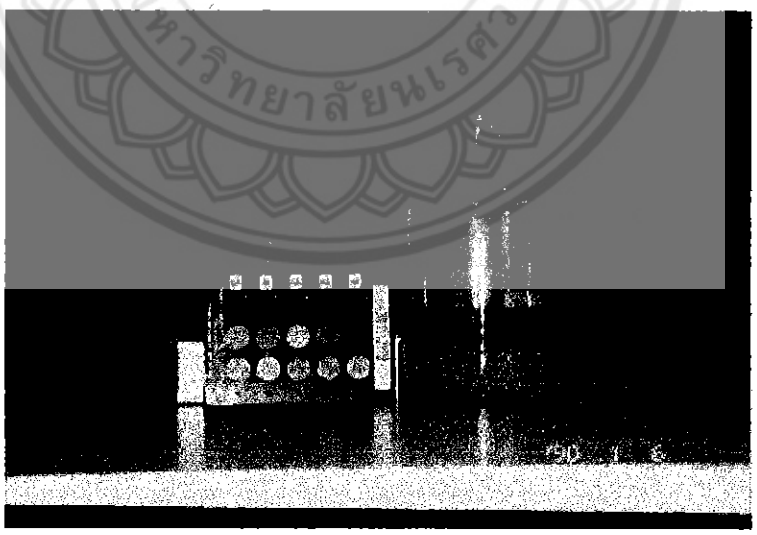
รูปที่ 3.47 การขนย้าย

รูปที่ 3.48 การขนย้าย

บทที่ 4
ผลการทำโครงงานวิศวกรรม

4.1 การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย (Organic Impurities in Fine Aggregate)

เมื่อเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 3 ส่วนต่อน้ำ 97 ส่วน โดยน้ำหนักจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 3% และนำทรายที่จะทดสอบมาชั่งน้ำหนักประมาณ 450 กรัม จากนั้นนำทรายใส่ในขวดให้ได้ปริมาตรประมาณ 130 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3% ให้ได้ปริมาตรรวมกับทรายถึงระดับ 200 มิลลิลิตร แล้วเขย่าไล่ฟอง จากนั้นปรับปริมาตรของทรายอีกครั้งหนึ่งจนกระทั่งปริมาตรของทรายและสารละลายอยู่ที่ 200 มิลลิลิตร หลังการเขย่า จากนั้นปิดฝาแก้วและเขย่าแรงๆ จนทรายและสารละลายเข้ากัน แล้วตั้งขวดแก้วทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทรายเป็นดังรูปที่ 4.1

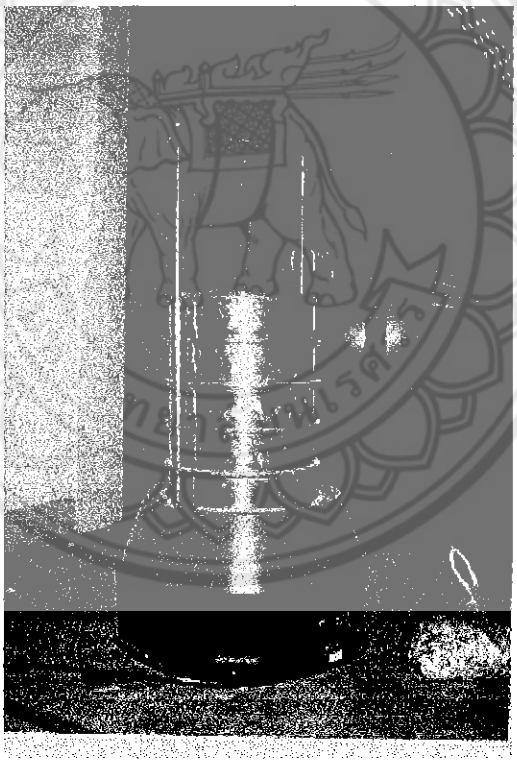


รูปที่ 4.1 การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย

จากรูปที่ 4.1 สีของน้ำในขวดที่มีทรายมีความเข้มตรงกับสีของแผ่นกระจกสีเบอร์ 2 แสดงว่ามีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ไม่เกินกำหนด ทรายที่นำมาทดสอบสามารถนำมาใช้ได้

4.2 การหาขนาดคละของทรายโดยวิธีร่อนด้วยตะแกรง (Sieve Analysis)

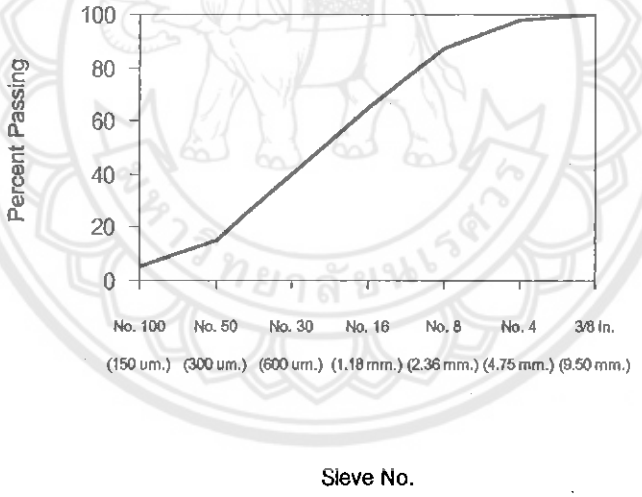
เตรียมตัวอย่างทรายที่จะทำการทดสอบให้ได้ปริมาณตามต้องการ โดยเผื่อน้ำหนักทรายหลังอบแห้งให้ได้ประมาณ 300 กรัม นำตัวอย่างที่ทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักทรายอบแห้งให้ได้ประมาณ 300 กรัม นำตะแกรงขนาด 3/8" เบอร์ 4 เบอร์ 8 เบอร์ 16 เบอร์ 50 และเบอร์ 100 มาวางซ้อนกันเป็นชุดบนเครื่องเขย่าโดยเรียงให้ตะแกรงขนาดใหญ่สุดอยู่ชั้นบน เททรายลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาให้แน่นแล้วนำเข้าเครื่องเขย่า เขย่าจนทรายที่ค้างบนตะแกรงไม่ผ่านไปยังตะแกรงชั้นถัดไป ชั่งน้ำหนักทรายที่ค้างบนแต่ละตะแกรง และนำมาคำนวนหาเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสมบนตะแกรงแต่ละขนาด



รูปที่ 4.2 การหาขนาดคละของทรายโดยวิธีร่อนด้วยตะแกรง

Sieve	Percent Passing
3/8 in.(9.50 mm.)	100
No. 4 (4.75 mm.)	98.3
No. 8 (2.36 mm.)	87.8
No. 16 (1.18 mm.)	65.5
No. 30 (600 um.)	40.5
No. 50 (300 um.)	15.4
No. 100 (150 um.)	5.4

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการหาขนาดคละของทราย



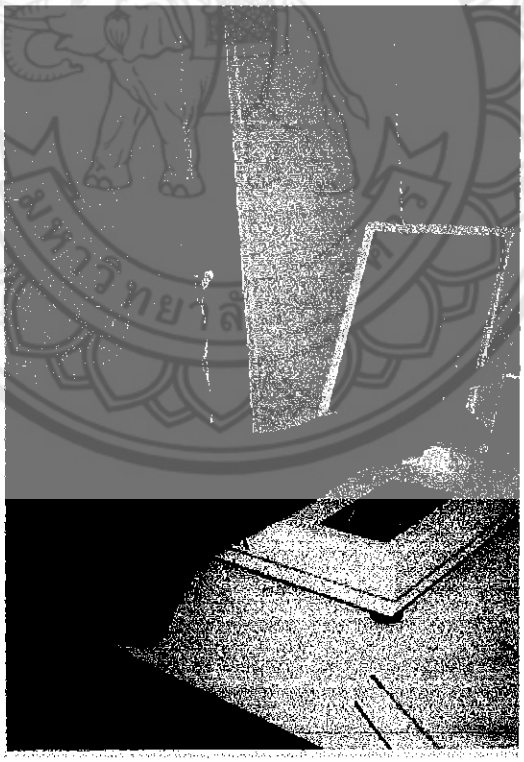
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการกระจายขนาดคละของทราย

ผลที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าทรายที่นำมาทดสอบนั้นมีขนาดคละอยู่ในมาตรฐานตามรูปที่ 3.1

4.3 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ (Test for Tensile Strength of Cement Mortars)

ก่อนการทดสอบให้เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้งพร้อมทั้งทำความสะอาดตัวอย่างด้วย จากนั้นจึงใส่ตัวอย่างบริเดทในเครื่องทดสอบกำลังดึง โดยใช้แรงดึงสม่ำเสมอด้วยอัตราในการดึง ประมาณ 5.0 มิลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างขาด

ค่ากำลังดึงของแต่ละตัวอย่าง ถ้าหากว่าแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยเกิน 15% แล้วจะถือว่าค่านั้นใช้ไม่ได้ แต่อย่างน้อยจะต้องเหลือไว้ 2 ค่า สำหรับหาค่าเฉลี่ยของกำลังดึง หากเหลือน้อยกว่า 2 ค่า จะต้องทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด



รูปที่ 4.4 การทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์

4.3.1 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์

การคำนวณค่ากำลังดึงของตัวอย่างบริเดทนี้ จะแสดงออกมาในรูปของหน่วยแรงดึงที่ทำให้ตัวอย่างบริเดทขาดพอดี คำนวณได้จากสูตร

$$f_t = P/A$$

เมื่อ f_t = ค่ากำลังดึงหรือหน่วยแรงดึงที่ขุดประลัย

P = แรงดึงประลัย

A = พื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของตัวอย่างบริเดท

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงดึงประลัย (กก.)	กำลังดึง (กก./ซม.^{2})	กำลังดึงเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	1	6.675	101.767	15.246	14.668
2	1	6.677	73.929	11.072	
3	1	6.597	116.672	17.686	

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 1วัน

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงดึงประลัย (กก.)	กำลังดึง (กก./ซม.^{2})	กำลังดึงเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	3	6.780	252.991	37.314	32.843
2	3	6.913	197.094	28.628	
3	3	6.932	225.901	32.588	

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงดึงประลัย (กก.)	กำลังดึง (กก./ซม.^{2})	กำลังดึงเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	7	6.827	235.231	34.456	39.243
2	7	6.963	299.065	42.951	
3	7	7.257	292.624	40.323	

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงดึงประลัย (กก.)	กำลังดึง (กก./ซม.^{2})	กำลังดึงเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	28	6.782	289.024	42.616	45.245
2	28	6.854	325.143	47.438	
3	28	6.886	314.552	45.680	

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่ากำลังดึงของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน

เมื่อนำค่ากำลังดึงเฉลี่ยจากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามตารางที่ 3.2 แสดงว่าซีเมนต์ที่นำมาใช้นั้นมีคุณภาพได้มาตรฐาน และเหมาะสมที่จะเอาไปใช้งาน

4.4 การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ (Test for Compressive Strength of Cement Mortars)

ก่อนการทดสอบให้เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้งพร้อมทั้งทำความสะอาดตัวอย่างด้วยและในการทดสอบให้ทดสอบในเครื่องทดสอบแรงกดทั่วไป โดยให้แรงอัดทางด้านข้างที่มีผิวเรียบทั้งสองด้าน ให้ทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างแตก โดยใช้เวลาการทดสอบระหว่าง 20 ถึง 80 นาที ในการทดสอบแต่ละครั้งต้องใช้ตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง

รูปที่ 4.5 การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์

4.4.1 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์

ค่ากำลังอัดของตัวอย่างแต่ละก้อนคำนวณได้จากสูตร

$$f_c = P/A$$

เมื่อ f_c = กำลังอัด, กก/ซม.^{2}

P = แรงดึงประลัย, กก.

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างจริง, ซม.^{2}

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงอัดประลัย (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	1	280	26.214	4505.607	171.878	199.433
2	1	280	25.351	6126.402	241.663	
3	1	285	25.652	5861.366	228.495	

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 1 วัน

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงอัดประลัย (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	3	285	25.806	9745.158	377.631	370.963
2	3	290	25.705	9775.739	380.305	
3	3	285	25.502	9051.988	354.952	

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 3 วัน

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงอัดประลัย (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	7	285	25.503	7441.386	291.785*	392.569
2	7	290	25.959	10214.067	393.469	
3	7	290	26.265	10458.716	398.200	

* ค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนมากจึงตัดค่านี้ทิ้ง

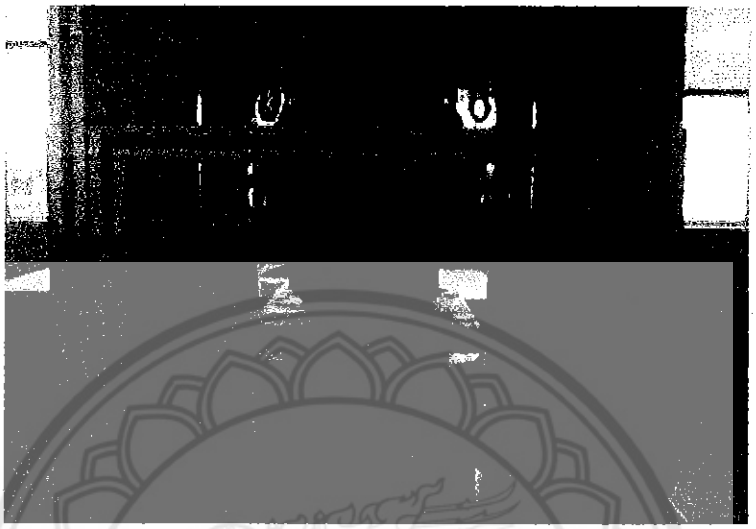
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน

ตัวอย่างที่	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	พื้นที่หน้าตัด (ซม.^{2})	แรงอัดประลัย (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม.^{2})
1	28	290	25.000	15575.943	623.038	609.582
2	28	290	25.000	14678.899	587.156	
3	28	290	25.000	15463.812	618.552	

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน

เมื่อนำค่ากำลังอัดเฉลี่ยจากผลการทดลองตามตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 ตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามตารางที่ 3.3 แสดงว่าซีเมนต์ที่นำมาใช้นั้นมีคุณภาพได้มาตรฐาน และเหมาะสมที่จะเอาไปใช้งาน

4.5 การทดสอบหาค่าโมเมนต์ดัดของมอร์ตาซีเมนต์เสริมเหล็ก

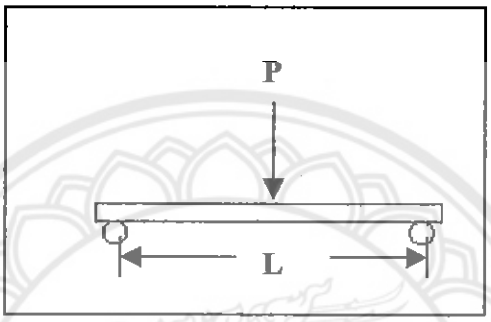


รูปที่ 4.6 การทดสอบหาค่ากำลังดัดของมอร์ตาซีเมนต์เสริมเหล็ก

รูปที่ 4.7 การทำตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาซีเมนต์เสริมเหล็ก

การทดสอบนี้ทำเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดของมอร์ตาซีเมนต์เสริมเหล็ก โดยใช้ตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง ขนาด กว้าง x ยาว = 30 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร และมีความหนา 3, 4, 5, และ 6 เซนติเมตร

วิธีการทดสอบคือ ให้แรงกดกระทำที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่าง กดจนกระทั่งตัวอย่างแตก และนำค่าแรงกดมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด



รูปที่ 4.8 วิธีการทดสอบหาค่าโมเมนต์ดัด

ค่าโมเมนต์ดัดมีค่า = PL/4

4.5.1 ผลการทดสอบ

- ตัวอย่างที่ 1 ขนาด 30 cm x 50 cm. หนา 3 cm.

  แรงกด P = 18.9 kN

  ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัด = (18.9 x 0.5)/4 = 2.36 kN.m

- ตัวอย่างที่ 2 ขนาด 30 cm x 50 cm. หนา 4 cm.

  แรงกด P = 30.9 kN

  ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัด = (30.9 x 0.5)/4 = 3.86 kN.m

- ตัวอย่างที่ 3 ขนาด 30 cm x 50 cm. หนา 5 cm.

  แรงกด P = 22.5 kN

  ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัด = (38.2 x 0.5)/4 = 2.81 kN.m

  ค่าที่ได้จากตัวอย่างที่ 3 มีความผิดพลาด

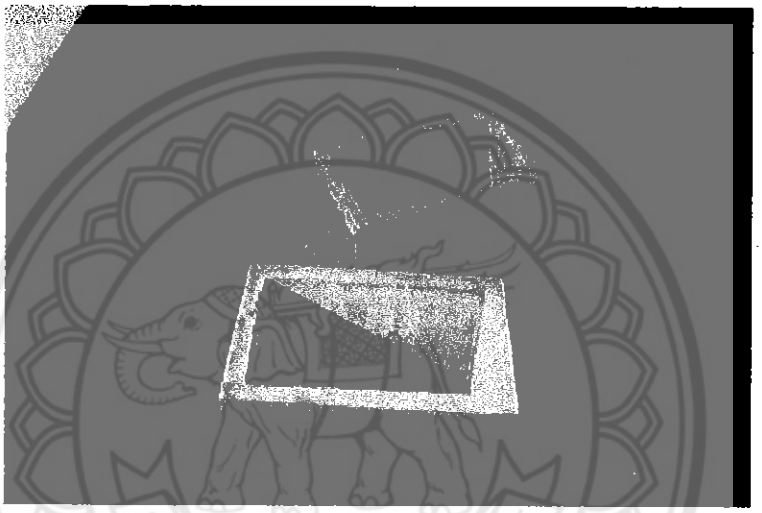
- ตัวอย่างที่ 4 ขนาด 30 cm x 50 cm. หนา 6 cm.

  แรงกด P = 48.9 kN

  ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัด = (48.9 x 0.5)/4 = 6.11 kN.m

4.6 การทดสอบการลอยตัวของตัวอย่างรูปกล่อง

การทดสอบการลอยตัวของตัวอย่างรูปกล่อง ใช้ตัวอย่างรูปกล่องขนาด กว้าง x ยาว x สูง = 30 cm. x 50 cm. x 40 cm. จำนวน 3 ตัวอย่างมีความหนา 3 cm.,4 cm. และ 5 cm. ทำเพื่อศึกษาเรื่องแรงลอยตัว

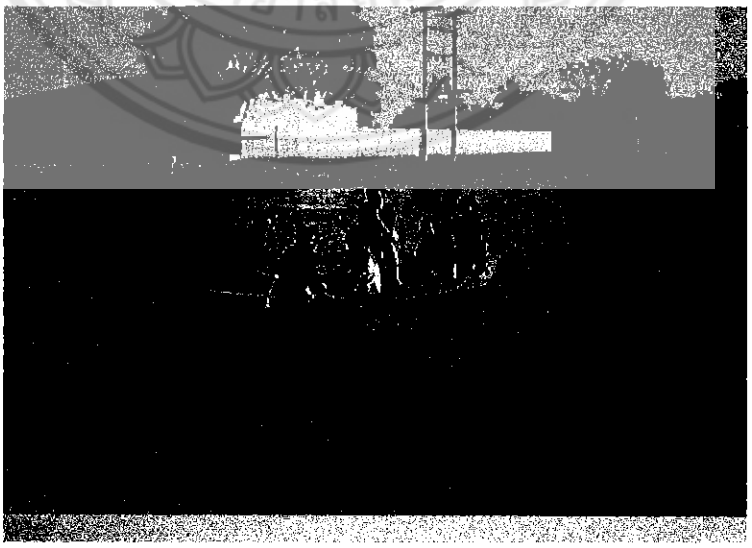


รูปที่ 4.9 การทดสอบการลอยตัวของตัวอย่างรูปกล่อง

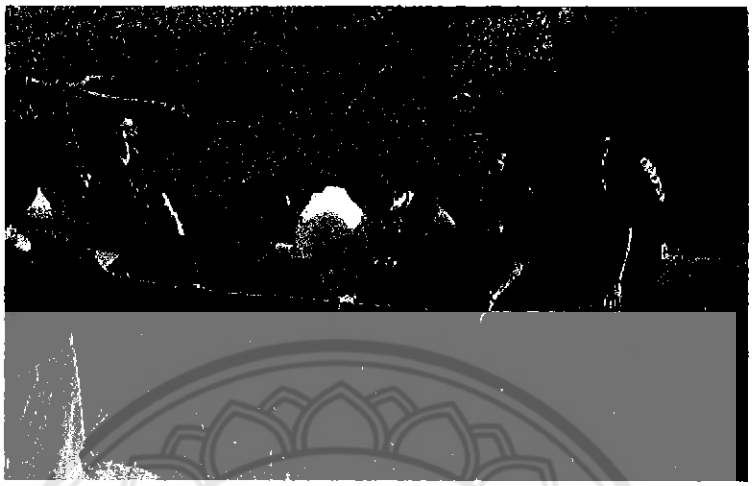
รูปที่ 4.10 การทดสอบการลอยตัวของตัวอย่างรูปกล่อง

4.7 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์

รูปที่ 4.11 การทดสอบการลอยตัวของเรือเฟอร์โรซีเมนต์



รูปที่ 4.12 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์



รูปที่ 4.13 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์

รูปที่ 4.14 การทดสอบการลอยตัวและน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์

4.7.1 การทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกของเรือเฟอร์โรซีเมนต์

ทดสอบดังรูปที่ 4.14 ได้ค่าน้ำหนักของคนที่ขึ้นเรือเฟอร์โรซีเมนต์ดังนี้

1.อาจารย์วิชัย	ฤกษ์ภูริทัต	มีน้ำหนัก	70 กิโลกรัม
2.นายกิตติศักดิ์	เกษตรธรรม	มีน้ำหนัก	65 กิโลกรัม
3.นายชูชัย	หล่อนิมิตรดี	มีน้ำหนัก	73 กิโลกรัม
4.นายวรกร	เรืองธีรชัย	มีน้ำหนัก	60 กิโลกรัม
5.นายอธิวัฒน์	แสนประสิทธิ์	มีน้ำหนัก	56 กิโลกรัม
6.นายกุลณัตร	ศรีสวัสดิ์	มีน้ำหนัก	65 กิโลกรัม
7.นางสาวรัฐกานต์	เผือกยอด	มีน้ำหนัก	44 กิโลกรัม
	น้ำหนักบรรทุกรวม	433	กิโลกรัม

จากน้ำหนักดังกล่าวที่กระทำ เมื่อวัดระยะพ้นของขอบเรือได้ค่าเท่ากับ 12 เซนติเมตรซึ่งจากที่ ได้ทำการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกที่ระยะพ้นน้ำ 12 เซนติเมตร เรือสามารถรับน้ำหนักได้ 437.4 กิโลกรัม

บทที่ 5
วิเคราะห์และสรุปผล

5.1 วิเคราะห์ผล

5.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณกับน้ำหนักบรรทุกจริงของเรือเฟอร์โรซีเมนต์

เมื่อนำค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเรือเฟอร์โรซีเมนต์จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเรือเฟอร์โรซีเมนต์จริงในสนาม จะพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจริงของเรือเฟอร์โรซีเมนต์ในสนามมีค่าใกล้เคียงค่าจากการคำนวณ โดยกำหนดค่าฟันน้ำของขอบเรือเฟอร์โรซีเมนต์ที่ 12 เซนติเมตร พบว่า

ค่าน้ำหนักบรรทุกจริงได้	433	กิโลกรัม
ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณ	437.4	กิโลกรัม

สาเหตุที่เกิดคลาดเคลื่อนมาจาก

- จากการคำนวณส่วนปริมาตรหัวเรือสมมติว่ามีปริมาตรเป็นรูปทรงกรวย
- จากหน่วยน้ำหนักของเฟอร์โรซีเมนต์ไม่ถูกต้อง

5.1.3 การเปรียบเทียบทางด้านราคา

- เรือเฟอร์โรซีเมนต์ (ขนาดยาว 4 เมตร กว้าง 1 เมตร หนา 2.5 เซนติเมตร)
  มีราคาทั้งสิ้น 2,684 บาท
- เรือพลาสติก (ขนาดยาว 2.80 เมตร กว้าง 1.10 เมตร)
  มีราคาทั้งสิ้น 4,000 บาท
- เรือไฟเบอร์กลาส (ขนาดยาว 2.80 เมตร กว้าง 0.70 เมตร)
  มีราคาทั้งสิ้น 3,200 บาท
- เรือเหล็กสังกะสี (ขนาดยาว 2.30 เมตร กว้าง 0.8 เมตร)
  มีราคาทั้งสิ้น 3,300 บาท
  (จากราคาเมื่อ วันที่ 13 มีนาคม 2543 จังหวัดพิษณุโลก)

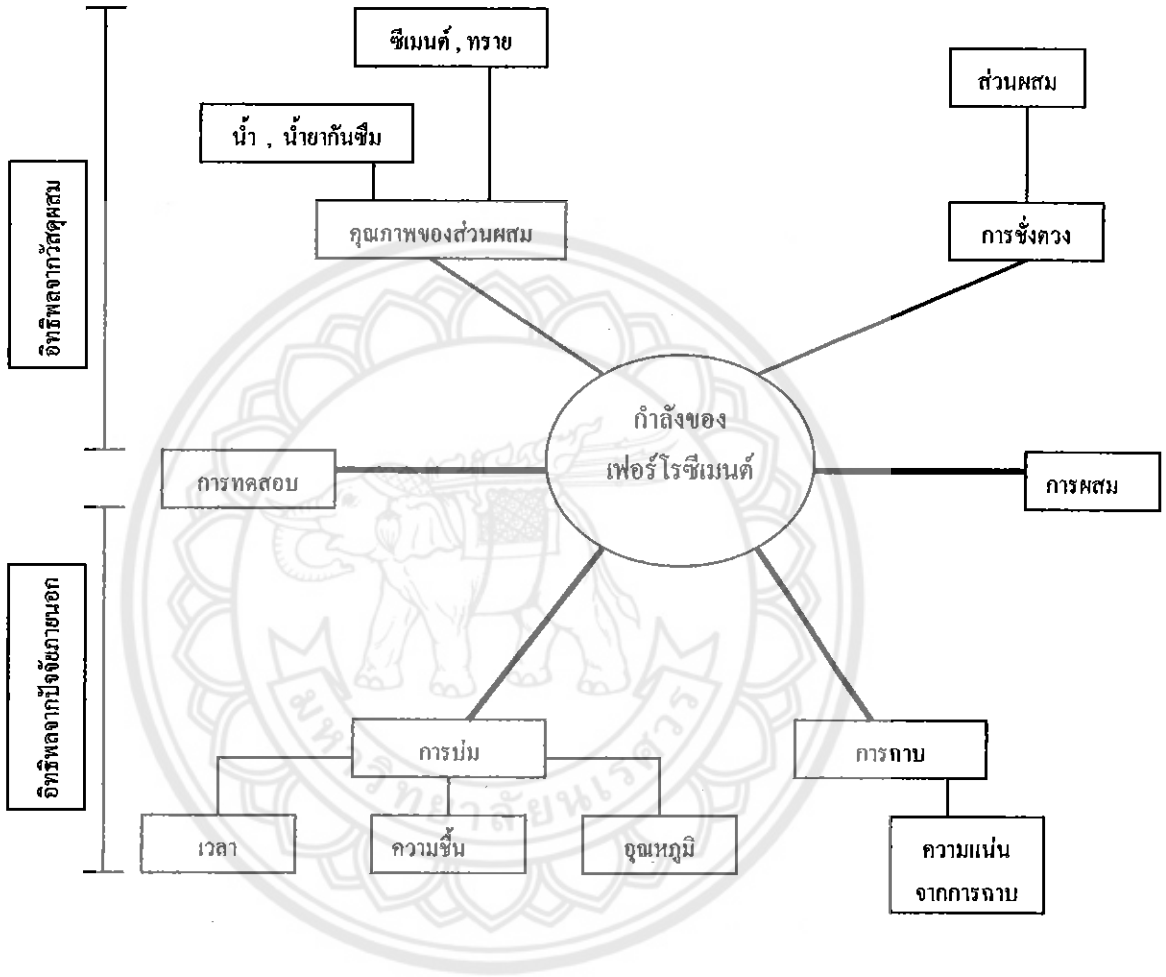
จากราคาของเรือทั้งสี่ชนิด จะเห็นได้ว่าเรือเฟอร์โรซีเมนต์มีราคาที่ถูกกว่าเรือชนิดอื่น ๆ ทั้งที่มีขนาดใหญ่กว่า

5.2 สรุปผล

5.2.1 ปัจจัยในการทำเฟอร์โรซีเมนต์ที่ดี

รูปที่ 5.1 ปัจจัยในการทำเฟอร์โรซีเมนต์ที่ดี

5.2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของเฟอร์โรซีเมนต์



รูปที่ 5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของเฟอร์โรซีเมนต์

5.2.3 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเฟอร์โรซีเมนต์

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. สามารถทำรูปร่างได้ตามต้องการ 2. ราคาถูก 3. มีความทนทานสูง 4. ทนไฟไหม้ , ไม่ไหม้ไฟ 5. สามารถทำให้ผิวสวยงามได้ 6. เป็นวัสดุที่เป็นชิ้นเดียวกันทั้งชิ้นงาน ทำให้ไม่มีปัญหาในการรั่วซึม 7. วัสดุสามารถจัดหาได้ง่าย และการสร้างไม่ต้องใช้เครื่องจักรหนัก 8. ความแข็งมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุการใช้งานมากขึ้น 9. ไม่ต้องมีการบำรุงรักษา 10. ถ้าเกิดความเสียหายสามารถซ่อมได้ง่าย และไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษแต่อย่างใด 11. ไม่ต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญสูง	1. สามารถรับแรงดึงได้น้อย 2. อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ 3. มีหน่วยน้ำหนักสูง

ตารางที่ 5.1 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเฟอร์โรซีเมนต์

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น

จากการทำโครงงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นมีหลายปัญหา เป็นผลทำให้การทำงานล่าช้า ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ปัญหาเรื่องน้ำหนักของวัสดุ เนื่องจากเฟอร์โรซีเมนต์ทำจากวัสดุที่มีน้ำหนักมาก โครงงานนี้ขาดยานพาหนะในการขนย้ายวัสดุ และตาชั่งที่ชั่งน้ำหนักได้มาก ๆ
- ปัญหาเรื่องความชำนาญด้านเทคนิคในการฉาบปูน ดัดเหล็ก
- ปัญหาเรื่องเอกสารอ้างอิงในการดำเนินโครงงานมีน้อยเกินไป และมีแต่หนังสือภาษาต่างประเทศ

5.4 ข้อเสนอแนะ

- หาสมการที่เหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อการคำนวณน้ำหนักและปริมาตรของเรือเฟอร์โรซีเมนต์ เพื่อความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- สำหรับผู้ที่สนใจโครงงานนี้ควรมีการนำวัสดุเฟอร์โรซีเมนต์ไปใช้ทำสิ่งประดิษฐ์อย่างอื่นที่เห็นว่าสมควร เหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นอีกต่อไป

บรรณานุกรม

Sharma, P.C. and Gopalaratnam, V.S. Ferrocement Canoe.Bangkok:Thai Wattana Panich Press Co. Ltd., 1980.

Paul, Bishwendu K. and Ricardo P. Pama. Ferrocement. Bangkok :Thai Wattana Panich Press Co. Ltd., 1978.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ, 2540.

วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ, 2539.

มหาวิทยาลัยนเรศวร. คู่มือปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. คู่มือการทดสอบ หิน ทราย และคอนกรีต. กรุงเทพฯ, 2541.

ภาคผนวก

ปูนซีเมนต์

ประวัติ

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์ , กรีก และโรมันใน คำว่าซีเมนต์ มาจากภาษาลาติน มีความหมายโดยทั่ว ๆ ไปคือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อผสมกันน้ำจะเกิดความเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความสามารถยึดส่วนต่าง ๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเริ่มเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็สิ้นสุดลงด้วย และความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้ง ในปี พ.ศ. 2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์ จนประสบความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทา เหมือนกับหินที่ใช้ในงานก่อสร้าง บริเวณเมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ รวมทั้งได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

ปลายศตวรรษที่ 19 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก รวมทั้งได้มีการเปิดโรงงานผลิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่น ประเทศฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2383 ประเทศเยอรมัน ในปี พ.ศ. 2398 ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2414 และประเทศออสเตรเลีย ในปี พ.ศ. 2425 ส่วนประเทศไทยได้มีการเริ่มผลิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2456

กรรมวิธีในการผลิต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมสำคัญดังนี้

1. Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
2. Argillaceous Material ได้แก่ ซิลิก้า อลูมิน่า ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale)
3. Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือศิลาแลง (Laterite)

กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกออกตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
2. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ดินสอพองและดินเหนียว ถูกนำมาผสมกันให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา (Kiln) กรรมวิธีในการผลิตแบบแห้งนั้นวัตถุดิบที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้แก่ หินปูนและดินดาน จะถูนำมาผสมกันในสภาพแห้ง ๆ ให้ได้สัดส่วนที่ต้องการ แล้วบดให้ละเอียด

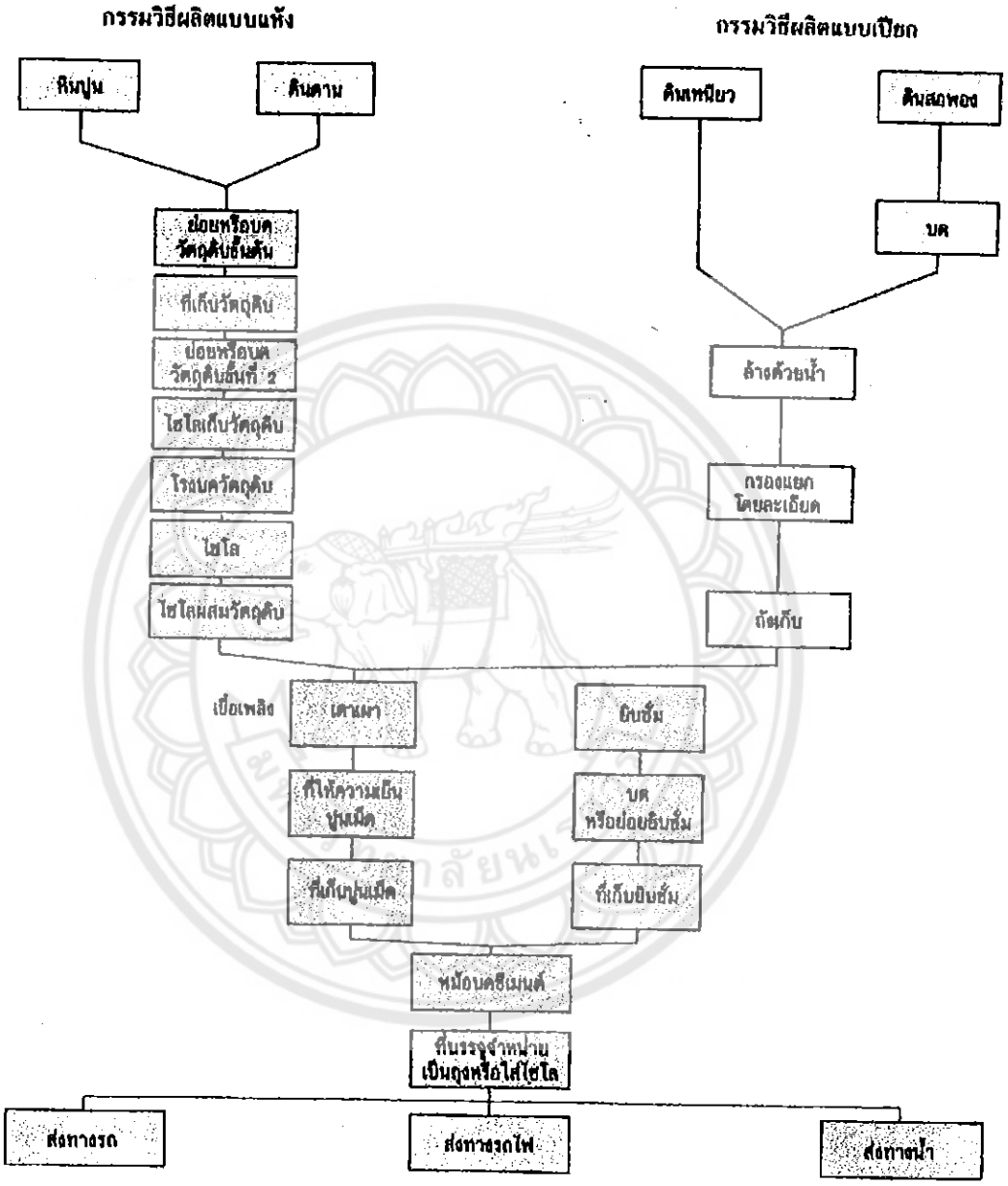
ก่อนที่จะป้อนเข้าไปในหม้อเผา กรรมวิธีในการผลิตแบบเปียกและแบบแห้งได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ ผ1

เมื่อสัดส่วนผสมของวัตถุดิบบดได้ที่แล้วก็จะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400 – 1,500 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ วัตถุดิบต่าง ๆ จะถูกหลอมรวมกันเป็น Clinker ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นนำปูนเม็ดที่เย็นตัวลงนี้ มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ในขณะทำหารบดจะมีการเติมยิบซั่มลงไปเล็กน้อย ประมาณ 3 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ อันจะเป็นผลทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อไป

สำหรับกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทย ปัจจุบันนิยมผลิตแบบแห้งซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีทันสมัยที่สุด เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อย หม้อเผาปูนซีเมนต์ที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน สามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ถึง 10,000 ตันต่อวัน สำหรับข้อมูลปริมาณความต้องการและการบริโภคปูนซีเมนต์ในประเทศต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ ผ1

ประเทศ	ปริมาณความต้องการ (ล้านตัน/ปี)	การบริโภค (กก./คน/ปี)
สิงคโปร์	2.15	800
ญี่ปุ่น	82.00	666
เยอรมัน	40.00	645
ไทย	18.70	335
มาเลเซีย	5.60	320
อเมริกา	71.30	286
อังกฤษ	16.00	280
ฟิลิปปินส์	7.35	115
อินโดนีเซีย	14.05	75

ตารางที่ ผ1 ปริมาณความต้องการและการบริโภคปูนซีเมนต์



รูปที่ ผ1 แผนภาพแสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกนำมาเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง, ซิลิก้า, อลูมิน่า และเหล็กออกไซด์ จากดินดำและดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ Cao , Sio_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90 % ของน้ำหนักซีเมนต์
- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , Tio_2 , P_2O_5 และยิบซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ ผ2

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
SiO_2	17 - 25
Al_2O_3	3 - 8
Fe_2O_3	0.5 - 6.0
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

ตารางที่ ผ2 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ ผ3

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

ตารางที่ ผ3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์

เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์ได้โดยประมาณจากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้น ๆ 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_3A = $2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$

ปริมาณ C_4AF = $3.04(Fe_2O_3)$

ตัวเลขในวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมด และปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime

ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ ผ4

องค์ประกอบทางเคมี (%)	องค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ (%)
CaO 64.73	C_3S = 4.07 × (64.73 – 1.60) – 7.60 × (21.20) – 6.72 × (5.22) – 1.43 × (3.08) – 2.85 × (2.01) = 50.6%
SiO_2 21.20	
Al_2O_3 5.22	
Fe_2O_3 3.08	
MgO 1.04	C_2S = 2.87 × (21.20) – 0.754 × (50.6) = 22.7%
SO_3 2.01	
Na_2O 0.10	C_3A = 2.65 × (5.22) – 1.69 × (3.08) = 8.6%
K_2O 0.42	
Loss of Ignition 1.45	C_4AF = 3.04 × (3.08) = 9.4%
Insoluble Residue 0.66	
Free Lime 1.60	

ตารางที่ ผ4 ตัวอย่างการคำนวณสารประกอบหลัก

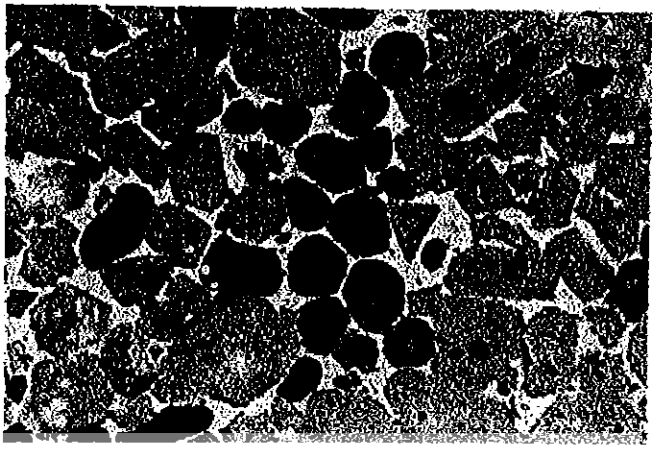
สารประกอบหลัก

1. ไตรดัลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ ผ2 คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 – 3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S จะถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35 – 55 %

2. ไดดัลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15 - 35 %



รูปที่ ผ2 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ

3. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบรูปร่างเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1 – 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7 – 15 %

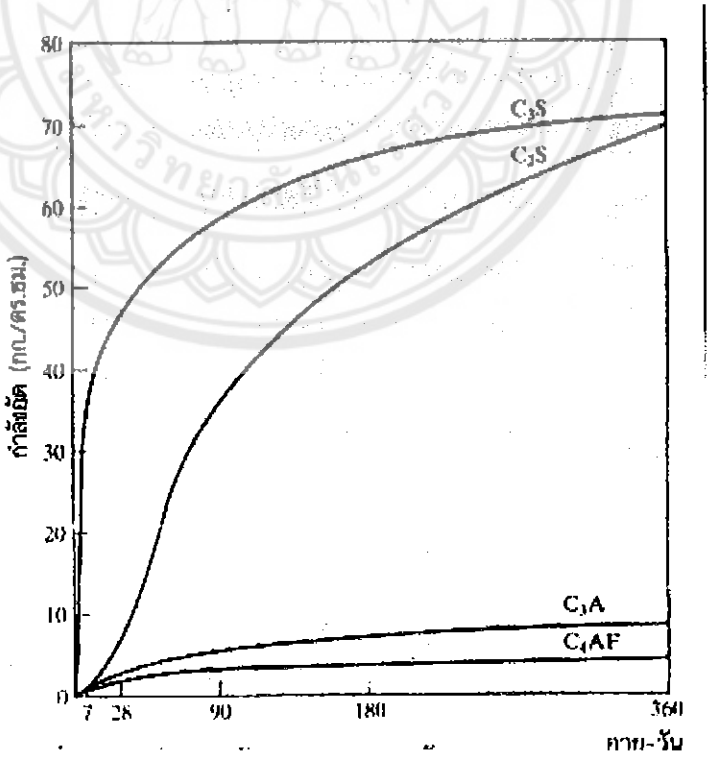
3. เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่วินาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์จะมี C_4AF อยู่ในประมาณ 5 – 10 %

คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ ผ5 และกราฟรูปที่ ผ3

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2) อัตราการพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3) กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4) ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5) คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ตารางที่ ผ5 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ ผ3 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก

สารประกอบรอง

1. ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิบซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิบซั่มที่ใส้ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิบซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

1) อัลคาไลท์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O

2) ปริมาณ C_3A

3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2. Free Lime (CaO)

Free Lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 ได้ทั้งหมด

2) ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะเหมือนกับ CaO คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1) ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์

2) ขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้การขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

4. อัลคาไลท์ออกไซด์ (Na_2O , K_2O)

อัลคาไลท์ออกไซด์ ที่อยู่ในรูปปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่อัลคาไลท์ต่ำ

การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า "Dormant Period" หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันจะยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า "จุดแข็งตัวเริ่มต้น" (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า "เวลาการก่อตัวเริ่มต้น" (initial Setting time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ "จุดแข็งตัวสุดท้าย" (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า "เวลาการก่อตัวสุดท้าย"(Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เราเรียกว่า "การแข็งตัว" (hardening) ขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ ผ4

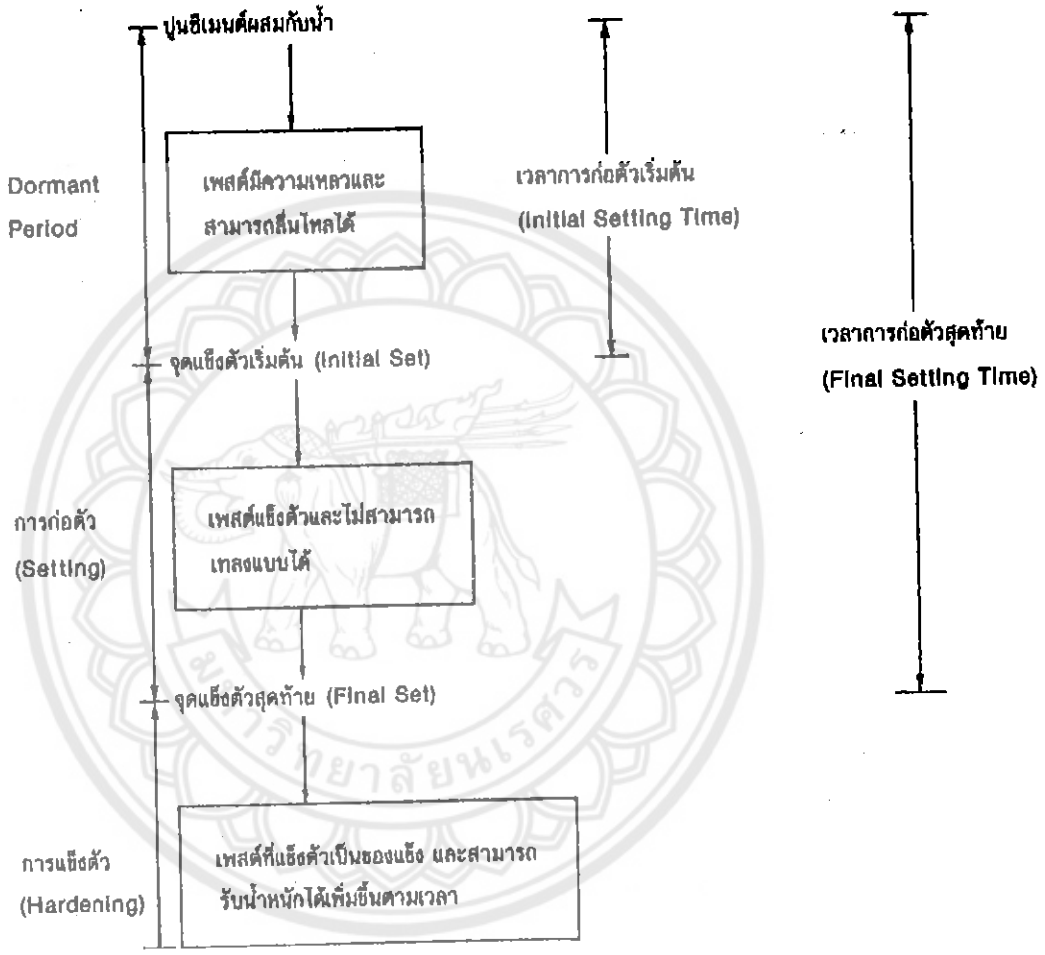
ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1) **อาศัยสารละลาย** ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2) **การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง** ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์จะเกิดทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง



รูปที่ ผ4 ขั้นตอนการก่อตัวและของแข็งตัวของคอนกรีต

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของดัลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)**

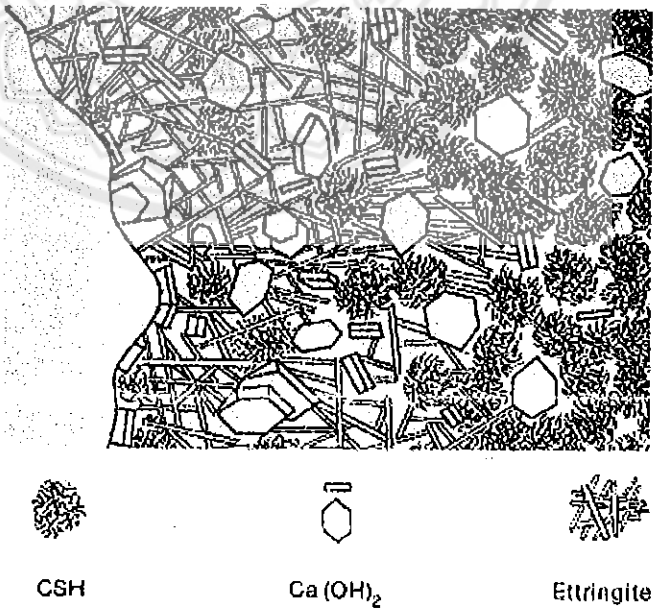
ดัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่ เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ ผ5 และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_2S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$$



รูปที่ ผ5 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของดัลเซียมซิลิเกต

จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างเป็นอย่างมาก คือ มี P.H. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรกัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)**

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิด การแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

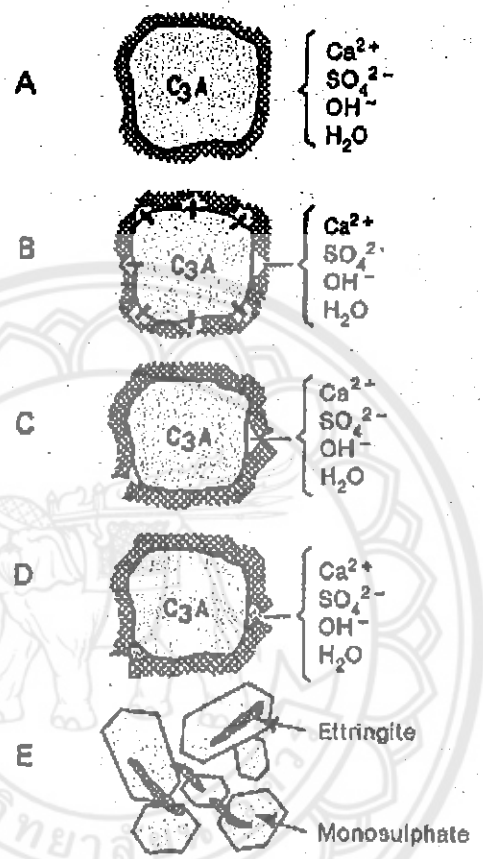
$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \qquad 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$$

หรือ $C_3A + 6H_2O \longrightarrow 3C_3AH_6$

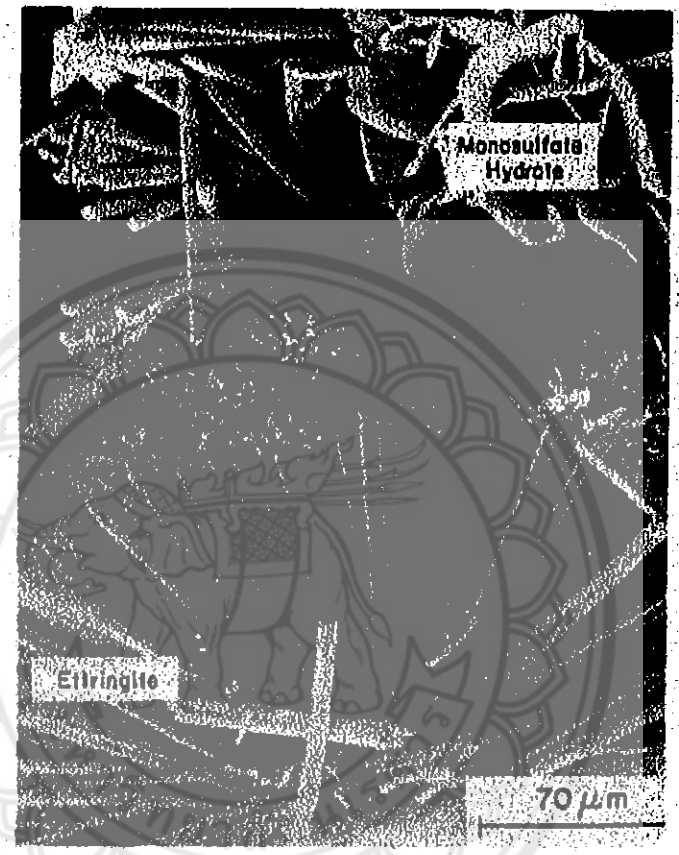
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ

$$C_3A + CaSO_4 \cdot 2H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O \text{ (Ettringite)}$$

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และจะทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ ผ6 และรูปที่ ผ7



รูปที่ ผ6 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A



รูปที่ ผ7 ภาพขยายของ Momosulphate และ Ettringite

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)**

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 3CaSO_4$$

เวลาที่ใช้เพื่อบรรลุ 80 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ ผ6

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

ตารางที่ ผ6 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80 %

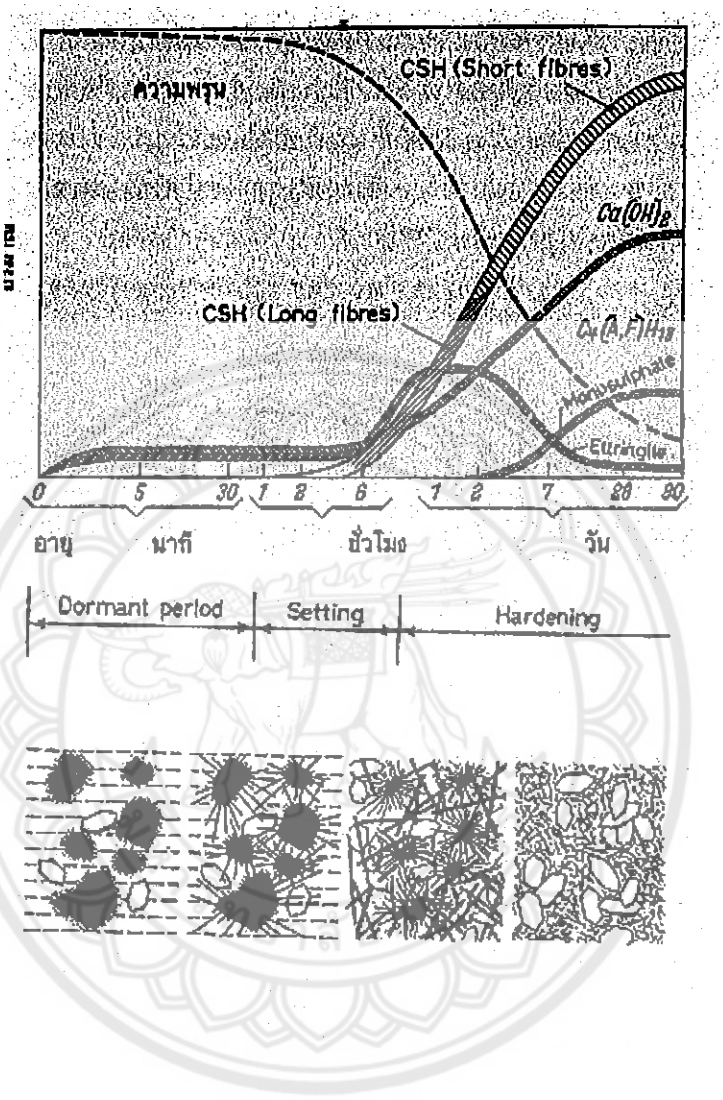
การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งอธิบายหลักการเกิด "Dormant Period" อันเป็นช่วงเวลาค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1 – 2 ชั่วโมง ในขณะนั้นซีเมนต์เพสต์ยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วง "Dormant Period" ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เวลาผ่านไป ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส จำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set) ดังแสดงในรูปที่ ผ8

แผนภาพแสดงขบวนการเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และโครงสร้างของเพสต์ แสดงในรูปที่ ผ9 โดยซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำในขณะที่ $Ca(OH)_2$ จะแสดงด้วยรูปเหลี่ยม ผลึกของ Ettringite แสดงโดยเส้นบาง ๆ สั้น ๆ และ CSH เส้นเข้มมีความยาวพอสมควร จากรูปที่ ผ10 จะพบว่าระหว่าง Dormant Period เม็ดซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH gel เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัว CSH gel นี้ก่อให้เกิดการก่อตัวในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของเพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate Ions ถูกใช้หมดไป อลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์เริ่มก่อตัว และ Ettringite ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน C_3S และ C_2S จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป ได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเพสต์ลดลงในระยะยาว



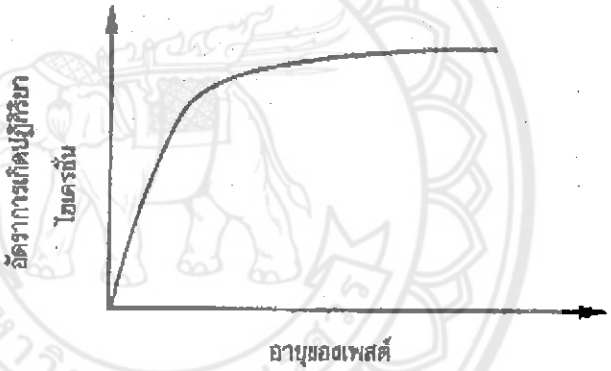
รูปที่ ผ8 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วยะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ได้แก่

1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นดังแสดงในรูปที่ ผ9



รูปที่ ผ9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2) องค์ประกอบของซีเมนต์เพสต์ จากตารางที่ ผ6 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดในอัตราเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช้วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมต์ ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยเฉลี่ยและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

ประเภทของปูนซีเมนต์

- **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์**

ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ธรรมดา (Originary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคเขียว เป็นต้น

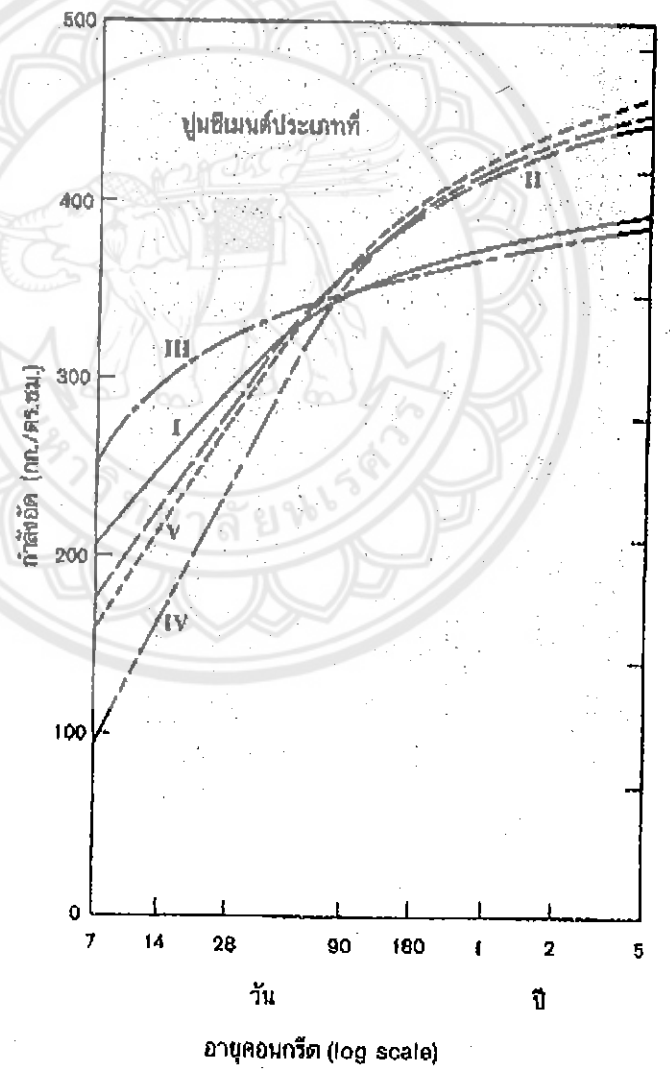
ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวังคือไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันปูนประเภทนี้จะถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverlized Fuel Ash (PFA) และ Ground Granular Blast Furnace Slack (GGBS)

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี C_3A ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดช้า และให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่หนึ่ง ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราช้างฟ้าและตราปลาฉลาม

เกณฑ์การกำหนด คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์แสดงไว้ในตารางที่ ผ8 และ และรูปที่ ผ12



รูปที่ ผ10 การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ

	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ำสุดร้อยละ		21.0			
2. อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) สูงสุดร้อยละ		6.0			
3. เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงสุดร้อยละ		6.0		6.5	
4. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สูงสุดร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5. ซัลฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สูงสุดร้อยละ					
5.1 เมื่อมี $3CaO.Al_2O_3$ ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
5.2 เมื่อมี $3CaO.Al_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5		
6. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
7. ภาคที่ไม่ละลายในกรดต่าง (Insoluble Residue) สูงสุด ร้อยละ	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
8. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) สูงสุด ร้อยละ				35.0	
9. ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) ต่ำสุด ร้อยละ				40.0	
10. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) สูงสุด ร้อยละ		8.0	15.0	7.0	5.0
11. ผลบวกของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนต		58.0			
12. เทตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์บวกสองเท่าไตรแคลเซียมอลูมิเนต [$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 2(3CaO.Al_2O_3)$] หรือสารละลายแข็ง [$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 2CaO.Fe_2O_3$] แล้วแต่กรณีสูงสุด ร้อยละ					20.0

ตารางที่ ผ7 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานมอก.15-2514
(แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517)

1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (ให้เลือกวิธีทดสอบได้)					
1.1 ทดสอบด้วยเทอร์บิดิมิเตอร์ (Turbidimeter Test Wagner)					
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1 600	1 600		1 600	1 600
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	1 500	1 500		1 500	1 500
1.2 ทดสอบด้วยแอร์เพอมีอะบิลิตี้ (Air Permeability Test, Blaine) ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2 800	2 800		2 800	2 800
ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2 600	2 600		2 600	2 600
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟ์ (Autoclave Expansion) ร้อยละสูงสุด	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) (ให้เลือกทดสอบได้)					
3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์ (Gillmore Test) การก่อตัวระยะต้น (Initial Set) ไม่น้อยกว่า-นาที	60	60	60	60	60
การก่อตัวระยะปลาย (Final Set) ไม่มากกว่า-ชั่วโมง	10	10	10	10	10
3.2 ทดสอบแบบไวแคท (Vicat Test) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เล่ม 9) การเริ่มก่อตัวไม่น้อยกว่า-นาที	45	45	45	45	45
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) เมื่อเตรียมและทดสอบตามวิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 13 โดยปริมาณกว่าร้อยละ	12	12	12	12	12

	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
5. แรงอัด (Compressive Strength) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์ มอร์ตา (Mortar Cube) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด (Graded Standard Sand) 2.75 ส่วน โดยน้ำหนักผสมและทดสอบตามวิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 12 ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้					
1 วันในอากาศชื้น กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร			120		
1 วันในอากาศชื้น, 6 วันในน้ำ — กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร	150	130		65	105
1 วันในอากาศชื้น, 27 วันในน้ำ — กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร	245	245		140	210
6. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Heat of Hydration)					
7 วัน สูงสุด แคลอรี่ต่อกรัม		70		60	
28 วัน สูงสุด แคลอรี่ต่อกรัม		80		70	
7. การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุด ร้อยละ	50	50	50	50	50
8. การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต (Sulphate Expansion) 14 วัน สูงสุด ร้อยละ					0.045

ตารางที่ ผ8 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานมอก.15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517)

- **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พิเศษ**

นอกจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้ง 5 ชนิดที่กล่าวมาแล้วยังมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อีกบางประเภทที่นิยมใช้กันในประเทศไทย

- ปูนซีเมนต์ขาว (White Portland) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี C_4AF อยู่ต่ำมาก จึงมีสีขาว โดยทั่วไปความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A และ C_3S สูงกว่า เหมาะสำหรับงานตบแต่งต่าง ๆ ปูนซีเมนต์ขาวที่มีใช้อยู่ในประเทศไทยได้แก่ ตราช้างเผือก ตราเสือเผือก ตรามังกร ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 3.05 - 3.10 ซึ่งต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปที่มีค่า 3.15 เล็กน้อย

- ปูนซีเมนต์สำหรับบ่อน้ำมัน (Oil Well Cement) โดยทั่วไปจะเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง ผสมกับสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปูนประเภทนี้จะใช้สำหรับงานเจาะบ่อน้ำมัน โดยจะผสมปูนซีเมนต์ประเภทนี้แล้วปั๊มลงไปใต้ดิน บางทีต้องปั๊มลงไปถึงความลึก 6,000 เมตร หรือมากกว่า และอุณหภูมิสูงถึง 170 องศาเซลเซียส ซีเมนต์เพสต์นี้ยังต้องเหลวพอที่จะทำงานได้จนถึงประมาณ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะแข็งตัวโดยเร็ว

- ปูนซีเมนต์ซิลิก้า หรือปูนซีเมนต์ผสม (Silica Cement) ผลิตโดยการบดปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับทรายหรือหินปูน ประมาณ 25 – 30 % คุณสมบัติทั่วไปของปูนประเภทนี้คือ จะแข็งตัวช้า ไม่ยืดหรือหดตัวมาก ช่วยลดการแตกร้าวที่ผิว เหมาะสำหรับผสมปูนก่อปูนฉาบ นอกจากนี้ปูนประเภทนี้จะให้กำลังอัดไม่สูงนัก ตัวอย่างปูนซีเมนต์ประเภทนี้ เช่น ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตราจรเข้ และตรานกอินทรีย์คุณสมบัติของปูนประเภทนี้ แสดงไว้ในตารางที่ ผ9

- **ปูนซีเมนต์อื่น ๆ**

High Alumina Cement (HAC) หรือ Calcium Aluminate Cement ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศ เพื่อทนทานต่อซัลเฟต แต่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการกำลังอัดอันรวดเร็ว HAC ได้จากการเผารวมกันของหินปูน และ Bauxite ซึ่งก็คืออลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 1,600 องศา จากนั้นนำมาบด สารประกอบของ HAC นี้จะแตกต่างอย่างมากจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป รวมทั้งสีของ HAC บางทีก็เรียกว่า "Ciment Fondu" ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ทั่ว ไ ไปมาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เฉพาะในกรณีที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ในงานที่ต้องการใช้คอนกรีตทนซัลเฟตได้ดีมาก ๆ งานซ่อมคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูงในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะได้กำลังอัดสูงถึง 240 ksc ในเวลาเพียง 6 – 8 ชั่วโมง รวมไปถึงการทำอิฐทนไฟ แต่อย่างไรก็ตาม HAC มีข้อเสียคือ ในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น หรือเมื่อใช้คอนกรีตนี้เป็นเวลานานจะเกิดการสลายตัว "Conversion" โดยความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะ

เพิ่มขึ้น และความสามารถในการผ่านได้ของน้ำ (Permeability) ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลที่ตามมาคือ กำลังอัดจะลดลงถึง 80 % ในการใช้งานไม่ควรที่จะนำ HAC ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่ว ๆ ไป เพราะจะก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (Flash Set)

Magnesium Phosphate Cement หรือที่รู้จักทางการค้า คือ Set 45 ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ถูกคิดค้นขึ้นในประเทศอเมริกา มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ จะแข็งตัวและให้กำลังอัดสูงมากภายในเวลาเพียง 45 นาที เหมาะสำหรับใช้ในงานซ่อมต่าง ๆ โดยเฉพาะจะใช้ซ่อมแซมพื้นสนามบินในเวลาเกิดสงคราม

มหาวิทยาลัยนเรศวร

คุณสมบัติ	บัญญัติกำหนด	วิธีทดสอบ
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ทดสอบด้วยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีแบบของเบลน (Air Permeability Test, Blaine) ต่ำสุด ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	2 800	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 6 ข้อกำหนดการหาความละเอียดโดยแอร์เพร์มีอะบิลิตี (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 204)
2. ความอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟ์ (Autoclave Expansion) สูงสุด ร้อยละ	0.8	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 11 ข้อกำหนดการหาการขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟ์ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 151)
3. ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test) ไม่น้อยกว่า-นาที	45 นาที	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 9 ข้อกำหนดการก่อตัวโดยใช้เข็มแบบไวแคต (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 191)
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) โดยปริมาณสูงสุด ร้อยละ	12	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 13 ข้อกำหนดการหาปริมาณอากาศในมอร์ต้า (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 185)
5. แรงอัด (Compressive Strenght) แรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้า (Mortar Cube) ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้		ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 12 ข้อกำหนดการหาแรงอัด (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 109)
หนึ่งวันในอากาศชื้น — เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)	6.4 (65)	
สองวันในน้ำ		
หนึ่งวันในอากาศชื้น — เมกะปาสกาล (ประมาณกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร)	11.3 (115)	
หกวันในน้ำ		
6. การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) ต่ำสุด ร้อยละ	50	ให้ใช้วิธีในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 16 ข้อกำหนดก่อตัวผิดปกติ (ซึ่งเทียบกับ ASTM : C 451)

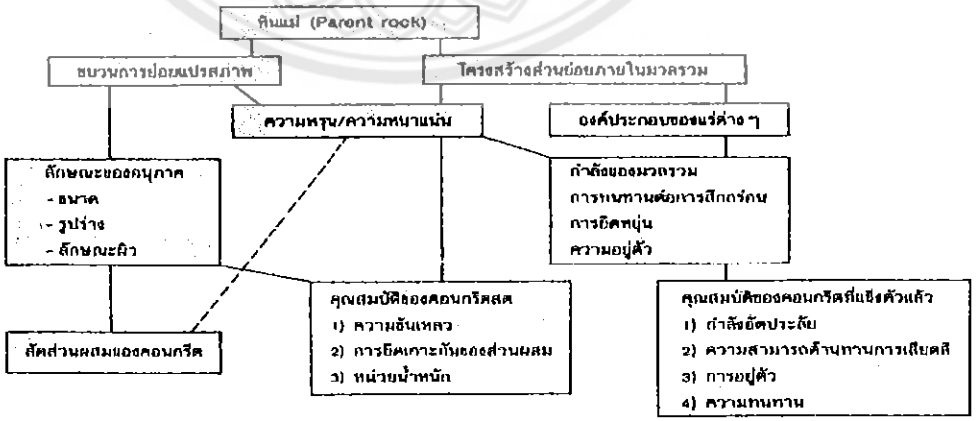
ตารางที่ ผ9 คุณสมบัติที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม

มวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่น่าเป็นที่สงสัยเลยว่า ทำไมคุณภาพของมวลรวมจึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตและจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องให้ความสนใจเรื่องนี้เป็นอย่างมาก

ในอดีตมวลรวมถูกคิดว่าเป็นเพียงวัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสานกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์เท่านั้น ในปัจจุบันนี้พบว่า มวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญอีก ประการแรกเนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวมจะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังคงช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้ คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์

คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับขบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวมดังแสดงในรูปที่ ผ. 11



รูปที่ ผ11 แผนภาพแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในเนื้อมวลรวมและขบวนการย่อยแปรสภาพจะเป็นตัวพิจารณาคุณสมบัติของมวลรวม ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ประเภทของมวลรวม

เราสามารถแบ่งมวลรวมตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1) มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ
2) มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น(Artificial Aggregate) เช่น มวลรวมเบาบางประเภทที่ได้จากการเผาดิน เป็นต้น

ถ้าแบ่งมวลรวมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักจะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

1) มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300 – 1,100 กิโลกรัม/ลบ.เมตร
2) มวลรวมปกติ (Normal Weight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400 – 3000 กิโลกรัม/ลบ.เมตร
3) มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กิโลกรัม/ลบ.เมตร

หรือถ้าแบ่งมวลรวมตามขนาด เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หิน หรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4
2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมากในส่วนผสมคอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น

Silt จะมีขนาดประมาณ 0.07 มม.

Clay จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 – 0.06 มม.

กรรมวิธีการผลิต

● กรรมวิธีการผลิตหิน

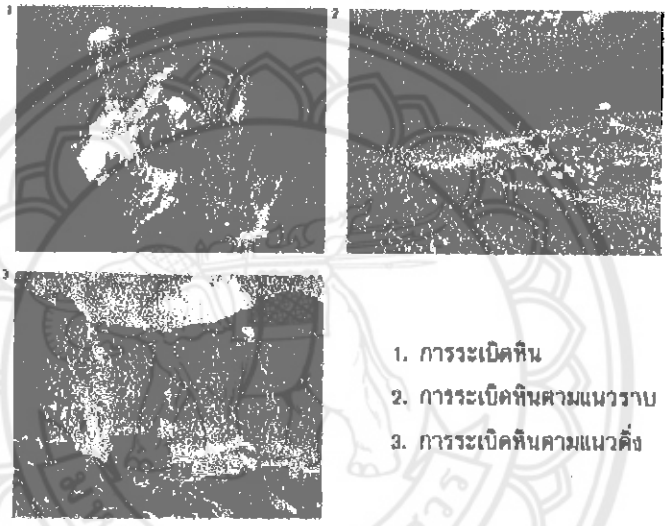
ประเทศไทยนิยมใช้หินปูนในงานก่อสร้างเป็นส่วนใหญ่ทั้งนี้เนื่องจากมีภูเขาหินปูนกระจายอยู่ทั่วประเทศ การจะนำหินที่อยู่ตามธรรมชาติมาใช้นั้น จะต้องผ่านการแปรรูปให้มีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจหาแหล่งหินที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานจากนั้นจึงขอสัมปทานของพื้นที่นั้น

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้รับสัมปทานพื้นที่นั้นแล้ว จึงทำการเปิดหน้าเหมืองโดยการระเบิด ซึ่งสามารถทำการระเบิดได้ 2 วิธี คือ

วิธีแรก ทำการระเบิดหินตามแนวดิ่ง ลาดขึ้นไปตามความชันของหน้าผา วิธีนี้โรงโม่ส่วนใหญ่นิยมใช้ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย แต่มีผลเสียคือ เป็นวิธีที่ค่อนข้างอันตราย

วิธีที่สอง ทำการระเบิดหินตามแนวราบ ลักษณะคล้ายขั้นบันได โดยเริ่มกระบวนการระเบิดหิน ไล่ลงมาจากแนวยอดเขา วิธีนี้ใช้เงินลงทุนสูง แต่ให้ผลดีคือ มีความปลอดภัยสูงกว่าแบบแรกมาก

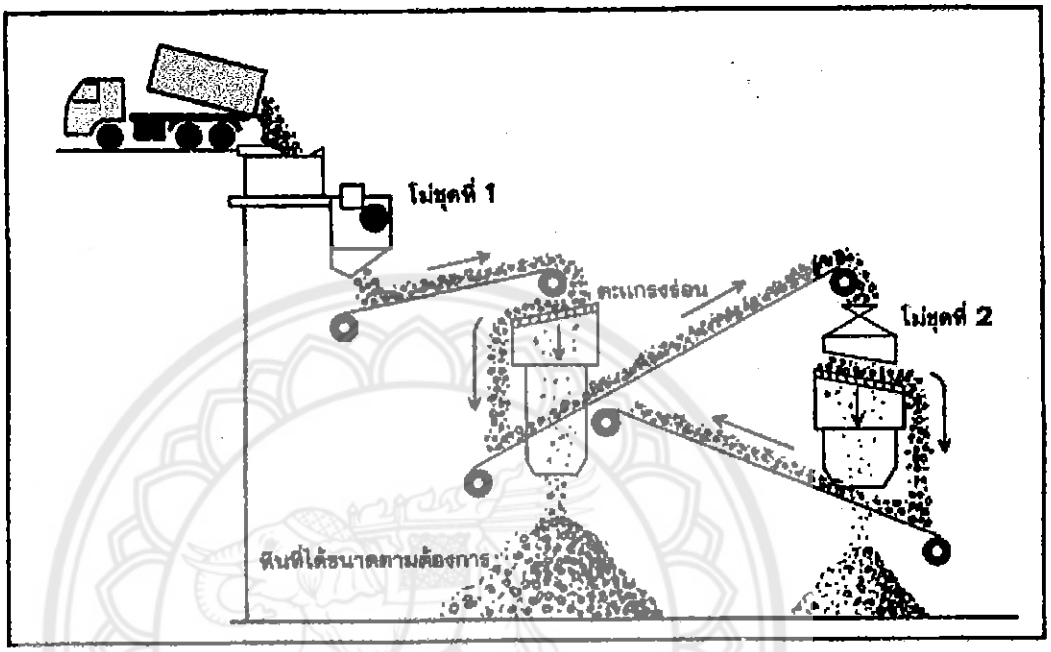


รูปที่ ผ12 การระเบิดหิน

ทั้งนี้หินที่ได้จากการระเบิด จะมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะนำมาใช้งาน จึงต้องนำมาโม่ให้มีขนาดเหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการโม่หิน ลำเลียงหินที่ได้จากการระเบิดลงสู่ปากโม่ บริเวณปากโม่จะมีตะแกรงคัดแยกหินที่มีขนาดเล็กกว่า 8 นิ้วออก ส่วนหินที่มีขนาดใหญ่ จะผ่านเข้าสู่เครื่องโม่ตัวที่ 1 ซึ่งจะทำการย่อยหินให้มีขนาดเล็กลงจนได้ขนาดประมาณ 8 นิ้ว – No. 4 จากนั้นสายสะพานจะลำเลียงหินผ่านตะแกรงชุดที่ 2 เพื่อแยกหินที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่ต้องการออกไป ส่วนหินที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการก็จะลำเลียงเข้าสู่เครื่องโม่ชุดที่ 2 ซึ่งจะทำหน้าที่โม่หินจนมีขนาดที่ต้องการเกือบทั้งหมด หลังจากขั้นตอนนี้ หินจะผ่านเข้าไปยังตะแกรงร่อน เพื่อร่อนแยกคัดขนาดหินที่ต้องการไว้ ทั้งนี้อาจมีหินบางส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ สายพานจะนำหินวกกลับเข้าสู่เครื่องโม่ชุดที่ 2

อีกครั้ง ต่อเมื่อผ่านการโม่จนครบขั้นตอนจนได้หินที่มีขนาดตามต้องการสายพานจะลำเลียงหินไปกองเก็บเพื่อรอการนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ ผ13 แผนภาพแสดงขั้นตอนการโม่หิน

● กรรมวิธีการผลิตทราย

ทรายที่ใช้ผลิตคอนกรีต สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด คือ

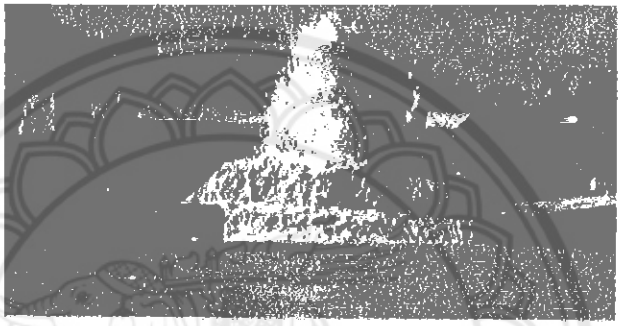
- ทรายแม่น้ำ
- ทรายบก

<u>ทรายแม่น้ำ</u>

เป็นทรายที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อยๆ ตกตะกอน สะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก จะตกตะกอนอยู่บริเวณต้นน้ำ ส่วนทรายละเอียดนั้นก็จะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำ

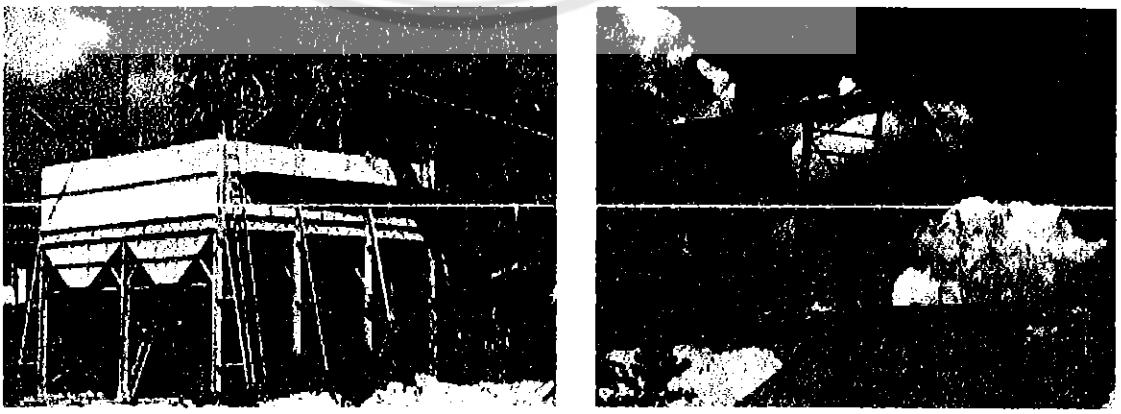
การนำทรายขึ้นจากท้องน้ำ จะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมาตามท่อ แล้วทิ้งทรายลงบนตะแกรงของเรืออีกลำ ตะแกรงจะทำหน้าที่ร่อนแยกกรวดที่มีขนาดใหญ่ออกก่อนที่จะดูดทรายขึ้นบนเรืออีกลำ

เมื่อทรายเต็มเรือ ก็จะใช้เรืออีกลำลากเรือบรรทุกทรายไปยังท่าทราย ทรายที่ได้จะยังไม่สะอาดนักเนื่องจากมีสารอินทรีย์ เศษตะกอนของดินโคลนปะปนอยู่ โดยทั่วไปจะต้องมีการล้างทรายอีกครั้ง คือเมื่อเรือบรรทุกทรายมาถึงท่า ทรายจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณใกล้ท่า โดยการเปิดท้องเรือให้ทรายไหลลงแม่น้ำแต่ถ้าเรือที่ลำเลียงทรายเปิดท้องเรือไม่ได้ ก็จะใช้สายพานลำเลียงทรายทิ้งลงในแม่น้ำ จากนั้นจะใช้เรือดูด ดูดทรายขึ้นมา ทำวิธีการเดียวกันกับการดูดทรายขึ้นจากท้องน้ำครั้งแรก แตกต่างกันที่ตะแกรงที่จะใช้สามารถแยกได้ทั้งทรายหยาบและทรายละเอียด ทรายที่ได้จัดเป็นทรายที่สะอาด เพราะผ่านการชะล้างถึง 2 ครั้ง



รูปที่ ผ14 เรือดูดทรายขึ้นล้างบนตะแกรง

ขั้นต่อไปคือการลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock โดยใช้สายพานลำเลียงจากเรือไปเก็บไว้ในยุ้งจนเต็มเมื่อยุ้งเต็มก็จะลำเลียงทรายไปเก็บยัง Stock ต่อไป ทรายที่เก็บไว้ในยุ้งสามารถลำเลียงลงรถบรรทุกได้โดยสะดวก เพียงเปิดปากยุ้งให้ทรายไหลลงในรถบรรทุกเอง ส่วนทรายที่กอง Stock อยู่หากจะนำไปใช้จะใช้รถตัก ขนทรายใส่รถบรรทุกอีกครั้ง

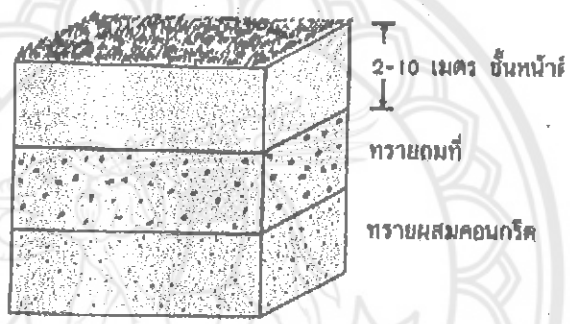


รูปที่ ผ15 ลักษณะของกองเก็บทราย

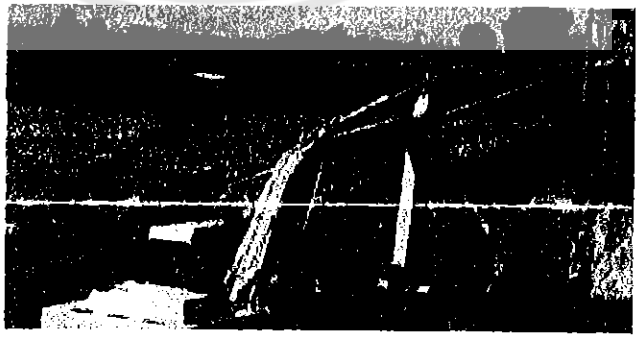
<u>ทรายบก</u>

เป็นทรายที่เกิดจากการตกตะกอน ทับถมกันของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดิน โดยมีซากพืช ซากสัตว์ ทับถมที่ผิวหน้าซึ่งเราเรียกกันว่า หน้าดิน ที่มีความหนาประมาณ 2 – 10 เมตร

การนำทรายมาใช้ เริ่มจากการเปิดหน้าดินก่อนด้วยรถตักดิน จากนั้นจะขุดดินลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน จนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่ แล้วนำเรือดูด ดูดทราย ผ่านมาตามท่อ โดยปลายท่อจะมีตะแกรงแยกกรวดออก ขณะเดียวกันก็สามารถติดตั้งตะแกรงเพื่อแยกทรายหยาบและทรายละเอียดได้ ทรายที่ผ่านการร่อนแยกจะถูกทิ้งลงน้ำบริเวณริมฝั่ง จากนั้นก็ใช้รถตัก ตักทรายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ ผ.16 ภาพตัดชั้นหน้าดิน



รูปที่ ผ.17 เรือดูด ดูดทรายในแอ่งน้ำ

รูปที่ ผ.18 ตะแกรงแยกกรวด

คุณสมบัติทั่วไป

มวลรวมที่ดีเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถเทได้ง่าย แข็งแรงทนทาน และราคาประหยัด นอกจากนี้มวลรวมควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1. ความแข็งแกร่ง (Strength)

มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่าไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งปกติมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าคอนกรีตมาก คือ จะรับแรงกดได้ 700 – 3,500 กก./ตร.ซม. ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวมที่ใช้

2. ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance)

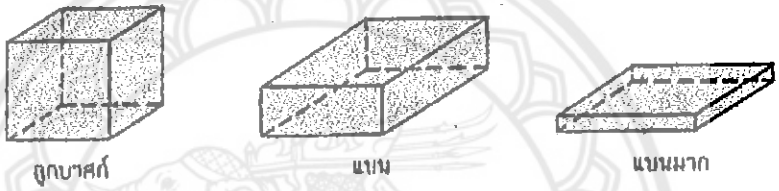
ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสีของมวลรวมมักจะถูกใช้เป็นตัวชี้บอกถึงคุณภาพของมวลรวม คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีตที่จะต้องถูกกระทำจากการกระแทก หรือขัดสี เช่น งานถนน, พื้นโรงงาน, พื้นสนามบิน เป็นต้น ดังนี้ มวลรวมที่ใช้ได้ดี ควรมีความแข็งแรง เนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่ม หรือเป็นรูพรุนหรือแตกละเอียดได้ง่าย

3. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability) มวลรวมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ในบางพื้นที่มวลรวมบางประเภททำปฏิกิริยากับด่าง (Alkalis) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นและขยายตัวก่อให้เกิดรอยร้าวโดยทั่วไปในคอนกรีต ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Alkalis-Aggregate Reaction (AAR)

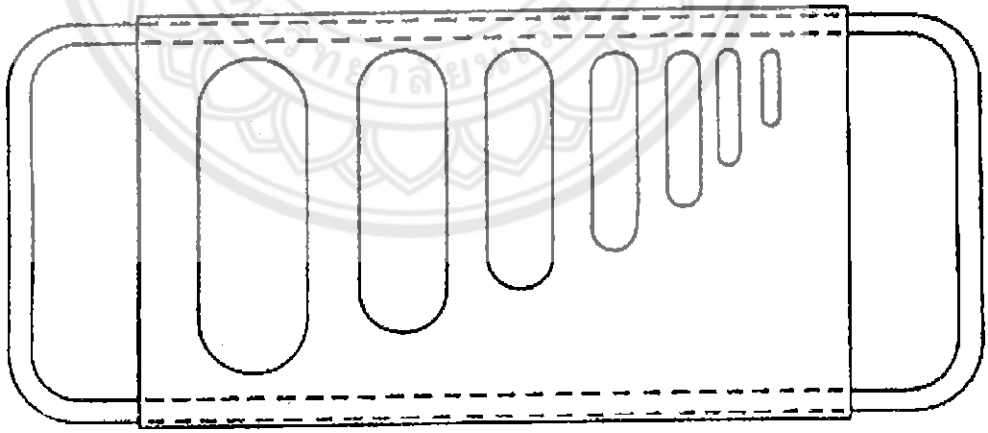
4. รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface Textile)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด มากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบ หรือมีรูปร่างแบนและยาว จะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเทได้ (Workability) เดียวกันตามมาตรฐานอังกฤษ มีการกำหนดหารทดสอบรูปร่างของมวลรวมไว้ 2 ประการ คือ

(1) การทดสอบความแบน (Flakiness) ซึ่งคือ อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของมวลรวม ในรูปที่ ผ19 แสดงรูปร่างของหินที่มีระดับความหนาแตกต่างกัน และในรูปที่ ผ20 แสดงเครื่องทดสอบความแบนของมวล



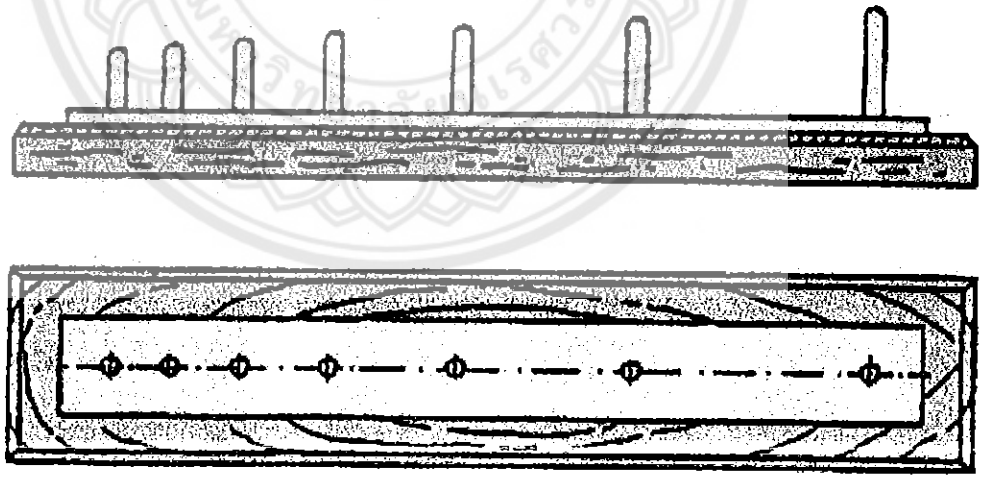
รูปที่ ผ.19 รูปร่างของหินที่มีระดับความแบนที่แตกต่างกัน



รูปที่ ผ20 เครื่องมือทดสอบความแบนของหิน (Thickness gauge)

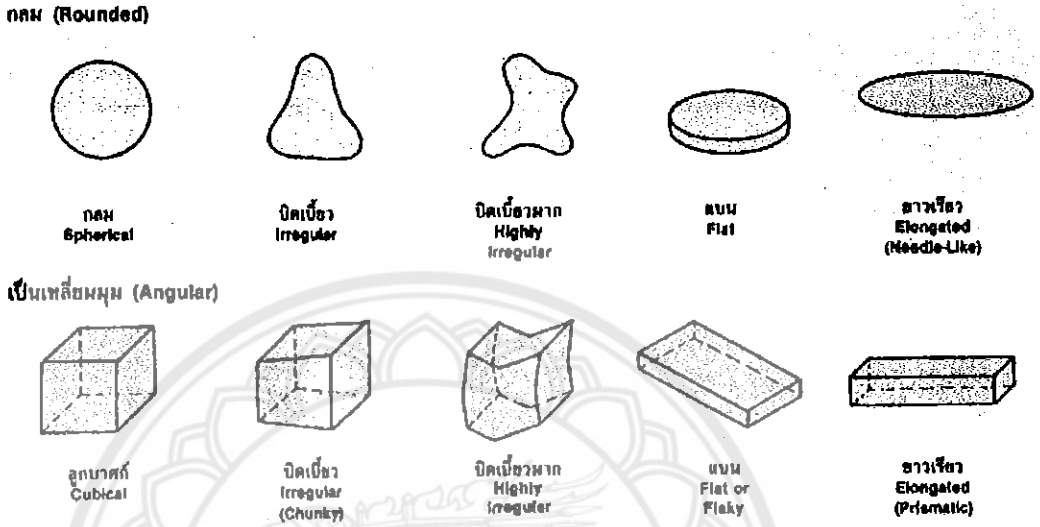
(2) การทดสอบความยาวเรียว (Elongated) ซึ่งคือ อัตราส่วนยของความยาวต่อความกว้างของมวลรวม ในรูปที่ ผ21 แสดงรูปร่างของหินที่มีระดับความยาวเรียวแตกต่างกัน และในรูปที่ ผ22 แสดงเครื่องทดสอบความยาวเรียว

รูปที่ ผ21 รูปร่างของหินที่มีระดับความยาวเรียวแตกต่างกัน



รูปที่ ผ22 เครื่องมือทดสอบความยาวเรียวของหิน

ส่วนลักษณะผิวของมวลรวมจะมีผลโดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยว เมื่อมีผิวหยาบด้านหรือมีรูพรุนมาก จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวดีแต่ต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากขึ้น



รูปที่ ผ23 การแบ่งชนิดของมวลรวมตามรูปร่างของอนุภาค

มาตรฐาน มอก.566 ได้ให้คำนิยามของรูปร่างและลักษณะของมวลรวมไว้ ดังตารางที่ ผ10 และ ผ11

การแบ่งประเภท	ลักษณะ	ตัวอย่าง
กลม	เกลี้ยงไม่มีเหลี่ยมเนื่องจากถูกน้ำกัดเซาะหรือจากการเสียดสีกันเอง	กรวดทรายจากแม่น้ำหรือชายทะเล
ไม่ค่อยมีเหลี่ยมหรือมีส่วนกลมอยู่บ้าง	ไม่สม่ำเสมอโดยธรรมชาติหรือถูกเสียดสีมากบ้าง และมีเหลี่ยมเล็ก	กรวดทรายที่ได้จากบ่อหิน เหล็กไหลที่ได้จากตีนสินไฮ หินรูปลูกบาศก์
เหลี่ยม	มีเหลี่ยมเกิดจากด้านที่โผล่มาบรรจบกันชัดเจนได้ชัด	หินที่ย่อยจากเครื่องโม่ทุกชนิด หินที่ผ่านการไสเรา
แบน	วัสดุที่มีความหนาไม่มากเมื่อเทียบกับความกว้างหรือความยาว ปกติจะเป็นเหลี่ยมด้วย	หินที่มีลักษณะเป็นชั้น

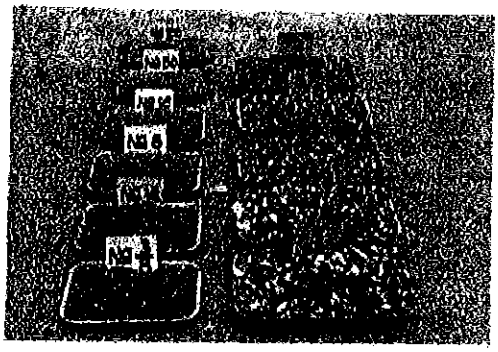
ตารางที่ ผ10 การแบ่งประเภทของมวลรวมและลักษณะตาม มอก. 566

เนื้อผิว	ตัวอย่าง
ใสคล้ายแก้ว	หินหลึกไฟต่ำ
เรียบ	หินเชิร์ต หินชนวน หินย่อน และหินผิวไอโลต์บางชนิด
เป็นเม็ด	หินทราย หินอูไลต์
เป็นผลึก	อย่างละเอียด:
	ยะซอลต์ แทรกไลต์ แกรโนไฟร์
	อย่างกลาง:
	โดเลอไรต์ แกรโนไฟร์ แกรบูโลต์ ไมโครแกรนิต หินปูนบางชนิด และหินโดโลไมต์ส่วนใหญ่
	อย่างหยาบ:
	แกบโบร ไนส์ แกรนิต แกรโนไดโอไรต์ ไซอีไนต์
เป็นโพรงรวางเนื้อ	สกอเรีย พัมมิซ ทราส
หรือเป็นรูพรุน	

ตารางที่ ผ11 ลักษณะผิวของมวลรวมตาม มอก. 566

5. ส่วนคละ (Gradation)

ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ และปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต การทำคอนกรีตที่ดีนั้น แต่ละก้อนของมวลรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ตาม นอกจากนี้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมเมื่อนำมาผสมรวมกันแล้ว มวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าจะต้องบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างก้อนมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า ให้มากที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะใช้ยึดมวลรวมเข้าด้วยกัน รวมทั้งอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ดังนั้น การใช้มวลรวมที่ส่วนขนาดคละที่เหมาะสมจึงทำให้ลดปริมาณซีเมนต์เพสต์ลง ทำให้ประหยัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงได้



รูปที่ ผ24 ขนาดต่างๆ ของมวลรวม

คุณสมบัติที่ต้องใช้พิจารณาในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผู้ออกแบบต้องทราบถึงคุณสมบัติของมวลรวมดังนี้

1. ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ (Maximum Size of Aggregate)

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ พิจารณาจากการทำการหาส่วนคละของมวลรวม แล้วดูผลจากเปอร์เซ็นต์ที่ค้างว่าตะแกรงร่อนใหญ่ (หยาบ) ที่สุดอันใดมีเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ให้นับขนาดตะแกรงอันที่ใหญ่กว่านั้นขึ้นไปอีก 1 ชั้น เป็นขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมนั้น ดังแสดงในตัวอย่าง

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักค้าง (กรัม)	% ค้าง
1"	12	–
¾"	1,384	7
½"	8,031	41
⅜"	8,076	43
เบอร์ 4	573	3
เบอร์ 8	609	3
ถาดรอง	513	3
รวมน้ำหนัก	19,800	100

ตารางที่ ผ12 ตัวอย่างการทดลองหาขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้

พิจรณาจากผลการวิเคราะห์ จะเห็นว่า ตะแกรงร่อนใหญ่ที่สุดที่มีหินค้างบนตะแกรงร่อน (%ค้าง) เกิน 15% คือตะแกรงร่อน ½" ขนาดของตะแกรงร่อนที่ใหญ่กว่านี้ 1 ชั้น คือตะแกรงร่อน ¾" ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของหินคือ ¾"

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผลโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการ และขนาดคละของวัสดุผสม กล่าวคือมวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวโดยรวมน้อยกว่ามวลรวมที่ขนาดเล็กเมื่อน้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน ดังนั้นมวลรวมขนาดใหญ่จึงต้องการปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า เพื่อให้มีความสามารถในการเทได้เท่ากัน หรือถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่ากัน กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น ถ้าใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้น เพราะสามารถลดน้ำหรือลดอัตราส่วนซีเมนต์นั่นเอง

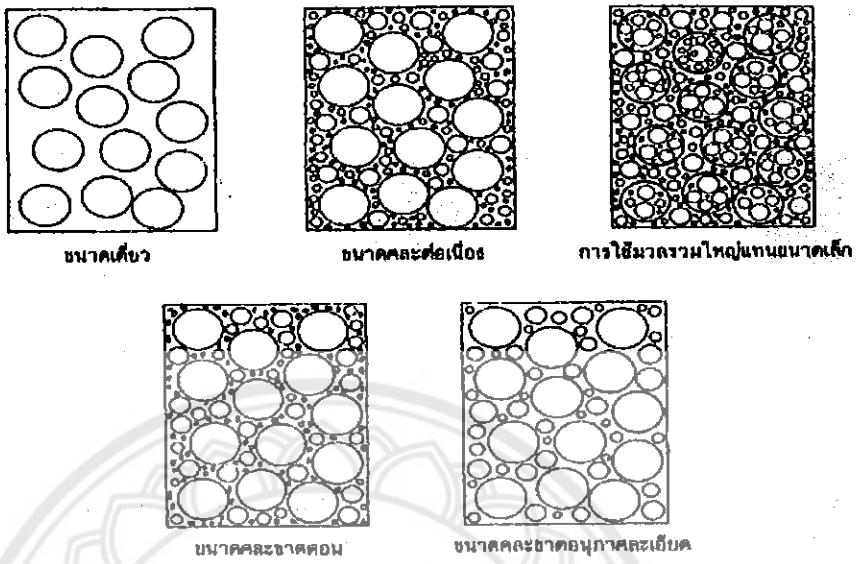
ผู้ออกแบบจำเป็นต้องตัดสินใจเลือกขนาดใหญ่สุดของมวลรวม โดยมีข้อพิจารณาเลือกดังนี้

- ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมต้องมีขนาดไม่เกิน 1/5 ของส่วนที่แคบที่สุดของแบบหล่อ หรือ
- ขนาดไม่เกิน ¾ ของระยะแคบสุด ระหว่างเหล็กเสริม หรือระหว่างเหล็กเสริมกับแบบหล่อ หรือ
- ขนาดไม่เกิน 1/5 ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อคอนกรีตปั๊ม

ข้อกำหนดที่กล่าวนี้จะหมายถึง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ ในงานก่อสร้างทั่วไปจะมีขนาดไม่เกิน 40 มม.

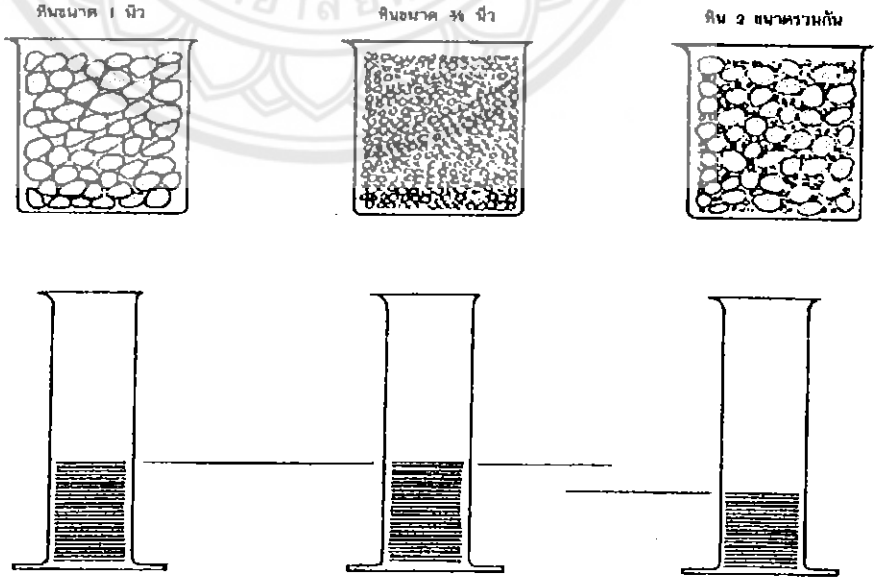
2. ขนาดคละ (Gradation)

ขนาดคละคือ การกระจายของขนาดต่างๆ ของอนุภาค นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณของเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการสำหรับคอนกรีตสด คอนกรีตจะมีราคาประหยัดเมื่อใช้เนื้อซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุดในการผลิตคอนกรีต โดยคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต เช่นความสามารถในการเทได้ การทำให้แน่น การปาดและการแต่งผิวหน้า กำลังอัดและความทนทานยังเป็นไปตามข้อกำหนด



รูปที่ ผ25 การเรียงตัวของมวลรวมขนาดคละต่างๆ กัน

รูปที่ ผ26 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่ต้องการเพิ่มเติมให้เต็มช่องว่างเมื่อใช้หิน 2 ขนาดคละกัน จะน้อยกว่าเมื่อใช้หินขนาดเดียว (Single Size) นั่นคือ ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลง ถ้าใช้หินและทรายหลายขนาดที่มีขนาดลดหลั่นมาผสมกันโดยมีสัดส่วนที่พอเหมาะแล้ว จะทำให้ช่องว่างเหลือน้อยที่สุด ซึ่งก็คือ คอนกรีตจะมีราคาต่ำลง



รูปที่ ผ26 มวลรวมที่มีขนาดคละดี จะใช้ปริมาณน้ำสำหรับการผสมน้อย

● การวิเคราะห์ขนาดคละ

วิธีการที่ใช้ประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยตะแกรง โดยการเก็บตัวอย่างปริมาณหนึ่งมาร่อนบนตะแกรงขนาดต่างๆ ซึ่งวางเรียงกันตามขนาดช่องว่างของตะแกรงจากขนาดใหญ่สุดข้างบนจนถึงเล็กสุด และถาดรองด้านล่าง แล้วทำการร่อน อาจใช้มือโยกเขย่าหรือใช้เครื่องร่อน การร่อนจะทำโดยใช้ตะแกรงเคลื่อนไหวทั้งทางราบและทางดิ่ง รวมทั้งการตบเขย่าเพื่อให้วัสดุตัวอย่างเคลื่อนไหวอยู่บนตะแกรงตลอดเวลา ผลการวิเคราะห์จะนำมาใส่ตารางซึ่งประกอบด้วย

ช่องที่ 1 น้ำหนักของวัสดุที่ค้างอยู่บนตะแกรง

ช่องที่ 2 ค่าร้อยละของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด

ช่องที่ 3 ค่าร้อยละสะสมของวัสดุผสมที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐาน

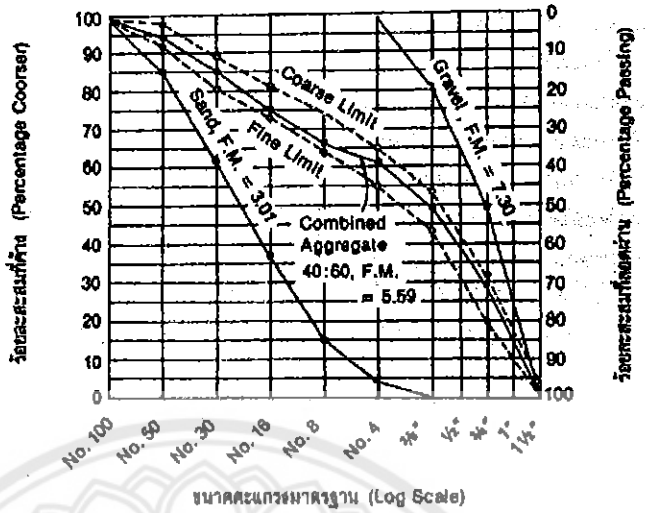
ช่องที่ 4 ค่าร้อยละสะสมของวัสดุผสมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ ผ13

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง
เบอร์ 4	32	2.0	2.0	98
8	90	5.9	7.9	92.1
16	211	13.7	21.6	78.4
30	530	34.5	56.1	43.9
50	530	34.5	90.6	9.4
100	140	9.1	99.7	0.3
ถาดรอง	5	0.3	100	
น้ำหนักรวม	1,538	100		

ตารางที่ ผ13 การวิเคราะห์ขนาดคละ

● แผนภูมิคละ

แผนภูมิคละ คือ การแสดงผลการวิเคราะห์วัสดุผสมบนกระดาษกราฟ โดยให้แกนตั้งแสดงน้ำหนักร้อยละสะสมของวัสดุผสมที่ค้าง หรือผ่านตะแกรงแต่ละขนาด แกนนอนแสดงขนาดช่องเปิดของตะแกรง กระดาษกราฟที่ใช้ควรเป็นแบบ Semi-Log Scale บนแกนนอน โดยทั่วไปแผนภูมิขนาดคละจะประกอบด้วย กราฟขีดจำกัดล่าง ขีดจำกัดบนตามข้อกำหนด และกราฟขนาดคละของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ ผ27



รูปที่ ผ27 แผนภาพส่วนคละของมวลรวม

● โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.)

โมดูลัสความละเอียดคือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยที่

โมดูลัสความละเอียด (F.M.) = (1/100)(ผลบวกของร้อยละสะสมของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน)

ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ คือขนาด เบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 ตัวอย่างการหาค่า F.M. ของทราย จากตารางที่ 3.3 หาได้ดังนี้

F.M. = (1/100)(2+7.9+21.6+50.1+90.6+99.7)

= 2.78

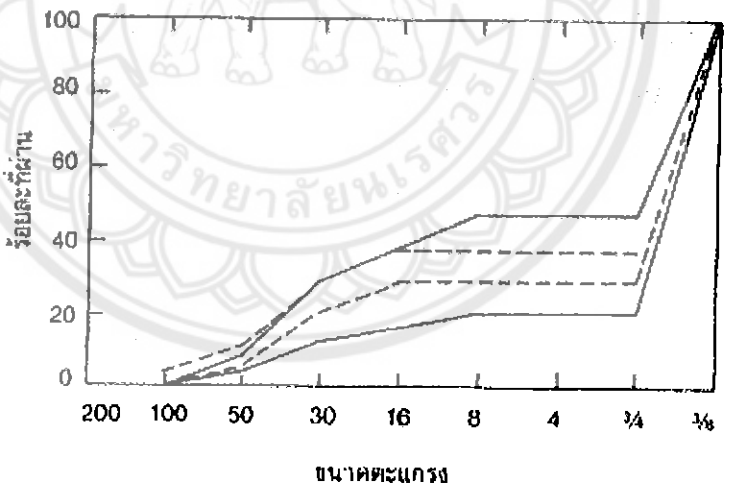
ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3-3.2 ทรายที่มีค่า F.M. สูง คือทรายจะมีความหยาบมาก เช่นทรายที่มีค่า F.M. = 3.2 จะมีความหยาบมากกว่าทรายที่มีค่า F.M. = 2.3 เป็นต้น ทรายที่มีความละเอียดมากจำเป็นต้องใช้น้ำมากเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้เท่าๆ กัน

● **ข้อจำกัดอื่นๆ เกี่ยวกับขนาดคละ**

ปริมาณอนุภาคละเอียดที่ผ่านตะแกรง เบอร์ 50 และ 100 มีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด การแต่งผิวหน้า และการเยิ้มของน้ำบนผิวคอนกรีตสด (Bleeding) นอกจากนี้อนุภาคเล็กๆ ยังช่วยให้คอนกรีตเกาะรวมตัวกันได้ดี มาตรฐาน ASTM กำหนดปริมาณอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 เป็น 10% แต่ปริมาณนี้ไม่เพียงพอสำหรับการปาดแต่งผิวหน้าด้วยเครื่องไม้ ปริมาณที่ควรจะมีคือ ผ่านเบอร์ 50 อย่างน้อย 15% และเบอร์ 100 อย่างน้อย 5% แต่ต้องมิให้มีอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 5% เพราะอนุภาคเล็กๆ นี้ประกอบด้วยดินเหนียวซึ่งมีผล 2 ประการใหญ่ คือ จะต้องใช้ปริมาณน้ำจำนวนมาก และเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีตจะไม่ดีด้วย

● **ขนาดคละขาดตอน (Gap Grading)**

ขนาดคละขาดตอน คือ มวลรวมที่ขาดอนุภาคขนาดกลางขนาดหนึ่งขนาดใดหรือหลายขนาด ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถเทได้ เมื่อนำมวลรวมนี้ไปผสมคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวสูงจะเกิดปัญหาการแยกตัว (Segregation) ได้ง่าย



รูปที่ ผ28 ลักษณะแผนภาพของมวลรวมที่มีขนาดคละขาดตอน

3. ปริมาณความชื้นและการดูดซึม (Moisture and Absorption)

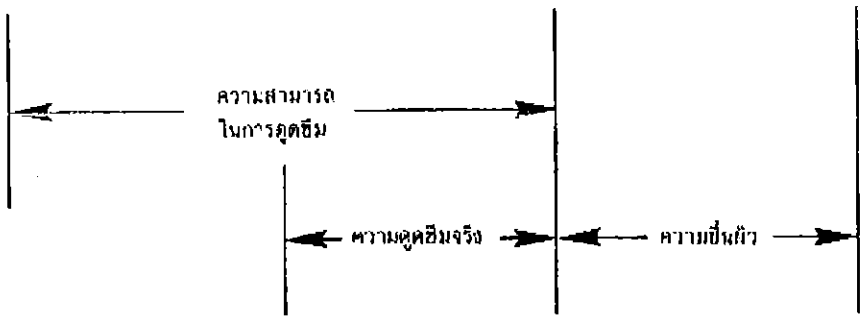
มวลรวมมีรูพรุนภายในบางส่วนที่ติดต่อกับผิวนอก ดังนั้นมวลรวมจึงสามารถดูดความชื้นนอกจากนี้น้ำบางส่วนยังสามารถเกาะบริเวณผิวของมวลรวม ดังนั้นมวลรวมที่เก็บอยู่ในสภาพธรรมชาติ จึงมีความชื้นต่างๆ กันไป สภาพความชื้นนี้มีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต คือ หากมวลรวมอยู่ในสภาพแห้งก็จะดูดน้ำผสมเข้าไป ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จริงลดลง หากเปียกชื้นก็ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จริงสูงกว่าที่ควรจะเป็น

●สภาพความชื้น

อาจแบ่งสภาพความชื้นได้เป็น 4 ลักษณะดังนี้

1. อบแห้ง (Oven-Dry, OD) ความชื้นถูกขับออกด้วยความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศา จนมีน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 12 ชั่วโมง)
2. แห้งในอากาศ (Air-Dry, AD) ผิวแห้ง แต่อาจมีน้ำในรูพรุน
3. อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface-Dry, SSD) รูพรุนเต็มไปด้วยน้ำ แต่ผิวแห้ง
4. เปียก (Wet, W) รูพรุนเต็มไปด้วยน้ำ และมีน้ำบนผิวด้วย

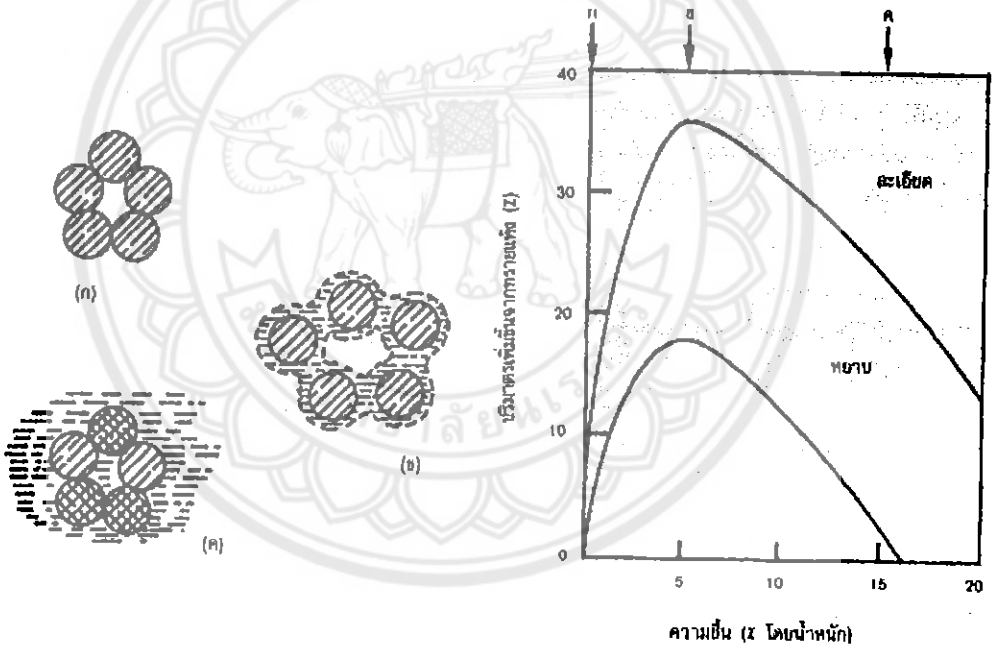
ในการคำนวณออกแบบส่วนผสมทุกครั้ง จะถือว่ามวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วจึงปรับปริมาณน้ำตามลักษณะของวัสดุที่เป็นจริง ความชื้นทั้งหมดที่อยู่ในก้อนวัสดุในลักษณะอิ่มตัวผิวแห้งจะเรียกว่า "ความจุในการดูดซึม" ผลต่างของความชื้นในลักษณะอิ่มตัวผิวแห้ง กับความชื้นในลักษณะแห้งด้วยอากาศเรียกว่า "การดูดซึม"



รูปที่ ผ29 สภาพความชื้นของมวลรวม

● ปริมาตรเพิ่มของทราย (Bulking of Sand)

ตามปกติมวลรวมหยาบในสภาพเก็บรักษาจะอยู่ในสภาพแห้งในอากาศโดยมีปริมาณความดูดซึมจริงน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมวลรวมละเอียดมักจะเปียกและมีความชื้นบนผิวระหว่าง 3 – 5 เปอร์เซ็นต์ เหตุที่มวลรวมละเอียดมีปริมาณเพิ่มมากก็เพราะปริมาณน้ำที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาค นอกจากนี้ความตึงของผิวน้ำยังทำให้ความหนาของน้ำที่เคลือบผิวสูงขึ้นและผลักดันให้อนุภาคของมวลรวมละเอียดห่างออกจากกัน ซึ่งเราเรียกว่า Bulking ซึ่งมีผลให้การหาส่วนผสมคอนกรีตด้วยการตวงปริมาตรมีโอกาสผิดพลาด เราจึงควรใช้วิธีชั่งน้ำหนักแทน และการหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมควรทำในสภาพอบแห้ง เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นบนผิวมวลละเอียดจนเปียกแรงตึงผิวจะหายไปดังนั้นจึงมีปริมาตรลดลงเหมือนสภาพอบแห้งดังรูปที่ ผ30



รูปที่ ผ30 ปริมาตรเพิ่มปรากฏของมวลรวมละเอียด
(ก) แห้ง (ข) ชื้นเล็กน้อย (ค) เปียก

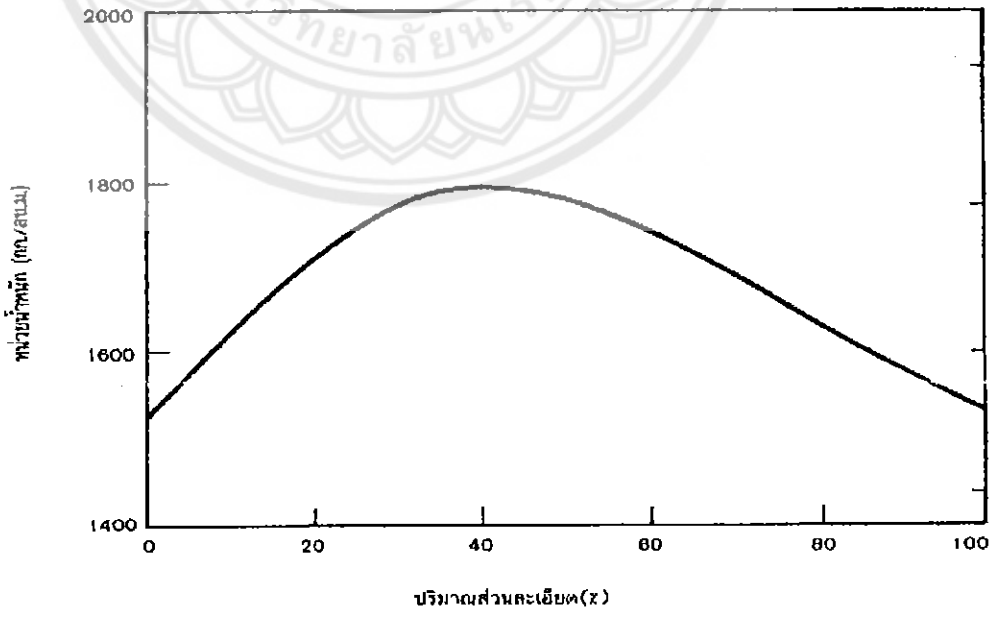
4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลรวมต่อความหนาแน่นของน้ำ ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสม และรูพรุนของก้อนวัสดุ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในประเทศไทยจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 และ 2.65 ตามลำดับ ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในการแปลงปริมาตรเป็นน้ำหนักหรือกลับกัน

5 หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง (Unit Weight and Void)

หน่วยน้ำหนัก คือ น้ำหนักของมวลรวมในขนาดคละที่ต้องการต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักจะบอกถึงปริมาตรและช่องว่างระหว่างมวลรวม ที่มวลรวมน้ำหนักหนึ่งๆ จะบรรจุลงได้ ดังนั้น หน่วยน้ำหนักย่อมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการบดอัดและสภาพความชื้น เราใช้หน่วยน้ำหนักในการคำนวณหาปริมาตรคเมื่อใช้วิธีตวงในการวัดส่วนผสมของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่ใช้อยู่ทั่วๆ ไปในประเทศไทยมีค่า 1,400-1,600 กก./ลบ.เมตร การนำเอามวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมาผสมกันด้วยอัตราส่วนต่างๆ จะมีผลต่อหน่วยน้ำหนักของมวลรวมดังแสดงในรูป 3.21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้มวลรวมละเอียด 34 – 40% โดยน้ำหนัก ดังนั้น ถ้าคำนึงถึงเฉพาะราคาของคอนกรีต (ใช้ซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุด) เราควรใช้เปอร์เซ็นต์ทรายในช่วงดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสดด้วย



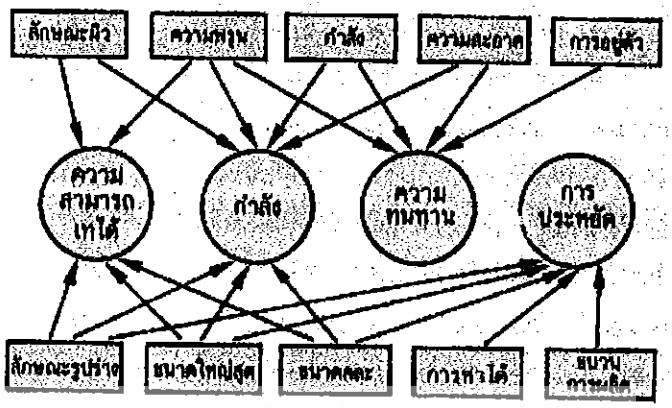
รูปที่ ผ31 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณมวลรวมละเอียด

คุณสมบัติของมวลรวมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

คุณสมบัติของมวลรวมจะส่งผลถึงคุณสมบัติของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ ผ14

คุณสมบัติของคอนกรีต	คุณสมบัติของมวลรวมที่เกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์
ความทนทาน	
การต้านทานต่อ Freezing และ Thawing	**Soundness, ความพรุน, โครงสร้างของรูพรุน ในเนื้อมวลรวม, การซึมผ่านของน้ำ, ปริมาณการอิ่มตัว, การรับแรงดึง ลักษณะและโครงสร้างของผิว, สิ่งเจือปน**
การต้านทาน Wetting และ Drying	โครงสร้างของรูพรุนในเนื้อมวลรวม, โมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
การต้านทานต่อ Heating และ Cooling	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
การต้านทานต่อการสึกกร่อน	ความแข็ง
การทำปฏิกิริยากับ Alkali ในคอนกรีต	ปริมาณของ Siliceous ที่เป็นส่วนประกอบ
กำลัง	กำลัง, ลักษณะผิว, ความสะอาด, รูปร่างขนาดใหญ่สุด
Shrinkage และ Creep	โมดูลัสยืดหยุ่น, รูปร่างของมวลรวม, ขนาดคละ, ความสะอาด, ขนาดใหญ่สุด และสิ่งเจือปน
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน, โมดูลัสยืดหยุ่น
การนำความร้อน	การนำความร้อน
ความร้อนจำเพาะ	ความร้อนจำเพาะ
หน่วยน้ำหนัก	ความถ่วงจำเพาะ, รูปร่าง, ส่วนคละ, ขนาดใหญ่ที่สุด
โมดูลัสยืดหยุ่น	**โมดูลัสยืดหยุ่น, Poisson's Ratio**
การลื่นของผิวหน้า	**แนวโน้มการยึดเป็นมันของผิวหิน**
การประหยัด	**รูปร่าง, ส่วนคละ, ขนาดใหญ่ที่สุด, จำนวนชั้นละในการผลิต, ความสม่ำเสมอในการหามวลรวม**

ตารางที่ **ผ14** คุณสมบัติของมวลรวมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

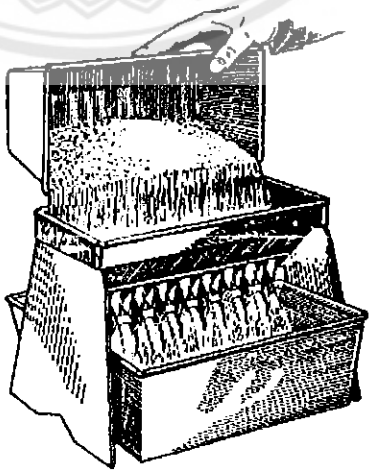


รูปที่ ผ32 อิทธิพลของคุณสมบัติของมวลรวมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

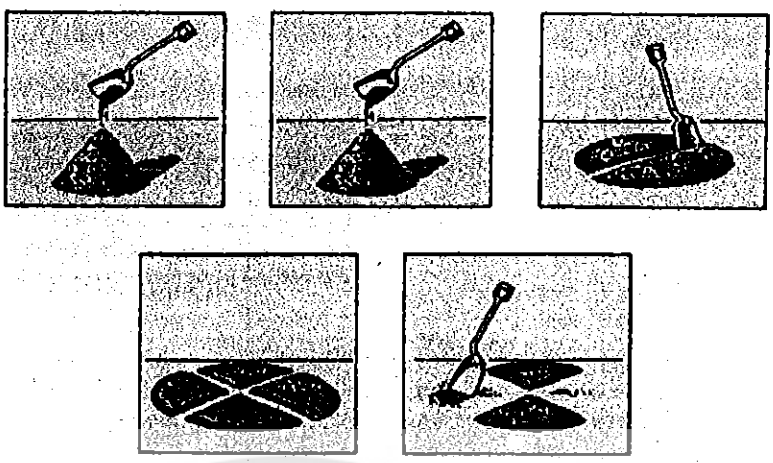
การทดสอบคุณสมบัติ

มวลรวมที่จะนำมาทดสอบนั้น ต้องได้รับการสุ่มเก็บจากต้นแหล่ง หรือ ณ สถานที่กองเก็บ และต้องนำมาทำการแบ่งส่วนก่อนการทดสอบเพื่อให้ได้ตัวแทนของตัวอย่างที่ถูกต้อง การแบ่งส่วนตัวอย่างอาจทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ใช้ Riffle Sampler โดยเทตัวอย่างมวลรวมผ่าน Sample Splitter ซึ่งจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนผ่านช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ ผ33
2. ใช้วิธีการแบ่งสี่ ทำโดยการผสมมวลรวม จากนั้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กันนำ 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกันมาทดสอบและทิ้ง 2 ส่วนที่เหลือไป ดังแสดงในรูปที่ ผ34



รูปที่ ผ33 การแบ่งส่วนตัวอย่างโดยใช้ Riffle Sample



รูปที่ ผ34 วิธีแบ่งสี่

การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

การทดสอบกลุ่มที่ 1 ทดสอบคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมวลรวมนี้มาผสมคอนกรีต เช่น กำลัง ลักษณะรูปร่างและผิว ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึม การต้านทานการเสียดสี หน่วยน้ำหนัก ซึ่งการทดสอบคุณสมบัตินี้จะทดสอบเฉพาะเมื่อเปลี่ยนแหล่งมวลรวมใหม่ หรือเมื่อสงสัยในคุณสมบัติเท่านั้น

การทดสอบกลุ่มที่ 2 ทดสอบหาคุณสมบัติทั่วๆ ไป เช่น ส่วนคละ ความชื้น ความสะอาด และสิ่งเจือปนต่างๆ ซึ่งจะต้องทำการทดสอบอย่างสม่ำเสมอ

ถ้าแบ่งการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม ตามวิธีการทดสอบ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังตารางที่ ผ15

การทดสอบทางฟิสิกส์ Physical Tests	การทดสอบทางกล Mechanical Tests	การทดสอบทางเคมี Chemical Tests
● ขนาดคละ ● รูปร่างและลักษณะผิว ● ความหนาแน่น ● ความถ่วงจำเพาะ ● การดูดซึมน้ำ ● การหดตัว	● การทดสอบกำลัง - Impact Value - Crushing Value - 10% Fine ● ความทนทาน - ความต้านทานการเสียดสี - Attrition	● ปริมาณ คลอไรด์ ● ปริมาณ ซัลเฟต ● ปริมาณสารอินทรีย์

ตารางที่ ผ15 ประเภทของการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ในตารางที่ ผ16 เป็นการรวบรวมการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม สำหรับงานคอนกรีต ตามมาตรฐานอังกฤษและอเมริกา

การทดสอบ	มาตรฐานอังกฤษ (BS)	มาตรฐานอเมริกา (ASTM)
คำจำกัดความ	**882**	**C 125**
ส่วนคละ - ข้อกำหนด	882	C 33
ส่วนคละ - การทดสอบ	812 ส่วนที่ 1	C 136
การสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบ	812 ส่วนที่ 1	D 75
การแบ่งประเภทมวลรวม	812 ส่วนที่ 1	C 294
รูปร่างของมวลรวม	812 ส่วนที่ 1	–
ลักษณะผิว	812 ส่วนที่ 1	–
ปริมาณดินเหนียว, ฝุ่น, Silt	812 ส่วนที่ 1	C 117
ความแบน, ความยาว, การเป็นเหลี่ยมมุม	812 ส่วนที่ 1	–
ความถ่วงจำเพาะ - หิน	812 ส่วนที่ 2	C 127
- ทราย	812 ส่วนที่ 2	C 128
ปริมาณความชื้น	812 ส่วนที่ 2	C 70
สารอินทรีย์	812 ส่วนที่ 1	C 40
กำลังของมวลรวม	812 ส่วนที่ 3	–
Soundness	–	C 88
Alkali-Aggregate-Reaction	–	C 289
หน่วยน้ำหนัก	–	C 29
การต้านทานการเสียดสี	–	C 131

ตารางที่ ผ16 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ข้อกำหนดคุณสมบัติทั่วๆ ไปของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต

1. ขนาดคละของมวลรวม (ASTM C33)

มวลรวมละเอียด		มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุด 1"		ขนาดใหญ่สุด ¾"
ขนาดตะแกรง	% ผ่าน	ขนาดตะแกรง	% ผ่าน	% ผ่าน
⅜"	100	1½"	100	-
เบอร์ 4	95-100	1"	95-100	100
8	80-100	¾"	-	90-100
16	50- 85	½"	25- 60	-
30	25- 60	⅜"	-	20- 55
50	10- 30	เบอร์ 4	0- 10	0- 10
100	2- 10	เบอร์ 8	0- 5	0- 5

ตารางที่ ผ17 ข้อกำหนดขนาดคละของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต

2. สิ่งเจือปนต่างๆ

สิ่งเจือปน	ผลต่อคอนกรีต	ข้อกำหนดสูงสุด (% โดยน้ำหนัก)	
		มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
● วัสดุที่ขนาดเล็กกว่า 75 μm หรือตะแกรงเบอร์ 200	กระทบต่อความสามารถเทได้ ต้องเพิ่มน้ำในส่วนผสม		
- มวลผสมคอนกรีตสำหรับงานทนการขัดสี		3	1
- มวลผสมคอนกรีตสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป		5	1
● ก้อนดินและวัสดุเปราะอื่น ๆ	กระทบต่อความสามารถเทได้ และการต้านทานการเสียดสี	3	5
● ถ่านและลิกไนท์	กระทบต่อความทนทานและก่อให้เกิดรอยเปื้อนบนผิว	0.5-1	0.5
● Chert (ที่ ถ.พ.น้อยกว่า 2.4)	กระทบต่อความทนทาน	-	5

ตารางที่ ผ18 ข้อกำหนดสิ่งเจือปน ของมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต

3. ความสามารถต้านทานการเสียดสี

ทดสอบโดยเครื่องลอสแองเจลีส แล้วส่วนที่แตกออกต้องไม่เกิน 50%

4. การอยู่ตัว (Soundness)

การทดสอบการอยู่ตัวของมวลรวม เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการสลายตัวของมวลรวม ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟตแต่ทั่วไปจะทดสอบในแมกนีเซียมซัลเฟต โดยแช่จำนวน 5 รอบ แล้วน้ำหนักจะต้องสูญไปไม่เกิน 18%

5. สารอินทรีย์ที่เจือปนในมวลรวมละเอียด

ทดสอบโดยการแช่ทรายไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3% แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นเปรียบเทียบสีของสารละลายที่ได้กับแผ่นกระจกสีมาตรฐาน ถ้าสีของสารละลายเข้มกว่าสีมาตรฐานเบอร์ 3 จะถือว่าทรายนั้นมีสารอินทรีย์เจือปนมาก ถ้าต้องใช้ผสมคอนกรีตจะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างอื่นประกอบอีกครั้ง

การเก็บรักษามวลรวม

ระหว่างการขนย้ายและกองเก็บมวลรวมไว้รอการใช้งานหรือขนย้ายต่อไป อาจเกิดผลเสีย คือ การแยกแยะของมวลรวมขนาดต่างๆ กัน และการแตกหักของมวลรวม

การแยกแยะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของมวลรวมในระนาบเอียง มวลรวมขนาดใหญ่ที่หนักกว่า มักไหลไปรวมกันใกล้เชิงระนาบเอียง ส่วนมวลรวมขนาดเล็กกว่าคงติดค้างอยู่ตอนบนของระนาบเอียง นอกจากนี้ควรระมัดระวังการเทมวลรวมเมื่อมีลมแรง เพราะลมสามารถพัดพามวลรวมขนาดเล็กไปได้ไกลกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ วิธีการป้องกันที่ดีก็โดยการแยกเก็บมวลรวมหยาบเป็นสัดส่วนตามช่วงขนาดที่ใกล้เคียงคือ ขนาด 5 ถึง 10, 10 ถึง 20, 20 ถึง 40 มม.ฯลฯ ออกเป็นกองๆ ซึ่งเราสามารถนำมารวมกันก่อนการใช้งาน ดังนี้หากมีการแยกแยะเกิดขึ้นก็เป็นเพียงในช่วงแคบๆ ตามกลุ่มกองของมวลรวมที่แยกเก็บเท่านั้น สำหรับการป้องกันการแตกหักก็ด้วยการเทมวลรวมขนาดเกิน 40 มม. ลงในที่เก็บผ่านขั้นบันได นั่นคือไม่ควรปล่อยจากที่สูงๆ เพราะมวลรวมมีโอกาสแตกหักได้ง่าย

น้ำ

ปริมาตรและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต ในบทนี้จะมาพิจารณาถึงเรื่องคุณภาพของน้ำ ซึ่งมีความสำคัญมากเพราะสิ่งเจือปนต่างๆ ในน้ำอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่นเวลาการแข็งตัวกำลังอัด ทำให้สีของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ และอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริม ด้วยเหตุนี้การเลือกน้ำที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับผสมบ่มคอนกรีตจึงจำเป็นต้องพิจารณาอย่างรอบครอบ

ความสำคัญของน้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตคอนกรีต โดยทำหน้าที่ 3 ประการคือ

1) ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดชั่นรวมทั้งทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้
2) ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้น
3) ใช้ล้างมวลรวมที่สกปรก

เราต้องการน้ำมีมีคุณภาพดี และปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีต กฎเกณฑ์ทั่วไปของน้ำที่จะใช้ผสมคอนกรีต คือน้ำที่ดื่มได้นับเป็นน้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตได้เสมอ ส่วนปริมาณน้ำผสม นอกจาจะมีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลงแล้วยังมีผลต่อกำลังและความทนทานของคอนกรีตที่แข็งแล้วด้วย

ปัญหาที่มักพบอยู่เสมอเกี่ยวกับปริมาณน้ำในงานคอนกรีตคือ

1) ในขณะเป็นคอนกรีตสด คอนกรีตต้องการน้ำจำนวนเพียงให้ลื่นไหลเข้าแบบได้ แต่ผู้ทำงานมักจะใส่น้ำปริมาณมากเพื่อให้คอนกรีตเหลวมาก สะดวกในการเทแต่กำลังอัดจะลดต่ำลง
2) ในขณะเป็นคอนกรีตแข็งตัวแล้ว คอนกรีตต้องการน้ำจำนวนมาก เพื่อบ่มให้กำลังอัดได้พัฒนาขึ้นตามเวลาแต่ผู้ทำงานก็มักจะเลยการบ่มคอนกรีต

โดยสรุปคือ คอนกรีตที่ใช้งานทั่วไปจะได้กำลังต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เพราะใช้น้ำไม่เหมาะสมนั้นเอง

สิ่งเจือปน

ถ้าในน้ำที่ผสมคอนกรีตมีสิ่งเจือปนอยู่มากเกินระดับหนึ่งอาจก่อปัญหาทางด้านคุณภาพ อันได้แก่

1) กำลังและความทนทานของคอนกรีตลดลง
2) เวลาการก่อตัวเปลี่ยนแปลงไป
3) คอนกรีตเกิดการหดตัวมากกว่าปกติ
4) อาจมีการละลายของสารประกอบภายในคอนกรีตออกมาแข็งตัวบนผิวนอก (Efflorescence)

สิ่งเจือปนที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตมี 3 ประเภทคือ ตะกอน, สารละลายอนินทรีย์ หากมีสิ่งเจือปนเหล่านี้ปริมาณน้อย ก็จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียร้ายแรง

ตะกอน

หากน้ำมีประมาณตะกอนเกินกว่า 2000 ส่วนต่อล้าน (ppm.) อาจจะทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำมากกว่าปกติ การหดตัวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น หรือทำให้เกิดขี้เกลือบริเวณผิวของคอนกรีต (Efflorescecence) ดังนั้นถ้าน้ำที่ใช้ขุ่นมาก ควรปล่อยให้ตกตะกอนเสียก่อน แต่ตะกอนของเห็ดราหรือสารอินทรีย์ต่างๆ มักไม่ยอมตกตะกอน และในระหว่างการผสมคอนกรีต สารอนินทรีย์เหล่านี้จะเริ่มละลายตัว ผลก็คือ ซีเมนต์จะก่อและแข็งตัวช้าลง นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดฟองอากาศปริมาณมากจนกำลังของคอนกรีตลดลงหรือในทางตรงกันข้าม บางครั้งอาจมีผลกระทบกระเทือนต่อการทำงานของสารกักกระจายฟองอากาศ

สารละลายอนินทรีย์

ตามปกติเราสามารถใช้น้ำที่มีสารละลายอนินทรีย์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 200 ส่วนต่อล้านได้อย่างปลอดภัย ยกเว้นสารละลายบางชนิดเช่น โซเดียมซัลไฟด์เพียง 100 ส่วนต่อล้านก็อาจก่อปัญหาได้ ในทางตรงกันข้าม เราสามารถใช้น้ำทะเลซึ่งมีเกลือละลายอยู่ถึง 35,000 ส่วนต่อล้าน (3.5%) ทำคอนกรีตได้หากให้ความระมัดระวังอย่างเต็มที่ ในบางครั้งเรายังใช้ประโยชน์โดยใช้สารละลายเป็นสารผสมเพิ่มเช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัว สารละลายของคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตจะทำให้ซีเมนต์ก่อตัวเร็วขึ้น แต่หากใช้สารละลายของคาร์บอเนตหรือซัลเฟตมากเกินไปอาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

สารละลายของเกลืออนินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและแข็งตัวช้าลง เช่น เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีสและดีบุก เช่นเดียวกับฟอสเฟต อาร์ซีเนตและบอเรทส์ เราสามารถอนุโลมความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้ได้ถึง 500 ส่วนต่อล้าน สารละลายที่มีความเข้ม

ขันสูงในระดับดังกล่าวจะพบได้เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งไม่ได้ผ่านระบบกำจัดสิ่งสกปรกหรือน้ำที่ซึมออกมาจากเหมืองแร่

เราสามารถใช้น้ำที่มีความเป็นกรดโดยไม่มีผลเสียต่อคอนกรีต แต่หากระดับ PH ของน้ำอยู่ต่ำถึง 3.0 ก็มักก่อให้เกิดปัญหา น้ำที่มีความเป็นด่างสูง เช่น มีปริมาณโซเดียมหรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เกิน 500 ส่วนต่อล้าน อาจก่อให้เกิดปัญหาในการก่อตัวอย่างรวดเร็วและกำลังของคอนกรีตลดลง

น้ำทะเล ประกอบด้วยเกลือซัลเฟต และคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียม ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้นแต่เมื่ออาย 28 วัน กำลังอัดจะลดลงเพราะเกลือก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้นแต่เมื่ออายุ 28 วัน กำลังจะลดลงเพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของ Ettringite ช้าลง นอกจากนี้ไอออนของคลอไรด์มีผลต่อการสึกกร่อนของเหล็กเสริม จึงไม่ควรใช้น้ำทะเลสำหรับคอนกรีตอัดแรง หรือแม้แต่คอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาถ้าสามารถหลีกเลี่ยงได้

สารละลายอินทรีย์

สารอินทรีย์ทำให้น้ำมีสี และทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ช้าลง สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมีผลเสียต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น หรือก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณมากที่สูง ตามปกติจึงต้องระมัดระวังการใช้น้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมยกเว้นกรณีที่น้ำได้ผ่านโรงกจัดน้ำเสียซึ่งจะลดสารละลายอินทรีย์ลงในระดับที่ปลอดภัย

วิธีสังเกตอย่างง่ายว่าน้ำนั้นใช้ผสมคอนกรีตได้หรือไม่มีดังนี้

ความสะอาด น้ำต้องไม่มีสารเน่าเปื่อย ปฏิกูล หรือตะไคร่น้ำ

สี น้ำต้องใส ถ้ามีสีแสดงว่ามีสารแขวนลอยต่างๆ มาก

กลิ่น น้ำต้องไม่มีกลิ่นเน่า ถ้ามีกลิ่นก็มักจะมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก

รส น้ำต้องไม่มีรส ถ้ามีรสกร่อยหรือเค็ม แสดงว่ามีเกลือแร่อยู่มาก ถ้ามีรสเปรี้ยวแสดงว่าเป็นกรด ถ้าฝาดแสดงว่าเป็นด่าง แต่โดยทั่วไปความเป็นกรดหรือด่างของน้ำมักไม่มากจนสามารถชิมรสแล้วรู้

<u>ข้อกำหนดของน้ำผสมคอนกรีต</u>

ข้อกำหนดทั่วไปที่เกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต จะต้องมีของเขตระดับความเข้มข้นไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

ปริมาณของแข็ง ไม่มากกว่า 2000 ppm.

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (PH) อยู่ในช่วง 6-8

ปริมาณซัลเฟต ไม่มากกว่า 1000 ppm.

ปริมาณคลอไรด์ ไม่มากกว่า 500 ppm.

นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดรองเรตความเข้มข้นของสิ่งเจือปนโดยละเอียด ดังตารางที่ ผ1

สิ่งเจือปน	ความเข้มข้นสูงสุด (PPM)	ผลกระทบ/ตัวอย่าง
ตะกอน	2,000	- ตะกอนดินเหนียว สารอินทรีย์
เพ็คติน	500 - 1,000	- เพิ่มฟองอากาศ
เกลือคาร์บอเนต	1,000	- ลดเวลาก่อตัว
เกลือไบคาร์บอเนต	400 - 1,000	- 400 ส่วนต่อล้านส่วน สำหรับเกลือไบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม
โซเดียมซัลเฟต	10,000	- อาจเพิ่มกำลังระยะแรก แต่ลดกำลังระยะยาว
แมกนีเซียมซัลเฟต	40,000	
โซเดียมคลอไรด์	20,000	- ลดเวลาการก่อตัว
แคลเซียมคลอไรด์	50,000	- เพิ่มกำลังระยะแรก
แมกนีเซียมคลอไรด์	40,000	- ลดกำลังสูงสุด
เกลือของเหล็ก	40,000	
ฟอสเฟต, อาร์ซีเนต, บอเรทส์	500	- ลดเวลาการก่อตัว
เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก	500	
กรดอนินทรีย์	10,000	- PH ไม่ต่ำกว่า 3.0
โซเดียมไฮดรอกไซด์	500	
โซเดียมซัลไฟล์	100	- ควรหลีกเลี่ยงการทดสอบ
น้ำตาล	500	- มีผลต่อการก่อตัว

ตารางที่ ผ19 ขอบเขตและผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำ

การทดสอบคุณสมบัติ

การทดสอบน้ำผสมคอนกรีตนี้ จะทำการทดสอบเปรียบเทียบการก่อตัวและกำลังอัดกับน้ำกลั่น ปริมาณที่จะนำมาทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่า 5 ลิตร น้ำที่เหมาะสำหรับคอนกรีตควรมีคุณสมบัติดังนี้

1) ค่ากาก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ต่างจากตัวอย่างที่ทำจากน้ำกลั่นไม่เกิน 30 นาที
2) ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของตัวอย่างใช้น้ำที่นำมาทดสอบต้องได้ค่าไม่น้อยกว่า 90% ของกำลังอัดของตัวอย่างที่ใช้น้ำกลั่น

ถ้าผลการทดสอบที่ได้ออกนอกค่าที่กำหนด แสดงว่าน้ำนั้นมีผลต่อคอนกรีต อาจแก้ไขโดยการเปลี่ยนแหล่งน้ำที่จะนำมาผสมคอนกรีต หรือถ้าผลการทดสอบแสดงว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 80% ของค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างที่ใช้น้ำกลั่น อาจใช้น้ำนี้แต่ต้องมีการเปลี่ยนส่วนผสมคอนกรีต

คุณภาพน้ำที่ใช้ล้างมวลรวมและบ่มคอนกรีต

น้ำสำหรับล้างคอนกรีต ควรมีคุณสมบัติเหมือนน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต เพราะน้ำนี้จะเคลือบอยู่บนผิวของมวลรวมและสามารถเข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตเหมือนกับน้ำที่ใช้ผสมข้อที่ควรระวังคือ ต้องคอยเปลี่ยนน้ำที่ใช้ล้างมวลรวมอย่างสม่ำเสมอ เพราะเมื่อล้างไปช่วงเวลาหนึ่ง น้ำจะขุ่น การใช้ต่อไปจะไม่เกิดผลดีอย่างไร กลับอาจทำให้เกิดความสกปรกเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนน้ำสำหรับบ่มคอนกรีต ไม่ควรมีสิ่งเจือปนที่จะทำปฏิกิริยากับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น สารพวกซัลเฟต หรือสารที่ทำให้เกิดคราบสกปรก อันจะส่งผลให้ ผิวคอนกรีตเกิดรอยเปื้อน หรือเป็นตัวการทำให้สีจัยกับผิวคอนกรีตการทำให้สีจับกับผิวคอนกรีตได้ไม่ดี และหลุดร่อนในภายหลัง

สารผสมเพิ่ม

คำจำกัดความ

สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต (concrete admixture)หมายถึง สารใดๆ นากเหนือไปจากน้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย อันใช้เติมลงไปผสมในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตขณะยังเหลวอยู่หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ, สิ่งแวดล้อม และสภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ทั่วๆ ไปของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตก็คือ ปรับปรุงความสามารถเท่ได้,เร่งหรือหน่วงเวลาการก่อตัว, ควบคุมหรือดัดแปลงการพัฒนากำลังอัด ปรับปรุง, คุณสมบัติด้านการต้านการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนการทดต่อกรดและซัลเฟต เป็นต้น หรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง แต่พึงระลึกไว้เสมอว่าสารผสมเพิ่มมิได้มีส่วนช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดีหรือการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง

ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้สารผสมเพิ่มไปทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ กล่าวคือ ใช้ปูนซีเมนต์ทั่วๆ ไปผสมกับสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม ซึ่งจะปรับปรุงหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการได้ สารผสมเพิ่มที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่บางชนิดเป็นผงซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุพื้นฐานวัสดุเหล่านี้จะต้องไม่ทำลายคุณภาพของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว รวมทั้งต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ แร่ธาตุในมวลรวมและต่อเหล็กเสริม ดังนั้นก่อนที่จะใช้น้ำยาผสมคอนกรีตความมีการศึกษาข้อจำกัดการใช้งาน, การตรวจสอบคุณภาพและการทดสอบประสิทธิภาพรวมทั้งควรใช้ตามข้อแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด มิฉะนั้นอาจจะก่อให้เกิดผลเสียหายได้

ประเภทของสารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มที่ผลิตจำหน่ายทั่วๆ ไป มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆได้ 4 กลุ่มคือ

1) สารกักกระจายฟองอากาศ (Air- Entraining Agent)

ใช้เพื่อเพิ่มความทนทาน กรณีที่คอนกรีตต้องสัมผัสกับสภาพที่เย็นจัด เช่น ในพื้นห้องเย็นหรือในบริเวณที่มีหิมะปกคลุมบางช่วงเวลา และสารผสมเพิ่มนี้ยังปรับปรุงความสารถในการใช้งานของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว

2) สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture)

เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ควบคุมการก่อตัวและการแข็งตัวหรือปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลว เป็นต้น

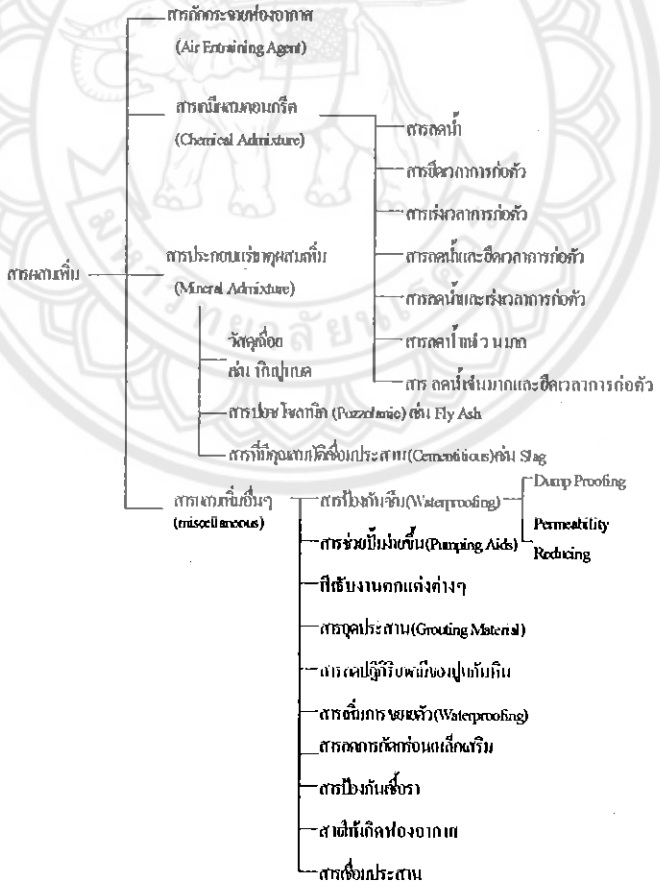
3) สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้ปรับปรุงความสารถในการใช้งาน เพิ่มความคงทน ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการเกาะตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน

4) สารผสมเพิ่มอื่นๆ

ได้แก่ สารผสมเพิ่มอื่นๆ ที่ไม่จัดอยู่ใน 3 ประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น

รายละเอียดของการแบ่งสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ ผ20



รูปที่ ผ35 การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม

การใช้สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มได้เข้ามามีบทบาทอย่างรวดเร็วในวงการก่อสร้าง ประเทศที่เจริญแล้ว ได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตกันอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกาใช้คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มถึง 90% ในออสเตรเลีย ญี่ปุ่น และเยอรมัน มียอดการใช้ 80%,80% และ 60% ตามลำดับ ส่วนในประเทศไทยวงการการก่อสร้างเพิ่งตื่นตัวเรื่องการใช้สารผสมเพิ่มอย่างจริงจังในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ทำให้ยอดคอนกรีตที่ผสมสารผสมเพิ่มยังมีปริมาณไม่มาก แต่ยอดปริมาณการใช้ในปัจจุบันได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วมากก็ด้วยเหตุที่สำคัญ คือ คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการทำงานมาก คือ คอนกรีตมีความสามารถเทได้หรือเหลวอยู่นานกว่าคอนกรีตทั่วๆ ไป ทำให้สะดวกทั้งด้านการลำเลียงและการทำให้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลงด้วย สิ่งสำคัญที่พึงระลึกไว้เสมอ คือ สารผสมเพิ่มไม่สามารถช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดี หรือการสใช้งานที่ไม่ถูกต้อง หากแต่ใช้เมื่อไม่สามารถช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดี หรือการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง หากแต่ใช้เมื่อไม่สามารถปรับปรุงคอนกรีตด้วยการปรับปรุงส่วนผสม

ในตารางที่ ผ21 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตที่สามารถปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงได้โดยสารผสมเพิ่มประเภทต่างๆ

คุณสมบัติที่ต้องการ	ประเภทของสารผสมเพิ่ม					
	สารลดน้ำ	สารหน่วง	สารก่อฟอง	สารลดน้ำจำนวนมาก	สารกักอากาศจากฟองอากาศ	อื่นๆ
การก่อตัวและแข็งตัว						
- เร่งอัตราการพัฒนากำลังอัดช่วงต้น	••			•		
- เร่งการก่อตัว		•				
- หน่วงการก่อตัว			•			
ความสามารถเทได้และคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวอื่น ๆ						
- เพิ่มความสามารถเทได้โดยกำลังอัดไม่สูญเสียไป	•			•		
- ลดอุณหภูมิจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	••		••	••		
- เพิ่มการเยิ้ม					•	•
- ลดการแยกตัว					•	•
- เพิ่มความสามารถปั๊มได้				••	•	•
คอนกรีตแข็งตัวแล้ว						
- เพิ่มกำลังอัดโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์หรือลดความสามารถเทได้	•			•		
- ปรับปรุงความทนทาน	••			•	•	
- ปรับปรุงความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำ	•			•	••	•
- ปรับปรุงแรงยึดระหว่างคอนกรีต						•

• ผลทางอ้อม •• ผลทางตรง

ตารางที่ ผ20 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงปรับหรือเปลี่ยนแปลงโดยสารประกอบเพิ่มต่าง ๆ

ข้อควรระวังในการใช้งาน

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารผสมเพิ่ม มักเนื่องมาจากความไม่เข้าใจว่าสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่งๆ มีผลต่อคอนกรีตอย่างไรบ้างข้อพึงระมัดระวังที่ผู้ใช้ควรยึดปฏิบัติคือ

1) สารผสมเพิ่มที่จะนำมาใช้ควรมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐาน เช่น ของประเทศไทยควรเป็นไปตาม มอก. 733-2530 "สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต" รวมทั้งต้องมีข้อมูลเทคนิคต่างๆ ดังนี้

- ผลของสารผสมเพิ่มต่อคอนกรีต
- อิทธิพลอื่นๆ ที่สารผสมเพิ่มมีต่อคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นทางที่เป็นประโยชน์หรือผลเสีย
- คุณสมบัติทางกายภาพของสารผสมเพิ่ม
- ความเข้มข้นของสารประกอบที่สำคัญ
- ส่วนประกอบอื่น ๆ ที่อาจมีผลเสียต่อคอนกรีต เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ซัลไฟด์ ฟอสเฟต น้ำตาล ไนเตรด และแอมโมเนีย
- PH
- ผลเสียต่อผู้ใช้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว
- วิธีการเก็บและอายุการใช้งาน
- วิธีการเก็บและอายุการใช้งาน
- การตระเตรียมและวิธีการผสมเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีต
- ปริมาณที่ควรใช้ ปริมาณสูงสุดที่อาจใช้ได้ และข้อเสียที่เกิดจากการใช้เกินปริมาณที่กำหนด

2) ควรใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ พร้อมกับตรวจดูผลว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบควรทำในสภาวะของการใช้งาน เพราะผลอันแท้จริงของสารผสมเพิ่มต่อคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆ คือชนิดของซีเมนต์ คุณสมบัติของมวลรวมและสารไม่บริสุทธิ์ที่มีอยู่ ส่วนผสม วิธีและระยะเวลาการผสม ช่วงเวลาที่ใสสารผสมเพิ่ม อุณหภูมิของคอนกรีตและสภาพการบ่ม

3) ควรใช้วิธีการวัดปริมาณสารผสมเพิ่มที่แน่นอน ซึ่งสำคัญมากในกรณีของสารกักกระจายฟองอากาศและสารผสมเพิ่มเคมี ทั้งนี้เพราะปริมาณที่ผสมมักต่ำกว่า 0.1% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นหากมีการผสมเกินปริมาณที่กำหนดอาจก่อให้เกิดผลเสียอย่างมาก

4) ผลของสรผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตสารผสมเพิ่มทั่ว ๆ ไปมักมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตหลายอย่างพร้อมๆ กัน

สารกักกระจายฟองอากาศ

สารกักกระจายฟองอากาศ เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิว (Organic Surfactants) โดยก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณที่สามารถควบคุมได้ในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศขนาดเล็กกระจายตัวอยู่สม่ำเสมอและจะคงตัว โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 –1 มิลลิเมตร

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้ (Entrain air)แตกต่างจากโพรงอากาศ ซึ่งมีขนาดใหญ่และจะเกิดในบางบริเวณอันเนื่องมาจากการจี้ และการเขย่าคอนกรีตไม่ดีพอ สารกักฟองอากาศนี้ช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการแข็งตัวของน้ำ (Frost)

วัตถุดิบ

สารกักกระจายฟองอากาศนี้ผลิตขึ้นจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมทำกระดาษ, น้ำมันและอาหารสำเร็จรูปจากสัตว์ วัตถุดิบที่สำคัญได้แก่ ยางไม้ ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันสัตว์ และพืช หรือจากกรดซึ่งได้มากจากยางไม้หรือจากไขมันของสัตว์และพืช เป็นต้น

ลักษณะการทำงาน

สารกักกระจายฟองอากาศ ประกอบไปด้วยตัวเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบนผิวของอนุภาคซึ่งมักรวมกันอยู่ระหว่างผิวน้ำและอากาศ ทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลง ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กมากกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต โดยฟองอากาศนี้จะถูกทำให้อยู่ตัวด้วย

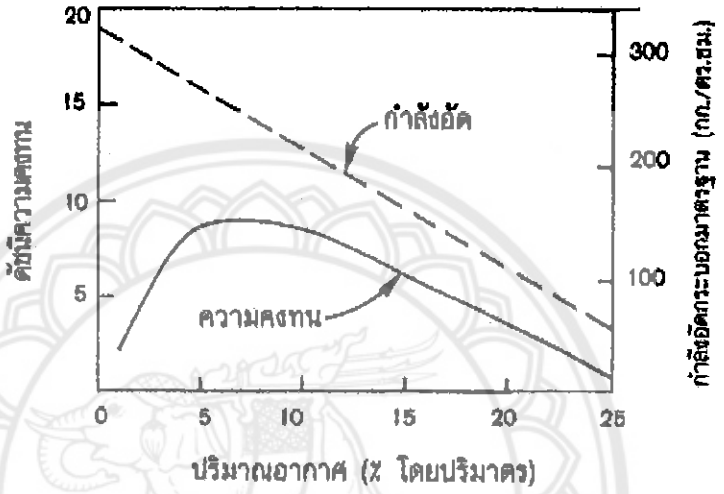
ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีตสด

การกักกระจายฟองอากาศมีผลดีต่อความสามารถในการใช้งานและการเกาะตัวของคอนกรีตเหลว โดยลดกาแยกตัวและการเยิ้ม ไม่ว่าจะมีค่ายุบตัวมากหรือน้อยก็ตาม ในคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเดียวกัน คอนกรีตที่มีฟองอากาศจะใช้งานได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะเทลงแบบและบดอัดได้ง่ายกว่า หรือมีความสามารถเทได้ดีกว่านั้นเอง ในส่วนผสมที่เหลว ฟองอากาศการแยกแยะที่อาจเกิดขึ้นระหว่าง การขนส่งและการใช้งาน

การใช้ปริมาณอากาศ 5% จะทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 15-50 มม. โดยมีปริมาณเพสต์คงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนเห็นมวลรวมละเอียดขนาดเล็กซึ่งยืดหยุ่นได้และมีแรงเสียดทานต่ำ จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งภายในเนื้อคอนกรีตเหลว คอนกรีตจึงมีลักษณะคล้ายกับว่ามีทรายมาก คุณสมบัตินี้ใช้ได้ผลดีสำหรับส่วนผสมที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก ตามปกติจะไม่ใช้การกักกระจายฟองอากาศเพื่อค่ายุบตัว แต่ใช้เพื่อลดปริมาณทรายและน้ำสำหรับค่ายุบตัว แต่ใช้เพื่อลดปริมาณทรายและน้ำสำหรับค่ายุบตัวหนึ่งๆ การเพิ่มปริมาณอากาศ 5% สามารถทำให้ลดปริมาณน้ำได้ 20-30 ลิตร/ลบ.ม. ซึ่งทำให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น และเป็นส่วนหนึ่งที่ทดแทนกำลังอัดที่ลดลงเพราะปริมาณอากาศที่สูงขึ้น

ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นมีผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีต ตามปกติคอนกรีตที่มีฟองอากาศกำลังอัดจะลดลง 5% ทุกๆ การเพิ่มขึ้นของฟองอากาศ 1% รูปที่ ผ35 แสดงผลให้เห็นว่า ปริมาณอากาศที่มากเกินไปจะทำให้ทั้งกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตน้อยลง



รูปที่ ผ36 ผลของการกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน

จะเห็นว่าสารกักกระจายฟองอากาศจะมีผลกระทบต่อความสามารถเทได้ กำลังอัดและปริมาณของคอนกรีต ดังนั้นผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจำต้องนำปัจจัยเหล่านี้มาพิจารณาด้วย

ปัจจัยที่มีผลการะทบต่อการกักกระจายฟองอากาศ

ผลของการกักกระจายฟองอากาศขึ้นอยู่กับ

1) วัสดุผสมคอนกรีตและสัดส่วนผสม

- ส่วนละเอียด เช่น ทรายละเอียด หรือปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ
- ปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นโดยลดขนาดของหิน
- สัดส่วนของอากาศจะเพิ่มขึ้นโดยลดขนาดของหิน
- สัดส่วนของทรายมีความสำคัญต่อปริมาณฟองอากาศการเพิ่มทรายขนาด 300-600 ไมโครเมตร จะก่อให้เกิดปริมาณฟองอากาศมากขึ้น แต่ถ้ามีทรายที่ละเอียดมาก โดยเฉพาะทรายที่ได้จากการบดหินจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ

- น้ำที่เหมาะสำหรับคอนกรีตไม่มีผลต่อปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น แต่น้ำกระด้างจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ ดังนั้นจึงต้องใส่ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้น
- การใช้สารผสมเพิ่มอื่นๆ ร่วมกับสารกักกระจายฟองอากาศจะต้องทำอย่างระมัดระวัง ในบางกรณีอาจจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ หรือในบางกรฯจะต้องใส่สารผสมเพิ่มอื่นๆ หลังจากที่ฟองอากาศเกิดขึ้นก่อนแล้ว เป็นต้น

2) การผสมและการจี้เขย่า

- ปริมาณฟองอากาศจะถูกกระทบด้วย ชนิด อัตราและเวลาที่ใช้ในการผสม รวมทั้งปริมาณคอนกรีตที่ถูกผสม การยืดเวลาการผสมจะส่งผลให้ฟองอากาศลดลง
- คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ต่ำมาก จะก่อให้เกิดฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถเทได้มากขึ้น ตลอดช่วงค่ายุบตัว 25-150 มิลลิเมตร
- การจี้เขย่าคอนกรีตมากเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศลดลง

3) สภาพแวดล้อม

- ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตจะเป็นปฏิภาคผกผันกับ อุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 10 °C เป็น 32 °C ปริมาณฟองอากาศจะลดลงประมาณ 50%

สารเคมีผสมคอนกรีต

สารเคมีผสมคอนกรีต คือ สารละลายเคมีชนิดต่างๆ ที่ใส่ผสมลงในสคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนนผสมสคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C494 แบ่งสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านี้ออกเป็น 7 ประเภท คือ

ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing)

ประเภท B สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding)

ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)

ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว(Water Reducing and Retarding)

ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว(Water Reducing and Accelerating)

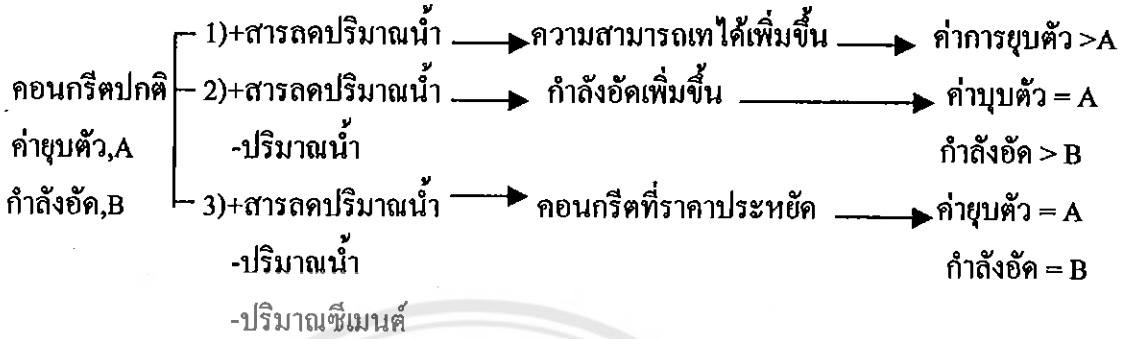
ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water Reducing-High Range)

ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว (Water Reducing-High Range and Retarding)

1.สารลดปริมาณน้ำ

สารลดปริมาณน้ำหรือที่รู้จักในชื่อ Plasticizer หมายถึง สารผสมเพิ่มที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสม โดยได้ความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบ

ต่อปริมาณฟองอากาศหรือเวลาการก่อตัวของคอนกรีตการใช้สารลดปริมาณน้ำให้เกิดประโยชน์ทำได้ดังนี้



กรณีที่ 1 ใช้เพื่อช่วยในงานเทคอนกรีตที่ทำได้ยาก เช่นโครงสร้างที่บางหรือมีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตนี้จะมีความสามารถเทได้ดี ง่ายต่อการจี้เขย่าเข้าแบบ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำและซีเมนต์

กรณีที่ 2 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยใช้ปริมาณน้ำลดลงในขณะที่ปริมาณซีเมนต์คงที่ นั้นคืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดลง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น การต้านทานการซึมผ่านของน้ำและความคงทนสูงขึ้นหรืออาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังอัดโดยไม่สามารถเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพราะจะเกิดปัญหาด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือเกิดการหดตัวทำให้เกิดการแตกร้าว โดยเฉพาะ โครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากแผ่ เป็นต้น

กรณีที่ 3 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ นั้นคือ เราสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้

วัตถุดิบ

สารลดปริมาณน้ำได้มาจากสารประกอบหลัก 3 ชนิดคือ

1) เกลือและสารประกอบของ Lignosulphonate
2) เกลือและสารประกอบของ Hydroxycarboxylic Acid
3) Polymer เช่น Hydroxylate Polymers

สารลดปริมาณน้ำน้ำ ทั่วๆ ไปจะทำมาจากสารประกอบหลัก 2 ชนิดแรก

ทำไมต้องลดปริมาณน้ำ

การลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับงานคอนกรีตจะพบว่าสารเคมีผสมคอนกรีต 5 ใน 7 ชนิด จะมีคุณสมบัติลดปริมาณน้ำ ก่อนที่จะอธิบายในรายละเอียด เราควรมาพิจารณาถึงหน้าที่ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีตอีกทีเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

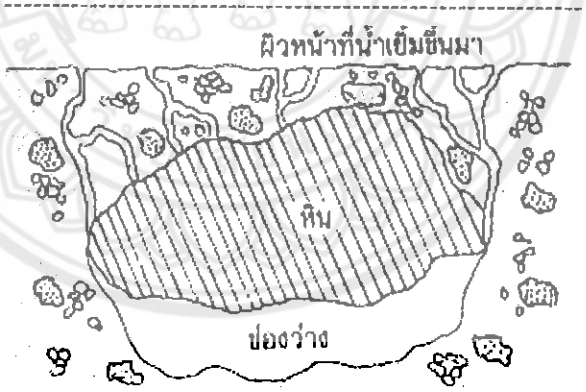
น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการผลิตคอนกรีต โดยจะทำหน้าที่ 3 อย่าง คือ

1. เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือปฏิกิริยา Hydration
2. ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียก เพื่อซีเมนต์จะเข้าเกาะและแข็งยึดติดกัน
3. ทำหน้าที่หล่อลื่นให้หิน ทราย ซีเมนต์ อยู่ในสภาพเหลวสามารถไหลเข้าแบบได้ง่าย

น้ำจำนวนพอดีที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือประมาณ 28 ± 1% ของน้ำหนักซีเมนต์ หรืออัตราส่วนน้ำ (W/C)= 0.28±0.01% แต่คอนกรีตทั่วไปใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.35 น้ำที่เกินนี้จะเข้าไปทำหน้าที่ในข้อ 2 และ 3 ทำให้คอนกรีตเหลว ทำงานได้สะดวกขึ้น น้ำส่วนนี้ถูกเรียกว่า "น้ำส่วนเกิน" (Excess Water)

น้ำส่วนเกิน ถ้ามีมากเกินไปจะมีผลเสียต่อคอนกรีต คือ

1) เกิดการเยิ้มของน้ำขึ้นมาที่ผิวหน้ามาก (Bleeding)
2) เกิดการแยกตัว
3) กำลังอัดต่ำลง
4) เกิดการหดตัว
5) ทำให้เกิดรูพรุน มีผลทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน

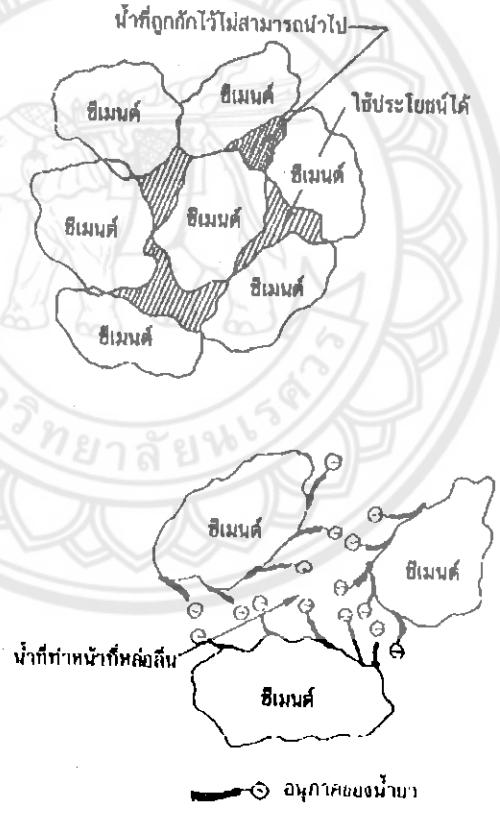


รูปที่ ผ37 คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป

ในรูปที่ ผ36 แสดงลักษณะคอนกรีตที่ใช้น้ำมากเกินไปน้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หินและบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งคือการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแอ่งน้ำดังกล่าว จะกลายเป็นโพรงอากาศ ทำให้ความทนทานและกำลังอัดคอนกรีตต่ำลง

ลักษณะการทำงาน

สารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีตทั้งนี้เพราะมีคณสมบัติในการช่วยเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวต่อระหว่างของแข็งและน้ำในคอนกรีต ปกติอนุภาคซีเมนต์ต่างๆ ในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว ซึ่งอาจเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ อนุภาคซึ่งมีประจุต่างกันจะดูดรวมกันเป็นกลุ่ม (Flocculate) ซึ่งสามารถดูดน้ำได้จำนวนมากทำให้เหลือน้ำหล่อลื่นคอนกรีตเหลวอยู่น้ำ โมเลกุลของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยทำให้ประจุเป็นกลาง หรือทำให้ประจุบนผิวอนุภาคต่างๆ กลายเป็นประจุชนิดเดียวกันจึงเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกันทำให้แยกตัวกันในเนื้อเพสต์ น้ำที่ผสมไปในคอนกรีตส่วนใหญ่จึงสามารถถูกใช้ลดความหนืดของเพสต์ ดังแสดงในรูป ผ22



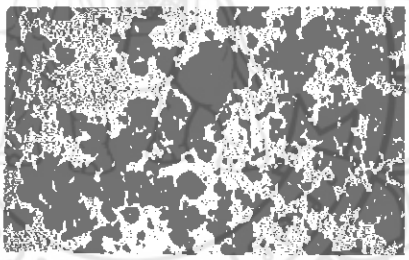
รูปที่ ผ38 ลักษณะการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

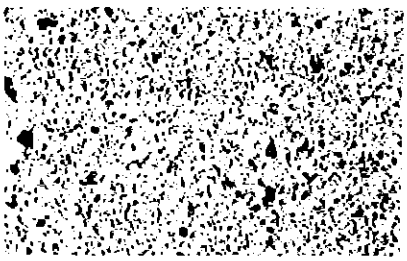
ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1) ชนิดและปริมาณการใช้ของสารลดปริมาณน้ำ
2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ
3) ชนิดของมวลรวมและส่วนคละ
4) สัดส่วนผสม
5) อุณหภูมิ

ถ้าใช้สารลดปริมาณน้ำในปริมาณปกติ ปริมาณน้ำที่ลดลงจะอยู่ในช่วง 5-10% อย่างไรก็ตามควรทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มที่จะให้บรรลุคุณสมบัติที่เหมาะสม



รูปที่ ผ39 อนุภาคของซีเมนต์จะจับตัวอยู่ในกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ



รูปที่ ผ40 การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ

ผลต่อคอนกรีตสด

1) สารลดปริมาณน้ำนี้จะเพิ่มความสามารถเทได้ ถ้าไม่มีการปรับส่วนผสมอื่นๆ โดยปกติจะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 25-50 มิลลิเมตร
2) สารลดปริมาณน้ำที่มีสารประกอบของ Hydroxycarboxylic Acid จึงสามารถลดปริมาณน้ำได้มากกว่าสารประกอบของ Lignosulphonate
3) ค่าอัตราการสูญเสียการยุบตัว (Slump loss) ในช่วงแรกของคอนกรีตทั่วไป
4) สารลดปริมาณน้ำที่มาจากเกลือของ Hydroxycarboxylic Acid มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการเยิ้ม(Bleeding) ดังนั้นควรใช้ด้วยความระมัดระวังโดยเฉพาะกับคอนกรีตที่มีการยุบตัวมาก
5) สารลดปริมาณน้ำที่มากจาก Lignosulphonate จะลดการเยิ้มเนื่องจากสารประกอบพวกนี้ก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นเล็กน้อย คืออยู่ในช่วง 1-3 %
6) โดยทั่วไปสารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อเวลาการก่อตัวคือจะหน่วงเวลาการก่อตัวเล็กน้อย
7) ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต สารลดปริมาณน้ำจะไม่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาของคอนกรีต(Heat of Hydration)

ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1) ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ใส่สารลอปริมาณน้ำจะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนซีเมนต์ในส่วนผสม
2) เนื่องจากสารลดปริมาณน้ำส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง นั้นคือ กำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงขึ้น ผลทางอ้อมก็คือ กำลังอัดช่วงต้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย
3) การหดตัว (Drying Shrinkage) และCreep จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความสามารถเทได้และกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากัน
4) ผลของการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ทำให้ความทนทานและการกันซึมสูงขึ้น เพราะคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.สารยืดเวลาการก่อตัว

สารยืดเวลาการก่อตัว เป็นสารเคมีที่หน่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งส่งผลหน่วงการก่อตัวของคอนกรีตด้วยสารผสมเพิ่มชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในงานคอนกรีตในเขตร้อน เช่นในประเทศไทยเป็นต้น เพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดเร็วมาก เวลาการก่อตัวของซีเมนต์จะลดลง นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานคอนกรีตประเภทอื่น ๆ อีกเช่น

1) งานโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยยืดเวลาการก่อตัวเพื่อป้องกันการเกิด Cold Joint
2) งานเขื่อน โดยลดความร้อนในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว
3) งานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ ซึ่งบางครั้งต้องยืดเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตออกไป 6-8 ชั่วโมง

วัตถุดิบ

สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวแบ่งได้เป็น 4 ประเภทตามส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้

1) กรด Lignosulphonic และเกลือของมัน
2) กรด Hydroxycarboxylic
3) น้ำตาลและสารประกอบของน้ำตาล
4) เกลืออนินทรีย์

สารเคมีหลายๆ ตัวจะเหมือนกับของสารลดปริมาณน้ำแต่จะใช้ในปริมาณที่มากกว่า

ลักษณะการทำงาน

มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายการทำงานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ **แต่ทฤษฎีที่สำคัญที่สามารถอธิบายเรื่องนี้ได้ดี คือ** สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวนี้จะถูกดูดซึมไวบนผิวของอนุภาคซีเมนต์ ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับอนุภาคซีเมนต์ลดลง **นั้นคือ** การหน่วงเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารยืดเวลาการก่อตัว
2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ
3) เวลาที่เติมสารยืดเวลาการก่อตัว
4) อุณหภูมิ

สารยืดเวลาการก่อตัวจะขยายเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตทั้งเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (InitiaL Setting Time) และเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ส่วนผลด้านการยืดเวลาพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อย จะยืดเวลาได้นานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูง

ความสามารถในการยืดเวลาการก่อตัวของสารผสมเพิ่มนี้จะดีขึ้นหากว่าเติมน้ำยาประเภทนี้ 2-3 นาที หลังจากการใส่น้ำผสม และจะให้ผลเต็มที่เมื่อเติม 10 นาที หลังผสม ถ้าเติมหลัง 2-4 ชั่วโมง สารผสมเพิ่มนี้จะไม่ก่อให้เกิดผลด้านการยืดเวลาการก่อตัว ปริมาณการใช้สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ผลต่อคอนกรีตสด

1) ผลโดยตรงคือ หน่วงเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้นาน รวมทั้งมีค่าการสูญเสียค่ายุบตัวน้อยลง
2) หน่วงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ปริมาณความร้อนทั้งหมดยังคงเดิม
3) สารยืดเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มจะเพิ่มการหดตัว (Plastic Shrinkage) เพราะว่าคอนกรีตจะเหลวอยู่นานกว่าปกติ ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมสารยืดเวลาการก่อตัวจึงจำเป็นที่จะต้องบ่มอย่างถูกต้องและเพียงพอเพื่อป้องกันการแตกร้าว(Plastic Cracking) ซึ่งจะเกิดขึ้นถ้าปล่อยให้คอนกรีตแห้งก่อนที่คอนกรีตจะมีกำลังอัดเพียงพอ

ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1) กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการยืดเวลาการก่อตัว แต่เมื่อคอนกรีตอายุ 2-3 วัน กำลังอัดจะใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่วๆ ไป
2) อัตราการเกิด Dry Shrinkage และ Creep เพิ่มขึ้น แต่ค่ารวมจะไม่เปลี่ยนแปลง

3.สารเร่งเวลาการก่อตัว และแข็งตัว

สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว เป็นสารที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลเร่งการก่อตัว และการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้น โดยทั่วไปจะใช้สำหรับงานดังต่อไปนี้

1) งานก่อสร้างเร่งด่วน เช่น งานที่ต้องการถอดแบบไม้เร็ว งานซ่อมแซมต่างๆ
2) งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตในโรงงาน เพื่อจะให้การหมุนเวียนแบบหล่อทำได้อย่างรวดเร็ว
3) งานคอนกรีตในฤดูหนาวสำหรับประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นจัด

สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะแตกต่างจากสารที่ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างกระทันหัน (Set Accelerating Admixture) ซึ่งจะก่อตัวภายใน 2-3 นาที และเหมาะในงาน Shotcrete สำหรับอุดรูรั่วภายใต้ความดันของน้ำ หรือการซ่อมแซมอย่างกระทันหัน

วัตถุดิบ

สารเร่งเวลาการก่อตัวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารเคมีดังนี้

1) Calcium Chloride
2) Calcium Formate
3) Calcium nitrate

คัลเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้เร่งการก่อตัวของคอนกรีตอย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการ คือ ราคาไม่แพง และหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้พบว่าคัล

เซียมคลอไรดจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต ดังนั้นจึงหันมาสนใจสารเคมีอื่นที่ไม่มีเกลือคลอไรด์ อันได้แก่ Calcium Formate และล่าสุดได้มีการพัฒนาสารเร่งการก่อตัวที่มีสารเคมีหลัก คือ Calcium Nitrate ขึ้นใช้อย่างแพร่หลาย

ลักษณะการทำงาน

สารเร่งเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทำหน้าที่เสมือนตัวเร่ง ปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) ระหว่างซีเมนกับน้ำ ผลก็คือ จะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก่อให้เกิดความร้อนขึ้นและกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นในเวลารวดเร็ว

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารเร่งการก่อตัว
2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ
3) อุณหภูมิ

คัลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ดีกว่า Calcium Formate และ Calcium Nitrate รวมทั้งราคาถูกกว่าอย่างมากด้วย และการเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณสารนี้ในปริมาณที่มากขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ สัดส่วนผสม ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำมากกว่าส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง

ผลต่อคอนกรีตสด

เวลาการก่อตัวและแข็งตัวจะลดลง แต่ทั้งนี้มีข้อกำหนดควบคุมไว้ ไม่ให้การก่อตัวเกิดเร็วมากจนไม่สามารถนำคอนกรีตนั้นๆ ไปใช้งานได้

ผลต่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

1) กำลังอัดในช่วงต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กำลังอัดในระยะยาว (Long Term Strength) ที่อายุมากกว่า 28 วันจะต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป
2) Calcium Chloride จะเพิ่มทั้ง Drying Shrinkage และCreep
3) Calcium Chloride ที่ใส่ไปเร่งการก่อตัว จะมีผลทำให้ความสามารถทนทานต่อซัลเฟตของคอนกรีตลดลงรวมทั้งยังกระตุ้นให้เกิด Alkali Aggregate Reaction สำหรับในกรณีที่มวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์
4) คอนกรีตมีความสามารถทนทานต่อ Erosion และ Abrasion ทุกช่วงอายุมากกว่าคอนกรีตทั่วๆ ไป
5) คัลเซียมคลอไรด์จะเร่งการสึกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ความระมัดระวัง

4. สารเคมีผสมคอนกรีตอื่นๆ

เราได้กล่าวถึง สารเคมีผสมคอนกรีตที่สำคัญ 3 ชนิดไปแล้ว ที่เหลืออีก 4 ประเภทคงจะไม่กล่าวในรายละเอียด ทั้งนี้เพราะสารผสมเพิ่มที่เหลือจะเป็นการรวมสาร 3 ประเภทต้นเท่านั้น เราจะพิจารณาเฉพาะประเด็นที่สำคัญเท่านั้นคือ

1) สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานคอนกรีตผสมเสร็จ

2) สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก

มักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า "Superplasticizer" สารผสมนี้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ 15-30% ทั้งนี้เนื่องจากประจะไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักดัน มีแรงผลักดันมากกว่าสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำทั่วๆ ไป ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มประเภทนี้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในโรงงานผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เพราะการลดน้ำในปริมาณมากๆ ทำให้อัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังในช่วงต้นที่สูงมากทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวด ได้ในเวลารวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

3)สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมที่เพิ่มที่พัฒนาล่าสุด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมากๆ เช่นในงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรือเสา คาน และชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มนี้จะมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. ทำให้สามารถลื่นไหลเข้าไปในทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบ โดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าคอนกรีตมากนัก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกทั่วๆ ไปว่า "Flow Concrete"

คุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture) ควรเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ ผ23

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด						
	สารลดน้ำ	สารหน่วงการก่อตัว	สารช่วยการก่อตัว	สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว	สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำพิเศษ	สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว
น้ำ ร้อยละของปริมาณน้ำที่ผสมคอนกรีตควบคุม ไม่เกิน	95			95	95	88	88
ระยะเวลาการก่อตัว เทียบกับคอนกรีตควบคุม ชั่วโมง:นาที							
การก่อตัวระยะต้น							
อย่างน้อย		ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	-	ช้าลง 1:00
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
การก่อตัวระยะปลาย							
อย่างน้อย	-	-	เร็วขึ้น 1:00	-	เร็วขึ้น 1:00	-	-
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	-	ช้าลง 3:30	-	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
ความต้านแรงอัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 1 วัน	-	-	-	-	-	140	125
3 วัน	110	90	125	110	125	125	125
7 วัน	110	90	100	110	110	115	115
28 วัน	110	90	100	110	110	110	110
ความต้านแรงดัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 3 วัน	100	90	110	100	110	110	110
7 วัน	100	90	100	100	100	100	100
28 วัน	100	90	90	100	100	100	100

ตารางที่ ผ21 สรุปคุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่าง ๆ ตามข้อกำหนดมาตรฐาน

สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

สารผสมเพิ่มชนิดนี้มักจะเป็นผงละเอียด ซึ่งใส่รวมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลงและเพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 3กลุ่มคือ

1) วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ หรือวัสดุเฉื่อย(inert)
2) วัสดุชนิด Pozzolana
3) วัสดุที่มีความสามารถเป็นตัวเชื่อมประสาน(Cementitious)

1.วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำหรือวัสดุเฉื่อย

สารผสมเพิ่มชนิดนี้ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตหลว โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก เช่นคอนกรีตที่ทำจากทรายหยาบ หรือที่มีปริมาณซีเมนต์อยู่น้ำ คอนกรีตแบบนี้อาจแยกตัวอย่างได้ง่ายไม่เหมาะสำหรับการลำเลียงและเทลงแบบ การปรับปรุงการเกาะตัวและความเหลวของคอนกรีตนี้ด้วยราคาหรือทางเทคนิค เช่นทำให้มีความร้อนจากไฮเดรชั่นมากในคอนกรีตเหลง วิธีการทำได้คือการใส่แร่ธาตุเหล่านี้มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมโยงเหมาะสำหรับการปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงเท่านั้น

2.วัสดุชนิด Pozzolana

Pozzolana คือวัสดุประเภทซิลิก้า ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตัวเชื่อมประสานหรือ Calcium Silicate Hydrate เพิ่มขึ้น นากจากนี้ยังลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้นเราอาจใช้ Pozzolana ในรูปของสารผสมเพิ่มซึ่งใส่ในสถานที่ก่อสร้าง หรือในรูปของซีเมนต์ผสม

นอกเหนือจากการเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ขาดซีเมนต์แล้วมันยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เราสามารถใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งผสมสารผสมเพิ่มชนิดนี้แทนซีเมนต์ประเภทที่สี่สำหรับโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ ปริมาณการใช้ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของงานและอาจสูงถึง 15-35% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยซิลิก้าที่ทำปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ ขี้เถ้าภูเขาไฟและหิน Tuff,Pumicite,opaline,Chert ดินเหนียว และหิน Shale โดยปกติต้องนำมาบดให้ละเอียดและเผา ,Fly Ash เป็นขี้เถ้าอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยมมากเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดอยู่แล้ว

การใช้สาร Pozzolana มักจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน

รายละเอียดของ Fly ash หรือที่มีชื่อเรียกทางการว่า Pulverized Fuel Ash(PFA) จะได้กล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป

สารผสมเพิ่มอื่น ๆ

สารผสมเพิ่มประเภทนี้ ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในงานจำเพาะเจาะจงบางอย่าง เช่น

1. สารป้องกันซึม

ใช้ป้องกันการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีรูพรุนมาก ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุประเภทสบู่หรือน้ำมัน

2. สารกันความชื้น

เป็นพวกกรดไขมันหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมอาจจะทำให้น้ำไม่จับที่ผิวคอนกรีต แต่จะไม่สามารถทนน้ำที่มีแรงดันมากได้

3. สารช่วยให้ปั๊มง่าย

ช่วยให้คอนกรีดยึดเกาะตัวกัน เคลื่อนผ่านท่อปั๊มไปได้ถึงแม้ว่าคอนกรีตนั้นจะมีประมาณซีเมนต์ต่ำ

4. สารอุดประสานหรือสารกรอกฉีด

ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการอัดฉีดเข้าไปในซอกหรือบริเวณแคบๆ โดยป้องกันการแยกตัว การเยิ้ม รวมทั้งเพิ่มการยึดเกาะเพื่อให้ปั๊มได้สะดวกเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับงาน Stabilize ฐานราก อุดรอยร้าวหรือรอยต่อในงานคอนกรีตอุดช่องว่างในงานคอนกรีตอัดแรงระบบ Bonding เป็นต้น

5. สารเพิ่มการขยายตัว

มีสารเคมีหลัก คือ Calcium Sulpho-Aluminateจะทำให้ซีเมนต์ธรรมดาเป็นซีเมนต์แบบขยายตัว เพื่อใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างทั่วๆ ไป

6. สารลดการกัดกร่อนเหล็กเสริม

เป็นเกลือของสารเคมีที่มีประจุที่เกิดออกไซด์ได้

7. สารเชื่อมประสาน

ส่วนใหญ่ทำมาจาก Polymer Latex ใช้เพิ่มเสริมการยึดเกาะตัวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่หรือระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ นายกิตติศักดิ์ นามสกุลเกษตรธรรม

สัญชาติ ไทย เชื้อชาติ ไทย

ศาสนาพุทธ

เกิดวันที่ 12 กันยายน 2519 ที่เกิด พิจิตร

ที่อยู่ 35 หมู่ที่ 8 ต.วังทรายพูน อ.วังทรายพูน จ.พิจิตร 66120

เบอร์โทร 056 – 695076

สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนบ้านวังทรายพูน

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม

สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจาก มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ วิชาเอก วิศวกรรมโยธา

ประสบการณ์ในการทำงาน เข้าฝึกงานที่สำนักงานโยธาจังหวัดพิษณุโลก

ชื่อ นายปรีดา นามสกุลโยธะคง
สัญชาติ ไทย เชื้อชาติ ไทย
ศาสนาพุทธ
เกิดวันที่ 20 ตุลาคม 2520 ที่เกิด เพชรบูรณ์
ที่อยู่ 389 หมู่ที่ 9 ต.เพชรละคร อ.หนองไผ่ จ.เพชรบูรณ์ 67140
เบอร์โทร 056 – 724568
สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนบ้านซับตะเคียนทอง
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเพชรละครวิทยา
สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจาก มหาวิทยาลัยนเรศวร
คณะ วิศวกรรมศาสตร์ วิชาเอก วิศวกรรมโยธา
ประสบการณ์ในการทำงาน เข้าฝึกงานขององค์การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ที่โครงการโรงไฟฟ้าพลังน้ำลำตะคอง แบบสูบกลับ จังหวัดนครราชสีมา

ชื่อ นายศักดิ์ดา นามสกุลตาทิพย์
สัญชาติ ไทย เชื้อชาติ ไทย
ศาสนาพุทธ
เกิดวันที่ 20 มกราคม 2521 ที่เกิด เพชรบูรณ์
ที่อยู่ 133/2 หมู่ที่ 4 ต.นาป่า อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000
เบอร์โทร 056 – 748097
สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนบ้านชอน
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเพชรพิทยาคม
สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจาก มหาวิทยาลัยนเรศวร
คณะ วิศวกรรมศาสตร์ วิชาเอก วิศวกรรมโยธา
ประสบการณ์ในการทำงาน เข้าฝึกงานที่ห้างหุ้นส่วนจำกัด วีสถาปัตย์