# การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ

# A STUDY OF PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT TYPE 3 MIX WITH MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER

โดย

นายนิพนธ์ สาดสูงเนิน

นายณรงค์ ธนสัตยาวิบูล


โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีการศึกษา 2536


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A STUDY OF PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT TYPE 3 MIX WITH MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER

BY

MR.NIPHON SARTSUNGNUN

MR.NARONG THANASATTAYAWIBUL

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

การทำรายงานฉบับนี้ ข้าพเจ้าได้รับความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล รวมทั้งคำชี้แนะต่าง ๆ ด้านการทำโครงการวิจัยนี้ จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน จึงขอขอบพระคุณผู้มีรายนามต่อไปนี้ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

อาจารย์ ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ
- อาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำชี้แนะในการทำโครงการ

คุณพงษ์ศักดิ์ วิบัสสนากุล
- ผู้จัดการฝ่ายขาย บ.SODAP ประเทศไทย จำกัด
ผู้ให้วัสดุและข้อมูล

คุณชัยสวัสดิ์ ศรีรัตนรัฐ และ
คุณจรัญ เกผูรวิเชียร
- ผู้จัดการฝ่ายขาย บ.SIKA ประเทศไทย จำกัด
ผู้ให้วัสดุและข้อมูล

คณะเจ้าหน้าที่ประจำ SHOP
- ผู้ให้ความสะดวกในการทำโครงการวิจัย

คณะเพื่อน ๆ และน้อง ๆ
- ให้ความร่วมมือด้านกำลังกายในการทำโครงการวิจัย

และตลอดจนผู้ให้ความร่วมมือทุกท่านด้วย

นิพนธ์ สาดสูงเนิน
ณรงค์ ธนสัตยาวิบูล
ผู้ประกาศกิตติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบยืนยันโครงงานพิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

---

หัวข้อโครงงานพิเศษ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ

(PORTLAND CEMENT TYPE 3 MIX WITH MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER)

นักศึกษา นายนิพนธ์ สาดสูงเนิน รหัสประจำตัว 32100146

นายณรงค์ ธนสัตยาวิบูล รหัสประจำตัว 33100101

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมการก่อสร้าง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ

| คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ | ลายมือชื่อ |
|---|---|
| 1. อ.ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ | ..... |
| 2. อ.ผศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ | ..... |
| 3. อ.อำนวย พานิชกุลพงศ์ | ..... |
| 4. อ.สกุล ห่อวโนทยาน | ..... |

(นายสุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ

# PORTLAND CEMENT TYPE 3 MIX WITH MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER

โดย นายนิพนธ์ สาดสูงเนิน

นายณรงค์ ธนสัตยาวิบูล

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ

บทคัดย่อ

ไมโครซิลิกาเป็นสารที่นำมาผสมเพิ่มเพื่อให้คอนกรีตเป็นคอนกรีตกำลังสูง แต่เนื่องจากไมโครซิลิกามีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า ทำให้ต้องการน้ำมาเคลือบผิวสูงกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงใช้น้ำมากเป็นผลให้กำลังของคอนกรีตไม่สูงเท่าที่ควรจึงปรับปรุงโดยการใช้สารลดน้ำพิเศษ มีผลให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกาลดลง ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ความข้นเหลว,ระยะเวลาก่อตัว,การขยายตัว และหดตัวเมื่อแห้ง, กำลังรับแรงอัด,กำลังรับแรงดึง และพิจารณาเปรียบเทียบราคาเพื่อหาราคาที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ต่อไมโครซิลิกาต่อสารลดน้ำพิเศษเป็น 90 : 10 : 3 และมีราคาแพงกว่ามอร์ตาร์ล้วน 3 เท่า

ABSTRACT

MICROSILICA IS AN ADMIXTURE USE FOR INCREASE CONCRETE IN HIGH STRENGTH CONCRETE. MICRASILICA IS SMALLER THAN PORTLAND CEMENT ABOUT 100. THEN IT NEED VERY MUCH WATER TO CLOSE THE SURFACE THAN PORTLAND CEMENT SO THAT THE STRENGTH OF CONCRETE IS NOT HIGH ENOUGH. THE APPLY BY USING SUPERPLASTICIZER HAS REDUCED WATER CEMENT RATIO AND MICROSILICA.IN THIS SPECIAL PROJECT,WE STUDY THE PROPERTIES OF CEMENT PASTE AND MORTARS MIX WITH MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER ABOUT NORMAL CONSISTENCY , SETTING TIME , SWELLING AND DRYING SHRINKAGE , TENSILE STRENGTH , COMPRESSIVE STRENGTH AND DETERMINE BY COMPARE THESE COST TO FIND THE OPTIMUM COST. THE STUDY SHOWS THAT THE APPROPRIATE RATIO BETWEEN PORTLAND CEMENT TYPE 3, MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER IS 90 : 10 : 3 AND THE COST IS EXPENSIVE THAN NORMAL MORTARS 3 TIMES.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| ใบยืนยันโครงงานพิเศษ | ข |
| บทคัดย่อ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตารางประกอบ | ช |
| สารบัญรูปประกอบ | ฌ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 คำนำ | 1 |
| 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการทดลอง | 2 |
| 1.3.1 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3.2 ขอบเขตการทดลอง | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | 3 |
| 2.1 ปูนซีเมนต์ | 3 |
| 2.1.1 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ | 3 |
| 2.1.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ | 7 |
| 2.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ | 8 |
| 2.1.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ | 9 |
| 2.1.5 ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ประเภทอื่น | 10 |
| 2.1.6 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ | 12 |
| 2.1.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น | 16 |
| 2.2 คอนกรีตกำลังสูงมาก | 17 |
| 2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงมาก | 17 |
| 2.4 สารผสมเพิ่ม | 19 |
| 2.5 สารลดน้ำพิเศษ | 20 |
| 2.5.1 คอนกรีตไหล | 22 |
| 2.5.2 คอนกรีตลดน้ำช่วงสูง | 36 |
| 2.5.3 คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ | 39 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.5.3.1 ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้ 39
2.5.3.2 การคายน้ำ 39
2.5.3.3 ระยะเวลาการก่อตัว 39
2.5.3.4 กำลังรับแรงอัด 40
2.5.3.5 กำลังรับแรงดึง 42
2.5.3.6 ความทนทาน 42
2.5.3.7 การขยายตัว 42
2.5.3.8 การหดตัว 42
2.6 วัสดุปอซโซลาน 43
บทที่ 3 การทดสอบ 46
3.1 แผนการทดสอบ 46
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 46
3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ 46
3.2.2 ไมโครซิลิกา 46
3.2.3 สารลดน้ำพิเศษ 46
3.2.4 ทราย 47
3.2.5 น้ำ 47
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ 47
3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ไฮดรอลิก 47
3.3.2 การทดสอบความละเอียด 49
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ 51
3.4.1 การทดสอบหาค่าความข้นเหลวปกติของซีเมนต์
โดยใช้เข็มแบบไวแคต 51
3.4.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว 53
3.4.3 การทดสอบหาค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์ 54
3.5 การทดสอบคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ 55
3.5.1 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ 55
3.5.2 การทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.5.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ 60
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการอภิปราย 65
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 65
4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ 65
4.1.2 ความละเอียด 65
4.2 การทดสอบหาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม 65
4.2.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ 65
4.2.2 กำลังรับแรงอัด 65
4.3 ความข้นเหลวปกติ 70
4.4 ระยะเวลาก่อตัว 70
4.5 กำลังรับแรงอัด 71
4.6 กำลังรับแรงดึง 71
4.7 การขยายตัวและหดตัว 72
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ 73
5.1 สรุปผลการทดสอบ 73
5.2 ข้อเสนอแนะ 73
รูปประกอบคำบรรยาย 76
ภาคผนวก 89
บรรณานุกรม 169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตารางประกอบ


| | | หน้า |
|---|---|---|
| ตารางที่ 2.1 | สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ | 4 |
| ตารางที่ 2.2 | สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ | 7 |
| ตารางที่ 2.3 | ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทต่าง ๆ | 10 |
| ตารางที่ 2.4 | เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี | 12 |
| ตารางที่ 2.5 | เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางพิสิกส์ | 14 |
| ตารางที่ 2.6 | รายละเอียดส่วนผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตไหล | 25 |
| ตารางที่ 2.7 | ลักษณะของส่วนที่เจาะออกมาจากพื้นหลังจากเทคอนกรีตเป็นเวลา 3 ปี | 30 |
| ตารางที่ 2.8 | ผลของการเติมสารลดน้ำเพียงเล็กน้อย | 32 |
| ตารางที่ 2.9 | รายละเอียดส่วนผสมและคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต โดยใช้ ลิกโนซัลโฟเนต ร่วมกับ สารลดน้ำกระจายก๊กฟองอากาศ | 35 |
| ตารางที่ 2.10 | ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และไมโครซิลิกา | 44 |
| ตารางที่ 3.1 | กำลังดึงของมอร์ตาร์ ซีเมนต์ | 56 |
| ตารางที่ 3.2 | เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน | 60 |
| ตารางที่ 3.3 | ขนาดคละของทรายมาตรฐาน | 61 |
| ตารางที่ 3.4 | ปริมาณวัสดุสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์ | 62 |
| ตารางที่ 4.1 | ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 และ ไมโครซิลิกา | 66 |
| ตารางที่ 4.2 | ผลการทดสอบหาความข้นเหลวและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ | 67 |
| ตารางที่ 4.3 | ผลการทดสอบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์โดยวิธี "La Chatelier Split Mould Test" | 68 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน | 69 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า


| | | |
|---|---|---|
| ตารางที่ 4.5 | ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน | 69 |
| ตารางที่ 5.1 | แสดงราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ | 74 |
| ตารางผนวก ก | ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ | 119 |
| ตารางผนวก ข | ผลการทดสอบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์ | 126 |
| ตารางผนวก ค | ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ | 131 |
| ตารางผนวก ง | ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ | 147 |


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปประกอบ


| | | หน้า |
|---|---|---|
| รูปที่ 2.1 | กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ | 5 |
| รูปที่ 2.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตกำลังสูง | 18 |
| รูปที่ 2.3 | แสดงประจุไฟฟ้าที่ล้อมรอบเม็ดซีเมนต์เมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษ (Heinz, 1983) | 21 |
| รูปที่ 2.4 | a) slump ก่อนเติมสารลดน้ำพิเศษ<br>b) slump ที่ยุบลงสำหรับคอนกรีตไหล | 22 |
| รูปที่ 2.5 | การผสมสารลดน้ำพิเศษในคอนกรีตปั๊ม | 24 |
| รูปที่ 2.6 | การก่อสร้างชั้นพื้นดินของอ่างเก็บน้ำ | 25 |
| รูปที่ 2.7 | การเทพื้นคอนกรีตหนา 50 มม.<br>a) โดยใช้คอนกรีตไหล<br>b) โดยใช้การเทและตบแต่งด้วยมือ | 28 |
| รูปที่ 2.8 | ส่วนที่เจาะออกมาจากพื้น หลังจากเทคอนกรีตเป็นเวลา 3 ปี<br>a) คอนกรีตไหล<br>b) คอนกรีต slump 50 มม. | 29 |
| รูปที่ 2.9 | การสร้างโดมคอนกรีตเสริมเหล็ก ในสก๊อตแลนด์ | 32 |
| รูปที่ 2.10 | รายละเอียดที่มีความประณีตของที่กรุหน้าต่างคอนกรีตที่สร้างโดยใช้คอนกรีตไหล | 33 |
| รูปที่ 2.11 | ความสามารถทำงานได้สูงแต่การยึดเกาะของคอนกรีตมาจากการไหลเป็นส่วนใหญ่ และความสามารถทำงานได้อยู่ในขอบเขตจำกัดโดยใช้ สารลดน้ำกระจายกักฟองอากาศ ผสมกับสารลิกโนซัลโฟเนต | 34 |
| รูปที่ 2.12 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Rixom, 1978) | 40 |
| รูปที่ 2.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำ และกำลังรับแรงอัด กับปริมาณ Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensate (Stuart และคณะ, 1980) | 41 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำ และกำลังรับแรงอัด กับปริมาณ Sulphonated Napthalene Formaldehyde Condensate (Stuart และคณะ, 1980) 41
รูปผนวก ก ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์ 89
รูปผนวก ข ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์ 120
รูปผนวก ค เปรียบเทียบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์โดยใช้ผลต่างของความยาว 129
รูปผนวก ง เปรียบเทียบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์โดยใช้ผลต่างของน้ำหนัก 130
รูปผนวก จ เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน 141
รูปผนวก ฉ เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน 143
รูปผนวก ช เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน 145
รูปผนวก ซ เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน 157
รูปผนวก ฌ เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน 159
รูปผนวก ญ เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน 161
รูปผนวก ฌ เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. 163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 คำนำ

ไมโครซิลิกา (Microsilica, $SiO_2$) เป็นสารที่นำมาผสมเพื่อทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงมาก ไมโครซิลิกาจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$) ซึ่งเหลือจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) มากขึ้น CSH มีหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างมวลต่างๆ และเป็นตัวอุดประสานช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ในต่างประเทศได้นำเทคโนโลยีนี้มาใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังคอนกรีตสูงมาก ซึ่งจะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงถึง 700-1100 กก./ซม$^2$ เช่น ตึก Pacific First Center สร้างใน Seattlel, Washington, USA ออกแบบกำลังรับแรงอัดสูงถึง 1000 กก./ซม$^2$ แต่ในประเทศไทยไม่ได้นำมาใช้เพราะยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง

เนื่องจากไมโครซิลิกามีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า ทำให้ต้องการน้ำมาเคลือบผิวสูงกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในการผสมจึงใช้น้ำมาก ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกาสูง เป็นผลให้กำลังของคอนกรีตไม่สูงเท่าที่ควร จึงมีการปรับปรุงโดยการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) มีผลให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกาลดลงเมื่อความสามารถทำงานได้คงที่

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอัตราการเจริญทางเศรษฐกิจสูง และยังเป็นประเทศที่ก้าวสู่การเป็นประเทศอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีแนวโน้มที่จะใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก ดังนั้นจึงควรจะมีการศึกษาเทคโนโลยีนี้กันอย่างกว้างขวาง เพราะใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างได้หลายภาวะ ที่พอจะเห็นได้โดยตรงโดยการทำชิ้นส่วนโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้น้ำหนักโครงสร้างเบาลงและทำให้ลดน้ำหนักของอาคาร ประหยัดได้ทั้งในแง่ของฐานรากและวัสดุที่ใช้ และยังสามารถเพิ่มจำนวนชั้นของอาคารให้มากขึ้น ซึ่งเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ หรืออาจประยุกต์ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนสำเร็จรูป เช่น ชิ้นส่วนทางโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนอาคาร ซึ่งสามารถลดหน้าตัดให้มีขนาดเล็กลง และประหยัดในการขนส่ง เพิ่มความปลอดภัยในการติดตั้งและง่ายต่อการออกแบบรอยเชื่อมต่องานซ่อมแซมที่ต้องการกำลังสูงในระยะเวลาสั้น ๆ เช่น การซ่อมพื้นถนนหรือซ่อมแซมพื้นสะพาน ที่มีปริมาณการจราจรสูง เช่น กำหนดให้กำลังคอนกรีตที่เปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีการสัญจรได้ที่ 270 กก./ซม$^2$ ถ้าใช้คอนกรีตกำลังสูง จะใช้เวลาเพียงแค่ 12-24 ชั่วโมง เท่านั้น อีกทั้งให้ความคงทนในระยะยาวดีขึ้นด้วย การที่คอนกรีตให้กำลังสูงในระยะเวลาสั้นทำให้การถอดแบบหล่อคอนกรีตได้รวดเร็ว เช่น ถ้าใช้คอนกรีตธรรมดาทั่ว ๆ ไปต้องคอยให้คอนกรีตมีกำลังจึงจะทำการถอดแบบหล่อได้ ซึ่งกินเวลาเกินกว่า 14 วันถ้าใช้คอนกรีตกำลังสูงอาจทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ก็จะสามารถถอดแบบ ทำให้เป็นการประหยัดไม้แบบและทำให้ทำงานได้รวดเร็ว ดังนั้นเพื่อที่จะให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดในการใช้งาน เราควรที่จะศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ก่อน เพื่อจะนำไปเป็นพื้นฐานของการใช้ประโยชน์ของคอนกรีตที่ให้กำลังสูงมากในระยะเวลาอันสั้นต่อไป

## 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการทดลอง

### 1.3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ที่ผสมไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) เพื่อนำเอาไปเป็นพื้นฐานการใช้งานต่อไป สำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงในระยะเวลาสั้น ๆ และคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงมาก

### 1.3.2 ขอบเขตการทดลอง

ได้กำหนดขอบเขตการทดลองดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเดียวคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

2. ไมโครซิลิกาใช้ชนิดผง โดยใช้ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3. สารลดน้ำพิเศษชนิด Sulphonate Naphthalene Formaldehyde Condensates โดยใช้ร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4. คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมไมโครซิลิกา สารลดน้ำพิเศษ ที่ศึกษาได้แก่ ความข้นเหลวของซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาก่อตัว ความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์ กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ ความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์ กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎี

## 2.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซี่ยม และอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ไฮเดรชั่น (Hydration) ตำรับของชื่อปูนซีเมนต์ที่เรียกกันว่า "ปอรต์แลนด์" นี้ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปดิน โดยที่ในปี ค.ศ. 1824 เขาได้ทำการจดทะเบียนวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่ง ซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว และเมื่อนำมาบดจะได้เนื้อปูนซีเมนต์มีสีเหลือง-เทา คล้ายกับหินในเกาะของเมืองบอร์ตแลนด์ประเทศอังกฤษ เขาจึงตั้งชื่อว่าปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ในตอนแรกนี้ยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้หินปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวไม่ดี

ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุด ในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน โดยที่เมื่อผสมกับ หิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นและถนน เมื่อเสริมด้วยเหล็กเสริมจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพานอาคาร อุโมงค์ และอื่น ๆ หรือ เมื่อผสมรวมกับทรายและปูนขาวจะเป็นปูนฉาบสำหรับการก่ออิฐ และหิน เป็นต้น

### 2.1.1 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland Cement)

วัตถุดิบ วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ประกอบด้วย สารออกไซด์ของธาตุคัลเซี่ยม ซิลิกอน เหล็ก และอลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

วัตถุดิบที่ใช้นี้อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ให้ธาตุคัลเซี่ยม ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพอง (Chalk) ดินปูนขาว (Marl) และ ประเภทที่ให้ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม ได้แก่ หินเชล (Shale) ดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบอย่างอื่นอีก อาทิเช่น

(ก) แร่เหล็ก (Iron Ore) ใช้เพื่อเพิ่มปริมาณเหล็กให้ได้ตามต้องการในกรณีที่หินเชลหรือดินเหนียวที่ใช้มีปริมาณของเหล็กต่ำ

(ข) ยิบซั่ม (Gypsum) ใช้เพื่อเป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา

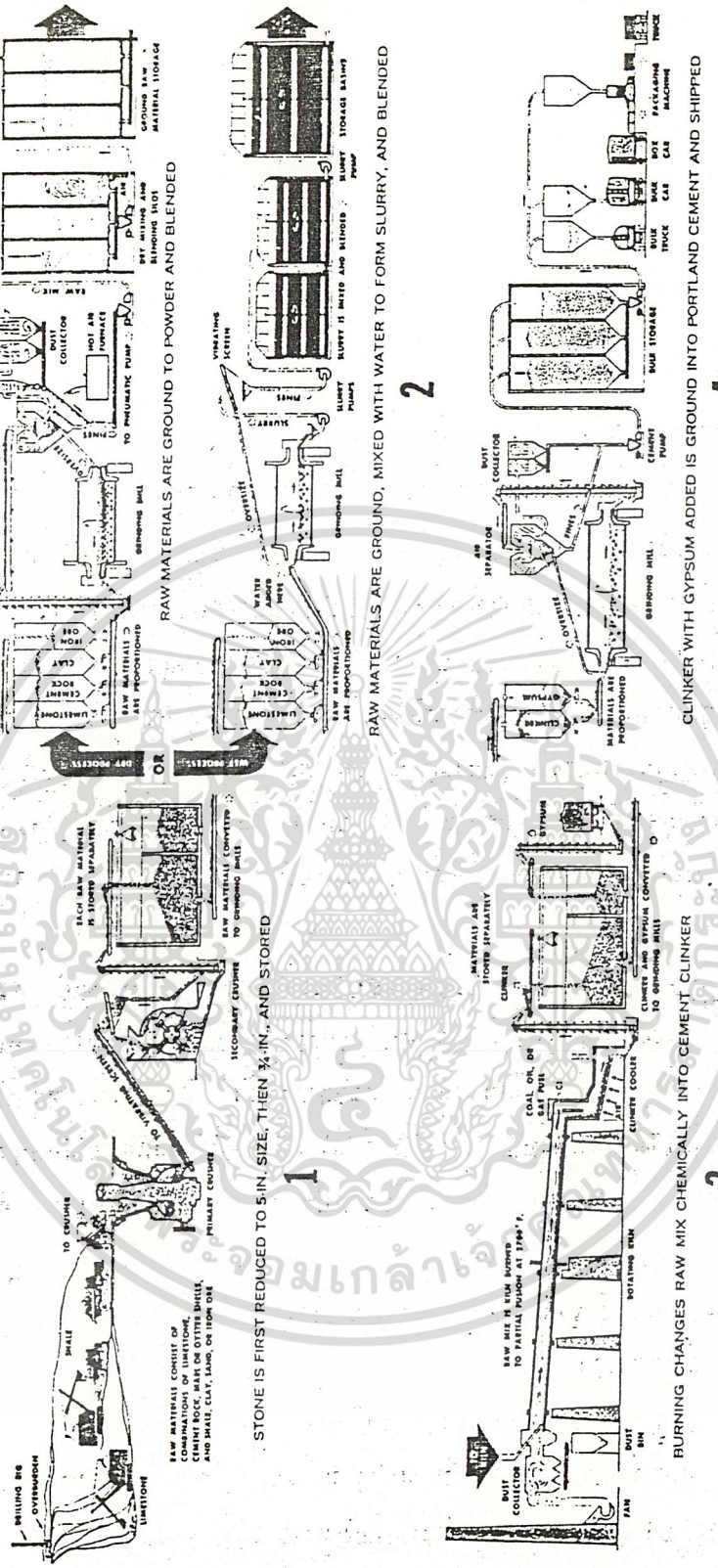
ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์

| ออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ | เปอร์เซ็นต์ |
|---|---|
| ปูนขาว ($CaO$) | 60-65 |
| ซิลิกา ($SiO_2$) | 20-24 |
| อลูมิน่า ($Al_2O_3$ | 4-8 |
| เหล็ก ($Fe_2O_3$) | 2-5 |

**กรรมวิธีผลิต**

กรรมวิธีในการผลิตเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) หรือการผลิตแบบเปียก (Wet Process) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กล่าวคือ วัตถุดิบก่อนการเผาอาจให้ผ่านกระบวนการแห้งหรือเปียก ในกระบวนการแห้งวัตถุดิบได้รับการบดและการผสมเปียก การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าเตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติหรือมีความชื้นอยู่น้อย ก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผาแล้วจึงนำไปบดและผสมกันในภาวะแห้งได้โดยมีราคาการผลิตต่ำซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการแห้งเสียค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ดีถ้าส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียก ค่าใช้จ่ายในการทำให้วัตถุดิบแห้งในกระบวนแห้งจะเพิ่มขึ้นและอาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการเปียก ในด้านการควบคุมส่วนประกอบของวัตถุดิบทางเคมี กระบวนการทั้งสองจะไม่แตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.1 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างกันนัก กระบวนการเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่า แต่ในการปรับแรงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปอรด์แลนด์ซีเมนต์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการแบบแห้งสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการเปียก

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้วส่วนผสมนี้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) เตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุด ทำงานตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่มีการหยุดพัก เตาเผาส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้แบบเตาหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50 ถึง 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 4 เมตร ภายในบุด้วยอิฐทนไฟ หมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้า ๆ ประมาณ 1.3 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1400-1500° C วัตถุดิบที่ผสมและถูกเผาแล้วจะกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา

สีและรูปร่างของปูนเม็ดจะบ่งบอกถึงการเผาว่าเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ถ้าเผาได้ที่ดีปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุด ๆ ก้อนใหญ่ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มม. (1 นิ้ว) ปูนเม็ดที่ยังเผาไม่ได้ที่จะมีสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลเป็นหย่อม ๆ ไม่เป็นมันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว ปูนเม็ดที่เผาเกินพอจะมีสีน้ำตาลแข็งเป็นหย่อม ๆ การเผาเกินพอไม่เป็นการเสียหายแต่อย่างใด เพียงแต่สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ดทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอมีความแข็งมาก

ปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผาจะร้อนมาก ต้องได้รับการลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนนำไปบด การลดอุณหภูมิกระทำโดยใช้เครื่องทำให้เย็น (Clinker Cooler) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหมุน (Rotary Cooler)หรือแบบตะแกรงการทำให้ปูนเม็ดเย็นลงนั้นจะต้องมีการควบคุมอย่างดีเพราะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นตัวเร็วจะบดง่าย และความแข็งแรงภายใน 7 วันดีขึ้น แต่ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ ความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น ปูนเม็ดที่เย็นตัวแล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Cement Mill) ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้หมด ปูนซีเมนต์ที่บดแล้วนี้ จะมียิบซั่มผสมอยู่ด้วยประมาณ 5% เพื่อทำให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวช้าลงเมื่อผสมกับน้ำ เพราะถ้าไม่มียิบซั่มแล้วปูนซีเมนต์นี้จะก่อตัวเร็วเกินไป จนไม่มีเวลานานพอที่จะเอาไปเทลงในแบบได้เมื่อได้ผสมกับน้ำปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่า จะก่อตัวและให้กำลังความแข็งแรงได้เร็วกว่า ส่วนปูนซีเมนต์ที่หยาบอาจทำให้เกิดการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด ปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ได้นี้จะถูกนำไปเก็บไว้ในถังทรงกระบอกใหญ่ตั้ง มีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้นเพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป ในประเทศไทยจะบรรจุในถุงกระดาษมีเนื้อปูนจริง 50 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่ง ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุคัลเซี่ยม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์หลังจากการเผาแล้วได้แก่ ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต (Tricalcium silicate) ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต (Dicalcium silicate) ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) และเทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite) ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งได้ให้ชื่อย่อของสารประกอบเหล่านี้ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้ชื่อย่อของออกไซด์ของธาตุใดด้วยอักษรของธาตุนั้นเพียงตัวเดียว กล่าวคือ CaO ย่อเหลือตัว C; $SiO_2$ ย่อเหลือตัว S; $Al_2O_3$ ย่อเหลือตัว A; $Fe_2O_3$ ย่อเหลือตัว F

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์

| ชื่อของสารประกอบ | ส่วนประกอบทางเคมี | ชื่อย่อ |
|---|---|---|
| ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต | $3\ CaO.\ SiO_2$ | $C_3S$ |
| ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต | $2\ CaO.\ SiO_2$ | $C_2S$ |
| ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต | $3\ CaO.\ Al_2O_3$ | $C_3A$ |
| เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ | $4\ CaO.\ Al_2O_3.\ Fe_2O_3$ | $C_4AF$ |

นอกจากนี้แล้วยังมีสารประกอบอื่น ๆ อีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น MgO, $TiO_2$, $Mn_2O_3$, $K_2O$ และ $Na_2O$ ซึ่งปะปนอยู่เป็นจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์

จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบเหล่านี้ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่ง ๆ ไม่เท่ากัน ประเภทของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับจำนวนของสารประกอบเหล่านี้ สารประกอบ $C_3S$ ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็ว สารประกอบ $C_2S$ ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงในระยะหลัง สารประกอบ $C_3A$ ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็ว สารประกอบ $C_4AF$ ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงในระยะหลัง และยิบซั่มเป็นตัวหน่วงเวลาให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวและแข็งตัวตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

จำนวนของสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป เช่นทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น

สารประกอบไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต ($C_3S$) และไดคัลเซี่ยมซิลิเกต ($C_2S$) ซึ่งผสมรวมกันเป็นปริมาณเท่ากับ 70-80% ของปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด จะเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ กล่าวคือ ถ้ามี $C_3S$ ผสมอยู่มากและมี $C_2S$ ผสมอยู่น้อย จะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีความแข็งแรง หรือกำลังสูงในระยะแรก (High-early Strength) และให้ปริมาณความร้อนมาก แต่ในทางตรงข้ามถ้ามี $C_2S$ ผสมอยู่มาก และมี $C_3S$ อยู่น้อย จะได้ปูนซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงหรือกำลังช้า และปริมาณความร้อนน้อย สารประกอบไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต ($C_3A$) จะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ตลอดจนความร้อนที่เกิดขึ้น ถ้าปูนซีเมนต์มี $C_3A$ ผสมอยู่น้อย ความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำก็จะน้อย แต่ช่วยให้ได้คอนกรีตมีกำลังอัดประลัยสูงกว่า มีรอยแตกร้าว (cracking) น้อยกว่า มีความคงทนต่อปฏิกิริยาของกรด และเกลือซัลเฟตดีกว่า ปูนซีเมนต์ที่มี $C_3A$ ผสมอยู่มาก

ถ้ามีปริมาณของปูนขาว (CaO) อยู่ในปูนซีเมนต์มาก จะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีระยะเวลาการก่อตัวช้า (Slow-setting) แต่จะได้ปูนซีเมนต์ที่มีกำลังสูงในระยะแรก ถ้าหากมีปริมาณของปูนขาวนี้มากเกินไปจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีความไม่คงตัว (Unsoundness)

ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของซิลิกา $SiO_2$ (Silica) และอลูมิน่า $Al_2O_3$ (Alumina) อยู่มากจะเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูง แต่ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของซิลิกามากเพียงอย่างเดียว จะเป็นปูนซีเมนต์ที่มีระยะเวลาการก่อตัวช้า ซึ่งตรงกันข้ามกับปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของอลูมิน่ามากซึ่งทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น

ออกไซด์ของเหล็ก $Fe_2O_3$ (Iron oxide) รวมกับปูนขาวและซิลิกาจะมีประโยชน์ต่อปูนซีเมนต์ที่มีซิลิกาสูง คือ ทำให้ปริมาณของไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนตลดลง แต่ปูนเม็ดที่มี $Fe_2O_3$ มากเกินไปจะแข็งทำให้บดยากขึ้น

ถ้ามีปริมาณของแมกนีเซีย (Magnesia) อยู่มากในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ จะทำให้เกิดความไม่คงตัว (Unsoundness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (ม.อ.ก.15) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 5 ประเภทคือ

**ประเภทที่หนึ่ง** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือในที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือที่ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัว จะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตราย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

**ประเภทที่สอง** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนา ๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพานเป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราพญานาคเจ็ดเศียร

**ประเภทที่สาม** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High - early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนและโดยการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้เร็ว หรือรื้อแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์ ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง และตราสามเพชร

**ประเภทที่สี่** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low - Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ซึ่งปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหลาเช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัว

**ประเภทที่ห้า** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate - Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราปลาฉลาม

ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทดังกล่าวข้างต้นอาจมีทั้งชนิดกระจายก๊กฟองอากาศ หรือไม่กระจายก๊กฟองอากาศ ปูนซีเมนต์ชนิดกระจายก๊กฟองอากาศจะมีสารสำหรับกระจายก๊กฟองอากาศผสมอยู่ด้วย ซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในเนื้อคอนกรีตมาก ทำให้ทนความเย็นได้ดี นอกจากนี้ยังทำให้ใช้น้ำผสมน้อยลง เพราะมีฟองอากาศอยู่ด้วยช่วยให้เทง่าย เป็นผลให้กำลังคอนกรีตดีตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
033348

ไปด้วย สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกันให้ข้อกำหนดสำหรับปูนซีเมนต์ชนิดกระจายกักฟองอากาศ 3 ประเภทคือ ประเภท IA, IIA และ IIIA ซึ่งตรงกับประเภทที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทต่าง ๆ

| สารประกอบ | ประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | หนึ่ง | สอง | สาม | สี่ | ห้า |
| ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต : $C_3S$ | 49 | 46 | 56 | 30 | 43 |
| ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต : $C_2S$ | 25 | 29 | 15 | 46 | 36 |
| ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต : $C_3A$ | 12 | 6 | 12 | 5 | 4 |
| เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ : $C_4AF$ | 8 | 12 | 8 | 13 | 12 |

2.1.5 <u>ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทอื่น</u>

**ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์กากเตาถลุง** (Portland-blastfurnance Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำขึ้นโดยการบดเม็ดตะกรันเตาถลุง (blastfurnance slag) กับ ปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดาเข้าด้วยกันจนเป็นผงละเอียด และ มียิบซั่มผสมอยู่ด้วยจำนวนหนึ่ง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความแข็งแรง หรือ กำลังในระยะแรกเท่ากันกับ ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดา (ประเภทหนึ่ง) แต่ในระยะหลังอาจจะสูงกว่าเล็กน้อย เหมาะสำหรับใช้กับงานก่อสร้างทั่วไป ประเภทเดียวกันกับปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดา หากแต่ราคาถูกกว่า

**ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ปอซโซลานา** (Portland pozzolana Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ธรรมดากับสารจำพวกปอซโซลานิก (Pozzolanic) ปอซโซลาน (Pozzolan) ที่ใช้อาจได้มาจากธรรมชาติ หรือเป็นวัสดุทำเทียม ประกอบด้วยซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ สัดส่วนของปอซโซลานที่ใช้อยู่ระหว่าง 15-50 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์สำเร็จรูป ดังนั้นราคาจึงถูกกว่า ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ปอซโซลานาให้คอนกรีตที่มีการขยายตัวน้อยแต่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บน้ำสูง ให้ความร้อนในการรวมตัวกับน้ำต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดา จึงเหมาะสำหรับการก่อสร้างคอนกรีตหลา มีอัตราการเกิดความแข็งแรงช้า เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ แต่ความต้านแรงอัดจะเท่ากับของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดา นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบพวกซัลเฟตได้ดีอีกด้วย จึงเหมาะสำหรับงานอาคารคอนกรีตในทะเล

**ปูนซีเมนต์อลูมิน่าสูง** (High Alumina Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากการหลอมส่วนผสมของหินปูนหรือชอล์คกับสารที่มีอลูมิน่ามาก เช่น บอกไซท์ (Bauxite) จนกลายเป็นปูนเม็ดแล้วบดให้ละเอียด ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังเร็ว แต่ให้ความร้อนมาก คอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีความแข็งแรงภายในเวลา 24 ชั่วโมง จนถึงประมาณ 2 เท่าของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดา นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบพวกซัลเฟตอีกด้วย จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นคอนกรีตในน้ำทะเลและในที่ต้องการความแข็งแรงในเวลาสั้น

**ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง** (Super-sulphated Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดส่วนผสมของเม็ดตะกรันเตาถลุง คัลเซียมซัลเฟต และปูนซีเมนต์หรือปูนเม็ดเข้าด้วยกัน มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเลและสารพวกซัลเฟตได้เป็นอย่างดี และยังทนทานต่อกรดและน้ำมัน นอกจากนี้ยังให้ปริมาณความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับน้ำต่ำอีกด้วย

**ปูนซีเมนต์ขยายตัว** (Expanding Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดส่วนผสมของปูนเม็ด ยิบซั่มและเม็ดตะกรันเตาถลุงให้เข้ากันทั่วถึง แตกต่างจากปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ ตรงที่เมื่อก่อตัว และแข็งตัวมันจะขยายตัวออกก่อน เป็นการลดรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากการหดตัวของคอนกรีต

**ปูนซีเมนต์งานก่อ** (Masonry Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดากับสารอื่น ๆ เช่น ยิบซั่ม ฝุ่นปูนขาว ดินสอพอง ดิน ทาล์ค (talc) เป็นต้น เพื่อให้ได้ปูนก่อที่มีคุณสมบัติปั้นง่ายและมีความแข็งแรงเหมาะสำหรับงานก่อหิน ก่ออิฐ

**ปูนซีเมนต์ซิลิกา** (Silica Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ธรรมดากับทรายประมาณ 25-30% ปริมาณเนื้อซีเมนต์จึงมากขึ้นและมีราคาถูกลง มีลักษณะแข็งตัวช้า ไม่ยืดหรือหดตัวมาก เหมาะกับงานก่ออิฐถือปูน ทำถนน เทพื้น ตอม่อ หล่อภาชนะคอนกรีต หล่อท่อ กระเบื้องมุงหลังคา งานอาคาร 2 ถึง 3 ชั้น ตึกแถว หรืองานที่ไม่ต้องการกำลังมาก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า และตรานกอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ผลิตเสร็จแล้วจะต้องมีคุณภาพสม่ำเสมอและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดคุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี

| | ประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | หนึ่ง | สอง | สาม | สี่ | ห้า |
| 1. ซิลิกอนไดออกไซด์ ($SiO_2$) ต่ำสุด ร้อยละ | | 21.0 | | | |
| 2. อลูมินัมออกไซด์ ($Al_2O_3$) สูงสุด ร้อยละ | | 6.0 | | | |
| 3. เฟอร์ริกออกไซด์ ($Fe_2O_3$) สูงสุด ร้อยละ | | 6.0 | | 6.5 | |
| 4. มักเนเซียมออกไซด์ (MgO) สูงสุด ร้อยละ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| 5. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ($SO_3$) สูงสุด ร้อยละ | | | | | |
| 5.1 เมื่อมี 3 CaO. $Al_2O_3$ ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า | 2.5 | 2.5 | 3.0 | 2.3 | 2.3 |
| 5.2 เมื่อมี 3 CaO. $Al_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 8 | 3.0 | | 4.0 | | |
| 6. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on igition) สูงสุด ร้อยละ | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2.5 | 3.0 |
| 7. กากที่ไม่ละลายในด่าง (insoluble residue) สูงสุด ร้อยละ | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 8. ไตรคัลเซียมซิลิเกต (3 CaO. $SiO_2$) สูงสุด ร้อยละ | | | | 35.0 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

| | ประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | หนึ่ง | สอง | สาม | สี่ | ห้า |
| 9. ไดคัลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) สูงสุด ร้อยละ | | | | 40.0 | |
| 10. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) สูงสุด ร้อยละ | | 8.0 | 15.0 | 7.0 | 5.0 |
| 11. ผลบวกของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไตรคัลเซียมอลูมิเนต สูงสุด ร้อยละ | | 58.0 | | | |
| 12. เทตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ บวกสองเท่า ไตรคัลเซียมอลูมิเนต [$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3+2(3CaO.Al_2O_3)$] หรือสารละลายแข็ง[$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3+2\ CaO.Fe_2O_3$] แล้วแต่กรณี สูงสุด ร้อยละ | | | | | 20.0 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์

| | ประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | หนึ่ง | สอง | สาม | สี่ | ห้า |
| 1. ความละเอียด (fineness) พื้นผิวจำเพาะ (specific surface) ซม²/กรัม (ให้เลือกวิธีทดสอบได้) | | | | | |
| 1.1 ทดสอบด้วยเทอร์บิดิมิเตอร์ (turbidimeter test, Wagner) | | | | | |
| ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ซม²/กรัม | 1600 | 1600 | | 1600 | 1600 |
| ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ซม²/กรัม | 1500 | 1500 | | 1500 | 1500 |
| 1.2 ทดสอบด้วยแอร์เพอมีอะบิลิตี (air permeability test, Blaine) | | | | | |
| ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ซม²/กรัม | 2800 | 2800 | | 2800 | 2800 |
| ค่าต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ซม²/กรัม | 2600 | 2600 | | 2600 | 2600 |
| 2. ความอยู่ตัว (soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (autoclave expansion) สูงสุด ร้อยละ | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| 3. ระยะเวลาก่อตัว (time of setting) (ให้เลือกทดสอบได้) | | | | | |
| 3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์(Gillmore test) การก่อตัวระยะต้น (initial set) ไม่น้อยกว่า-นาที | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

| | ประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | หนึ่ง | สอง | สาม | สี่ | ห้า |
| การก่อตัวระยะปลาย (final set) | | | | | |
| ไม่น้อยกว่า-ชั่วโมง | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 3.2 ทดสอบแบบไวแคต (Vicat test) | | | | | |
| การเริ่มก่อตัว ไม่น้อยกว่า-นาที | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| 4. ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ (air content of mortar) | | | | | |
| เมื่อเตรียมและทดสอบตามวิธีมาตรฐาน | | | | | |
| โดยบริมาตรสูงสุด ไม่มากกว่าร้อยละ | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 5. แรงอัด (compressive strength) | | | | | |
| แรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์ (mortar cube) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด (graded standard sand) 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก เตรียมและทดสอบ ตามวิธีมาตรฐาน ต้องเท่ากับหรือมากกว่า ค่าที่กำหนด ตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้ | | | | | |
| 1 วันในอากาศชื้น กก./ซม² | | | 120 | | |
| 1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ กก./ซม² | 85 | 70 | 210 | | |
| 1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ กก./ซม² | 150 | 130 | | 55 | 105 |
| 1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ กก./ซม² | 245 | 245 | | 140 | 210 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

| | ประเภท | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | หนึ่ง | สอง | สาม | สี่ | ห้า |
| 6. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (heat of hydration) | | | | | |
| 7 วัน สูงสุด แคลอรี่ต่อกรัม | | | 70 | | |
| 28 วัน สูงสุด แคลอรี่ต่อกรัม | | | 80 | | |
| 7. การก่อตัวผิดปกติ (false set) ระยะจมสุดท้าย (final penetration) | | | | | |
| สูงสุด ร้อยละ | 50 | 50 | 50 | 50 | |
| 8. การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต (sulfate expansion) | | | | | |
| 14 วัน สูงสุด ร้อยละ | | | | | 0.045 |

2.1.7 <u>ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น</u> (Hydration)

เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ผลผลิตที่สำคัญได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate. CSH) ประมาณ 50-70% แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluiminate Hydrate, CAH) ประมาณ 10% และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ประมาณ 20-25% ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขยายภายในช่องว่างที่มีอยู่ การเกิดช่องว่างที่มีเนื้อที่จำกัดทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีรูปร่างต่าง ๆ ตามช่องว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลึกที่ไม่แข็งแรงเป็นตัวถูกทำลายได้ง่าย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารปอซโซลานสามารถเพิ่มการทำปฏิกิริยากันและลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้คุณสมบัติหลายด้านของคอนกรีตดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คอนกรีตกำลังสูงมาก

โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด 400-600 กก./ซม² จัดว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูง ถ้าคอนกรีตที่กำลังรับแรงเกินกว่า 600 กก./ซม² จัดว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก คอนกรีตกำลังสูงมากจะให้ค่าการคืบและการหดตัวน้อยและมีความทนทานสูงเป็นพิเศษ

คอนกรีตโดยทั่ว ๆ ไป เมื่อรับน้ำหนักถึงจุดประลัย ส่วนที่เป็นมอร์ตาร์จะแตก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก กำลังของมอร์ตาร์จะสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงกับหิน นั่นคือเมื่อคอนกรีตกำลังสูงมากรับน้ำหนักถึงจุดประลัย ลักษณะการแตกของคอนกรีตจะแตกผ่านหิน เพราะฉะนั้นในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงมาก จะแยกพิจารณา 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นหิน และส่วนที่เป็นมอร์ตาร์

ก) หินที่ใช้ในการผสมคอนกรีตกำลังสูงมาก ตามปกติหินที่มีขนาดใหญ่จะต้องการน้ำในการผสมน้อยลง แต่ถ้าเป็นหินที่ได้จากโรงโม่หินขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิด Microcrack มาก ซึ่งจะทำให้กำลังของคอนกรีตตกไป ควรเลือกใช้หินขนาดเล็ก เช่น 1/2" หรือ 3/8"

ข) มอร์ตาร์ของคอนกรีตกำลังสูงมากมีหลายประเภทด้วยกัน เช่น

1) ประเภทที่ให้สารที่มีกำลังสูงซึมเข้าไปแทรกในช่องว่างอากาศในเนื้อคอนกรีต เช่น Polymer Impregnates Concrete, Sulphur Impregnates Concrete

2) ประเภทที่มีตัวเชื่อมที่มีกำลังสูง เช่น Epoxy Modified Concrete, Latex Concrete, Polymer Concrete

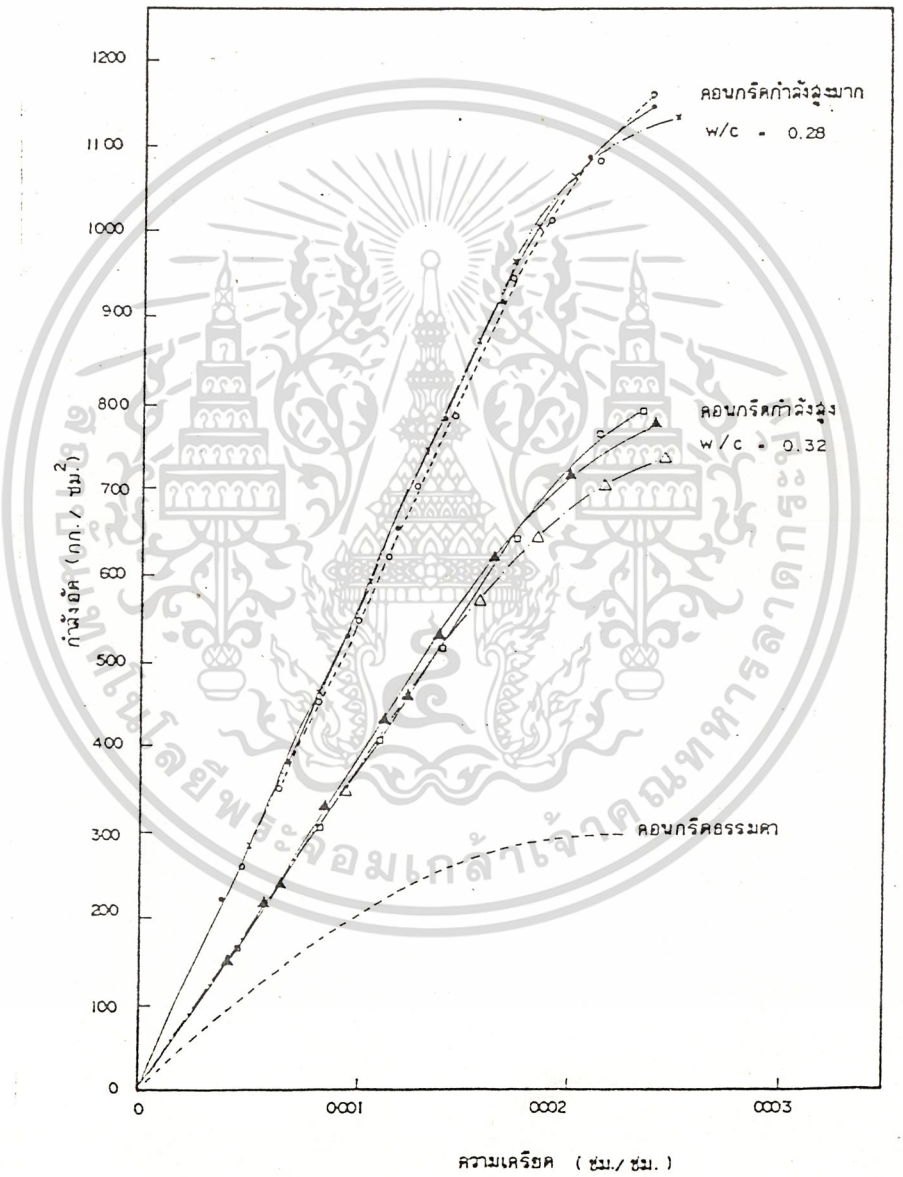
3) ประเภทที่ผลิตโดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้น้อยลง โดยการใช้สารผสมเพิ่มลดน้ำพิเศษและการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ไมโครซิลิกา ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าลอย ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดประสาน และทำให้กำลังสูงขึ้น

2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงมาก

เอกสิทธิ์ (2532) ได้รายงานผลการทดลอง ซึ่งได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด และความเครียดของคอนกรีตกำลังสูงมากพิเศษ และคอนกรีตกำลังสูงมากธรรมดา จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงกราฟระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด พบว่าลักษณะของกราฟทั้งสองคล้ายกัน คือในช่วงแรกของกราฟจะเป็นเส้นตรงไปถึง 85 ถึง 90% ของความสูง แล้วจึงเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงเพียงเล็กน้อยแล้วจะแตกกระจายที่มีความเครียดประมาณ 0.0025 ความชันของกราฟจะแตกต่างตามกำลังสูงสุดของคอนกรีต จากลักษณะคุณสมบัติอันนี้พอจะสรุปได้ว่าคอนกรีตกำลังสูงมากเป็นวัสดุอิลาสติก และหน่วยแรงอัดแปรผันตรงกับความเครียด โดยเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงแรก จึงเป็นการง่ายต่อการหาโมดูลัสยืดหยุ่น โดยโมดูลัสคอนกรีตกำลังสูงพิเศษให้ค่าเฉลี่ยประมาณ $5.70 \times 10^3$ กก./ซม$^2$ และ $3.90 \times 10^5$ กก./ซม$^2$ สำหรับคอนกรีตกำลังสูงในด้านของกำลังรับแรงอัด ซึ่งใช้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน กลุ่มที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.32 ให้กำลังรับแรงอัดเพียง 790 กก./ซม$^2$ และจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงด้วยวิธีดึงแตกกระจาย (Splitting Tensile Strength) พบว่ากำลังดึงจะมีค่าประมาณ 10% ของกำลังรับแรงอัด




รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตกำลังสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

มาตรฐาน ASTM C125 ได้ให้คำนิยามของสารผสมเพิ่มว่า เป็นสารใด ๆ นอกเหนือจาก น้ำ ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ไม่ว่าจะก่อนหรือขณะกำลังผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติตามต้องการไม่ว่าจะเป็นขณะที่ยังเหลวอยู่หรือแข็งตัวอยู่แล้ว

สารผสมเพิ่มมีหลายชนิดที่ใช้ แต่ที่นิยมใช้กันคือ สารเคมีผสมเพิ่ม Prior และ Adams (1959) รายงานว่าสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Tucker, Winkler และ Scripture ต่อมามีการวิจัยและทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารผสมเพิ่ม ที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างกว้างขวาง เป็นผลให้การใช้สารเคมีผสมเพิ่มเป็นที่แพร่หลาย

สารผสมเพิ่มนั้นแบ่งได้ตามชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบของสารเคมี หรือแบ่งตามลักษณะประโยชน์ของการใช้งาน มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งประเภทของสารผสมออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1) สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) เป็นสารประกอบเคมีที่ละลายน้ำได้ ใช้สำหรับลดความต้องการน้ำ และปรับเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต มาตรฐาน ASTM C 494-86 ได้จำแนกสารเคมีผสมเพิ่มออกเป็น 7 ประเภทดังนี้

ก. ประเภท A สารลดน้ำ (Water-Reducing Admixtures)

ข. ประเภท B สารหน่วงการก่อตัว (Retarding Admixtures)

ค. ประเภท C สารเร่งการก่อตัว (Accelerating Admixtures)

ง. ประเภท D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water-Reducing and Retarding Admixtures)

จ. ประเภท E สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water-Reducing and Accelerating Admixtures)

ฉ. ประเภท F สารลดน้ำพิเศษ (Water-Reducing, High Range Admixtures)

ช. ประเภท G สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว (Water-Reducing, High Range and Retarding Admixtures)

2) สารประเภทแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixtures) มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้สำหรับทำให้ความสามารถทำงานได้และความคงทนดีขึ้น แบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

ก. วัสดุที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Materials of Low Reactivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. วัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Materials)

ค. วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)

3) สารกระจายก๊กฟองอากาศ (Air-Entraining Agents) ใช้ในการเพิ่มความคงทนของคอนกรีตต่อสภาพอากาศที่เย็นจัด

4) สารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ (Miscellaneous Admixtures) สารผสมเพิ่มอื่นๆที่ไม่อยู่ในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง ที่กล่าวมาแล้ว เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้เพื่อจุดประสงค์โดยเฉพาะ เช่น สารผสมเพิ่มการยึดเกาะ สารผสมเพิ่มกันซึม และสารผสมเพิ่มอุดรูโพรงคอนกรีต

## 2.5 สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษ หรือ Superplasticizer ได้มีการค้นพบครั้งแรกในปี 1938 โดย W.R Grace และได้มีการพัฒนาเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงปี 1964 ได้มีการนำมาใช้ในเชิงธุรกิจ โดยเริ่มแรกในประเทศเยอรมัน และญี่ปุ่น ในปี 1972 เริ่มใช้ในประเทศอังกฤษและเริ่มใช้ในอเมริกา ปี 1976 สารลดน้ำพิเศษมีพฤติกรรมคล้ายกับสารลดน้ำธรรมดาคือช่วยลดแรงระหว่างอนุภาคเม็ดซีเมนต์ในเพสต์สด ต่างจากสารลดน้ำทั่วๆ ไปคือ จะไม่มีผลต่อแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำ ดังนั้นจึงทำให้ใช้สารลดน้ำพิเศษได้ในปริมาณสูง โดยไม่ทำให้เกิดฟองอากาศมาก (ACI Commitee, 1989) สารลดน้ำพิเศษที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

1) Sulphonate Napthalene Formaldehyde Condensates

ผลิตจากกรรมวิธีทางเคมี โดยใช้ Napthalene ($C_{10}H_8$) ผ่านขบวนการซัลโฟเนชัน (Sulphonation) ด้วยกรดซัลฟูลิก ($H_2SO_4$) จะได้สารประกอบของแนพทาลีนกับกรดซัลโฟนิก ($SO_3H$) และนำสารที่ได้ทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde,$CH_2O$) ได้สารประกอบชนิดใหม่ แล้วนำไปทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) แต่เนื่องจากสารประกอบชนิดใหม่นี้มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นกลุ่มกรดซัลโฟนิกจึงถูกทำลายให้เป็นกลาง (Neutralization) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้สารประกอบทางเคมีของเกลือ Sulphonate Napthalene Formaldehyde Condensates

2) Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensates

เป็นสารเคมีที่ได้จากกรรมวิธีทางเคมีโดยใช้เมลาไมน์ (Melamine,$C_3H_6N_6$) ทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ ได้สารประกอบของไตรเมทิรอลเมลาไมน์(Trimethyrolmelamine) แล้วนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับโซเดียมไบซัลไฟต์ (Sodium Bisulphite, $NaHSO_3$) ได้สารประกอบชนิดใหม่แล้วจึงนำไปทำการแปรสภาพโดยวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ได้เป็นสารประกอบของเกลือ Sulphonated Melamine Formaldehyde Condensates

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

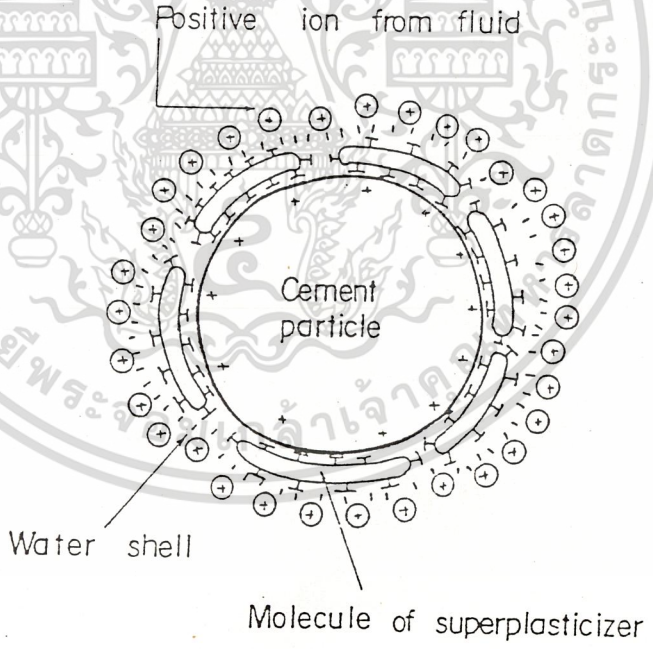
พฤติกรรมของสารลดน้ำพิเศษ เกิดจากการกระตุ้นที่ผิวทำให้ประจุไฟฟ้าไม่สมดุลย์ (Unbalanced Charge) สารลดน้ำพิเศษที่เติมลงไปก็จะหนีขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ โดยประจุลบจะถูกดูดไปอยู่ที่ผิวของเม็ดซีเมนต์ ทำให้เกิดประจุลบขึ้นรอบ ๆ เม็ดซีเมนต์ ยังผลให้เม็ดซีเมนต์ไม่รวมตัวกันเนื่องจากมีประจุเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (Heinz, 1983) สามารถลดแรงเสียดทานทำให้เพสต์มีความลื่นไหลสูง และเพิ่มพื้นที่ผิวของซีเมนต์ทำให้ปฏิกิริยามีมากขึ้น และเกิดแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดซีเมนต์กับมวลรวมมากขึ้น เป็นผลให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้น

ประโยชน์ของสารลดน้ำพิเศษคือ

1. ใช้ในการผลิตคอนกรีตไหล (Flowing Concrete) ที่มีค่าการยุบตัวสูงถึง 200 มม. หรือมากกว่านี้

2. ใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) ซึ่งทำให้ลดปริมาณน้ำได้ถึง 30% ในขณะที่ยังรักษาความสามารถทำงานได้เช่นเดิม

3. ใช้เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งลดได้อย่างน้อยที่สุด 10-20% ในขณะที่ยังคงรักษาความสามารถในการทำงานได้และกำลังของคอนกรีตยังคงเท่าเดิม

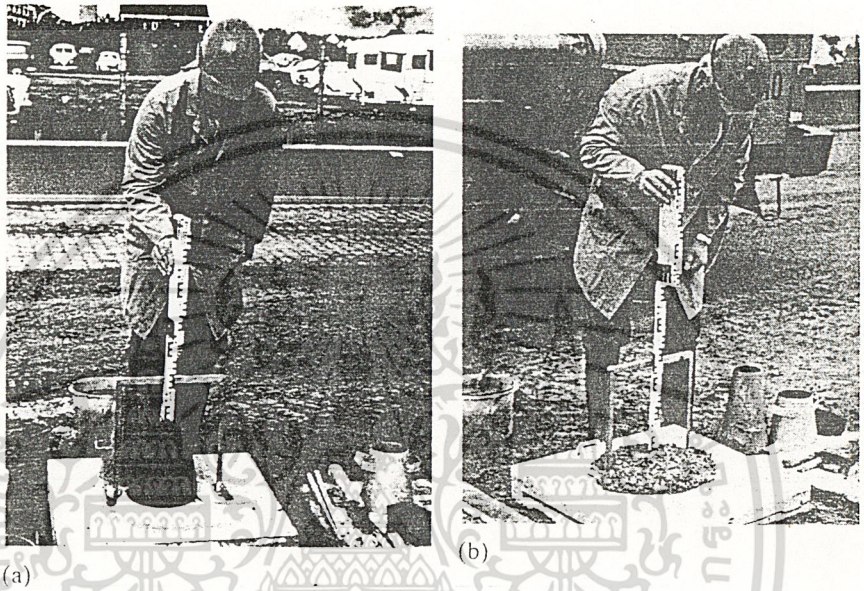



รูปที่ 2.3 แสดงประจุไฟฟ้าที่ล้อมรอบเม็ดซีเมนต์
เมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษ (Heinz, 1983)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 <u>คอนกรีตไหล</u> (Flowing Concrete)

โดยปกติคอนกรีตทั่วไป จะมีความเข้มข้นสูงและมีค่า slump ไม่เกิน 180 มม. และการแผ่กระจายบนโต๊ะควบคุมการไหลมากกว่า 50 ซม. ถ้าจะทำให้มีความสามารถใช้งานได้ง่าย ต้องเติมสารลดน้ำพิเศษให้ได้ slump 50-75 มม. ดังรูปที่ 2.4



(a) (b)

รูปที่ 2.4 (a) slump 50 มม. ก่อนการเติมสารลดน้ำพิเศษ
(b) slump ที่ยุบลง 100 มม. โดยทั่วไปใช้สำหรับคอนกรีตไหล

เนื่องจากลักษณะที่เป็นของเหลวของคอนกรีตไหล ทำให้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มการคายน้ำและแยกตัวออกจากกัน เมื่อผสมโดยทั่วไปที่ slump ช่วง 75-100 มม. และเพิ่มขึ้นไปไม่เกิน 180 มม. ดังนั้นการออกแบบส่วนผสมจึงมีความจำเป็นเพื่อปรับปรุงให้ส่วนผสมมีการยึดเกาะกันอย่างเพียงพอ โดยในการออกแบบส่วนผสมจะพิจารณา สิ่งเหล่านี้

1. ชนิดของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์และส่วนประกอบ
2. ส่วนประกอบที่ละเอียดของการผสม
3. คุณสมบัติของการรวมตัวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การแทนที่ slump สูงสุด

5. ปริมาณของการผสม พิจารณาจาก ชนิดของการผสม, ชนิดซีเมนต์, อุณหภูมิของคอนกรีต และ slump เริ่มต้น

6. ขั้นตอนในการผสม

ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 4 และ 5 ใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษผสมน้อยกว่าประเภทที่ 1 และ 3 ในการที่จะให้ได้ slump ที่ต้องการ และความละเอียดของปูนซีเมนต์อาจจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ slump และต่อระดับความแข็งแรงด้วย

ปูนซีเมนต์โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณน้ำมาก เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ และส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตไหลจะอยู่ในช่วง 270-350 กก./ม$^3$ ซึ่งลักษณะของส่วนผสมหยาบ เช่น รูปร่าง และ เนื้อความหยาบละเอียดควรจะนำมาใช้ในการพิจารณาด้วย ความจุของส่วนผสมประกอบด้วย การบดอัดหรือมุมการไหลซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากต่อสัดส่วนของความละเอียด และการลดขนาดการไหลสูงสุด ซึ่งโดยทั่วไปจะส่งเสริมลักษณะการไหลให้ดียิ่งขึ้น

ไม่ควรใช้คอนกรีตที่มี slump มากกว่า 220 มม. หรือการแผ่กระจายบนโต๊ะควบคุมการไหล มากกว่า 60 ซม. เพราะส่วนผสมจะแยกตัวออกจากกันและมีความเหลวมาก โดยเฉพาะเมื่อได้รับการสั่นสะเทือน หรือเมื่อมีการขนย้ายเกิดขึ้น

เนื่องจากการเปลี่ยนส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง ทำให้มีผลต่อความเข้มข้นของส่วนผสม เมื่อมีเติมสารลดน้ำพิเศษ โดยเฉพาะผู้ผลิตควรจะควบคุมปริมาณให้พอดีสำหรับการผลิตคอนกรีตไหล ส่วนประกอบซึ่งมีผลต่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เติม คือ อุณหภูมิของคอนกรีต, slump เริ่มต้น คือ slump ก่อนเติมสารลดน้ำพิเศษ, ชนิดของปูนซีเมนต์และส่วนประกอบ, การผสมตามธรรมดาก่อนแล้วจึงเติมสารลดน้ำพิเศษ และลำดับการเติมสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสม

ถ้าอุณหภูมิของคอนกรีตที่สูง, เนื้อปูนซีเมนต์ละเอียด, ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ที่สูง(มากกว่า 415 กก./ม$^3$) และ slump เริ่มต้นต่ำ จำเป็นต้องเติมสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมในปริมาณมากกว่ามาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้

การเติมสารกระจายก๊กฟองอากาศ, สารหน่วง หรือ สารลดน้ำในส่วนผสมจะทำให้ slump เพิ่มสูงขึ้น แต่อาจจะเกิดการคายน้ำและการแยกตัวออกจากกันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการรวมตัวของสารผสมทั้ง 2 ชนิดที่เติมลงไป ซึ่งปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่จะเกิดกับปูนซีเมนต์ชนิดต่ำและมีส่วนประกอบที่ละเอียด การควบคุมตัวแปรเหล่านี้จะทำให้เหมือนกับคุณสมบัติการแทนที่และการยึดเกาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตไหลอาจปรับปรุงโดยใช้เทคนิคคอนกรีตปั๊ม ซึ่งความสามารถทำงานได้จะสูงและจะมีการยึดเกาะกันที่ดีกว่าเดิม เหมือนกับการใช้สารลดน้ำพิเศษซึ่งทำให้คอนกรีตเทได้ดีในอัตราที่รวดเร็วและความดันในเส้นท่อต่ำ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงผลการผลิตโดยการผสมสารลดน้ำพิเศษในคอนกรีตปั๊ม

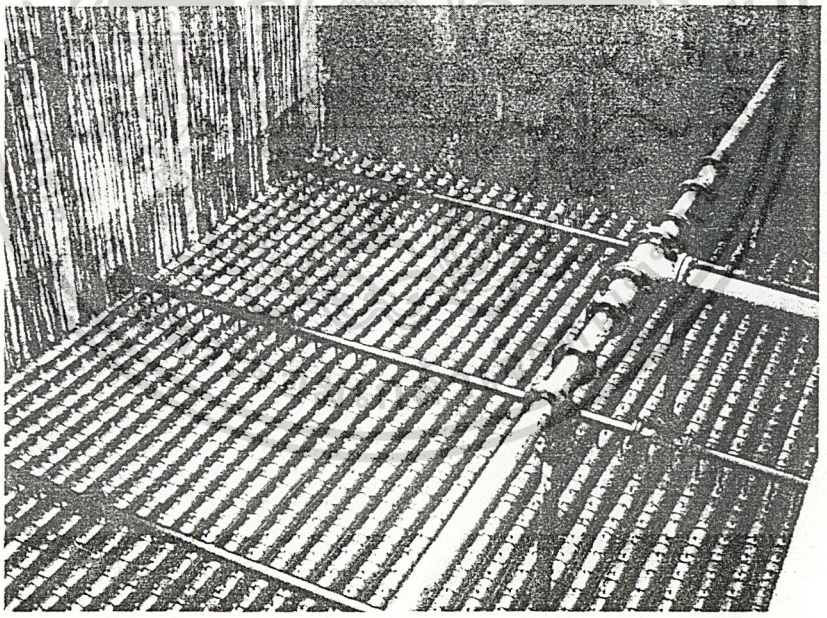
รูปที่ 2.5 การผสมสารลดน้ำพิเศษในคอนกรีตปั๊ม

คอนกรีตไหลสามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้ในการก่อสร้างแผ่นพื้น, แผ่นหลังคา และอ่างคอนกรีต ถ้าเป็นพื้นที่กว้าง ๆ และมีการเสริมเหล็กมาก ๆ หรือรูปร่างภายนอกแบบหล่อที่ทำให้หดตัวจะทำให้ใช้เวลามากและค่าแรงสูง ดังนั้นถ้าใช้ส่วนผสมที่มีความคล่องตัวสูงมาแทนที่ เช่น คอนกรีตไหล จะทำให้ช่วยลดเวลาและค่าแรงลง ข้อได้เปรียบของการผสมในส่วนผสมเหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงการก่อสร้างชั้นพื้นดินของอ่างเก็บน้ำโดยใช้ท่อพลาสติกทำให้หมดปัญหาเกี่ยวกับทางเข้าของเครื่องสั่นบดธรรมดาที่เข้าไปทำงานได้ยาก และลดความเสียหายที่จะเกิดกับท่อ โดยที่คอนกรีตที่ใช้มีความสามารถทำงานได้สูงงานได้จะไหลไปรอบ ๆ ท่อซึ่งจะทำให้มีทั้งความเร็วและมีประสิทธิภาพในการเท ซึ่งตารางที่ 2.6 แสดงส่วนผสมที่ใช้และผลที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดส่วนผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตไหล

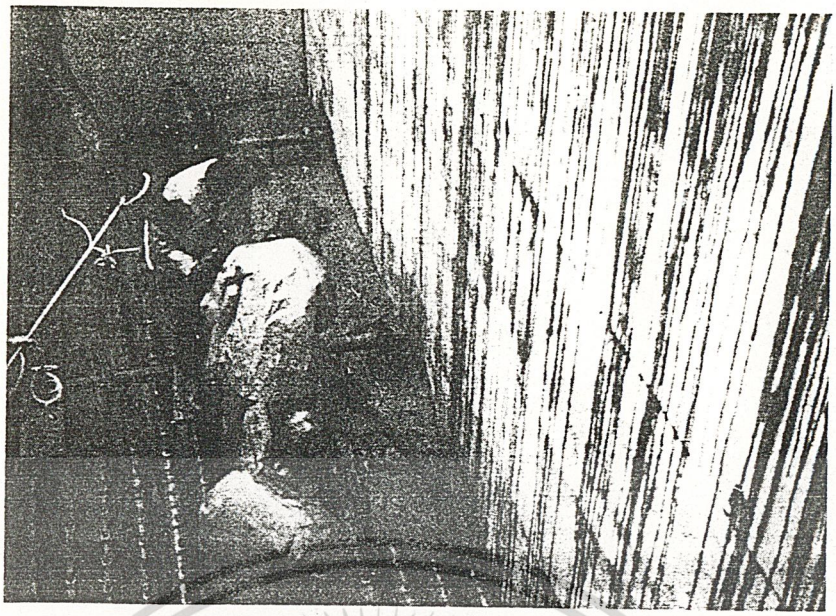
| | | | |
|---|---|---|---|
| ปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ธรรมดา | (กก./ม$^3$) | = | 350 |
| หินปูนบดขนาด 10 มม. | (กก./ม$^3$) | = | 1009 |
| ส่วนที่ 2 ทรายทะเล | (กก./ม$^3$) | = | 925 |
| อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ | | = | 0.52 |
| slump ก่อนเติมสารผสม | (มม.) | = | 50 |
| กำลังรับแรงอัด (นิวตัน/มม$^2$) | ที่ 7 วัน | = | 23.0 |
| | 28 วัน | = | 28.0 |



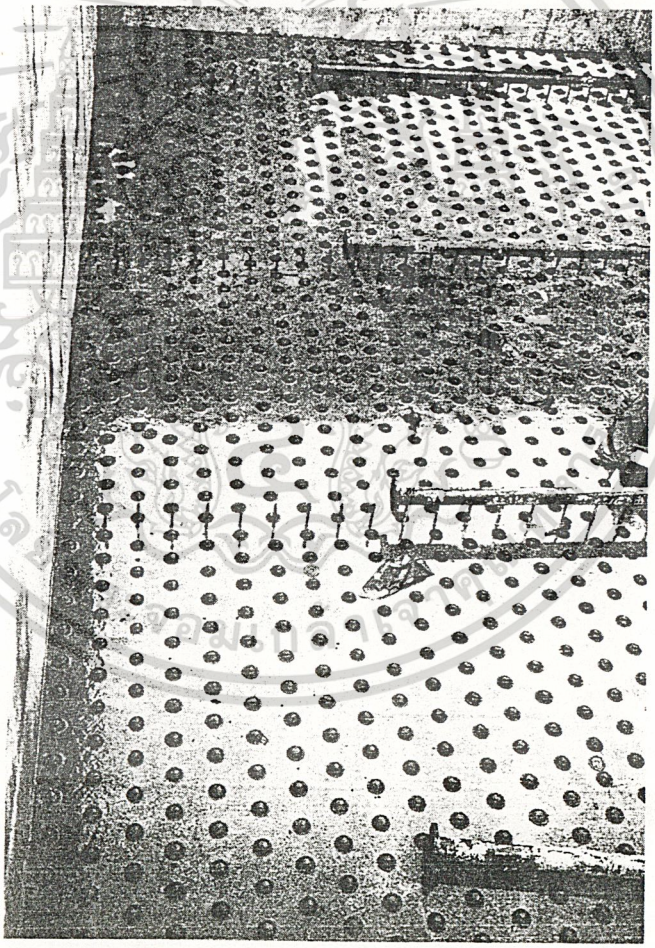
(a)

รูปที่ 2.6 การก่อสร้างชั้นพื้นดินของอ่างเก็บน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)



(c)

รูปที่ 2.6 การก่อสร้างชั้นพื้นดินของอ่างเก็บน้ำ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้-

ถึงแม้ว่าจะได้รับการปรับปรุง และมีการสรุปเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่จำเป็นที่เหมือนกันบ้างในคอนกรีตส่วนใหญ่ แต่คอนกรีตผสมเสร็จจะต้องรวมเวลาที่ล่าช้าระหว่างการผสมและการเทในสถานที่ก่อสร้างเพราะฉะนั้นเวลาจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีตพลาสติกและลักษณะของส่วนผสมที่จะรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในการผสม

สำหรับคอนกรีตผสมเสร็จที่ผลิตให้มีความสามารถทำงานได้สูงในการส่งไปยังสถานที่ก่อสร้างควรมี slump 75 $\pm$ 10 มม. และการเติมสารลดน้ำพิเศษควรใช้เครื่องจ่ายในการเติมเพราะมีความถูกต้องมากกว่าการเติมด้วยมือ ในบางกรณีที่คอนกรีตอยู่ ณ สถานที่ผสมปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เติมแต่ละครั้งจะคำนวณที่สถานที่ผสมและใส่ในถังบรรจุบนรถผสม การคำนวณโดยทั่วไปใช้แผนภูมิที่เตรียมไว้แล้ว (ก่อนเท) สำหรับปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่จำเป็นต่อการผลิตคอนกรีตไหลที่ไม่แยกตัวออกจากกันที่ slump ต่าง ๆ กัน ซึ่งการปรับปรุงปริมาณนี้เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำให้เรียบร้อย เพื่อป้องกันไม่ให้มีปัญหาในการหาค่า slump ที่ต้องการในสถานที่ก่อสร้าง โดยทั่วไปใช้วิธีควบคุมความเข้มข้น และอยู่ในช่วงเวลาสั้น ๆ และมีตารางที่ชัดเจน

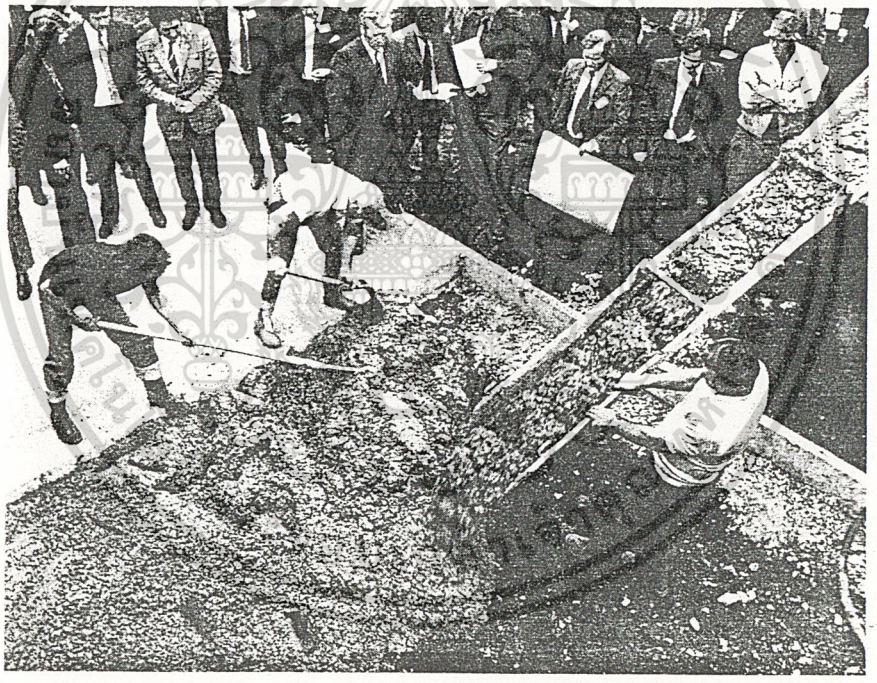
หลังจากเติมสารลดน้ำพิเศษแล้วควรทำการวัดค่าการไหลบนโต๊ะควบคุม หรือ ค่า slump แล้วทำการจดบันทึกไว้ ถึงแม้ว่าวิธีโต๊ะควบคุมการไหลจะถูกยอมรับโดยประเทศยุโรปหลายประเทศก็ตาม แต่ทางอเมริกาเหนือก็ยังสงสัยว่าอาจเกิดความผิดพลาดในทางปฏิบัติได้ง่าย ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้วิธีแบบกรวย slump ซึ่งยืนยันว่าค่าการกระจายซึ่งเริ่มต้นหลังจากเอากรวยออกจะวัดการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วจนกระทั่งเกิดการแผ่กระจายจนหมด นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องวัดคุณสมบัติการไหลของคอนกรีต ซึ่งได้นำเข้ามาใช้ในการวัดอีกด้วย

การใช้การผสมเหล่านี้ในอุตสาหกรรมในอเมริกาเหนือจะมีผลกระทบช้า และไม่ค่อยเข้มงวดในสิ่งที่ผิดบกพร่องเล็กน้อยของสถานที่ผสมเสร็จ ซึ่งทำให้มีการประยุกต์การผสมในบางกรณีทำให้การผสมวัสดุเกิดการผิดพลาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำเทคนิคพิเศษที่เกี่ยวกับคอนกรีตมาใช้ ทำให้ราคาของการผสมสูงแต่จะทำให้ลด slump ลง และมีผลในการเพิ่มคุณสมบัติความสดและความแข็งแรงของคอนกรีต โดยใช้วิธีวัดการแผ่กระจายเป็นหลัก ในทางตรงข้ามการทำคอนกรีตผสมเสร็จในยุโรปและญี่ปุ่น ซึ่งมีการใช้ตารางควบคุมอย่างเข้มงวด พบว่าคอนกรีตไหลให้ประโยชน์ตามจุดประสงค์ที่ต้องการได้

ประโยชน์หลักของคอนกรีตไหลสำหรับผู้รับเหมาคือ ลดราคาต้นทุนสำหรับคอนกรีตพิเศษทั้งยังสามารถรักษาให้คงสภาพได้อยู่นาน นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบกว่าคอนกรีตผสมเสร็จเพราะสามารถนำใส่รถผสมได้เลย และลดเวลาในการทำงานให้สั้นลงเมื่อไปถึงสถานที่ก่อสร้าง ในความเป็นจริงสถานที่ผสมคอนกรีตผสมเสร็จต้องปรับปรุงการส่งสินค้าให้รวดเร็ว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการอุดตันเนื่องจากการส่งคอนกรีตช้า มิฉะนั้นการประหยัดราคาค่าแรงจากอัตราการเทที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a)



(b)

รูปที่ 2.7 การเทคอนกรีตพื้นหนา 50 มม.

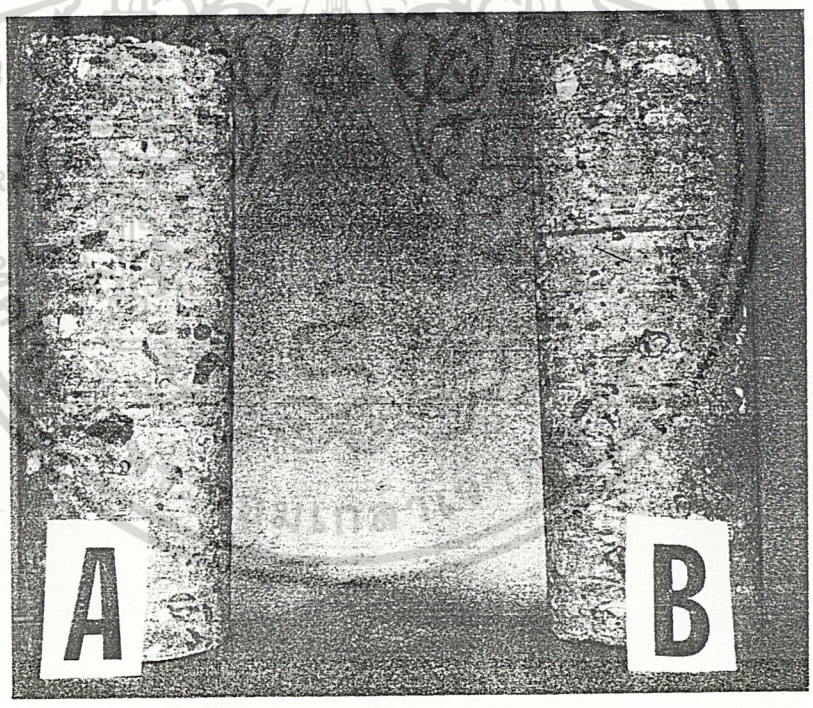
a) โดยใช้คอนกรีตไหล

b) โดยใช้การเทและตบแต่งด้วยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นอาจจะหมดสิ้นไป ซึ่งมีความสำคัญมากในงานเทคอนกรีตฐานรากซึ่งจำเป็นต้องใช้รถผสมจำนวนมากในการเทให้เสร็จ โดยคอนกรีตชนิดนี้มีรัศมีการไหลมากที่สุดประมาณ 5 ม. จากการพิจารณาการเทจะลดจำนวนการขนส่งได้หลายครั้ง ซึ่งในความเป็นจริงรางเทควรจะอยู่ตรงกลางของพื้นที่ที่จะเทและท่อส่งที่ขยายได้สามารถเพิ่มปริมาณการเทได้มาก การใช้ท่อชนิดนี้สามารถส่งคอนกรีตไปยังส่วนต่าง ๆ ของงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การเทคอนกรีตพื้นหนา 50 มม. โดยใช้การเทและตบแต่งด้วยมือเมื่อเทียบกับการเทด้วยคอนกรีตไหล

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของคอนกรีตไหล คือ มีความสามารถทำงานได้สูงและมีการยึดเกาะที่แข็งแรงซึ่งส่วนที่หยาบจะอยู่ส่วนบนของคอนกรีตที่เท ซึ่งอธิบายได้อย่างชัดเจนในส่วนที่เจาะออกมา (Cores) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยส่วนที่เจาะออกมาจากพื้นหลังจากที่เทคอนกรีตแล้ว 3 ปี ในรูปที่ 2.7 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.7 และสามารถสรุปได้ว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นในส่วนที่เจาะออกมาจากพื้นที่เทด้วยคอนกรีตไหล เกิดจากการที่ช่องว่างในคอนกรีตลดลง ดังรูปที่ 2.8 , ชิ้นส่วน A




รูปที่ 2.8 ส่วนที่เจาะออกมาจากพื้น (Cores) หลังจากเทคอนกรีตเป็นเวลา 3 ปี

a) จากพื้นที่เทด้วยคอนกรีตไหล

b) จากพื้นที่เทด้วยคอนกรีต slump 50 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ลักษณะของส่วนที่เจาะออกมาจากพื้นหลังจากเทคอนกรีตเป็นเวลา 3 ปี

| | จากคอนกรีตไหล | จากคอนกรีต slump 50 มม. |
|---|---|---|
| ทดสอบด้วยสายตา | | |
| วัสดุ | ดี | ดี |
| การบดอัดของคอนกรีต | ดี | พอใช้ |
| ช่องว่าง ; ใหญ่ | ไม่มี | มีบ้าง |
| ปานกลาง | – | – |
| เล็ก | – | ต้องทดสอบต่อไป |
| ผลการทดสอบ | | |
| กำลังรับแรงอัดของ | | |
| ทรงกระบอก (นิวตัน/มม$^2$) | 32.8 | 26.3 |
| กำลังรับแรงอัดของ | | |
| รูปลูกบาศก์ (นิวตัน/มม$^3$) | 40.8 | 33.0 |
| ความหนาแน่น (กก./ม$^3$) | 2330 | 2305 |

คอนกรีตไหลใช้ประโยชน์ได้ทั้งทำผนังกันดิน , ก่อสร้างพื้นบนดิน และ หล่อชิ้นส่วนโครงสร้างเสริมเหล็ก ซึ่งผู้ออกแบบสามารถใช้คอนกรีตไหลผสมเสร็จได้ในงานต่อไปนี้

1. ในการเทที่ยากลำบาก เช่น มีการผูกเหล็กแน่น และเครื่องสั่นเข้าถึงลำบาก
2. ในการเทที่มีบริมาณมากซึ่งรอยต่อของการก่อสร้างต้องลดลง ดังนั้นจึงใช้ความเร็วในการทำงานมาก
3. ในแบบหล่อที่มีความซับซ้อน
4. ในชิ้นส่วนเล็ก ๆ ซึ่งออกแบบให้ประหยัดเพราะต้องการให้ได้กำลังสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของการใช้คอนกรีตไหลผสมเสร็จ คือความสามารถทำงานได้จะลดลงอย่างรวดเร็วในตอนเริ่มแรก สำหรับคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้รถผสม slump จะลดลงอย่างมากเมื่อ

1. มีการล่าช้าเป็นเวลานานระหว่าง การเติมสารลดน้ำพิเศษและตัวอย่าง
2. มีการล่าช้าเป็นเวลานานระหว่าง การผสมและการเติมสารลดน้ำพิเศษ
3. อุณหภูมิของคอนกรีตสูงกว่าอุณหภูมิรอบ ๆ

วิธีการที่ใช้แก้ปัญหาการสูญเสียของ slump ให้น้อยลงในคอนกรีตผสมเสร็จมีดังนี้

1. ใช้กรดไฮดรอกซีคาร์บอไซลิก (hydroxycarboxylic acid) เป็นสารหน่วงผสมร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ
2. ใช้สารหน่วงลดน้ำพิเศษ
3. เติมสารผสมเพิ่มลงไปเพื่อรักษา slump ในตอนเริ่มแรก ซึ่งวิธีการนี้ใช้กับงานที่ในรายการไม่ให้เติมน้ำ ณ สถานที่ก่อสร้าง

แม้ว่าจะมีการเผยแพร่ผลกระทบจากสาเหตุการเติมน้ำเพิ่มลงไป ณ สถานที่ก่อสร้างเพื่อชดเชย slump ที่ลดลง แต่ก็เป็นการกระทำที่พบเห็นกันทั่ว ๆ ไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพอากาศที่ร้อนซึ่งภายใต้สภาพเช่นนี้การใช้สารลดน้ำพิเศษเติมลงไป สามารถลดปริมาณน้ำที่จะเติมลงไปได้มากและทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงน้อยตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.8

คอนกรีตไหลสามารถใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อก่อนนำมาใช้ (precast) ทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ซึ่งบ่อยครั้งใช้ในการแก้ปัญหาในบางสถานการณ์ได้ เช่น ในการก่อสร้างโดมที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมเป็นแผ่นพื้น ในสกอตแลนด์ และต้องการกำลังสูงในช่วงแรกของส่วนประกอบที่มีการเสริมเหล็กมาก การแก้ปัญหานี้ใช้คอนกรีตไหลกำลังสูงโดยมีการเติมสารลดน้ำพิเศษลงไป วิธีนี้ไม่เพียงแต่มีการระบายน้ำที่เหมาะสมแต่ยังให้กำลังสูงในช่วงแรกซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการซ่อมแซม ดังรูปที่ 2.9 แสดงการสร้างโดมคอนกรีตเสริมเหล็ก

คอนกรีตไหลมีประโยชน์ในงานสถาปัตยที่ต้องการความหยาบละเอียด ซึ่งรูปร่างที่ซับซ้อนทำได้โดยการหล่อคอนกรีตไหลในแบบหล่อ ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 2.10 แสดงตึกที่ตกแต่งด้วยที่กรุหน้าต่างไม้ เป็นแนวและแต่งผิวภายนอกด้วยหินกรวด ในตัวอย่างนี้จะทำเป็นแถบอย่างประณีตโดยใช้คอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษหนา 25-40 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

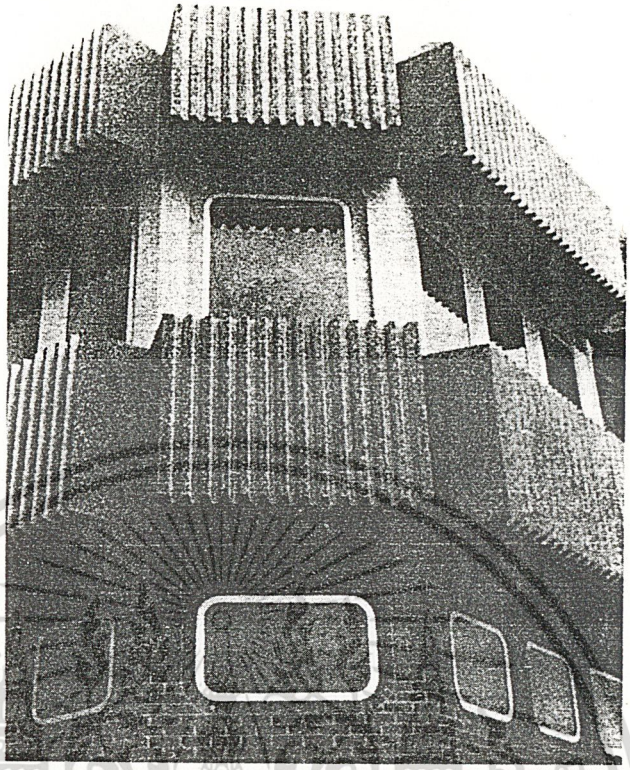
ตารางที่ 2.8 ผลของการเติมสารลดน้ำเพียงเล็กน้อย

| Cement B | | Time (min.) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 120 | 126 |
| Reference | Slump,mm(in) | 92(3.625) | 35(1.5) | 98(3.875) |
| 0.18% modified | W/C | 0.56 | 0.56 | 0.62 |
| lignosulphonate | Slump,mm(in) | 92(3.625) | 41(1.625) | 114(4.5) |
| 0.75% hydroxylated | W/C | 0.52 | 0.52 | 0.58 |
| carboxylic acid | Slump,mm(in) | 95(3.75) | 38(1.5) | 95(3.75) |
| 1% s/s sulphonated | W/C | 0.49 | 0.49 | 0.56 |
| melamine formaldehyde | Slump,mm(in) | 92(3.625) | 35(1.375) | 92(3.625) |

หมายเหตุ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ 21° ซ. (70° ฟ.)

รูปที่ 2.9 การสร้างโดมคอนกรีตเสริมเหล็กในสก็อตแลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 รายละเอียดที่มีความประณีตของที่กรุหน้าต่างคอนกรีตที่สร้างโดยใช้คอนกรีตไหล

ผู้ผลิตคอนกรีตส่วนมากจะใช้สารลดน้ำพิเศษและลดปริมาณน้ำและผสมสารกระจายกักฟองอากาศเพื่อให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ สารลดน้ำพิเศษใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่อไปนี้

1. เพื่อลดน้ำ
2. ประหยัดส่วนผสม
3. เพื่อให้ได้ปริมาณฟองอากาศที่เหมาะสม
4. ความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้น
5. ยืดระยะเวลาการก่อตัวและความสามารถทำงานได้ออกไปอีก

เนื่องจาก slump ที่ลดลงเป็นที่ยอมรับว่ามาจากสารลดน้ำพิเศษดังนั้นผู้ผลิตส่วนผสมส่วนใหญ่จึงสนับสนุนให้มีการค้นคว้าปรับปรุงคุณสมบัติการทำงานได้ของสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งการพัฒนาเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้ใช้วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของลิกโนซัลโฟเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาได้มีการปรับปรุงวัตถุดิบที่มีสัดส่วนของลิกโนซัลโฟเนต(lignosulphonates) ในปริมาณมากและประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตต่ำ (carbohydrate) จนประสบความสำเร็จ และมีการกระจายคุณสมบัติการหน่วงที่เพียงพอ ซึ่งอาจจะมีปริมาณสารบางชนิดที่ลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณสารชนิดอื่น ๆ ที่รู้จักกันดี เช่น เมลามีน (melamine) และ แนพทาลีน ซัลโฟเนต (nepthalene sulphonates) แต่ก็ยังคงรักษาความสามารถทำงานได้เหมือนเดิม บางครั้งปริมาณสารกระจายก๊กฟองอากาศจากการใช้สารเหล่านี้และกำลัง อาจน้อยกว่าที่ได้รับจากสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งการทำงานส่วนใหญ่เมื่อก่อนจำเป็นต้องใช้สารเหล่านี้

ถ้านำลิกโนซัลโฟเนตมาผสมกับสารกระจายก๊กฟองอากาศ จะใช้สารในปริมาณมากกว่าธรรมดา เพื่อให้มีความสามารถทำงานได้สูงและมีการยึดเกาะที่ดีขึ้น โดยการปรับปรุงการออกแบบส่วนผสมเพื่อใช้ซ่อมแซมหรือเพิ่มส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ หรือใช้สารเร่งซึ่งอาจมีผลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลต่อกำลังก็ได้ และคอนกรีตเมื่อผสมเสร็จแล้ว slump เริ่มแรกจะอยู่ในช่วงที่กว้างกว่า slump ที่ได้จากสารลดน้ำพิเศษ รูปที่ 2.11 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตชนิดนี้ ส่วนตารางที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ

รูปที่ 2.11 ความสามารถทำงานได้สูงแต่การยึดเกาะของคอนกรีตมาจากการไหลเป็นส่วนใหญ่ และความสามารถทำงานได้อยู่ในขอบเขตจำกัด โดยใช้สารลดน้ำกระจายก๊กฟองอากาศผสมกับสารลิกโนซัลโฟเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.9 รายละเอียดส่วนผสมและคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต โดยใช้ ลิกโนซัลโฟเนต ผสมร่วมกับ สารลดน้ำกระจายก๊กฟองอากาศ

| | ส่วนผสมทั่วไป | การปรับปรุงส่วนผสม สำหรับคอนกรีตไหล |
|---|---|---|
| ส่วนประกอบของส่วนผสม | | |
| ปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ (กก./ม³) | 280 | 300 |
| การไหลหยาบ (กก./ม³) | 1300 | 1300 |
| ทราย 50/50 ส่วนที่ 1 และ 4 (กก./ม³) | 700 | 600 |
| สารลดน้ำกระจายก๊กฟองอากาศ (มล./ปูนซีเมนต์ 50 กก.) | 0 | 300 |
| คุณสมบัติของคอนกรีต | | |
| slump (มม.) | 65 | 70 (ก่อนเติมสารผสม) |
| โต๊ะควบคุมการไหล (ซม.) | - | 56 (หลังเติมสารผสม) |
| ส่วนประกอบของอากาศ (%) | 0.9 | 4.6 |
| กำลังรับแรงอัด (นิวตัน/มม²) ที่ 7 วัน | 18.4 | 15.9 |
| 28 วัน | 32.8 | 30.1 |
| ความหนาแน่น (กก./ม³) | 2450 | 2405 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 <u>คอนกรีตลดน้ำช่วงสูง</u> (High range water-reduced concrete)

การปรับปรุงความสามารถทำงานได้ เมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษในคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปกติอาจจะทำให้ความสามารถทำงานได้อยู่ในช่วงปกติคือ slump 75-90 มม. แต่ที่สำคัญคือต้องลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลง สารลดน้ำพิเศษจะลดการใช้น้ำประมาณ 20-30% ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้, คุณสมบัติการแยกตัว และอุณหภูมิของคอนกรีต ในทางตรงกันข้ามการลดน้ำตามธรรมดาจะลดได้ 10-15% เท่านั้น ซึ่งน้ำที่ถูกลดลงและปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความสามารถทำงานได้ การใช้งานนี้สำหรับการผสมกับปูนซีเมนต์ในช่วง 300-600 กก./ม$^3$

ปริมาณน้ำที่ลดลงและกำลังที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ปูนซีเมนต์บางชนิดเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษจะทำให้ลดน้ำได้มากแต่กำลังไม่สูงเนื่องจากส่วนประกอบที่อาจแตกต่างกันคือ $C_3A$ และ $SO_3$ และความละเอียดของปูนซีเมนต์

สัดส่วนของการไหลรวมกันที่หยาบถึงละเอียด ซึ่งโมดูลัสความละเอียดของการไหลละเอียดและขนาดใหญ่สุดของการไหลหยาบมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น เปอร์เซนต์น้ำที่ลดลง, กำลังในระยะเริ่มแรกและที่ใช้งาน และลักษณะการเทและการตบแต่งของคอนกรีตนั้น

ปูนซีเมนต์ลดน้ำเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษจะทำให้มอร์ตาร์ของคอนกรีตมีการยึดเกาะที่สูงมาก ซึ่งทำให้ยากต่อการสั่นสะเทือนและมีความหนืดมากทำให้ติดอยู่บนเครื่องมือ เครื่องสั่นสะเทือนที่มีประสิทธิภาพและลดการยึดเกาะทำได้โดยเพิ่มสัดส่วนความหยาบของการไหล หรือใช้ระดับความหยาบจนถึงความละเอียดของการไหล

ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ขึ้นอยู่กับ ชนิดการผสม, ปริมาณน้ำที่ต้องการลด, slump ที่ต้องการใช้เท, ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้และส่วนประกอบ, อุณหภูมิของคอนกรีต และการเติมส่วนผสมโดยปกติก่อนเติมสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งค่า slump ในตอนเริ่มแรกและขณะเทที่แท้จริงจะวัดโดยตัวแปรเหล่านี้ เช่น ระดับกำลังเริ่มแรกที่ต้องการ, ระดับความทนทาน, ปริมาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ และลักษณะการตบแต่งที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

โดยทั่วไป slump ปกติที่มีปริมาณการผสมต่ำอาจจะประกอบด้วย สารหน่วงลดน้ำพิเศษ, ปูนซีเมนต์ซึ่งประกอบด้วย $C_3A$ ต่ำ (น้อยกว่า 5%), ส่วนประกอบต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์ที่อยู่ในช่วงปานกลาง, ปูนซีเมนต์ชนิดหยาบ และการเติมส่วนผสมในการผสม ค่า slump ที่ต่ำ (น้อยกว่า 50 มม.) ต้องมีการเติมส่วนผสมปริมาณมากเพื่อให้ได้ slump ที่เพียงพอ

คัลเซียมลิกโนซัลโฟเนต (calcium lignosulphonate) เป็นสารลดน้ำซึ่งให้ผลเมื่อใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ แต่ในการเติมควรแยกเติม, มีการวัดปริมาณน้ำ และเติมในช่วงสุดท้ายของการผสม การเติมสาร 2 ชนิดจะให้ผลสรุปเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสารลดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิเศษ เพียงอย่างเดียวดังนี้

1. ลดน้ำได้มากและขยายเวลาการก่อตัวเริ่มแรกเพื่อให้ได้ slump น้อยกว่า 100 มม. สำหรับ slump ที่มากกว่า 200 มม. จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารลดน้ำที่ใช้ แต่ที่สำคัญการยึดเกาะและกำลังอาจลดลงบ้าง

2. การเติมลิกโนซัลโฟเนต ทำให้การผสมเกิดการแยกตัวไว เมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษอีกครั้ง ซึ่งผลรวมการกระจายการทำงานของสารลดน้ำพิเศษชนิด แนพทาลีน ฟอร์มาลดีไฮด์ สูงกว่า เมลานีน ฟอร์มาล์ดีไฮด์

กรดไฮดรอกซีคาร์บอไซลิก (HC) เมื่อใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษจะเป็นสารหน่วงซึ่งเป็นประโยชน์แก่คอนกรีตภายใต้สภาพที่อุณหภูมิล้อมรอบนั้นสูง และ ในการบ่มด้วยไอน้ำในวิธี precast ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดไฮดรอกซีคาร์บอไซลิก ที่ผสมลงไป, อุณหภูมิของคอนกรีต และ slump ที่ใช้ในการเท และเวลาที่ใช้ในการก่อตัวประมาณ 3-4 ชั่วโมง

ทั้ง วิลโซล เรซิน ( vinsol resin ) และ ซัลโฟเนต ไฮโดรคาร์บอน (sulphonated hydrocarbon)ชนิดกระจายกักฟองอากาศเป็นสารชนิดเดียวกับสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งปัญหาหลัก 4 ประการเกี่ยวกับ คอนกรีตไหลกระจายกักฟองอากาศจะพิสูจน์สำหรับคอนกรีตลดน้ำผสมสารลดน้ำพิเศษ อย่างไรก็ตามส่วนประกอบการลดอากาศได้ยกเว้นในส่วนผสมที่ slump ต่ำซึ่งทำให้ปัญหาอื่น ๆ ลดลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตไหล ส่วนประกอบการลดอากาศในส่วนผสมที่ slump ต่ำเนื่องมาจากซีเมนต์เพสต์มีความหนืดน้อยมากสำหรับขบวนการกระจายกักฟองอากาศ ทำให้ผู้ผลิตบางรายแก้ปัญหานี้โดยเติมสารกักฟองอากาศหลังจากใส่สารลดน้ำพิเศษทำให้ได้ความหนืดตามที่ต้องการ

ส่วนใหญ่คอนกรีตของปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์ที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ จะประกอบด้วยขี้เถ้าแกลบหรือขี้เถ้าลอย ทำให้ใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในการผสมน้อยกว่า 10% เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมสารเหล่านี้ เพื่อให้มีความสามารถทำงานได้เท่ากัน และยังสามารถลดปริมาณน้ำได้มากตามไปด้วย เหตุผลที่ว่าทำไมถึงลดการผสมอาจเนื่องมาจาก สาร $C_3A$ ในปูนซีเมนต์ละลายจะส่งผลให้ขี้เถ้าลอยเข้าไปแทนที่ในคอนกรีตที่ผสม

จุดประสงค์โดยทั่วไปที่ใช้สารลดน้ำกำลังสูงคือ

1. ทำให้ราคาการบ่มต่ำลง

โดยสารลดน้ำพิเศษพยายามลดอุณหภูมิในการบ่มและระยะเวลาในการบ่มลง ซึ่งโดยทั่วไปใช้สำหรับเร่งการบ่มของผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น เมื่อส่วนประกอบของปูนซีเมนต์มีการลดน้ำ จะทำให้กำลังสูงในตอนเริ่มแรกภายใต้ระดับอุณหภูมิการบ่ม ซึ่งทำให้ผู้ผลิตสามารถลดอุณหภูมิของการบ่มลงได้ประมาณ 50-60° ซ. และลดระยะเวลาได้ 3-4 ชั่วโมง ในขณะที่กำลังยังคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่าเดิม

ถ้าสารลดน้ำพิเศษใช้กับชนิดไม่มีสารหน่วง ซึ่งใส่ในปริมาณปกติทำให้ไม่มีผลเกี่ยวกับระยะเวลาการก่อตัวและระยะเวลาการบ่ม อย่างไรก็ตามการปรับปรุงระยะเวลาการบ่มอาจจำเป็นสำหรับการเติมสารลดน้ำพิเศษจำนวนมาก หรือใช้สารหน่วงลดน้ำพิเศษ หรือใช้สารลดน้ำพิเศษร่วมกับสารหน่วงลดน้ำ ทำให้เวลาการก่อตัวครั้งสุดท้ายอาจมากกว่าเดิมและระยะก่อนการก่อตัวอาจเพิ่มตามไปด้วย ซึ่งระยะเวลาการบ่มไม่จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

**2. ลดส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ลงในขณะที่สามารถทำงานได้เหมือนเดิมและกำลังเท่าเดิม**

ถ้าใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษตามปกติจะให้ slump เท่าเดิม โดยลดน้ำได้ 20-25% ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ลดลงอาจจะลดกำลังรับแรงอัด หรือลดส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ลง สารลดน้ำพิเศษอาจช่วยผู้ผลิตที่ใช้วิธีการผลิตแบบ precast โดยใช้ส่วนประกอบปูนซีเมนต์ที่ต่ำโดยความสามารถทำงานได้ไม่ลดลงและรวมทั้งกำลังด้วย โดยแท้จริงแล้วการลดปริมาณของปูนซีเมนต์จำนวนมากขึ้นอยู่กับ ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ และสัดส่วนการผสมในคอนกรีต ถ้าใช้ส่วนประกอบปูนซีเมนต์ต่ำ (306 กก./ม$^3$) แล้วเติมสารลดน้ำพิเศษลงไปจะสามารถเร่งกำลังในช่วง 3 และ 28 วันได้โดยได้กำลัง 90% และ 55% ตามลำดับ ถ้าใช้ส่วนประกอบปูนซีเมนต์ 415 กก./ม$^3$ จะลดปูนซีเมนต์ลงได้ 11-20% ในขณะที่กำลังยังเท่าเดิม

**3. ใช้ในการเลือกชนิดของปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์ เช่น จากประเภทที่ 1 เป็นประเภทที่ 3**

ผู้ผลิตที่ใช้วิธีการผลิตแบบ precast นิยมใช้ปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์ประเภทที่ 3 ซึ่งมีความละเอียดตามมาตรฐาน ASTN ในการผลิต ซึ่งเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษลงไปจะทำให้ลดน้ำได้มาก และได้กำลังเร็วขึ้นมากกว่าประเภทที่ 1 ทำให้ผู้ผลิตได้รับประโยชน์อย่างมาก

**4. ทำให้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตมีกำลังสูงในช่วงเริ่มแรกและใช้งาน**

slump คอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแบบ precast และแบบ prestress โดยทั่วไปพิจารณาจากความสมดุลย์ในการเท และจากการที่ได้กำลังสูงมากซึ่งการใช้สารลดน้ำพิเศษมีผลต่อการลดปริมาณการเทและการระเหยที่ต่ำของ slump ของคอนกรีต เมื่อมีการสั่นสะเทือนอย่างมากสารลดน้ำพิเศษอาจเป็นสาเหตุให้ slump ลดลงอย่างรวดเร็ว

สารลดน้ำพิเศษโดยมากใช้ในการลดน้ำเพื่อให้ได้กำลังในช่วงระยะเวลา12-18 ชั่วโมง เวลาที่ลดลงเพื่อให้ได้กำลังตามต้องการสำหรับการเสริมเหล็กเพื่อให้ได้ความเค้นในช่วงแรกและเพิ่มการผลิตในการผลิตแบบ precast การใช้สารลดน้ำพิเศษทำให้ได้กำลังสูงซึ่งมีประโยชน์มากในการผลิตเสา precast กำลังสูงสำหรับตึกที่สูงมาก ๆ และตง precast ซึ่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมทำให้ได้กำลังสูง ทั้งยังลดน้ำได้มาก, เพิ่มความสามารถทำงานได้ และทำให้ปูนซีเมนต์มีประสิทธิภาพดีขึ้น

นิวเคลียร์คอนกรีตต้องการจุดประสงค์ 3 ประการ คือ ลดน้ำได้มาก, มีความสามารถทำงานได้สูง และมีกำลังสูงในระยะเริ่มแรกและใช้งาน คอนกรีตสำหรับการก่อสร้างท่อความดันคอนกรีตแบบ prestress สำหรับโรงงานนิวเคลียร์ จำเป็นต้องมีกำลังสูงในตอนแรกและใช้งาน รวมทั้งมีความสามารถทำงานได้สูงที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ

2.5.3 <u>คุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ</u>

2.5.3.1 ความต้องการน้ำและความสามารถทำงานได้

สารลดน้ำพิเศษจะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิม นอกจากนี้สารลดน้ำพิเศษยังสามารถทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้สูงมากโดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียการเกาะตัว (Cohesion) มากเกินไป และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิม (Rixom, 1976) สารลดน้ำพิเศษจะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงเมื่อความสามารถทำงานได้คงเดิม และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษขึ้นจะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงมากขึ้น เมื่อความสามารถทำงานได้คงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การใส่สารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากเกินไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เพราะมีปริมาณน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้น และเกิดการสูญเสียการยึดเกาะของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1 ถึง 3%

2.5.3.2 การคายน้ำ

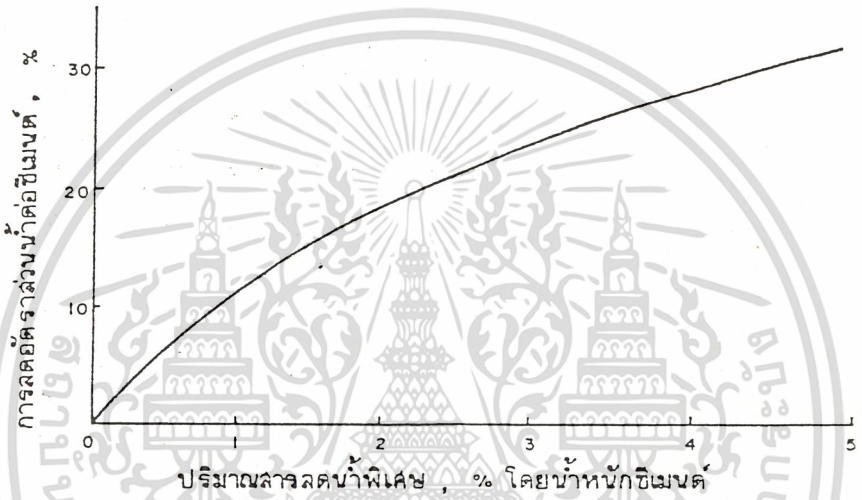
โดยทั่วไปเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษเพื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แล้ว การคายน้ำจะลดลง ยกเว้นคอนกรีตที่มีความสามารถทำงานได้สูงมาก การลดการคายน้ำทำได้โดยปรับส่วนผสม โดยให้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบสูงขึ้นหรือใส่วัสดุละเอียด (ACI Committee, 1989) ในคอนกรีตที่พร่องส่วนละเอียด (มวลละเอียดหรือซีเมนต์) สารลดน้ำพิเศษสามารถลดการคายน้ำ (Bleeding)และการแยกแยะ (Segregation) ได้ (Raymond, 1983) และการใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25% ทำให้อัตราการคายน้ำและความสามารถการคายน้ำของมอร์ตาร์ลดลง และ การคายน้ำของคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ 2% วัดค่าการคายน้ำได้เท่ากับ 0

2.5.3.3 ระยะเวลาการก่อตัว

การใส่สารลดน้ำพิเศษจะไม่ทำให้เวลาการก่อตัวเปลี่ยนไป (Rixom, 1978 และ Raymond,1983) พบว่าการใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25% จะทำให้ระยะเวลาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในช่วงที่กำหนดให้ตามมาตราฐาน ASTM 494-86 Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete และ สารลดน้ำพิเศษจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวที่เปลี่ยนไป เอกสิทธิ์ (2533) ให้เหตุผลว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงเหมือนเดิมเมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษจึงไม่ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเปลี่ยนไป

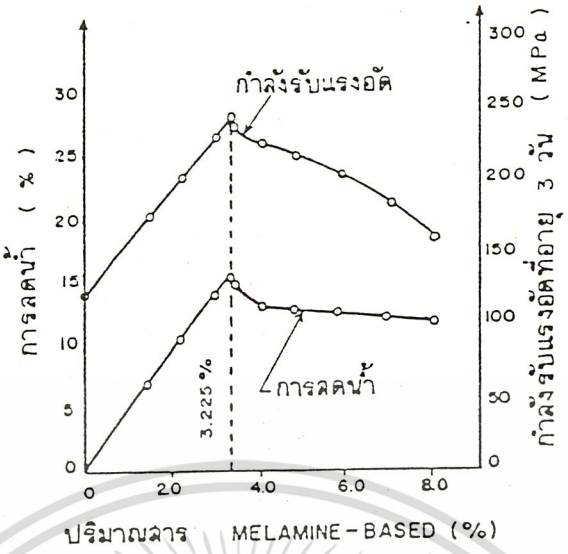



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Rixom, 1978)

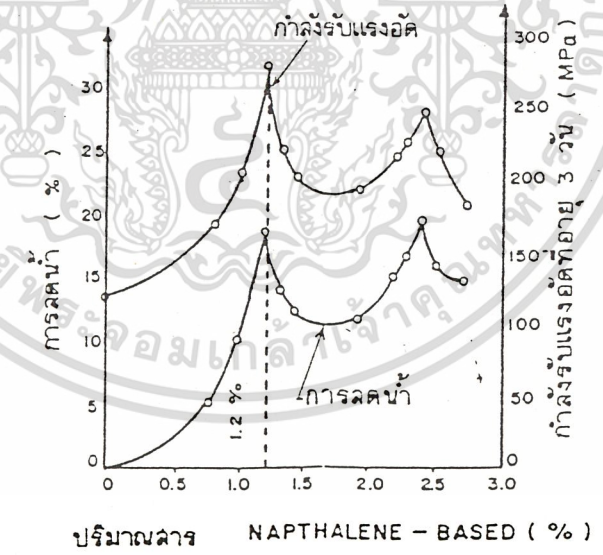
2.5.3.4 กำลังรับแรงอัด

การใส่สารลดน้ำพิเศษโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่าเดิม จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่ถ้าใส่สารลดน้ำพิเศษแล้วลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ด้วยจะทำให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตสูงขึ้นอีก (ACI Committee, 1989) ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสำหรับการลดน้ำมากที่สุดไม่จำเป็นเสมอไปว่าจะให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 (Stuart และคณะ, 1980) และทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7, 28, 90 สูงกว่ากำลังในแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ใส่สารลดน้ำพิเศษถึง 58%, 29%, 24%, 25% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำ และกำลังรับแรงอัด กับปริมาณ SULPHONATED MELAMINE FORMALDEHYDE CONDENSATE ( STUART และคณะ, 1980 )




รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดน้ำ และกำลังรับแรงอัด กับปริมาณ SULPHONATED NAPTHALENE FORMALDEHYDE CONDENSATE ( STUART และคณะ, 1980 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.5 กำลังรับแรงดึง

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษ โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิมจะประมาณเท่าเดิม ส่วนกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษสำหรับลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะสูงขึ้นแต่ไม่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มกำลังรับแรงอัด (ACI Committee, 1989) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25% จะทำให้กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์สูงขึ้นประมาณ 8% โดยเฉลี่ยส่วนผสมคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษโดยที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่

2.5.3.6 ความทนทาน

ความต้านทานการแข็งและละลาย และการกัดเซาะของน้ำและดินจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณน้ำลดลง แต่การลดน้ำจะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำขึ้นมากและกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นมากด้วย ความต้านทานการแข็งและละลายของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษจะเหมือนกับคอนกรีตทั่วไปที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.4 จะทำให้น้ำซึมผ่านได้น้อยมาก และสามารถต้านทานสารละลายได้ดีขึ้น (ACI Committee, 1989) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25% การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์จะมากขึ้น และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงมากขึ้น

2.5.3.7 การขยายตัว

การบ่มคอนกรีตในน้ำจะเป็นผลให้เกิดการขยายตัว (Swelling) เนื่องจากการดูดน้ำของซีเมนต์เจล (Cement Gel) สำหรับคอนกรีตที่ทึบน้ำ น้ำจะเข้าสู่เพสต์ได้น้อยลงเป็นผลให้เกิดการขยายตัวลดลง การขยายตัวของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Normal Weight Concrete) จะมีค่าเพียง 10-20% ของการหดตัว (Neville, 1987) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25% การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์จะลดลง

2.5.3.8 การหดตัว

การหดตัวเมื่อตากแห้งของคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำพิเศษ โดยให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงเดิมจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าใส่สารลดน้ำพิเศษแล้วลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงโดยปริมาณซีเมนต์คงเดิมจะพบว่าการหดตัวเมื่อตากแห้งของคอนกรีตจะลดลง (ACI Committe, 1989) และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 1.25% การหดตัวเมื่อตากแห้งและการสูญเสียน้ำหนักจะต่ำกว่าเมื่อไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน ได้แก่ วัสดุที่มีส่วนประกอบเคมีคือ ซิลิกา ($SiO_2$) หรือ ซิลิกาและอลูมินา ($SiO_2+Al_2O_3$) เป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ซึ่งโดยตัวของมันเองมีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย อยู่ในสภาพที่เป็นเม็ดละเอียดและสามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิปกติได้ แล้วเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติยึดประสาน ตัวอย่างได้แก่ ไมโครซิลิกา ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าลอย วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้คอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานคล้ายกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาและเพิ่มกำลังคอนกรีตที่อายุมากได้

ปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถเขียนง่าย ๆ ได้ดังนี้ (Neville, 1973)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ------ } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad \ldots\ldots 2.1$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \text{ ------ } 3CaO.2SiO_2.2SiO_2 + Ca(OH)_2 \quad \ldots\ldots 2.2$$

และเมื่อผสมสารปอซโซลาน เช่น ไมโครซิลิกา ขี้เถ้าแกลบ และขี้เถ้าลอย จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นอีก โดยคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินา แล้วก่อตัวเป็น คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และ คัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) ดังสมการ (Mindess และ Young, 1981)

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \text{ ------ } 3CaO.2SiO_2.3H_2O \quad \ldots\ldots\ldots 2.3$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \text{ ------ } 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \quad \ldots\ldots\ldots 2.4$$

ไมโครซิลิกา จัดว่าเป็นวัสดุปอซโซลานเช่นเดียวกันกับขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าแกลบ ซึ่งไมโครซิลิกา มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าซิลิกาฟูม (Silica Fume) เป็นผลผลิตที่ได้จากการผลิตโลหะโดยได้จากการผลิตเฟอร์โรซิลิคอน (Ferro Silicon) ในขบวนการผลิต เมื่อวัตถุดิบถูกเผาจะเกิดการหลอมตัวเป็นของเหลวและเกิดก๊าซลอยตัวขึ้น ก๊าซนี้จะถูกทำให้เย็นตัวโดยระบบ cooling system และตกสู่ถังเก็บ ก๊าซที่ถูกทำให้เย็นตัวนี้ คือ ไมโครซิลิกา

การนำไมโครซิลิกามาใช้ในงานคอนกรีตเริ่มมาจากกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวีย ซึ่งได้ทำการทดลองตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1950-1955 โดยทดสอบที่ NORWEGIAN INSTITUTE OF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TECHNOLOGY (เมือง TRONDHEIM ประเทศนอร์เวย์) และได้เริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวีย ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975

นอกจากกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวียแล้ว ประเทศแคนาดาได้นำไมโครซิลิกามาทดสอบและเริ่มใช้ในคอนกรีตผสมเสร็จในปี ค.ศ. 1981 หลังจากปีนั้นเป็นต้นมา ในประเทศต่างๆ ได้มีการทดสอบและวิจัยเกี่ยวกับไมโครซิลิกามาอย่างต่อเนื่อง และความรู้ในเรื่องนี้ได้ขยายตัวอย่างรวดเร็วซึ่งส่วนประกอบของไมโครซิลิกาแสดงไว้ในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกา

| ส่วนประกอบ | ส่วนประกอบทางเคมี (%) | |
|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | ไมโครซิลิกา |
| $CaO$ | 60-67 | 0.35-2.6 |
| $SiO_2$ | 17-25 | 93-98 |
| $Al_2O_3$ | 3-8 | 0.2-2.5 |
| $Fe_2O_3$ | 0.5-0.6 | 0.3-2.0 |
| $MgO$ | 0.1-0.5 | 0.2-0.4 |
| $SO_3$ | 1-3 | 0.1-0.3 |
| $Na_2O$ | 0.5-1.3 | 0.1-0.5 |
| $K_2O$ | 0.5-1.3 | 0.1-0.5 |
| พื้นที่ผิว (ซม$^2$/กรัม) | 3,000 | 200,000 |

หมายเหตุ 1. ข้อมูลจาก บ.ทีพีไอ โพลีน จำกัด

2. ข้อมูลจาก บ.ซิก้า ประเทศไทย จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครซิลิกามีขนาดประมาณ 0.1 ไมครอน (Micron) เล็กกว่าเม็ดปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า เนื่องมาจากไมโครซิลิกามีขนาดเล็กมาก ๆ จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมไมโครซิลิกาซึ่งไมโครซิลิกาจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์และจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ CSH จะเข้าไปแทรกซึมไปอุดช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งจะเป็นผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและมีความทนทานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# การทดสอบ

## 3.1 แผนการทดสอบ

ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้คือ

1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และ ไมโครซิลิกาคุณสมบัติที่ทำการทดสอบได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ และ ความละเอียด

2. การทดสอบความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัว และค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ โดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา โดยน้ำหนักเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์

3. การทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ โดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา โดยน้ำหนักเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ซึ่งคุณสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ กำลังรับแรงดึง ค่าความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์ และ กำลังรับแรงอัด

4. พิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบระหว่าง ราคา กับกำลังรับแรงอัด

## 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการทดลองเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

### 3.2.2 ไมโครซิลิกา

เป็นผลผลิตที่ได้จากการผลิตโลหะโดยได้จากการผลิตเฟอร์โรซิลิกอน ในขบวนการผลิตซึ่งมีประมาณ 0.1 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กมาก และได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Sika แห่งประเทศไทย

### 3.2.3 สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษใช้สาร Sulphonate Naphthalene Formaldehyde Condensates และก่อนการผสมมอร์ตาร์ได้ตวงและละลายในน้ำก่อนที่จะนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ทราย

ทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายตามท้องตลาด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างเบอร์ 16 ร้อยละ 30 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 30 ร้อยละ 40 และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างเบอร์ 50 ร้อยละ 30

3.2.5 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปา

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

3.3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ไฮดรอลิก

(Test for Specific Gravity of Hydraulic Cement)

ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ คือ ค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของซีเมนต์ในอากาศต่อน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4° ซ. ที่มีปริมาตรเท่ากับซีเมนต์ ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์โดยปกติมักใช้ประกอบในการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ของซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการบอกถึงความละเอียด (Fineness) ของซีเมนต์ นอกจากนั้นความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ ยังใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสม ( Mix Proportion or Mix Design) ของคอนกรีตอีกด้วย

ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.05 ถึง 3.20 ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยนั้น โดยทั่ว ๆ ไปขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเนื้อซีเมนต์และความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ผสม หรือ ซีเมนต์ซิลิกาจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าค่าดังกล่าวข้างต้น ซีเมนต์ที่ละเอียดมากก็จะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง ในกรณีที่ไม่ได้มีการทดสอบหาค่ามาก่อน มักจะสมมุติค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอรต์แลนด์ประเภทที่ 1 ประมาณ 3.15

ในการทดลองหาค่าต่าง ๆ ถ้าหากว่าต้องทำการทดลองมากกว่าหนึ่งครั้งขึ้นไปนั้น โดยทั่ว ๆไปจะมีการควบคุมขนาดของความผิดพลาด (Random Error) ที่เกิดขึ้น ในการควบคุมปกติจะถือว่าผลต่างของการทดลอง (สมมุติว่า) สองครั้ง จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้จึงจะถือว่าค่าทั้งสองนั้นใช้ได้ ค่าที่กำหนดไว้เป็นตัวควบคุมมีอยู่ 2 ประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการทดลองคือ

1. ความผิดพลาดเกิดจากการทำซ้ำ (Repeatability) เป็นขนาดของความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการทำการทดลองของคน ๆ เดียวกันในห้องปฏิบัติการอันเดียวกัน โดยใช้วัสดุ เครื่องมือและวิธีการทดลองแบบเดียวกัน

2. ความผิดพลาดเกิดจากการทำใหม่ ( Reproducibility ) เป็นขนาดของความผิดพลาดซึ่งเกิดขึ้นจากการทดลองของคนหลายคน ในห้องปฏิบัติการคนละแห่ง โดยใช้วัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือ และวิธีการทดลองแบบเดียวกัน

สำหรับการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ไฮดรอลิกนี้ ค่า Repeatability และ Reproducibility ที่ยอมรับกัน เป็น 0.03 และ 0.10 ตามลำดับ ดังนั้นผลของการทดลองสองครั้งไม่ควรจะแตกต่างกันมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ข้างต้น

**วิธีทดลอง**

1. จัดเตรียมน้ำในอ่างให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 20° ซ. ตามที่กำหนดไว้ พยายามควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาการทดลอง

2. เทน้ำมันก๊าดลงในขวดทดลองมาตรฐานเลอแชททีเลียร์ จนกระทั่งระดับของน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างขีดบอกปริมาตร 0 และ 1 มล. (ml.) คอขวดซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำมันก๊าดควรเช็ดให้แห้ง

3. จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำในข้อที่ 1 แล้วให้ทิ้งไว้ จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดและน้ำในอ่างเท่ากัน อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำและขีดค่าปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

4. ชั่งน้ำหนักของซีเมนต์และถาดใส่ จากนั้นค่อย ๆ ใส่ซีเมนต์ลงในขวดทดลอง ในการใส่ซีเมนต์ควรพยายามไม่ให้ซีเมสต์ตกกระจาย และจะต้องระวังไม่ให้ซีเมนต์เกาะติดตามคอขวดทดลองด้วย

5. ให้หยุดใส่ซีเมนต์ เมื่อระดับของน้ำมันก๊าดขึ้นมาอยู่ระหว่างช่วงของขีดบอกปริมาตรส่วนบนของขวดทดลอง จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศซึ่งอาจเกาะอยู่กับผงซีเมนต์ การไล่ฟองอากาศให้ปิดปากขวดทดลองด้วยจุกแก้วแล้วเอียงขวดและหมุนช้า ๆ จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมา

6. จุ่มขวดทดลองลงในอ่างน้ำอีกครั้งหนึ่งเช่นเดียวกับข้อที่ 3 ก่อนจะอ่านปริมาตรทุกครั้ง ผู้ทำการทดลองจะต้องแน่ใจว่า อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในขวดทดลองเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่าง เพื่อที่จะไม่ให้อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในการอ่านครั้งแรกและครั้งที่สองต่างกันไม่เกินกว่า 0.2° ซ.

7. อ่านอุณหภูมิของน้ำและปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

8. ชั่งน้ำหนักของซีเมนต์ที่เหลือพร้อมถาดใส่ ผลต่างของน้ำหนักของการชั่งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในขวดทดลอง

9. ทำการทดลองซ้ำอีกอย่างน้อย 1 ครั้งจากข้อ 2 ถึง ข้อ 7 จนกว่าจะได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ในการทำความสะอาดขวดทดลอง ให้ใช้น้ำมันก๊าดล้างเท่านั้น ห้ามใช้น้ำล้างเป็นอันขาด

การคำนวณ

1. ผลต่างระหว่างปริมาตรที่อ่านได้ของครั้งแรกและครั้งที่สอง จะเท่ากับปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่โดยซีเมนต์ที่ใช้

2. ผลต่างของน้ำหนักของซีเมนต์และถาดใส่ทั้งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในขวดทดลอง

3. คำนวณหาความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ให้ได้ละเอียดถึงจุดทศนิยม 3 ตำแหน่ง ดังนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ , (ถ.พ.)} = \frac{\text{น้ำหนักของซีเมนต์ , (ก.)}}{\text{ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่ , (มล.)}}$$

หมายเหตุ ความหนาแน่นของน้ำที่ 4° ซ. เท่ากับ 1 ก./มล.

4. ในการหาค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยให้ปัดเศษตัวเลขเหลือเพียงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.3.2 การทดสอบความละเอียด

(Test for Fineness of Hydraulic Cement)

วิธีการทดลองโดยวิธีแอร์ เพอร์มีอะบิลิตี้ (ASTM : C 204-72)

1. ชั่งเพอร์มีอะบิลิตี้ พร้อมกระดาษกรองที่จำนำมาใช้ทั้งสองแผ่น

2. นำกระดาษกรองแผ่นหนึ่งใส่ลงในเซลโดยวางบนแผ่นโลหะที่เจาะรูพรุนพยายามกดขอบโดยรอบของแผ่นกรองให้สนิทกับแผ่นโลหะนั้น จากนั้นจึงเทผงซีเมนต์ที่เตรียมไว้ใส่ลงในเซลเคาะเบา ๆ ที่ด้านข้างเพื่อให้ผิวซีเมนต์เรียบและอยู่ในระดับนาบ แล้วจึงนำกระดาษกรองอีกแผ่นหนึ่งวางปิดทับด้านบน กดด้วยแท่งอัด (plunger) โดยใช้น้ำหนักของตัวมันเองเพียง 1 ครั้ง การกดให้กดลงไปจนกระทั่งบ่าขอบบนของแท่งอัดแตะขอบบนของเซล ค่อย ๆ ชักแท่งอัดขึ้นเล็กน้อย หมุนไปประมาณ 90 องศา แล้วกดลงไปใหม่อีกครั้งหนึ่ง จากนั้นจึงค่อย ๆ ชักออกไปอย่างช้า ๆ

3. นำเพอร์มีอะบิลิตี้เซลไปชั่ง เพื่อหาน้ำหนักซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สวมเชลลงบนก้านมานอมิเตอร์ (manometer) ซึ่งเป็นหลอดแก้วดัดรูปด้วยู

5. สูบอากาศออกจากก้านมานอมิเตอร์อย่างช้า ๆ จนกระทั่งของเหลวในหลอดมีระดับสูงถึงขีดหมายเส้นบนสุดแล้วปิดลิ้น (valve) ให้แน่น และให้เริ่มจับเวลาที่ของเหลวลดระดับลงมาถึงขีดหมายเส้นที่สอง กระทั่งลดลงมาถึงขีดหมายเส้นที่สาม บันทึกเวลาช่วงนี้ไว้อย่างละเอียดพร้อมกับอุณหภูมิของห้องในขณะนั้น กระทำซ้ำเช่นนี้รวม 3 ครั้ง

6. การคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ให้คำนวณจากสูตรต่อไปนี้

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}}$$

เมื่อ $S$ = พื้นที่ผิวจำเพาะ มีหน่วยเป็น ซม$^2$/ก.

$S_s$ = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างมาตรฐาน = 3,200 ซม$^2$/ก.

$T$ = เวลาที่ของเหลวไหลผ่านขีดหมายทั้งสาม

$T_s$ = เวลาที่ของเหลวไหลผ่านขีดหมายทั้งสาม เมื่อทดสอบกับตัวอย่างมาตรฐาน = 44 วินาที

<u>วิธีทดลองโดยใช้ตะแกรงขนาด 150 และ 75 ไมโครเมตร</u>

1. ชั่งซีเมนต์ที่จะทดลองจำนวน 50 กรัม และค่อย ๆ เทลงบนตะแกรงขนาด 150 หรือ 75 ไมโครเมตร ที่แห้งและสะอาดพร้อมถาดรองอยู่ด้านใต้

2. ขยับข้อมือซ้าย ๆ ไปทางซ้ายและขวา เพื่อให้ซีเมนต์ส่วนที่ละเอียดผ่านลงไปบนถาด ขยับเช่นนี้ประมาณ 3 - 4 นาที นำส่วนที่ค้างบนตะแกรงไปชั่งหาน้ำหนัก

3. ความละเอียดของตัวอย่างซีเมนต์ จะหามาเป็นเปอร์เซนต์โดยตรง จากสูตร

$$R_c = R_a\ (100 + C)$$

$$F = 100 - R_c$$

เมื่อ $F$ = ความละเอียดของซีเมนต์ ซึ่งผ่านตะแกรง 150 หรือ 75 ไมโครเมตร โดยคิดเป็นอัตราร้อยละ

$R_c$ = ส่วนค้างของซีเมนต์บนตะแกรงคิดเป็นร้อยละ

$R_a$ = ส่วนของซีเมนต์บนตะแกรงคิดเป็นน้ำหนักกรัมต่อตัวอย่างหนึ่งกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= น้ำหนักซีเมนต์ที่ค้าง/น้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้ทดลอง

C = ตัวประกอบสำหรับปรับความคลาดเคลื่อนของตะแกรง คิดเป็นร้อยละ

= + 5.45 สำหรับตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร

3.4 <u>การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์</u>

ส่วนผสมที่จะนำไปทดสอบคุณสมบัติในหัวข้อนี้ พิจารณาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ที่ถูกแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักด้วยไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนัก ก่อนที่จะนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และไมโครซิลิกาไปใช้ในการทดสอบได้ทำการผสมจนเข้ากันตามอัตราส่วนที่กำหนดโดยน้ำหนักจนมีสีสม่ำเสมอ

3.4.1 <u>การทดสอบหาค่าความข้นเหลวปกติของซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคต</u>

(Test for Normal Consistency of Cement by Vicat Apparatus)

ในการทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ ของซีเมนต์ที่ได้มาตรฐานนั้นปริมาณน้ำที่นำไปผสมกับซีเมนต์จะต้องเป็นปริมาณที่เหมาะสม และ ตรงตามมาตรฐาน มิเช่นนั้นแล้วผลของการทดสอบคุณสมบัติต่างๆที่ได้ย่อมไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกันได้

ปริมาณน้ำที่พอเหมาะ หรือเหมาะสมนั้น หมายถึงปริมาณน้ำ ( คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักของซีเมนต์ ) ที่เมื่อผสมซีเมนต์แล้วทำให้ซีเมนต์เพสท์มีความข้นเหลวปกติ ( Normal Consistency ) สภาพความข้นเหลวปกติของซีเมนต์ หมายถึงสภาพที่เมื่อปล่อยเข็มมาตราฐานไวแคต (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม.) แล้วเข็มนั้นจะจมลงไปในซีเมนต์เพสต์ 10 มม. ในระยะเวลา 30 วินาที

กล่าวโดยสรุป การทดสอบเรื่องนี้เป็นการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติอื่นๆ ของซีเมนต์ต่อไปนั้นเอง

<u>อุณหภูมิและความชื้น</u>

1. อุณหภูมิของอากาศในบริเวณที่ทำการทดลองควรอยู่ระหว่าง 20 ถึง 27.5° ซ. และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ผสมระหว่าง 23 ± 1.7° ซ.

2. ความชื้นสัมพัทธ์ในบริเวณที่ทำการทดลองไม่ควรน้อยกว่าร้อยละ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทดลอง

1. ชั่งซีเมนต์จำนวน 650 ก. และใส่ลงในถาดสำหรับผสม

2. เกลี่ยซีเมนต์ให้มีลักษณะเป็นรูปกรวยภูเขาไฟ แล้วเทน้ำที่ทราบปริมาณที่แน่นลงไป (ในการทดสอบครั้งแรกอาจใช้น้ำประมาณ 26% หรือ 130 มล.) และในขณะที่เทน้ำนั้นให้ใช้เกรียงเกลี่ยซีเมนต์ด้านนอกเข้าไปด้านในด้วยเพื่อกันการระเหยของน้ำ ให้เทน้ำให้หมดภายในระยะเวลา 30 วินาที

3. ปล่อยทิ้งไว้ให้ซีเมนต์ดูดซึมน้ำอีกเป็นเวลา 30 วินาทีในระหว่างนี้อาจใช้เกรียงช่วยป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออกไป

4. หลังจากนั้นให้ใช้มือบีบ นวด ขยำ อย่างแรง เพื่อให้น้ำกับซีเมนต์ผสมเข้ากันอย่างทั่วถึงเป็นระยะเวลา 90 วินาที

5. จากนั้นให้ใช้มือทั้งสองปั้นซีเมนต์เพสท์ที่ได้ให้เป็นก้อนกลมๆ อย่างรวดเร็ว แล้วโยนจากมือหนึ่งไปอีกมือหนึ่งสลับกันไป จำนวน 6 ครั้ง โดยให้มือทั้งสองห่างกันประมาณ 15 ซม.

6. จากนั้นในขณะที่มือข้างหนึ่งถือซีเมนต์เพสท์ลูกกลมอยู่นั้น ให้อัดซีเมนต์เพสท์เข้าไปทางด้านใหญ่ของแบบวงแหวนรูปกรวยของเครื่องมือไวแคต ซึ่งถือไว้ด้วยมืออีกข้างหนึ่ง

7. ปาดซีเมนต์เพสท์ที่เกินอยู่ทางด้านใหญ่ของแบบออก โดยใช้มือเลื่อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

8. วางแบบด้านใหญ่ลงบนแผ่นแก้ว แล้วปาดซีเมนต์เพสท์ที่เกินอยู่ทางด้านเล็กออกโดยใช้เกรียงตัดเฉียง ๆ กับด้านบนของแบบ จากนั้นให้ตกแต่งผิวหน้าให้เรียบร้อย โดยใช้ปลายเกรียงแตะ ๆ เท่านั้นห้ามมิให้มีการอัดซีเมนต์เพสท์ด้วยแรงใด ๆ ทั้งสิ้น

9. วางซีเมนต์เพสท์ให้อยู่ใต้เข็ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ของเครื่องมือไวแคต (ควรตรวจสอบเครื่องมือก่อนว่าเข็มของเครื่องมือไวแคตสามารถเลื่อนขึ้นลงได้อย่างสม่ำเสมอ)

10. เลื่อนปลายเข็มให้แตะกับผิวของเพสท์ตรงกลางแบบ จากนั้นอ่านสเกลหน้าปัทม์ (หรืออาจตั้งให้อ่านสเกลที่ศูนย์ก็ได้)

11. ให้ปล่อยเข็มทันทีเมื่อผสมซีเมนต์เสร็จแล้ว 30 วินาที

12. อ่านสเกลหน้าปัทม์อีกครั้งหนึ่งหลังจากที่ปล่อยเข็มไปได้ 30 วินาที ซึ่งจะทำให้ทราบได้ว่าเข็มจมไปเท่าใด

13. ให้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้ (เป็น %) กับส่วนที่เข็มจม (เป็น มม.)

14. ให้ทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง (จากข้อ 1 ถึงข้อ 13) โดยใช้ซีเมนต์ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุกครั้ง จนกระทั่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้กับส่วนที่เข็มจมลงไป 10 มม. ได้จากกราฟ ปริมาณน้ำที่หาได้ก็คือความข้นเหลวปกติของซีเมนต์นั้นๆ

การคำนวณ

ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ความข้นเหลวปกติ ให้คำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักปูนซีเมนต์แห้งโดยคำนวณให้ละเอียดถึงร้อยละ 0.1 และต้องรายงานให้ละเอียดถึงร้อยละ 0.5

$$\text{ปริมาณน้ำ , \%} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่ใช้ (ก.) x 100}}{\text{น้ำหนักปูนซีเมนต์แห้ง (ก.)}}$$

3.4.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

(Test for Setting Time of Cement Paste)

ภายหลังจากที่ซีเมนต์ได้ผสมรวมตัวกับน้ำแล้ว จะเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่ง (Super-saturated solution) มีลักษณะเป็นผนึกข้น ๆ คล้ายวุ้น และวุ้นซีเมนต์ดังกล่าวจะเริ่มก่อตัวและแข็งตัวตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวของวุ้นซีเมนต์นี้ แบ่งเป็นสองระยะคือ ระยะเวลาการเริ่มก่อตัว (Initial setting time) ซึ่งจะเกิดประมาณ 2 - 4 ชม. ภายหลังที่ซีเมนต์ผสมกับน้ำและระยะเวลาก่อตัวเสร็จ (Final setting time) กินเวลาไม่มากกว่า 10 ชม. ส่วนการก่อตัวผิดปกตินั้น เกิดจากวุ้นซีเมนต์แข็งตัวเร็วกว่าปกติ โดยไม่เกิดความร้อนมากนัก

ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวนี้จะใช้วิธีทดสอบแบบกิลโมร์

วิธีทดลอง

1. ปั้นวุ้นซีเมนต์บนแผ่นกระจกสี่เหลี่ยมสะอาด ขนาดประมาณ 100 x 100 มม. การปั้นให้ปั้นเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 76 มม. และกดให้แบนโดยมีความหนาประมาณ 13 มม. และใช้เกรียงปาดให้ปูนลาดลงจากขอบบนถึงขอบล่าง เสร็จแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ชื้นหรือห้องชื้น ประมาณ 30 นาที

2. จากนั้นให้นำตัวอย่างดังกล่าวมาวางบนแท่นของอุปกรณ์กิลโมร์ เลื่อนตัวอย่างให้อยู่ใต้เข็มขนาดเล็ก ซึ่งใช้สำหรับวัดเวลาการก่อตัว

3. เวลาเริ่มก่อตัวของวุ้นซีเมนต์ คือ เวลาที่ผ่านไปตั้งแต่เริ่มผสมวุ้นซีเมนต์จนกระทั่งเมื่อตัวอย่างสามารถรับน้ำหนักเข็มขนาดเล็กได้โดยไม่จมลงไป (เห็นเพียงรอยเข็ม)

4. จากนั้นจึงตั้งตัวอย่างทิ้งไว้เฉย ๆ อีกประมาณ 9 ชม. จึงเลื่อนตัวอย่างมาอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เข็มขนาดใหญ่ ซึ่งใช้วัดระยะเวลาก่อตัวเสร็จ

5. ระยะเวลาก่อตัวเสร็จ คือเวลาที่ผ่านไปตั้งแต่เริ่มผสมวุ้นซีเมนต์ จนกระทั่งเมื่อตัวอย่างสามารถรับน้ำหนักเข็มได้โดยไม่จมลงไป

### 3.4.3 การทดสอบหาค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์

(Test for Soundness of Cement Paste)

เพื่อหาค่าความคงตัวของซีเมนต์ ที่เนื่องมาจากการที่ซีเมนต์ผสมกับน้ำและเริ่มแข็งตัว ปูนซีเมนต์ที่ไม่คงตัวจะค่อย ๆ ขยายตัวอย่างช้า ๆ และกินเวลานาน จะเกิดการบวมหรือแยกตัวออกจากกันหากถูกบ่มอยู่ในน้ำตลอดเวลา หรือจะหดตัวหารปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งเกินไป การยืดหรือหดตัวทำให้เกิดความเค้นภายในวุ้นซีเมนต์และอาจมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น สาเหตุที่ทำให้ซีเมนต์ไม่คงตัว เนื่องมาจากการที่มียิปซั่มหรือปูนขาวหรือแมกนีเซียมมากเกินไปนั่นเอง

ในการทดสอบหาค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์จะใช้วิธีทดสอบแบบ"La Chatelier" Split mould test เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณส่วนเกินของปูนขาว

<u>วิธีทดลอง</u>

1. ผสมซีเมนต์กับน้ำโดยใช้ปริมาณน้ำที่ให้ความข้นเหลวที่เหมาะสม การผสมควรผสมด้วยเครื่องผสม

2. วางแบบ เลอชาตาเลีย บนที่ราบเรียบและนำวุ้นซีเมนต์ที่ผสมได้จากขั้นตอนที่ 1 เทลงในแบบ ค่อย ๆ อัดซีเมนต์โดยอย่าให้น้ำหนักกดมากนัก แล้วใช้เกรียงเหล็กปาดหน้าให้เรียบเสียบเข็มหมุดที่ปลายทั้งสองข้างของแบบเพื่อใช้วัดการยืดหด

3. ปิดแผ่นกระจกใสลงบนแบบและกดทับด้วยน้ำหนักเล็กน้อยทิ้งไว้เฉย ๆ ประมาณ 30 นาที ให้ได้ระยะเวลาเริ่มก่อตัวของวุ้นซีเมนต์ จึงนำทั้งแบบลงบ่มในน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 20 $\pm$ 1° C เป็นเวลา 24 ชม.

4. เมื่อครบกำหนดให้นำแบบหล่อขึ้นมาจากน้ำ และวัดระยะที่ปลายเข็มหมุดในแต่ละช่อง

5. จากนั้นนำแบบซีเมนต์ใส่ลงในหม้อต้มน้ำ และเพิ่มความร้อนให้ถึงจุดเดือดภายในเวลา 25 - 30 นาที และต้มต่อไปเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. จึงนำแบบขึ้นมา และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นไม่ต่ำกว่า 15 นาที จึงวัดระยะที่ปลายเข็มหมุดอีกครั้งหนึ่ง

6. ซีเมนต์ที่ดี การยืดหรือหดตัวที่วัดได้ในครั้งหลังไม่ควรเกิน 10 มม. จากที่วัดครั้งแรก ถ้าเกินซีเมนต์จะต้องถูก aerated เป็นเวลา 7 วันและทดสอบซ้ำ คราวนี้การขยายตัวต้องไม่เกิน 5 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ

3.5.1 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

(Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars)

การทดสอบหากำลังดึงของมอร์ตาร์ซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่างแบบบริเคทนี้ มิได้มีวัตถุประสงค์ที่จะหากำลังดึงหรือความแข็งแรงโดยตรง แต่การทดสอบครั้งนี้จะเป็นตัวแสดงให้ทราบถึงคุณภาพของซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบว่า ซีเมนต์ชนิดนั้นมีคุณภาพได้มาตรฐานหรือไม่ และเหมาะสมที่จะเอาไปใช้ในงานคอนกรีตหรือไม่

หากการทดสอบหากำลังดึงของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ได้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานแล้ว ก็ไม่สมควรที่จะนำซีเมนต์นั้นไปใช้ในงานคอนกรีตอีกต่อไป การที่ค่าที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐานอาจเนื่องมาจากซีเมนต์นั้นเป็นซีเมนต์ที่เก่าผลิตมานานแล้ว หรืออาจเนื่องมาจากการเก็บรักษาซีเมนต์ไม่ดีเพียงพอซีเมนต์ได้รับความชื้นทำให้เสื่อมคุณภาพได้ ถึงแม้ว่าผู้ผลิตจะรับรองว่าซีเมนต์ที่ผลิตได้มาตรฐานก็ตาม การทดสอบวิธีนี้ก็จะช่วยให้ผู้ควบคุมมีความมั่นใจในคุณภาพของซีเมนต์ยิ่งขึ้น

มาตรฐาน ASTM C 150 ได้กำหนดถึงคุณภาพของซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ โดยเมื่อทำการทดสอบหากำลังดึงของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ซึ่งมีอัตราส่วนผสม 1 ส่วนของซีเมนต์ต่อ 3 ส่วนของทรายมาตรฐานโดยน้ำหนักแล้ว จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1

ทรายมาตรฐาน

ทรายมาตรฐานจะต้องเป็นทรายธรรมชาติ ซึ่งได้จากออตตาวา มลรัฐอิลินอยส์ ซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างตะแกรงเบอร์ 30

อุณหภูมิและความชื้น

1. อุณหภูมิของอากาศในบริเวณที่ทำการทดลอง รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องมือควรอยู่ระหว่าง 20 ถึง 27.5° ซ. อุณหภูมิของห้องเก็บตัวอย่างบริเคทควรจะอยู่ระหว่าง 21.3 ถึง 24.7° ซ.

2. ความชื้นสัมพันธ์ ของห้องทดลอง หรือ ห้องปฏิบัติการไม่ควรน้อยกว่าร้อยละ 50 และความชื้นสัมพันธ์ของห้องเก็บตัวอย่างไม่ควรน้อยกว่าร้อยละ 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 กำลังดึงของมอร์ตาร์ ซีเมนต์, บอนด์ต่อตารางนิ้ว (กก./ซม$^2$)

| อายุและสภาพการบ่ม | ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 วันในอากาศชื้น | – | – | 275 (19.3) | – | – |
| 1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ | 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 27 วันในน้ำ | 350 (24.5) | 325 (22.8) | – | 300 (21.0) | 325 (22.8) |

<u>จำนวนตัวอย่างบริเคท</u>

ในการทดสอบหาผลของกำลังดึงของตัวอย่างแต่ละชุดควรทดสอบไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง

<u>วิธีทดลอง</u>

1. ปฏิภาคส่วนผสมของมอร์ตาร์ มาตรฐานประกอบด้วยซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐาน 3 ส่วนโดยน้ำหนัก ในการเตรียมตัวอย่าง 6 ตัวอย่างจะต้องใช้ซีเมนต์ 300 ก. และทรายมาตรฐาน 900 ก. และสำหรับ 9 ตัวอย่างจะต้องใช้ซีเมนต์ 450 ก. และทรายมาตรฐาน 1,350 ก.

2. คำนวณปริมาณน้ำที่จะใช้ผสมมอร์ตาร์จาก $Y = \frac{P}{6} + 6.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Y เป็นปริมาณน้ำที่ต้องการโดยน้ำหนักเป็นร้อยละของน้ำหนักรวมของซีเมนต์และทราย

P เป็นร้อยละของน้ำที่ทำให้ซีเมนต์ที่ใช้มีความข้นเหลวปกติ (Normal - Consistency) ซึ่งได้มาจากการทดสอบหาค่าความข้นเหลวปกติของซีเมนต์

3. เทซีเมนต์และทรายมาตรฐาน ตามจำนวนที่ต้องการลงบนพื้นซึ่งไม่ดูดน้ำ เช่น ถาดผสม (Mixing Plate) แล้วผสมแห้งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำให้เป็นกองโดยตรงกลางเป็นแอ่ง (Crater) สำหรับเทน้ำลงไป

4. ค่อย ๆ เทน้ำปริมาณเท่ากับที่คำนวณได้จากข้อ 2 ลงในแอ่งกลาง ให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 30 วินาที ในขณะที่เทน้ำให้ใช้เกรียงตักวัสดุที่อยู่ในด้านนอกเข้าไปในแอ่งกลางด้วย

5. ทิ้งให้มอร์ตาร์ ดูดซึมน้ำอีก 30 วินาที ในระหว่างนี้พยายามมิให้น้ำระเหยออก

6. จากนั้นผสมให้ส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้มือเขย่า บีบ นวด อย่างแรงเป็นเวลา 90 วินาที

7. เทซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมแล้วลงในแบบบริเคทจนพูนออกมา แบบบริเคทนี้จะต้องสะอาด และชโลมน้ำมันให้ทั่วไว้ก่อนแล้ว จากนั้นใช้หัวแม่มือทั้งสองข้างกดมอร์ตาร์ให้ทั่วอย่าง ๆ ละ 12 ครั้ง แรงที่หัวแม่มือทั้งสองข้างใช้กดประมาณ 6.8 ถึง 9.1 กก.

8. ตักมอร์ตาร์ใส่ให้พูนอีกเล็กน้อยจากนั้นใช้เกรียงบาดและกดหน้าให้เรียบ แรงกดจะต้องไม่เกิน 1.8 กก.

9. กลับแบบโดยใช้แผ่นแก้วช่วย จากนั้นให้ทำซ้ำตามข้อ 7 และข้อ 8 อีกครั้งหนึ่ง (ห้ามกระทุ้ง กระแทก หรือใช้เกรียงกดนอกเหนือไปจากใช้เกรียงทำให้ผิวหน้าเรียบเท่านั้น)

10. เก็บตัวอย่างทั้งหมดในห้องเก็บตัวอย่าง เป็นระยะเวลาประมาณ 20 ถึง 24 ชั่วโมง โดยให้ผิวบนของตัวอย่างสัมผัสกับอากาศชื้นแต่ไม่ให้ถูกหยดน้ำ หากแกะแบบออกก่อนที่ตัวอย่างจะมีอายุครบ 24 ชั่งโมง ให้เก็บตัวอย่างไว้ในอากาศชื้นจนครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเอาตัวอย่างไปแช่ไว้ในน้ำ (ยกเว้นตัวอย่างที่ต้องทดสอบที่ 24 ชั่วโมง) น้ำที่ใช้แช่ควรจะสะอาด โดยมีการเปลี่ยนน้ำอยู่เสมอ

11. ทดสอบกำลังดึงของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ ตามอายุที่กำหนดไว้ในมาตรฐานที่อ้างอิง โดยอนุญาตให้มีความคลาดเคลื่อนของอายุได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| อายุทดสอบ | ความคลาดเคลื่อนได้ |
|---|---|
| 24 ชม. | ± 1/2 ชม. |
| 3 วัน | ± 1 ชม. |
| 7 วัน | ± 3 ชม. |

ก่อนการทดสอบให้เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้งพร้อมทั้งทำความสะอาดตัวอย่างด้วย จากนั้นจึงใส่ตัวอย่างบริเดทในเครื่องทดสอบกำลังดึง โดยให้แรงดึงสม่ำเสมอด้วยอัตราประมาณ 275 ± 10 กิโลกรัมต่อนาที (600 ± 25 ปอนด์ต่อนาที) จนกระทั่งตัวอย่างขาด (Fail)

<u>หมายเหตุ</u> ค่ากำลังดึงของแต่ละตัวอย่าง ถ้าหากว่าแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยเกิน 15% แล้วจะถือว่าค่านั้นใช้ไม่ได้ แต่อย่างน้อยจะต้องเหลือไว้ 2 ค่า สำหรับหาค่าเฉลี่ยของกำลังดึง หากเหลือน้อยกว่า 2 ค่าจะต้องทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด

<u>การคำนวณ</u>

ค่ากำลังดึงของตัวอย่างบริเดทนี้ จะแสดงออกมาในรูปของหน่วยแรงดึงที่ทำให้ตัวอย่างบริเดทขาดพอดี ค่านี้คำนวณได้จากสูตร

$$f_t = \frac{P}{A}$$

เมื่อ $f_t$ เป็นค่ากำลังดึง (Tensile Strength) หรือหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ที่จุดประลัย

P เป็นแรงดึงประลัย

A เป็นพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของตัวอย่างบริเดท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 <u>การทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์</u>

(Test for Consistency of Cement Mortar)

<u>วิธีการทดลอง</u>

1. เตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์มาตรฐาน จากซีเมนต์ 1 ส่วนและทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก คลุกเคล้าให้เข้ากันดี

2. เตรียมโต๊ะควบคุมการไหลให้พร้อม ด้วยการเช็ดส่วนต่าง ๆ ให้แห้งสนิท โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนจานกลม (plate) ที่จะวางซีเมนต์มอร์ตาร์และวางแบบทองเหลือง (mould) ลงตรงศูนย์กลางของจาน

3. ผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ส่วนหนึ่งให้พอดีกับที่จะบรรจุลงในแบบ ด้วยอัตราส่วนของน้ำที่ต่ำสุด (ปกติควรเริ่มที่ 10%) คลุกเคล้าให้ทั่วกันดี แล้วจึงนำมาใส่ลงในแบบโดยการแบ่งใส่เป็น 2 ชั้นชั้นละครึ่งแบบ แต่ละชั้นให้กระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งมาตรฐานขนาด 1" x 5" x 1/2" จำนวน 20 ครั้ง เมื่อครบ 2 ชั้นแล้ว จึงปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกให้พอดีปากแบบบนำส่วนเกินออกไปให้พ้นจาน จากนั้นจึงค่อย ๆ ยกแบบขึ้นตรง ๆ อย่างระมัดระวัง

4. หมุนลูกเบี้ยวของโต๊ะควบคุมการไหลเพื่อให้จานเลื่อนสูงขึ้น 1/2" แล้วกระแทกลงกับแกนด้วยน้ำหนักของตัวมันเองให้ได้ 25 ครั้ง ภายในระยะเวลา 15 $\pm$ 1 วินาที

5. เมื่อครบจำนวนครั้งแล้วทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่กระจายออกไปรอบ ๆ โดยวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนจานทั้งหมด 4 แนว รวมเป็น 4 ค่า บันทึกผลรวมทั้ง 4 ค่านี้ไว้พร้อมกับอัตราของน้ำที่ใช้

6. การกระจาย วัดจากผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจาย โดยวัดเป็นอัตราส่วน เปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางเดิม

7. การทดลอง ไม่สามารถที่จะทำครั้งเดียวให้ได้ค่าดังแสดงในขั้นตอนที่ 6 ได้ จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำแต่ละครั้งที่ทดลอง เพื่อให้ได้ค่าที่เพียงพอสำหรับนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายที่วัดได้กับอัตราส่วนของน้ำ แล้วจึงใช้กราฟเป็นตัวหาค่าเหมาะสมต่อไป ในการทดลองใหม่แต่ละครั้ง ต้องใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์มาตรฐานที่คลุกเคล้าเตรียมไว้ก่อนแล้วทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

(Test for Compressive Strength of Cement Mortars)

การทดสอบหากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ เป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพของซีเมนต์วิธีหนึ่งว่าซีเมนต์ที่จะนำมาใช้งานนั้นมีคุณภาพได้มาตรฐานหรือไม่

กำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก เตรียมและทดสอบตามวิธีมาตรฐานแล้วจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน

| อายุและการบ่ม | กำลังอัด , กก./ซม$^2$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ประเภทของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 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 |

ทรายมาตรฐานที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ จะต้องเป็นทรายธรรมชาติ จากเมืองออตตาวา มลรัฐอิลินอยส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา และจะต้องมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ขนาดคละของทรายมาตรฐาน

| ตะแกรงเบอร์ (ช่องว่าง มม.) | มวลที่ค้างบนตะแกรง ( % ) |
|---|---|
| 16 (1.180) | 0 |
| 30 (0.600) | 2 ± 2 |
| 50 (0.300) | 72 ± 5 |
| 100 (0.150) | 98 ± 2 |

อุณหภูมิและความชื้น

1. อุณหภูมิของอากาศในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องมือควรอยู่ระหว่าง 20 ถึง 27.5° ซ.

2. อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ผสม ห้องเก็บความชื้นและอุณหภูมิของน้ำที่ใช้เก็บตัวอย่างควรอยู่ระหว่าง 23 ± 1.7° ซ.

3. ความชื้นสัมพัทธ์ของห้องปฏิบัติการไม่ควรน้อยกว่า 50%

4. ความชื้นสัมพัทธ์ของห้องเก็บความชื้นไม่ควรน้อยกว่า 90%

จำนวนตัวอย่าง

ในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องใช้ตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง

วิธีทดลอง

1. ให้ทาน้ำมันชนิดเหลวภายในแบบหล่อตัวอย่างบาง ๆ เพื่อจะได้แกะแบบออกได้โดยง่าย และพยายามป้องกันไม่ให้น้ำปูนไหลออกจากแบบหล่อตัวอย่างได้

2. ให้เตรียมตัวอย่างทรายมาตรฐานตามตารางที่ 2 ให้เพียงพอสำหรับการทดสอบครั้งนี้

3. อัตราส่วนของวัสดุแห้งของมอร์ตาร์ตามมาตรฐานประกอบด้วย ซีเมนต์ 1 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก และใช้น้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.485 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา และ 0.460 สำหรับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่มีสารกักกระจายฟองอากาศ

สำหรับซีเมนต์ชนิดอื่นนั้น น้ำที่ผสม (คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักของซีเมนต์) จะต้องมีปริมาณที่ทำให้เกิดการไหลแผ่ 110 ± 5 ตามการทดลองการไหลแผ่ในข้อ (5)

ปริมาณของวัสดุที่จะต้องผสมสำหรับการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์จำนวน 6 และ 9 ตัวอย่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณวัสดุสำหรับตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์

| วัสดุ | จำนวนตัวอย่าง | |
|---|---|---|
| | 6 | 9 |
| ซีเมนต์ (ก.) | 500 | 740 |
| ทราย (ก.) | 1375 | 2035 |
| น้ำ (มล.) สำหรับ | | |
| -ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารกักกระจายฟองอากาศ | 242 | 359 |
| -ซีเมนต์ชนิดอื่น (ให้มีการไหลแผ่ 110 ± 5) | 230 | 340 |

4. การเตรียมมอร์ตาร์นั้น ให้ผสมวัสดุด้วยเครื่องผสมมอร์ตา ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 17 การผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเครื่องผสม

5. ในการทดลองการไหลแผ่นั้น ให้เช็ดแท่นให้สะอาดและแห้งแล้ววางแบบลงให้อยู่กึ่งกลางของแท่น จากนั้นให้ใส่มอร์ตาร์ที่ผสมแล้วลงในแบบ 1 ชั้น หนาประมาณ 25 มม. แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 20 ครั้ง จากนั้นใส่มอร์ตาอีกชั้นหนึ่งให้ล้นแบบแล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรก เฉือนมอร์ตาร์ส่วนที่เกินออกให้เรียบ ทำความสะอาดแท่นอีกครั้งหนึ่งแล้วยกแบบขึ้นตรง ๆ หลังจากที่ผสมมอร์ตาร์เสร็จแล้ว 60 วินาที จากนั้นให้หมุนให้แท่นตกกระแทกในแนวดิ่งสูง 12.7 มม. จำนวน 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที เสร็จแล้วให้วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่กระจายบนแท่น โดยหาค่าเฉลี่ยจากการวัด 4 ครั้งที่ช่วงห่างเท่าๆ กัน

ให้คำนวณหาการไหลแผ่จาก

$$\text{การไหลแผ่ , \%} = \frac{(D_1 - D_0)}{D_0} \times 100$$

เมื่อ $D_0$ = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบ

$D_1$ = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจายบนแท่น

ให้ทำการทดลองการไหลแผ่ซ้ำอีกโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ จนกระทั่งได้การไหลแผ่ 110 $\pm$ 5% และในการทดลองแต่ละครั้งให้ใช้มอร์ตาร์ใหม่เสมอ

เมื่อได้ค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมแล้ว จึงดำเนินการเตรียมมอร์ตาร์ตามข้อ(4) เพื่อเตรียมตัวอย่างลูกบาศก์ต่อไป

6. หลังจากที่ผสมตามข้อ (4) เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทิ้งไว้ในอ่างอีก 90 วินาที แล้วผสมอีกครั้งหนึ่งด้วยความเร็วปานกลางเป็นระยะเวลา 15 วินาที

7. ให้เริ่มเทมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อตัวอย่าง โดยใส่ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มม. ให้ครบทุกแบบหล่อ กระทุ้งเป็น 4 รอบ โดยแต่ละรอบให้ตั้งฉากกับรอบอื่น และการกระทุ้งนั้นให้มีน้ำหนักเพียงพอที่จะให้มอร์ตาร์บรรจุได้เต็มแบบหล่อเท่านั้น กระทุ้งให้เสร็จ 4 รอบในแต่ละช่องก่อนที่จะไปกระทุ้งช่องอื่นต่อไป

เมื่อกระทุ้งชั้นแรกเสร็จหมดเรียบร้อยแล้ว ให้ใส่มอร์ตาร์ส่วนที่เหลือให้เต็มครบทุกแบบหล่อ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก โดยให้มอร์ตาร์เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วสูงกว่าแบบเล็กน้อย จากนั้นให้ใช้เกรียงแต่งให้เรียบร้อย

8. หลังจากที่หล่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เก็บตัวอย่างซึ่งอยู่ในแบบไว้ในห้องเก็บความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบออกแล้วแช่ในน้ำสะอาด (ยกเว้นตัวอย่างที่ต้องทดสอบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง) และให้หมั่นเปลี่ยนน้ำอยู่เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์ ตามอายุที่กำหนดไว้ โดยอนุญาตให้มีความคลาดเคลื่อนของอายุได้ดังนี้.-

| อายุทดสอบ | ความคลาดเคลื่อนได้ |
|---|---|
| 24 ชม. | ± 1/2 ชม. |
| 3 วัน | ± 1 ชม. |
| 7 วัน | ± 3 ชม. |

ก่อนการทดสอบให้เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง พร้อมทั้งทำความสะอาดตัวอย่างด้วยและในการทดสอบให้ทดสอบในเครื่องทดสอบแรงกดทั่วไปโดยให้แรงอัดทางด้านข้างที่มีผิวเรียบทั้งสองด้าน

ให้ทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างแตก โดยใช้เวลาทดสอบระหว่าง 20 ถึง 80 วินาที

<u>การคำนวณ</u>

ค่ากำลังอัดของตัวอย่างแต่ละก้อนคำนวณได้จากสูตร

$$f_o = \frac{P}{A}$$

เมื่อ $f_o$ = กำลังอัด , กก./ซม$^2$

$P$ = แรงอัดประลัย , กก.

$A$ = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างจริง , ซม$^2$

อนึ่ง หากค่ากำลังอัดของแต่ละตัวอย่างแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งหมดเกินกว่า 10% แล้ว ถือว่าค่านั้นใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ตามหลังจากตัดค่าที่ใช้ไม่ได้ออกแล้วจะต้องมีผลการทดสอบเหลือไว้อย่างน้อย 2 ค่าสำหรับหาค่าเฉลี่ย หากเหลือน้อยกว่า 2 ค่า จะต้องทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ผลการทดสอบและการอภิปราย

## 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

### 4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และไมโครซิลิกาแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และไมโครซิลิกามีค่าเท่ากับ 2.92 และ 2.06 ตามลำดับ

### 4.1.2 ความละเอียด

ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และ ไมโครซิลิกามีค่าเท่ากับ 4,800 ซม$^2$/กรัม และ189,000 ซม$^2$/กรัม ตามลำดับ เมื่อทำการวัดโดยวิธีของเบลน

## 4.2 การทดสอบหาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม

### 4.2.1 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ เพื่อให้ได้ค่าการไหลร้อยละ 105 ถึง 115 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกา มีความต้องการน้ำสูง โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วนมีค่าเท่ากับ 0.33 และเมื่อแทนที่ด้วยไมโครซิลิกา 10, 20, 30, 40, 50% มีค่าเท่ากับ 0.34, 0.38, 0.401, 0.424 และ 0.462 ตามลำดับ และเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการน้ำลดลง

ซึ่งจากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าไมโครซิลิกาทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพราะไมโครซิลิกามีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มาก เมื่อมีความละเอียดมากก็จะต้องจำเป็นต้องใช้น้ำในการเคลือบผิวมาก และสารลดน้ำพิเศษทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำลดลงเนื่องจาก สารลดน้ำพิเศษช่วยลดแรงระหว่างเม็ดซีเมนต์ในเพสต์สด (ACI Commitee, 1989)

### 4.2.2 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษเพื่อหาปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม ได้แสดงไว้ในตารางผนวก ค ส่วนตารางที่ 4.4 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 และ ไมโครซิลิกา

TEST FOR SPECIFIC GRAVITY OF OPC.

| TEST No. | Volume (n1) (cc.) | (n2) (cc.) | WEIGHT cement (g.) | Sp.gr (g/cc.) | REMARK |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19.80 | 22.60 | 8.00 | 2.86 | |
| 2 | 19.90 | 23.35 | 10.00 | 2.90 | |
| 3 | 19.85 | 24.85 | 15.00 | 3.00 | |
| | | | Average | 2.92 | |

TEST FOR SPECIFIC GRAVITY OF MICROSILICA

| TEST No. | Volume (n1) (cc.) | (n2) (cc.) | WEIGHT cement (g.) | Sp.gr (g/cc.) | REMARK |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19.90 | 23.78 | 8.00 | 2.06 | |
| 2 | 19.95 | 24.78 | 10.00 | 2.07 | |
| 3 | 19.90 | 27.22 | 15.00 | 2.05 | |
| | | | Average | 2.06 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

TIME OF SETTING OF HYDRAULIC CEMENT
BY GILLMORE NEEDLES

| OPC:$SiO_2$ | Sup (%) | NORMAL CONSISTENCY (%) | SETTING TIME Ini. | Final |
|---|---|---|---|---|
| 100:0 | 0 | 33.00 | 130 | 220 |
| | 1 | 30.00 | 137 | 222 |
| | 2 | 29.30 | 142 | 222 |
| | 3 | 25.80 | 148 | 224 |
| | 4 | 24.00 | 153 | 235 |
| 90:10 | 0 | 34.00 | 138 | 210 |
| | 1 | 33.50 | 140 | 219 |
| | 2 | 29.50 | 145 | 223 |
| | 3 | 28.60 | 155 | 226 |
| | 4 | 27.60 | 170 | 240 |
| 80:20 | 0 | 38.00 | 110 | 160 |
| | 1 | 34.30 | 120 | 165 |
| | 2 | 31.00 | 123 | 170 |
| | 3 | 30.10 | 127 | 178 |
| | 4 | 29.00 | 130 | 182 |
| 70:30 | 0 | 40.10 | 100 | 145 |
| | 1 | 37.20 | 100 | 147 |
| | 2 | 33.70 | 108 | 150 |
| | 3 | 33.10 | 112 | 166 |
| | 4 | 31.00 | 136 | 178 |
| 60:40 | 0 | 42.40 | 92 | 121 |
| | 1 | 40.00 | 98 | 132 |
| | 2 | 39.25 | 97 | 157 |
| | 3 | 38.10 | 106 | 160 |
| | 4 | 36.27 | 112 | 175 |
| 50:50 | 0 | 46.15 | 65 | 108 |
| | 1 | 44.20 | 77 | 111 |
| | 2 | 42.30 | 81 | 120 |
| | 3 | 41.20 | 98 | 139 |
| | 4 | 40.00 | 109 | 163 |

Remark.
OPC.= Portland cement
$SiO_2$ = Microsilica
Sup.= Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์โดยวิธี "La Chatelier" Split Mould Test

TEST FOR SOUNDNESS

| OPC:$Sio_2$ | Sup | Abs.(W) | D(L) |
|---|---|---|---|
| 100:0 | 0 | 2.71 | 0.29 |
| 100:0 | 1 | 2.33 | 0.22 |
| 100:0 | 2 | 2.25 | 0.22 |
| 100:0 | 3 | 2.10 | 0.21 |
| 100:0 | 4 | 1.90 | 0.21 |
| 90:10 | 0 | 2.33 | 0.30 |
| 90:10 | 1 | 2.30 | 0.18 |
| 90:10 | 2 | 2.00 | 0.18 |
| 90:10 | 3 | 1.70 | 0.15 |
| 90:10 | 4 | 1.90 | 0.18 |
| 80:20 | 0 | 2.10 | 0.20 |
| 80:20 | 1 | 1.90 | 0.17 |
| 80:20 | 2 | 1.90 | 0.17 |
| 80:20 | 3 | 1.45 | 0.10 |
| 80:20 | 4 | 1.60 | 0.12 |
| 70:30 | 0 | 2.21 | 0.23 |
| 70:30 | 1 | 2.20 | 0.21 |
| 70:30 | 2 | 2.18 | 0.20 |
| 70:30 | 3 | 1.98 | 0.19 |
| 70:30 | 4 | 2.00 | 0.22 |
| 60:40 | 0 | 2.30 | 0.22 |
| 60:40 | 1 | 2.22 | 0.21 |
| 60:40 | 2 | 2.12 | 0.21 |
| 60:40 | 3 | 2.10 | 0.20 |
| 60:40 | 4 | 1.95 | 0.20 |
| 50:50 | 0 | 2.35 | 0.21 |
| 50:50 | 1 | 2.30 | 0.21 |
| 50:50 | 2 | 2.20 | 0.20 |
| 50:50 | 3 | 2.10 | 0.18 |
| 50:50 | 4 | 2.00 | 0.19 |

Remark.
OPC. = portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH

| | Age-Day | 1 | | | | 3 | | | | | 7 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OPC:$Sio_2$ | Sup0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 100:0 | 141 | 157 | 190 | 197 | 195 | 190 | 210 | 237 | 248 | 235 | 262 | 273 | 286 | 300 | 280 |
| 90:10 | 144 | 162 | 207 | 240 | 233 | 194 | 215 | 240 | 325 | 310 | 271 | 298 | 350 | 407 | 377 |
| 80:20 | 151 | 178 | 235 | 274 | 260 | 203 | 233 | 261 | 375 | 372 | 295 | 333 | 430 | 504 | 489 |
| 70:30 | 167 | 173 | 181 | 220 | 200 | 177 | 195 | 248 | 296 | 275 | 200 | 210 | 294 | 387 | 353 |
| 60:40 | 120 | 125 | 130 | 135 | 130 | 138 | 146 | 160 | 169 | 170 | 155 | 169 | 181 | 190 | 175 |
| 50:50 | 55 | 62 | 74 | 98 | 91 | 74 | 82 | 120 | 151 | 145 | 77 | 98 | 140 | 165 | 160 |

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน

TEST FOR TENSILE STRENGTH (ksc)

| | Age. Day | 1 | | | | 3 | | | | | 7 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OPC:$Sio_2$ | Sup0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 100:0 | 11 | 12 | 14 | 17 | 14 | 14 | 17 | 16 | 23 | 15 | 15 | 20 | 22 | 27 | 16 |
| 90:10 | 13 | 13 | 15 | 18 | 17 | 15 | 17 | 18 | 24 | 19 | 16 | 20 | 23 | 28 | 20 |
| 80:20 | 14 | 16 | 14 | 18 | 16 | 16 | 16 | 16 | 24 | 23 | 18 | 22 | 29 | 32 | 23 |
| 70:30 | 11 | 11 | 12 | 13 | 13 | 12 | 12 | 15 | 18 | 16 | 12 | 13 | 18 | 26 | 19 |
| 60:40 | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 | 10 | 11 | 11 | 10 | 11 | 11 | 12 | 11 |
| 50:50 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 5 | 5 | 8 | 10 | 9 | 5 | 6 | 8 | 10 | 10 |

Remark.
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer
Sand : Cement = 3:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่ากำลังแรงอัดของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ล้วน จะมีค่าสูงและใกล้เคียงกันเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษตั้งแต่ 0 ถึง 2% โดยกำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 2% แต่กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ 90% และไมโครซิลิกา 10% ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ 3% สำหรับมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 80:20 และ 70:30 กำลังรับแรงอัด Pะสูงขึ้นเมื่อผสมสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้น โดยที่กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมสารลดน้ำพิเศษ 4% จะต่ำกว่าส่วนผสมที่ผสมสารลดน้ำพิเศษ 3% เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือกใช้สารลดน้ำพิเศษ 3% เนื่องจากเป็นปริมาณที่ต่ำและให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงจากการศึกษาของStuart(1980) พบว่าการใส่สารลดน้ำพิเศษมากไปจะทำให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสมซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดน้อยลง

## 4.3 ความข้นเหลวปกติ

ผลการทดสอบความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสม ไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซนต์ และใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 4 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มสารไมโครซิลิกา ความข้นเหลวปกติจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากไมโครซิลิกามีขนาดเล็กมากจึงทำให้ปริมาตรของวัสดุซีเมนต์ (Cementitious Material) เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องการน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์จะลดลงมากขึ้น จากหัวข้อ 4.2 ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมเท่ากับ 3% และปริมาณของไมโครซิลิกา 10 และ20%

## 4.4 ระยะเวลาก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางผนวก ก ส่วนตารางที่ 4.2 และรูปผนวก ข เป็นค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ธรรมดาล้วนและซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมสารลดน้ำพิเศษ 3% มีระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายไม่ต่างกันมากนักแต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

การเพิ่มปริมาณสารไมโครซิลิกามีผลต่อการก่อตัวไม่มากนัก โดยที่ปริมาณสารไมโครซิลิกา 10% จะทำให้แนวโน้มของการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ปริมาณสารไมโครซิลิกา 20, 30, 40 และ 50% กลับทำให้ระยะเวลาการก่อตัวกลับลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบหาปริมาณสารลดน้ำพิเศษ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมเท่ากับ 3% ผลการทดสอบความต้องการน้ำเพื่อให้ได้ค่าการไหลร้อยละ 105 ถึง 115 ได้แสดงไว้ในตารางผนวก ค ส่วนตารางที่ 4.4 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วนผสมไมโครซิลิกา 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และ สารลดน้ำพิเศษ 0 ถึง 4% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์

จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่ผสมสารลดน้ำพิเศษจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ระหว่าง 0 ถึง 3% แต่ที่ 4% กำลังรับแรงอัดจะลดลงเล็กน้อย ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ 3% จะให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ล้วนผสมสารลดน้ำพิเศษ 1, 2, 3 และ 4% เป็น 141, 157, 190, 197 และ 195 กก./ซม$^2$ ตามลำดับ (พิจารณาที่ 1 วัน) การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากการใช้สารลดน้ำพิเศษทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้น (ACI Commitee, 1989)

และเมื่อผสมไมโครซิลิกาในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 กำลังรับแรงอัดเป็น 141, 144, 151, 167, 120 และ 55 กก./ซม$^2$ ตามลำดับ (พิจารณาที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษเท่ากับ 0%) การที่กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงมากขึ้นอีกเนื่องจากการที่ปริมาณสารไมโครซิลิกา 0, 10 และ 20% เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเหลือจากปฏิกิริยาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับน้ำประมาณ 15-30% แต่ที่ปริมาณไมโครซิลิกา 30, 40 และ 50% กำลังรับแรงอัดจะลดลงตามลำดับนั้น เพราะเวลาก่อตัวจะเพิ่มขึ้นมาก ปริมาณไมโครซิลิกามากเกินจำเป็นและสารไมโครซิลิกาที่เหลือจากปฏิกิริยาปอซโซเลนนิก (Pozzolanic Reaction) จะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ และตัวมันเองมีการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง

4.6 กำลังรับแรงดึง

การทดสอบคุณสมบัตินี้มีผลการทดลองสอดคล้อง กับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมเดียวกันจากตารางที่ 4.5

เมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษ 0, 1, 2 และ 3% กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์จะเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ไมโครซิลิกา 100 : 0 และสารลดน้ำพิเศษ 0, 1, 2, 3 และ 4% เป็น 11, 12, 14, 17 และ 14 กก./ซม$^2$ ตามลำดับที่ 1 วัน ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมไมโครซิลิกา 0, 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ผลการทดลองประมาณไมโครซิลิกา 10, 20 และ 30% กำลังรับแรงดึงจะเพิ่มตามลำดับ ส่วนที่ 40 และ 50% จะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัด

## 4.7 การขยายตัวและหดตัว

ผลการทดสอบการขยายตัวและหดตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่3 ผสมไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบการขยายตัวและหดตัวของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมไมโครซิลิกา 0, 10, 20, 30, 40 และ 50% จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่นการหดตัวและขยายตัวของซีเมนต์ : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษที่ 2% 100 : 0 : 2, 90 : 10 : 2, 80 : 20 : 2, 70 : 30 : 2, 60 : 40 : 2 และ 50 : 50 : 2 เป็น 0.22, 0.18, 0.17, 0.20, 0.21 และ 0.20 มม. ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของแท่งตัวอย่างเป็น 2.25, 2.00, 1.95, 2.18, 2.12 และ 2.20 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนจะมีความทึบน้ำน้อย จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสูงกว่าที่ผสมไมโครซิลิกา 10, 20 และ 30% และที่ 40 และ 50% การทึบน้ำจะน้อยกว่า 10, 20 และ 30% อีก เนื่องจากการดูดน้ำของซีเมนต์เจล (Cement Gel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# สรุปผลการทดสอบ

## 5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และไมโครซิลิกามีค่าเท่ากับ 2.92 และ 2.06 ตามลำดับ ความละเอียดของปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 และ ไมโครซิลิกา โดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิติเท่ากับ 4,800 และ 189,000 ซม$^2$/กรัม (ตารางที่ 4.1)

2. ไมโครซิลิกาทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพราะไมโครซิลิกามีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์มากการใส่สารลดน้ำพิเศษมากเกินไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมคือ 3% (ตารางที่ 4.4)

3. การใส่สารลดน้ำพิเศษจะทำให้ความข้นเหลวปกติลดลง แต่การผสมไมโครซิลิกาจะทำให้ความข้นเหลวปกติเพิ่มขึ้น เนื่องจากไมโครซิลิกามีขนาดเล็กมาก (ตารางที่ 4.2)

4. การใส่เฉพาะสารลดน้ำพิเศษจะทำให้ระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายไม่ต่างกันนัก แต่ในขณะเดียวกันถ้าใส่มากเกินไประยะเวลาการก่อตัวก็จะช้าขึ้น (ตารางที่ 4.2)

5. การใส่สารลดน้ำพิเศษ 3% จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น การใส่สารลดน้ำพิเศษ 3% แล้วใช้สารไมโครซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราที่เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้สารไมโครซิลิกาและจะลดลงที่ปริมาณของไมโครซิลิกา 30, 40 และ 50% (ตารางที่ 4.4)

6. กำลังรับแรงดึง จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์พบว่า การใส่สารไมโครซิลิกาและสารลดน้ำพิเศษจะทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น และลดลงที่ปริมาณของสารไมโครซิลิกาที่ 30,40 และ 50% ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (ตารางที่ 4.5)

7. จากกำลังรับแรงอัด,แรงดึง, ระยะเวลาการก่อตัว, การหดและขยายตัว เมื่อเปรียบเทียบกับราคาวัสดุของส่วนผสมเพิ่ม พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 90 : 10 : 3 (ตารางที่ 5.1)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ส่วนผสมที่ใช้ไมโครซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 : สารลดน้ำพิเศษที่เหมาะจะนำไปใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงมากสำหรับงานโครงสร้าง คือ 90 : 10 : 3 และ 80 : 20 : 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ

COST OF MATERIALS PER MORTAR 100 Kg.

| OPC. | $Sio_2$ | Sup. | Compressive strength (Ksc) | Cost OPC (Bath) | Cost Sio (Bath) | Cost Sup. (Bath) | Total cost (Bath) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 0 | 0 | 262.00 | 190.00 | 0.00 | 0.00 | 190.00 |
| 100 | 0 | 1 | 273.00 | 190.00 | 0.00 | 28.00 | 218.00 |
| 100 | 0 | 2 | 286.00 | 190.00 | 0.00 | 56.00 | 246.00 |
| 100 | 0 | 3 | 300.00 | 190.00 | 0.00 | 84.00 | 274.00 |
| 100 | 0 | 4 | 280.00 | 190.00 | 0.00 | 112.00 | 302.00 |
| 90 | 10 | 0 | 271.00 | 171.00 | 300.00 | 0.00 | 471.00 |
| 90 | 10 | 1 | 298.00 | 171.00 | 300.00 | 31.11 | 502.11 |
| 90 | 10 | 2 | 350.00 | 171.00 | 300.00 | 62.22 | 533.22 |
| 90 | 10 | 3 | 407.00 | 171.00 | 300.00 | 93.33 | 564.33 |
| 90 | 10 | 4 | 377.00 | 171.00 | 300.00 | 124.44 | 595.44 |
| 80 | 20 | 0 | 295.00 | 152.00 | 600.00 | 0.00 | 752.00 |
| 80 | 20 | 1 | 333.00 | 152.00 | 600.00 | 35.00 | 787.00 |
| 80 | 20 | 2 | 430.00 | 152.00 | 600.00 | 70.00 | 822.00 |
| 80 | 20 | 3 | 504.00 | 152.00 | 600.00 | 105.00 | 857.00 |
| 80 | 20 | 4 | 489.00 | 152.00 | 600.00 | 140.00 | 892.00 |
| 70 | 30 | 0 | 200.00 | 133.00 | 900.00 | 0.00 | 1,033.00 |
| 70 | 30 | 1 | 210.00 | 133.00 | 900.00 | 40.00 | 1,073.00 |
| 70 | 30 | 2 | 294.00 | 133.00 | 900.00 | 80.00 | 1,113.00 |
| 70 | 30 | 3 | 387.00 | 133.00 | 900.00 | 120.00 | 1,153.00 |
| 70 | 30 | 4 | 353.00 | 133.00 | 900.00 | 160.00 | 1,193.00 |
| 60 | 40 | 0 | 155.00 | 114.00 | 1,200.00 | 0.00 | 1,314.00 |
| 60 | 40 | 1 | 169.00 | 114.00 | 1,200.00 | 46.67 | 1,360.67 |
| 60 | 40 | 2 | 181.00 | 114.00 | 1,200.00 | 93.33 | 1,407.33 |
| 60 | 40 | 3 | 190.00 | 114.00 | 1,200.00 | 140.00 | 1,454.00 |
| 60 | 40 | 4 | 175.00 | 114.00 | 1,200.00 | 186.67 | 1,500.67 |
| 50 | 50 | 0 | 77.00 | 95.00 | 1,500.00 | 0.00 | 1,595.00 |
| 50 | 50 | 1 | 98.00 | 95.00 | 1,500.00 | 56.00 | 1,651.00 |
| 50 | 50 | 2 | 140.00 | 95.00 | 1,500.00 | 112.00 | 1,707.00 |
| 50 | 50 | 3 | 165.00 | 95.00 | 1,500.00 | 168.00 | 1,763.00 |
| 50 | 50 | 4 | 160.00 | 95.00 | 1,500.00 | 224.00 | 1,819.00 |

Remark:

OPC = Portland cement

$Sio_2$ = Microsilica (Replacing cement)

Sup = Superplasticizer

Cost:

- Superplasticizer 28 Bath/kg.
- Microsilica 30 Bath/kg.
- OPC. 95 Bath/50kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

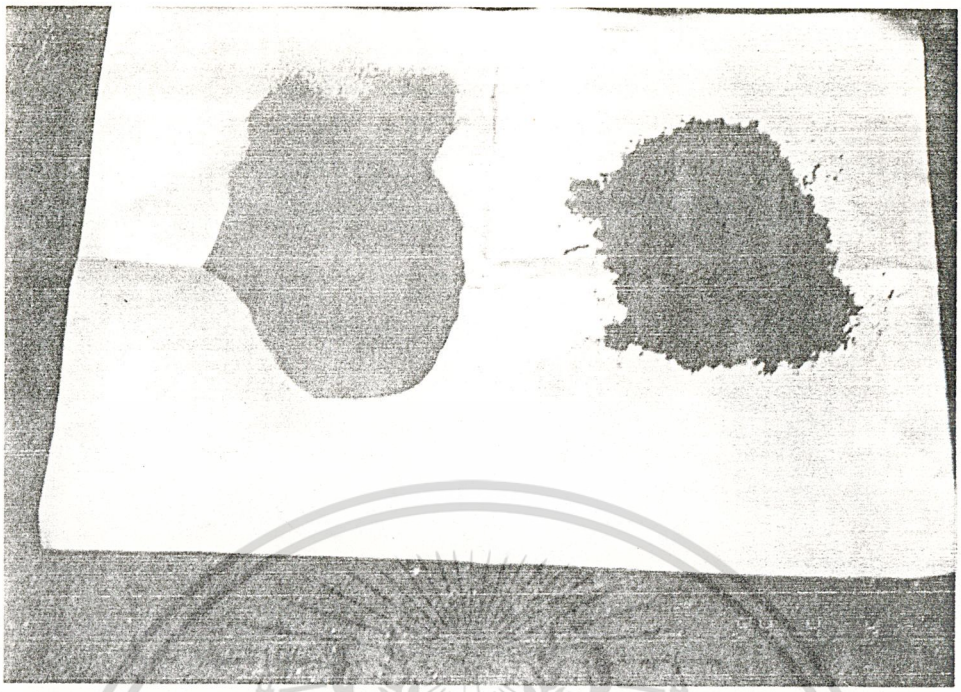
2. ส่วนผสมที่ใช้ไมโครซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 : สารลดน้ำพิเศษที่เหมาะนำไปใช้ในงานซ่อมแซมโครงสร้าง คือ 90 : 10 : 3 เพราะระยะก่อตัวต้นและระยะก่อตัวปลายน้อยให้กำลังรับแรงอัดและดึงสูง การหดและขยายตัวต่ำ

3. ในการศึกษาครั้งต่อไปควรจะศึกษา ให้ครอบคลุมส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับตัวที่เลือกใช้ได้ด้วย ทั้งนี้เพราะในบางโอกาสสามารถใช้ได้และในการทดลองครั้งนี้ควรพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การเกิดสนิมในเนื้อคอนกรีตเพราะมีสารลดน้ำพิเศษ และไมโครซิลิกา และในการทดลองนี้ควรจะพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของส่วนผสม 80 : 20 : 3 เนื่องจากเป็นส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงและระยะเวลาก่อตัวต่ำมากเมื่อนำมาเป็นวัสดุซ่อมแซมโครงสร้าง

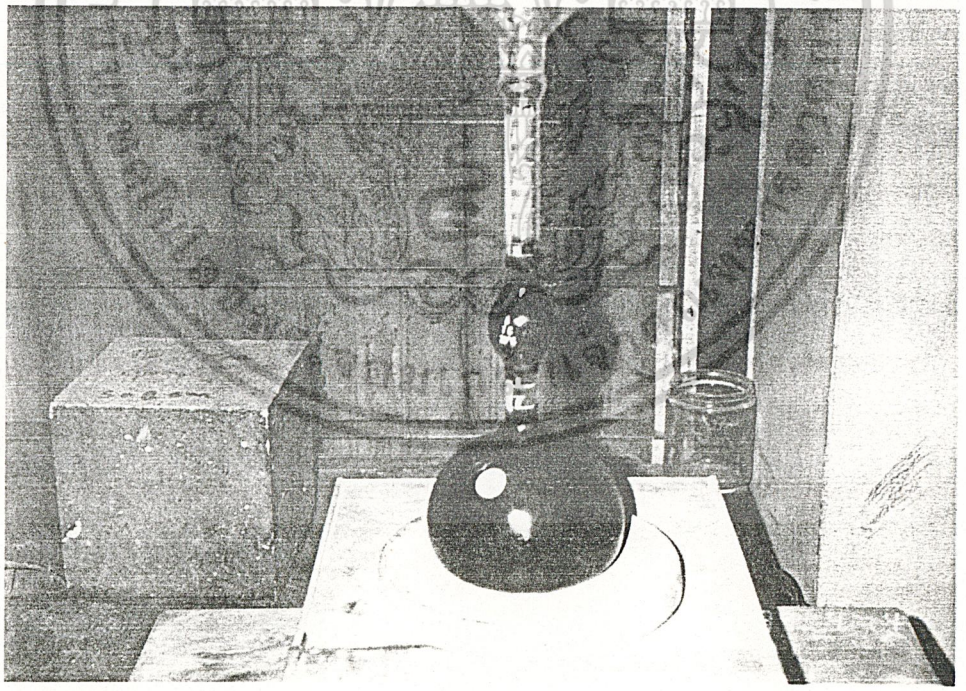
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รูปประกอบคำบรรยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

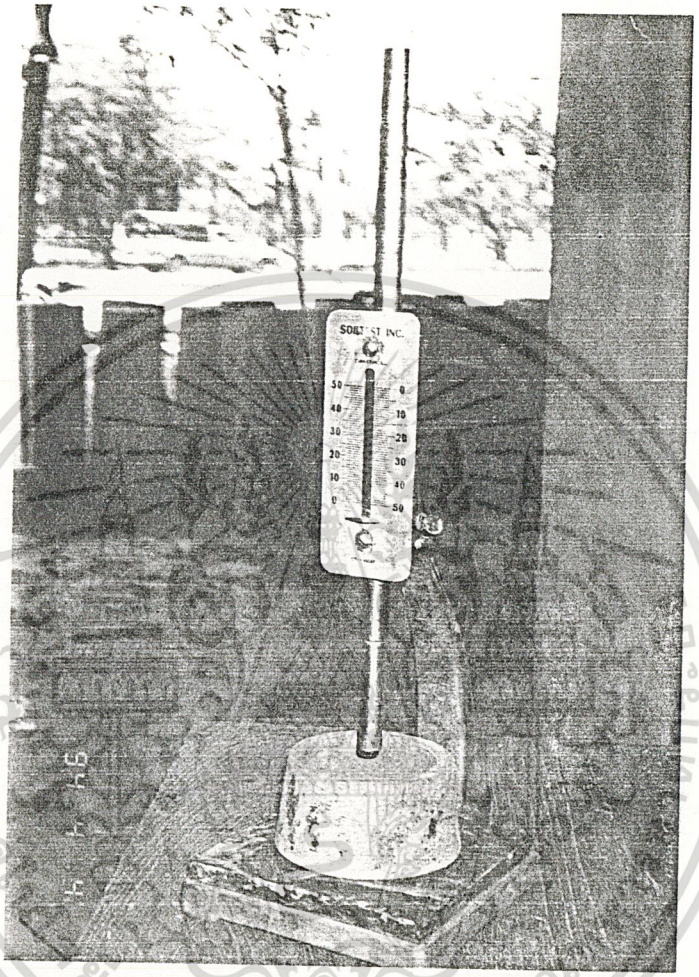


รูปที่ 1 รูปแสดงไมโครซิลิกากับปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์ประเภทที่ 3 (จากซ้ายไปขวา)



รูปที่ 2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกา
โดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลิเยร์ (Le Chatelier Flask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

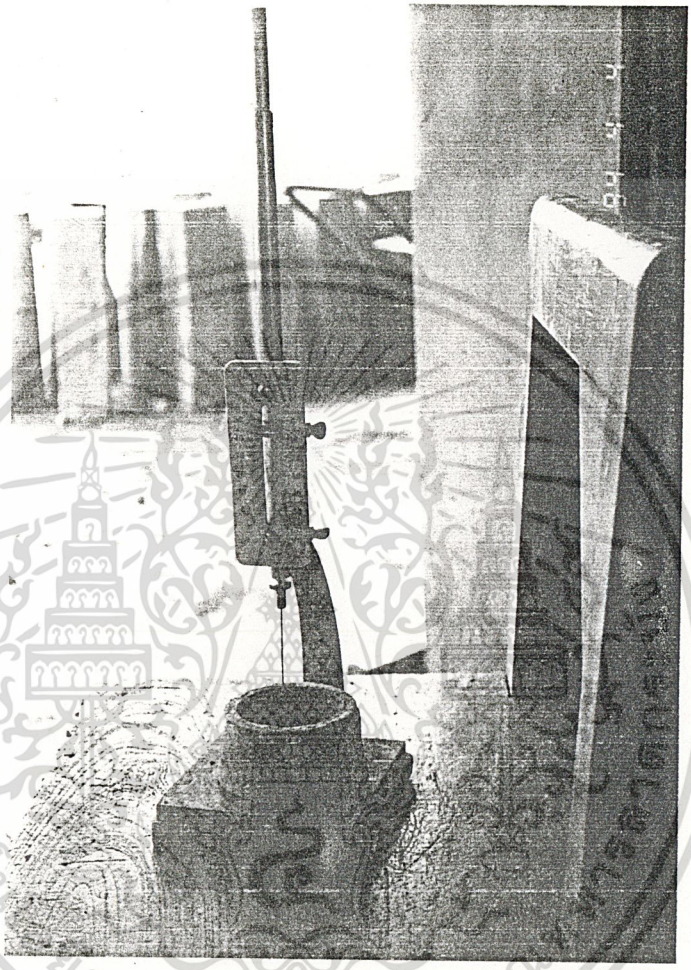



รูปที่ 3 อุปกรณ์ทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์เพสท์ ไวแคท (Vicat)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

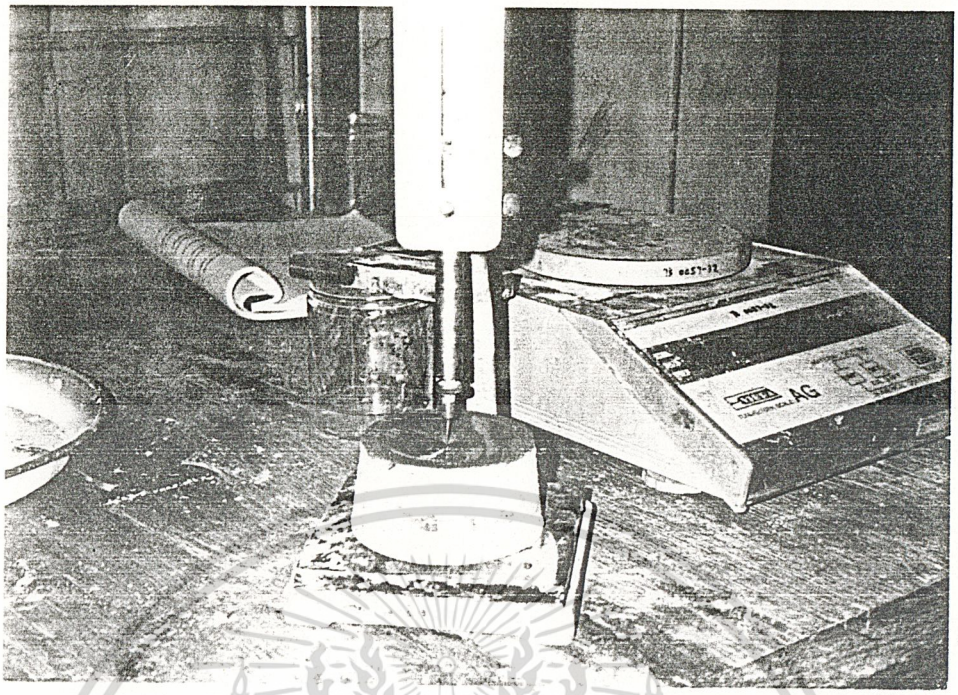
รูปที่ 4 การทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์เพสต์โดย ไวแคท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

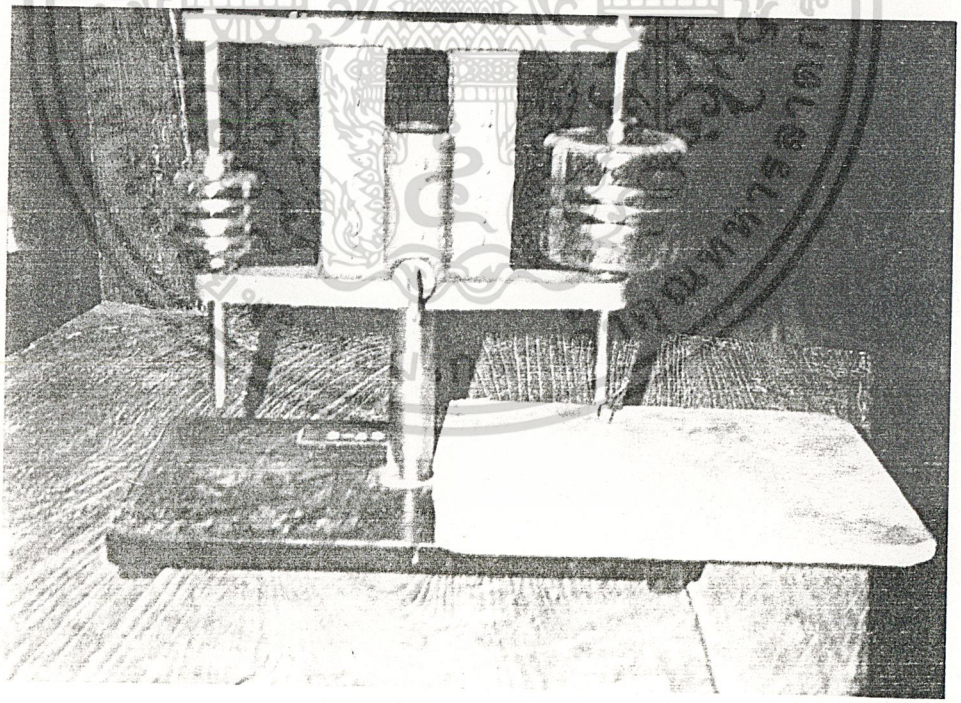


รูปที่ 5 แสดงการเตรียมอุปกรณ์ไวแคทเพื่อทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

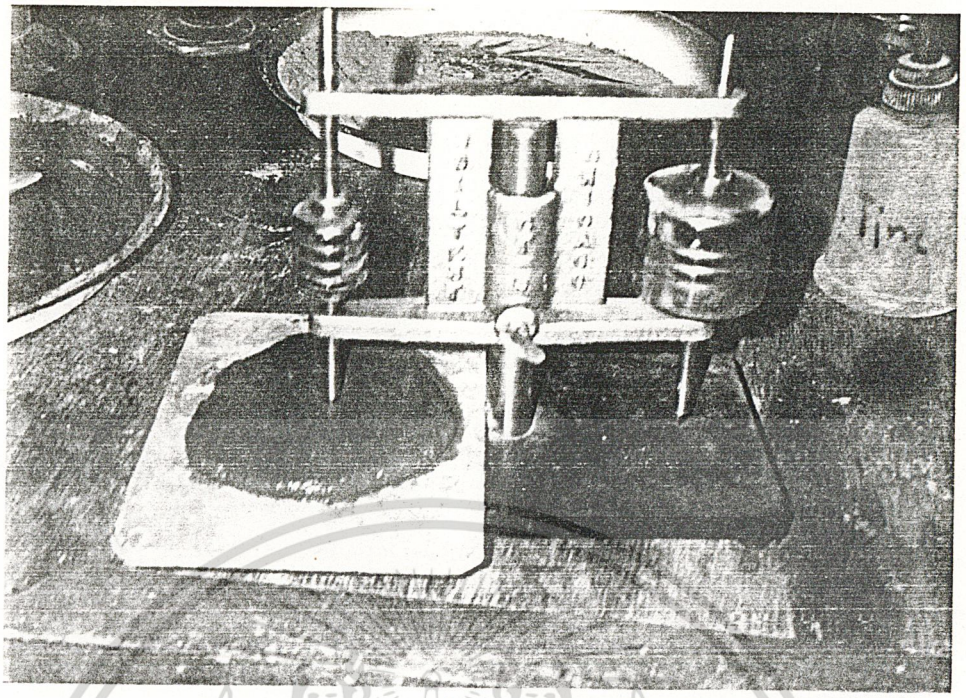


รูปที่ 6 แสดงการทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์แบบไวแคท

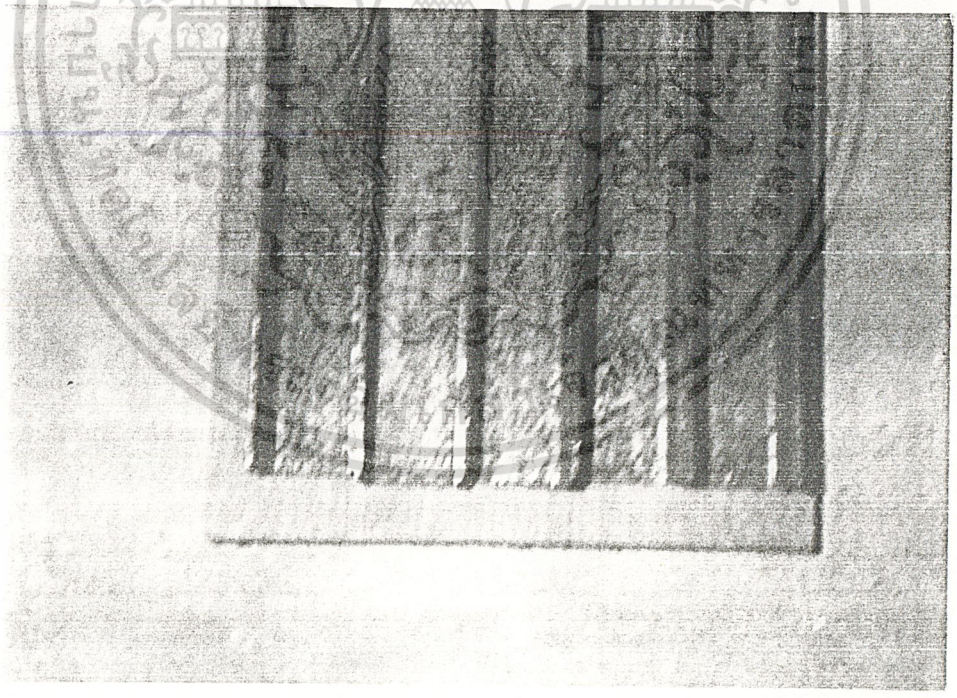


รูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์กิลโมร์ (Gillmore)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

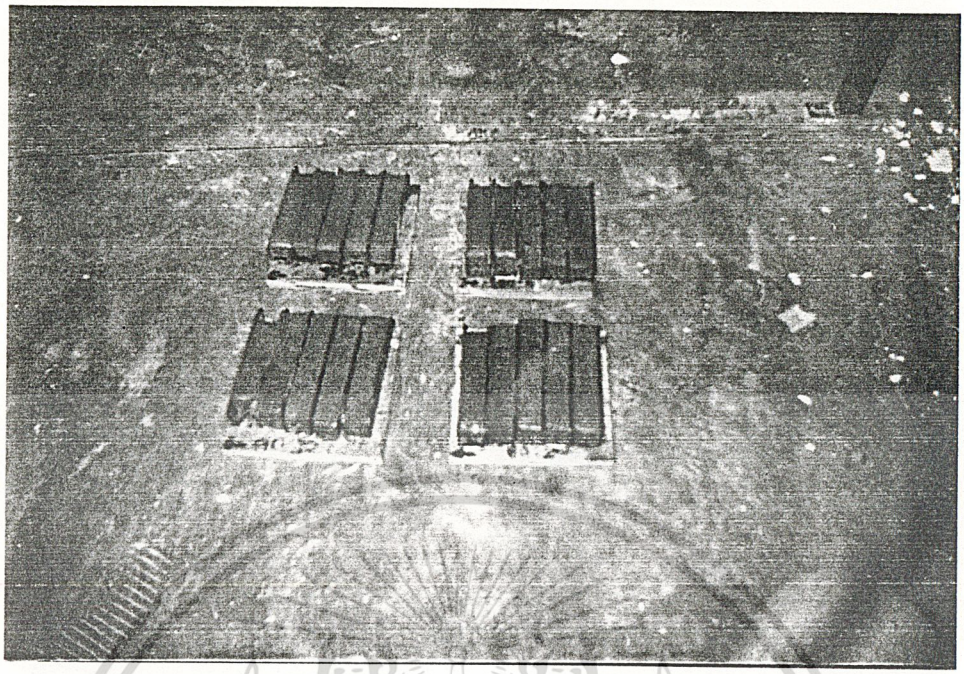


รูปที่ 8 การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวแบบกิลโมร์

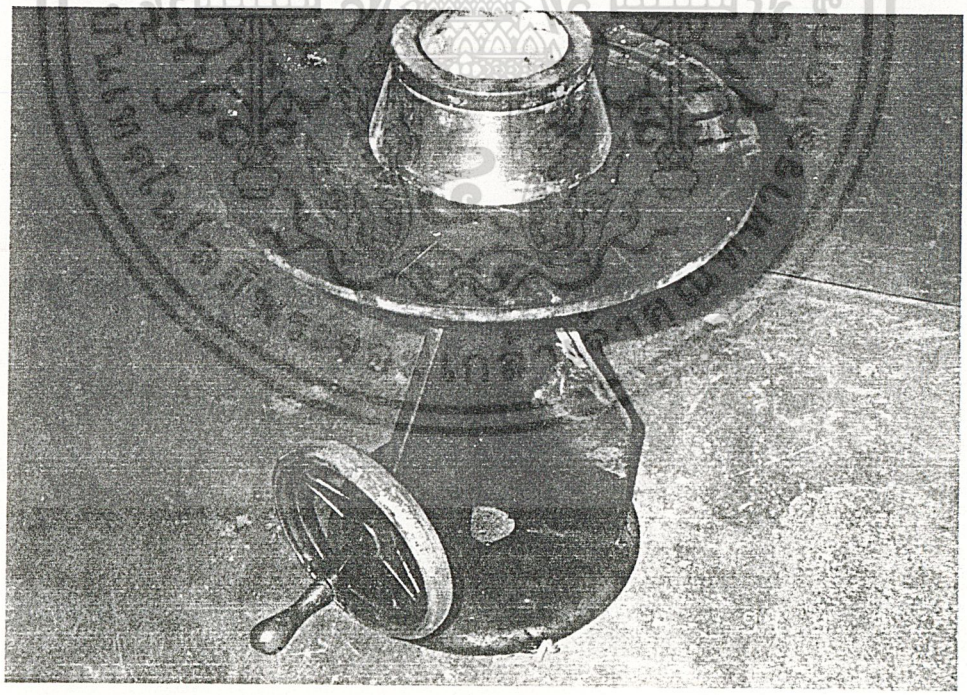


รูปที่ 9 แสดงอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความอยู่ตัวแบบ "La Chatelier" Split Mould Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

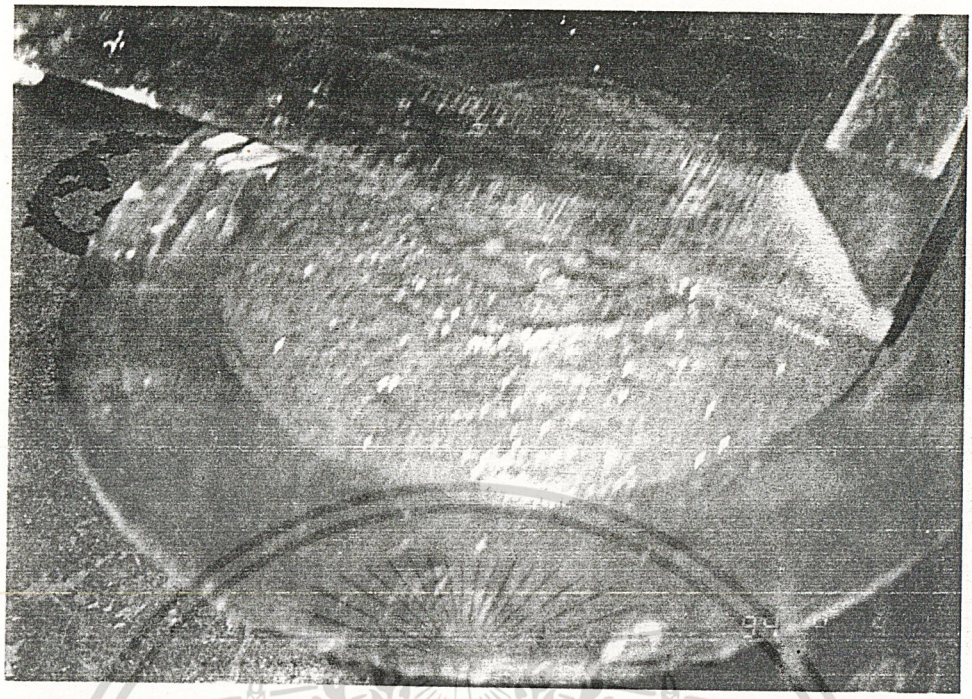


รูปที่ 10 การเตรียมตัวอย่างทดสอบความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์

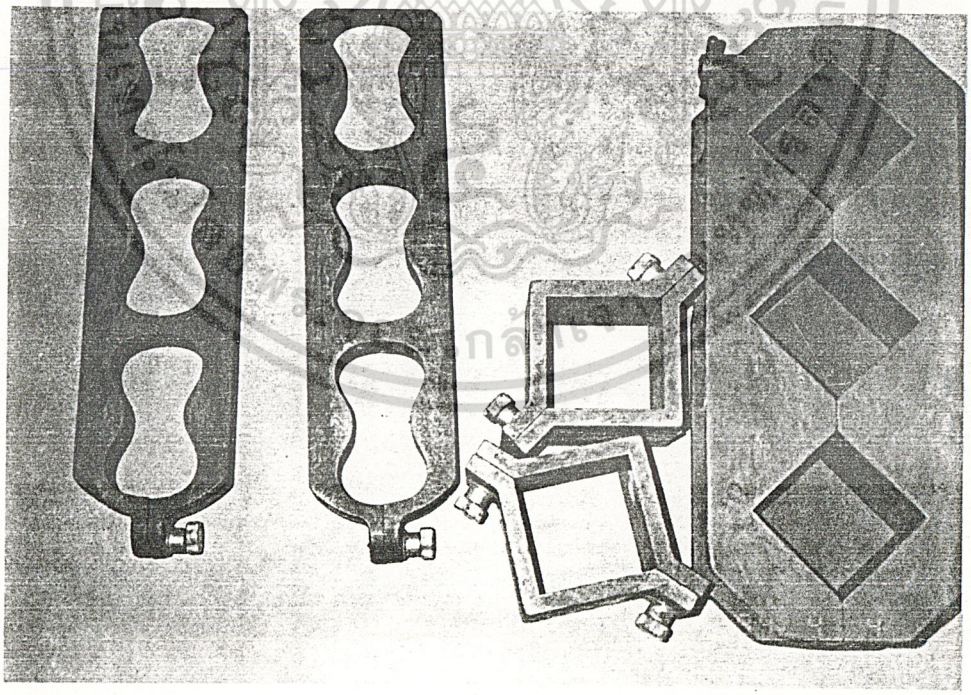


รูปที่ 11 อุปกรณ์โต๊ะควบคุมการไหล (Flow Table)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

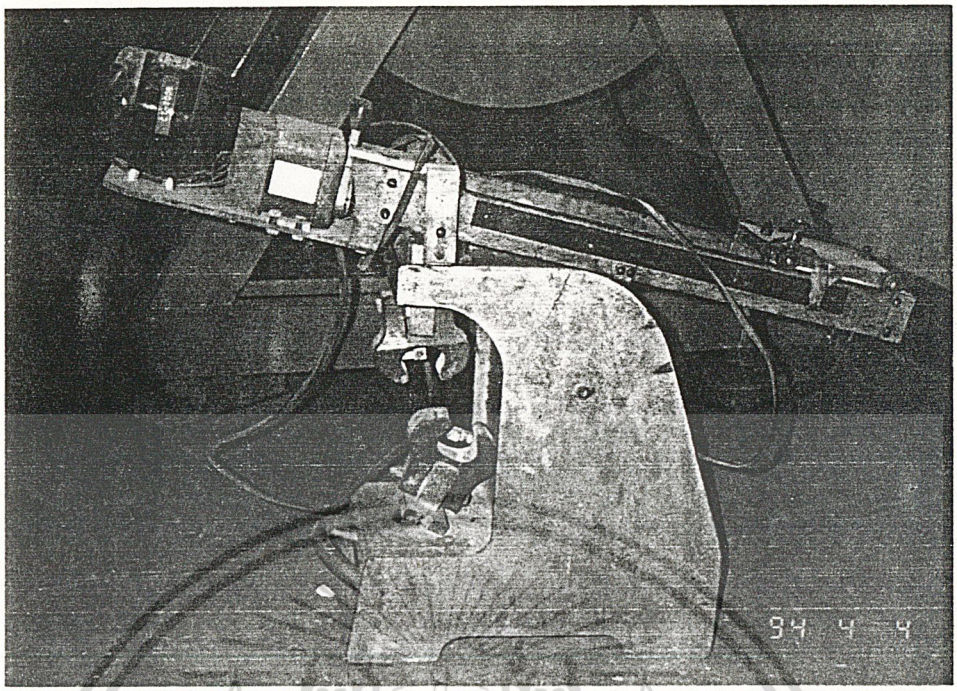


รูปที่ 12 การทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์

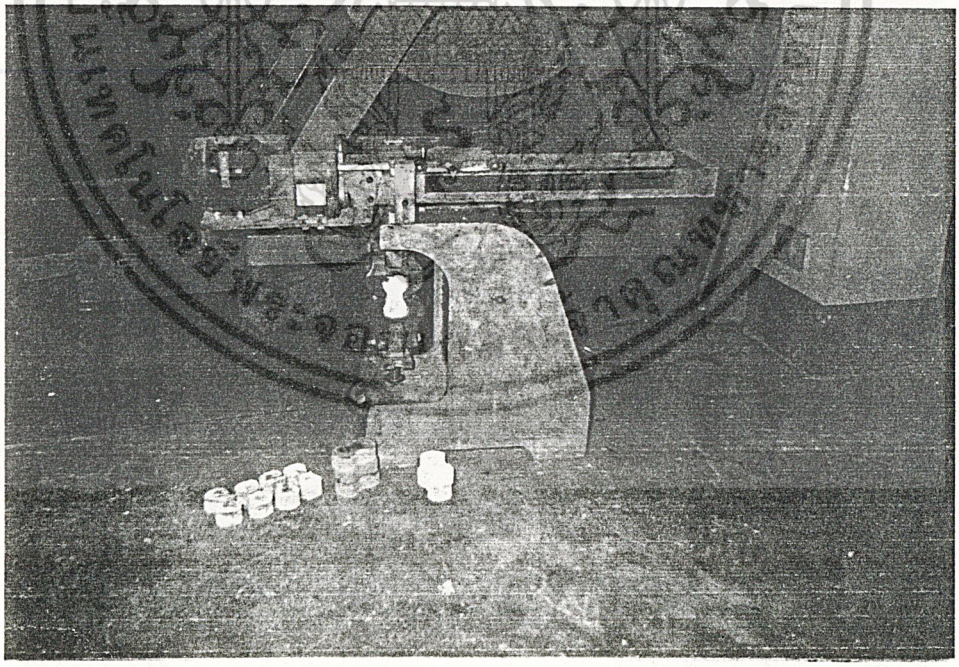


รูปที่ 13 แบบหล่อ Briquet Gang Molds และ แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

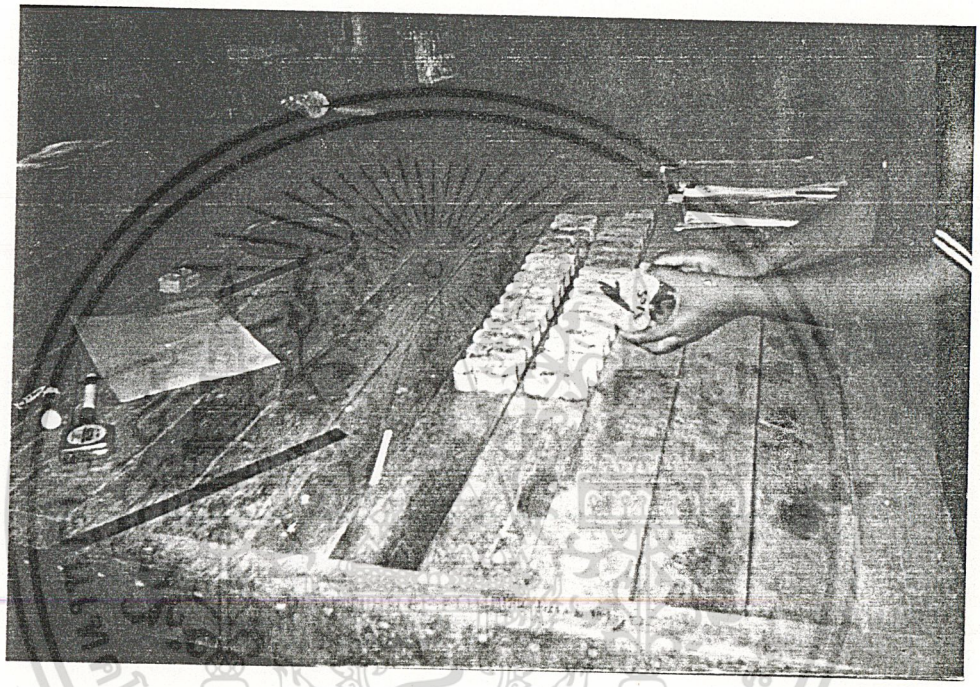



รูปที่ 14 แสดงเครื่องทดสอบกำลังดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์



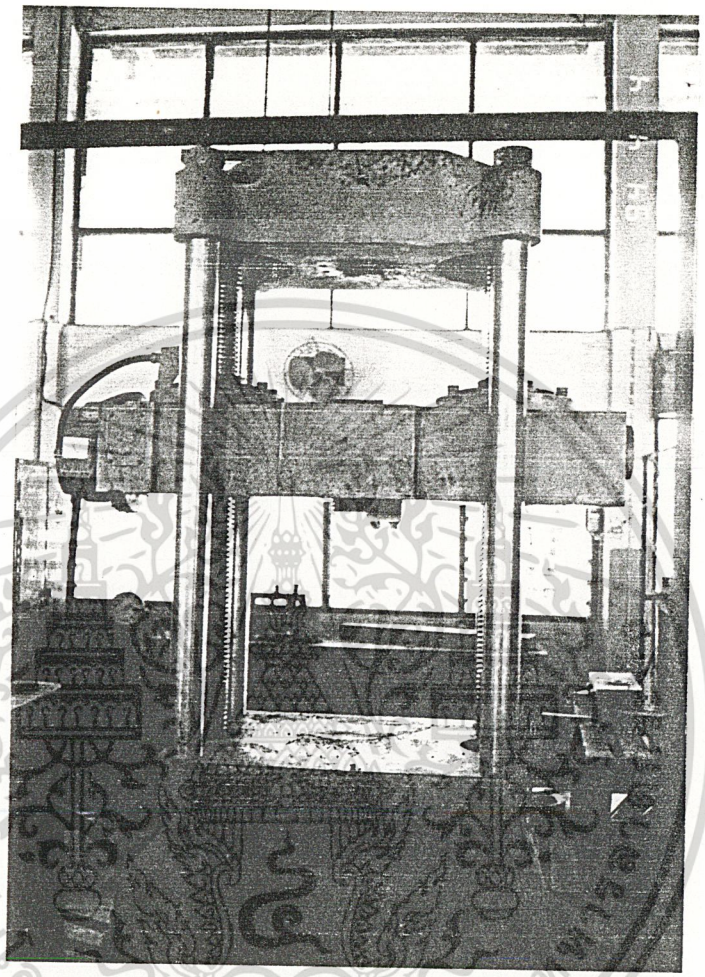
รูปที่ 15 การทดสอบหากำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 16 วัดพื้นที่หน้าตัดที่ขาดหลังจากทดสอบกำลังรับแรงดึง

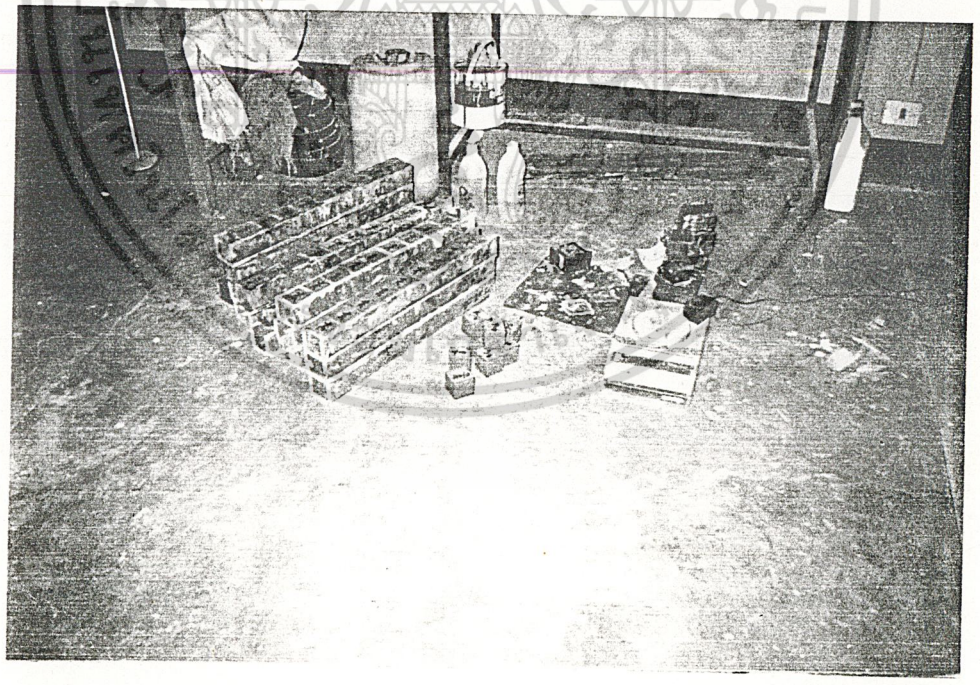
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine

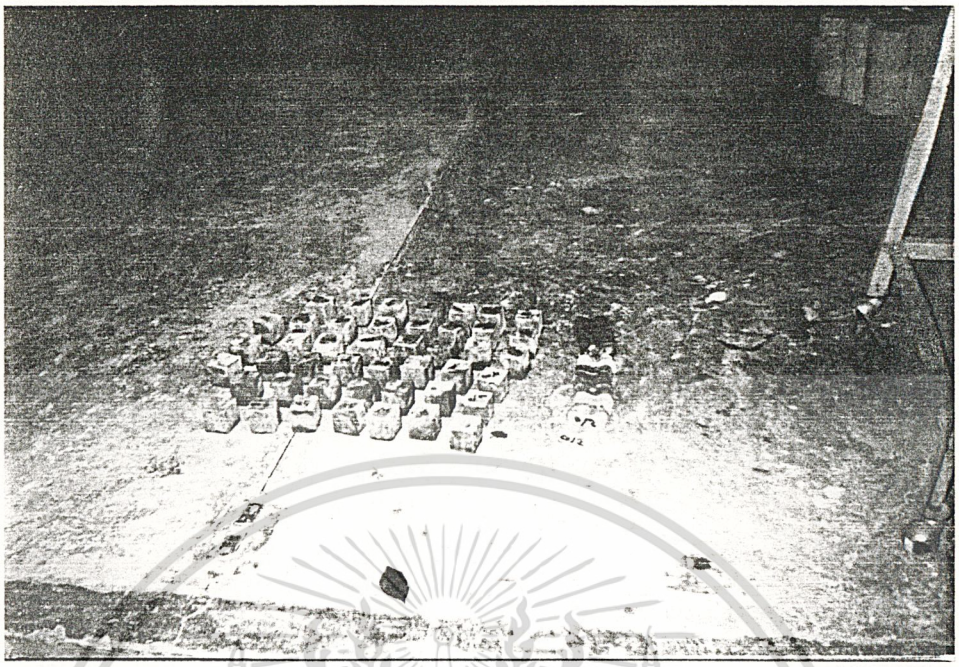
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 18 การเตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อทดสอบหากำลังรับแรงอัด

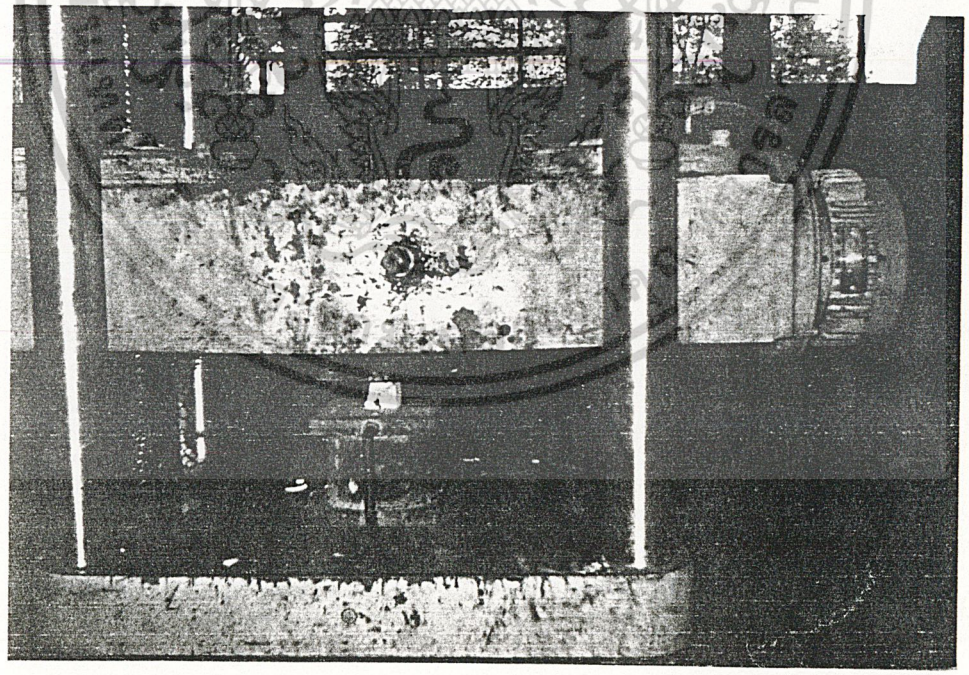


รูปที่ 19 บ่มในอากาศครบ 24 ชม. และแกะแบบนำแท่งต้วอย่างไปบ่มในน้ำที่ 23° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 ลูกปูนตัวอย่างมีอายุครบ 1วัน, 3วัน และ 7 วัน
นำมาผนกระดาษทรายน้ำและวัดพื้นที่หน้าตัด



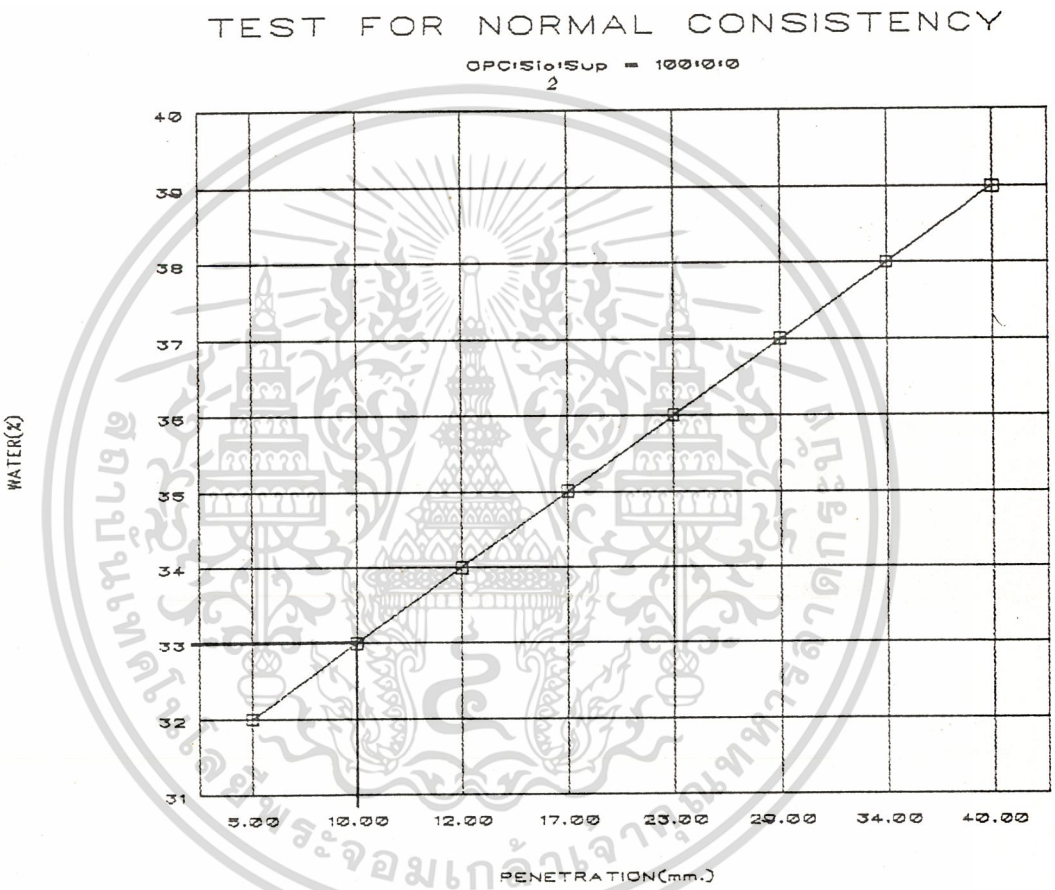
รูปที่ 21 แสดงการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 100 : 0 : 0



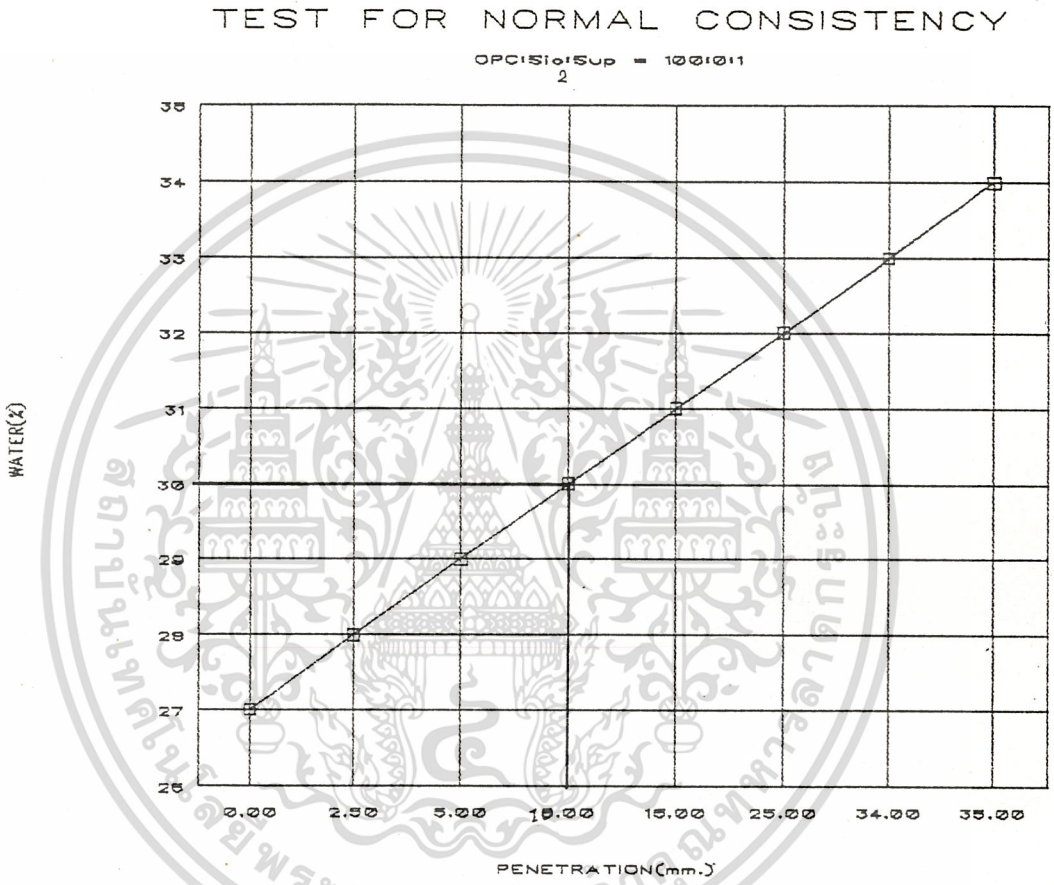

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, p = 33.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 100 : 0 : 1



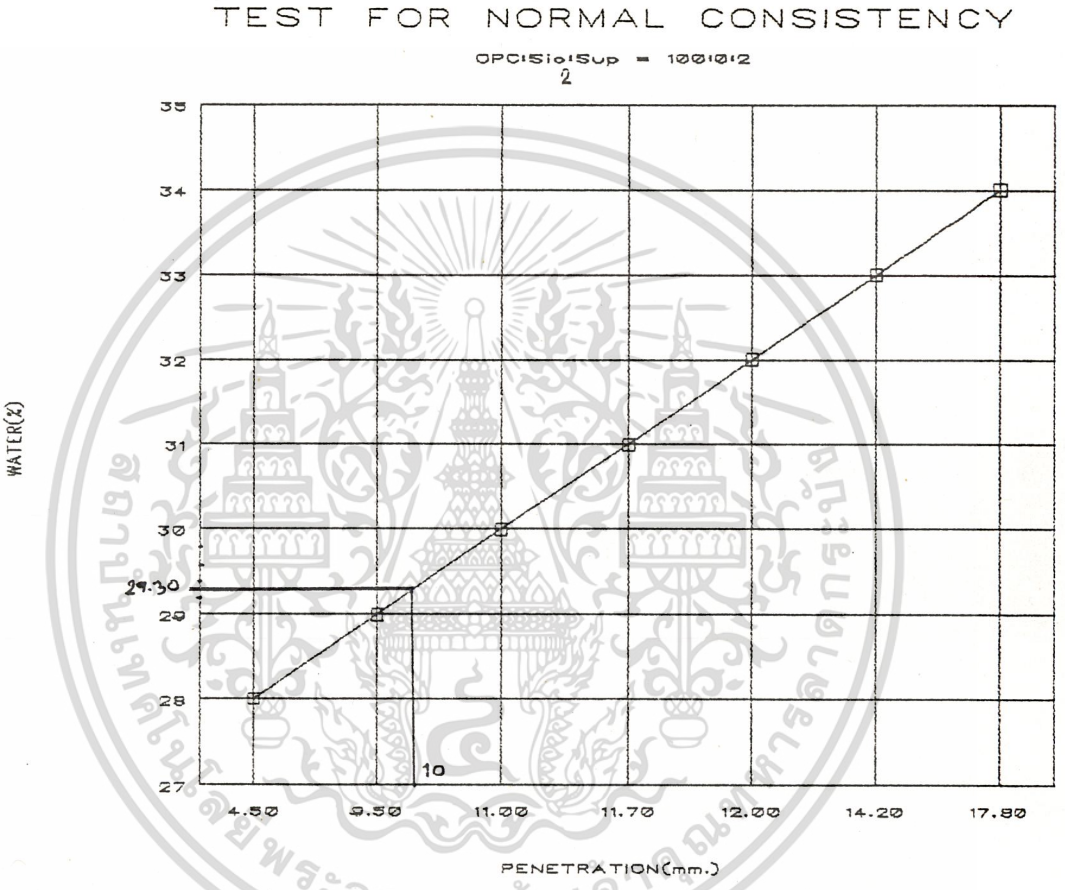

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 30.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 100 : 0 : 2



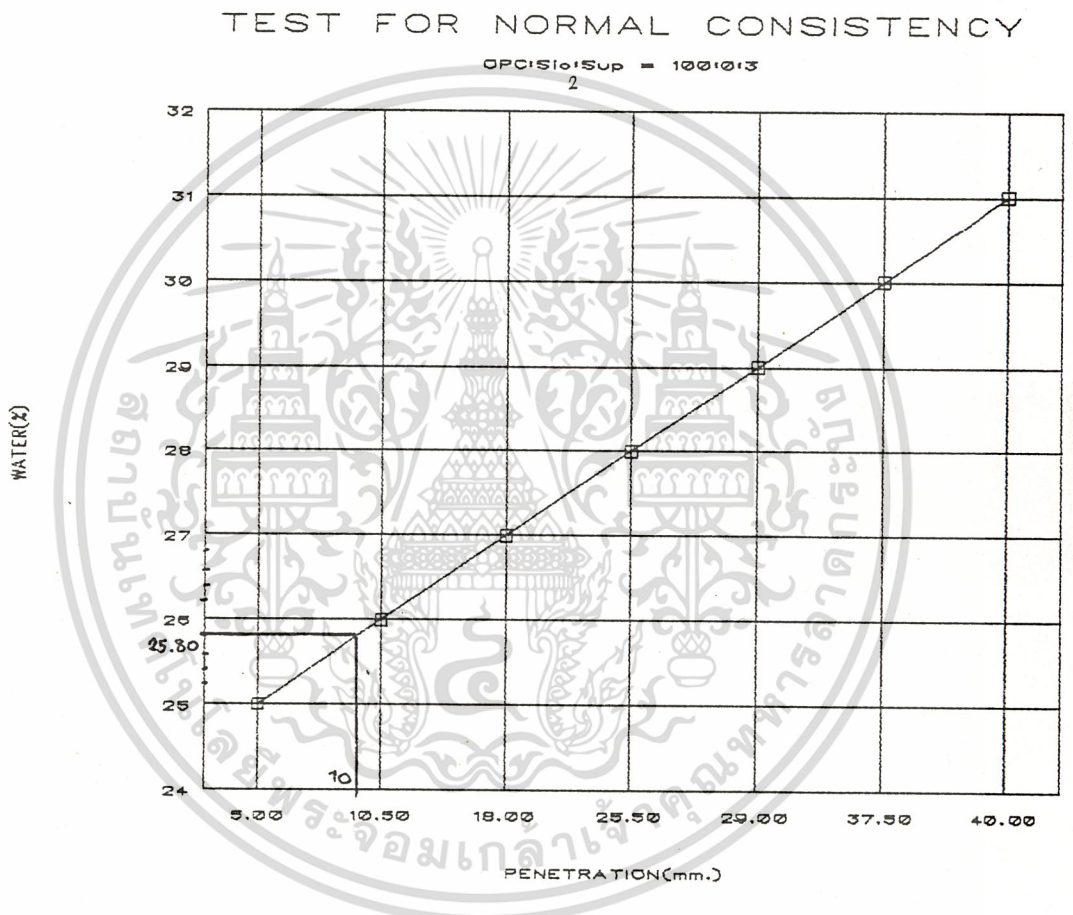

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 29.30 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 100 : 0 : 3



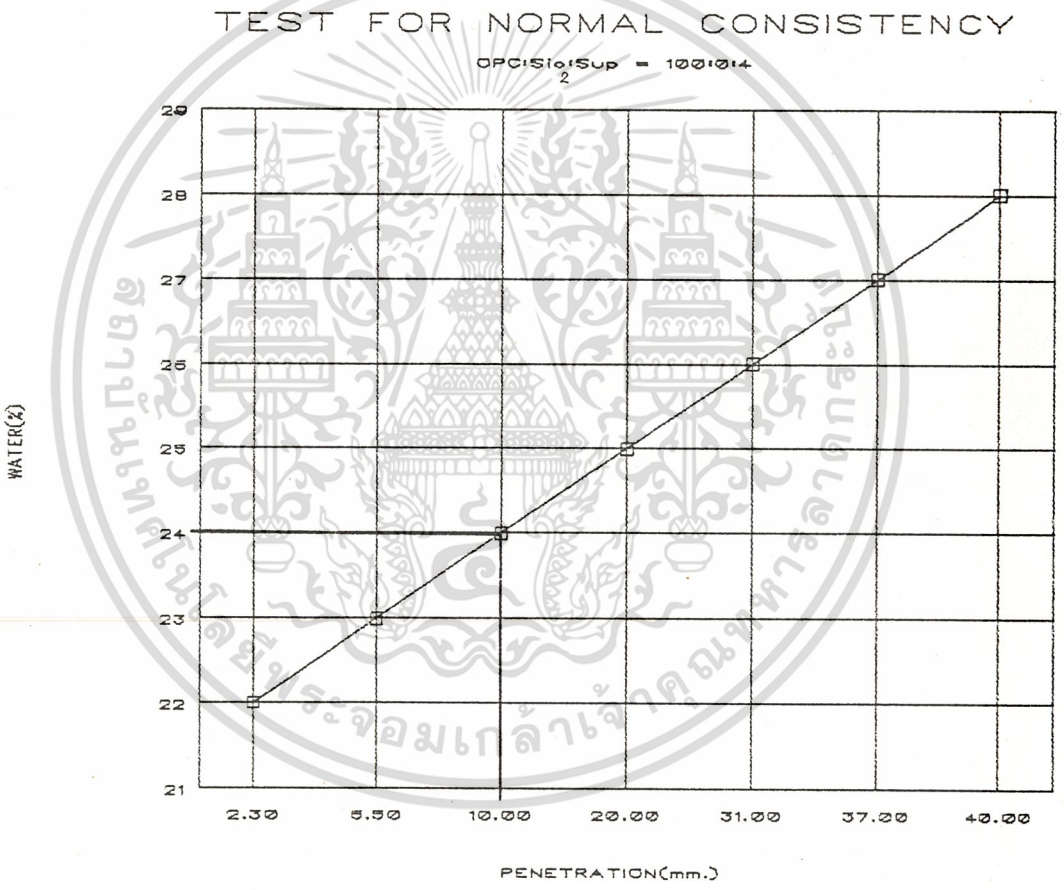

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 25.80 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 100 : 0 : 4



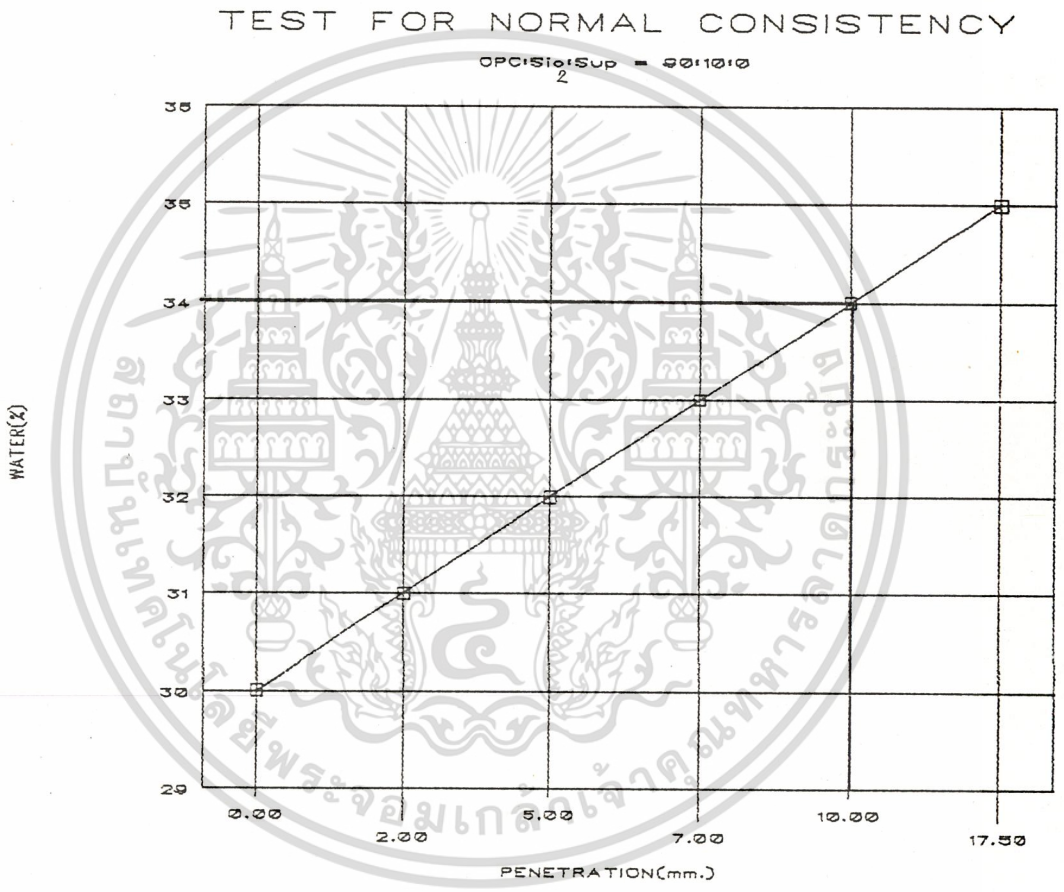

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 24.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 90 : 10 : 0



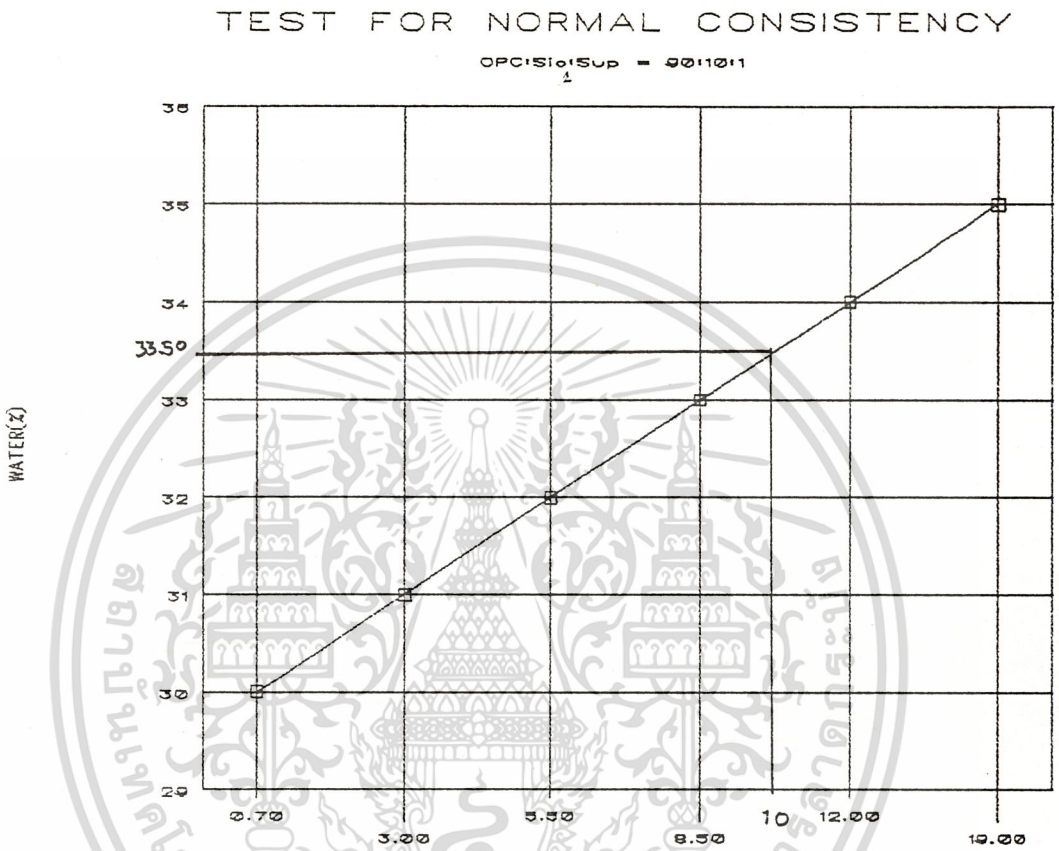

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 34.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 90 : 10 : 1



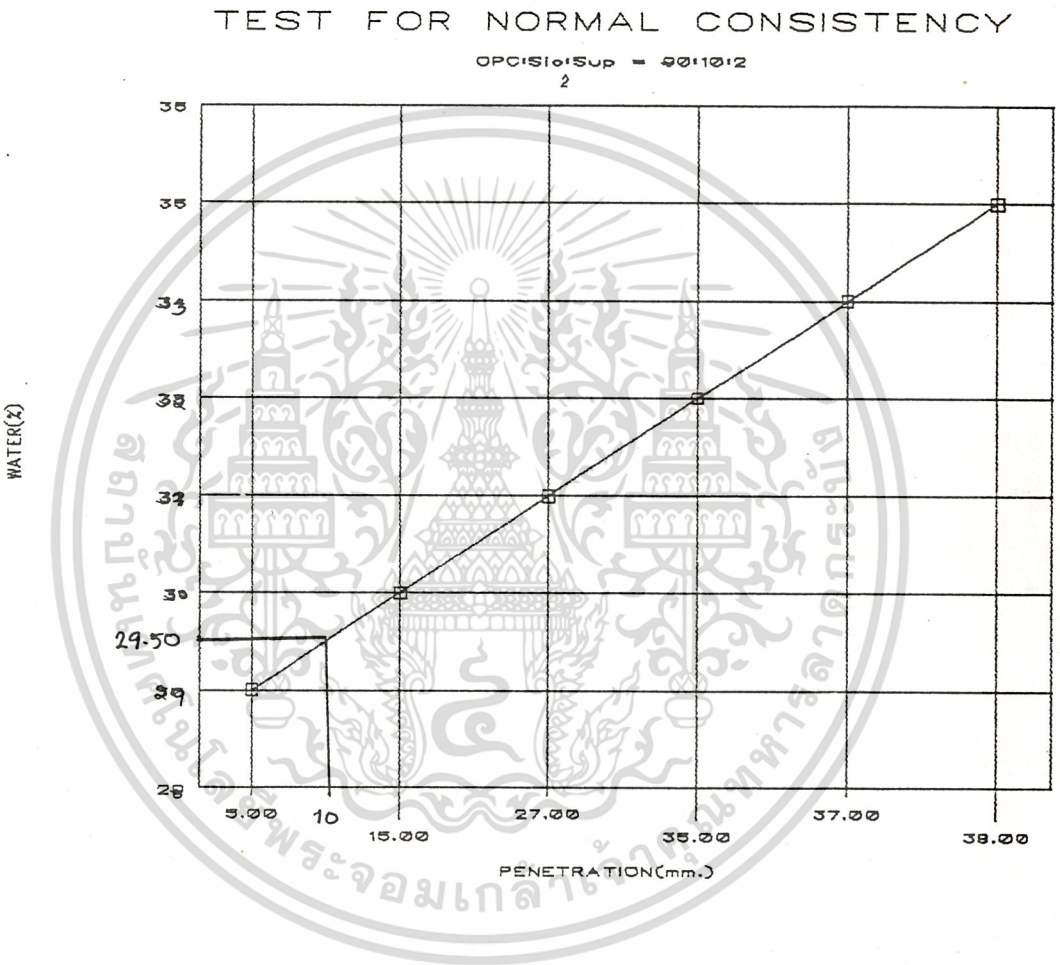

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, $P = \frac{33.50}{}$ %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 90 : 10 : 2



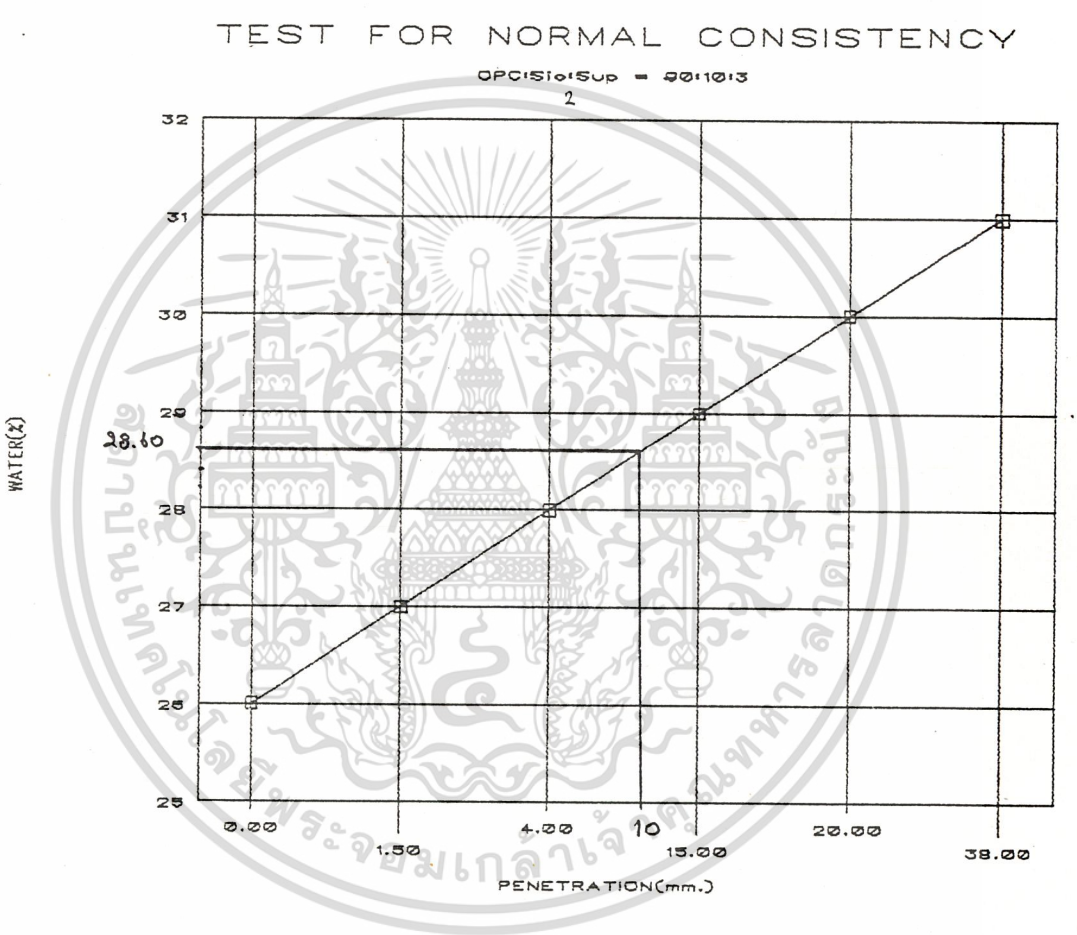

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 29.50 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 90 : 10 : 3



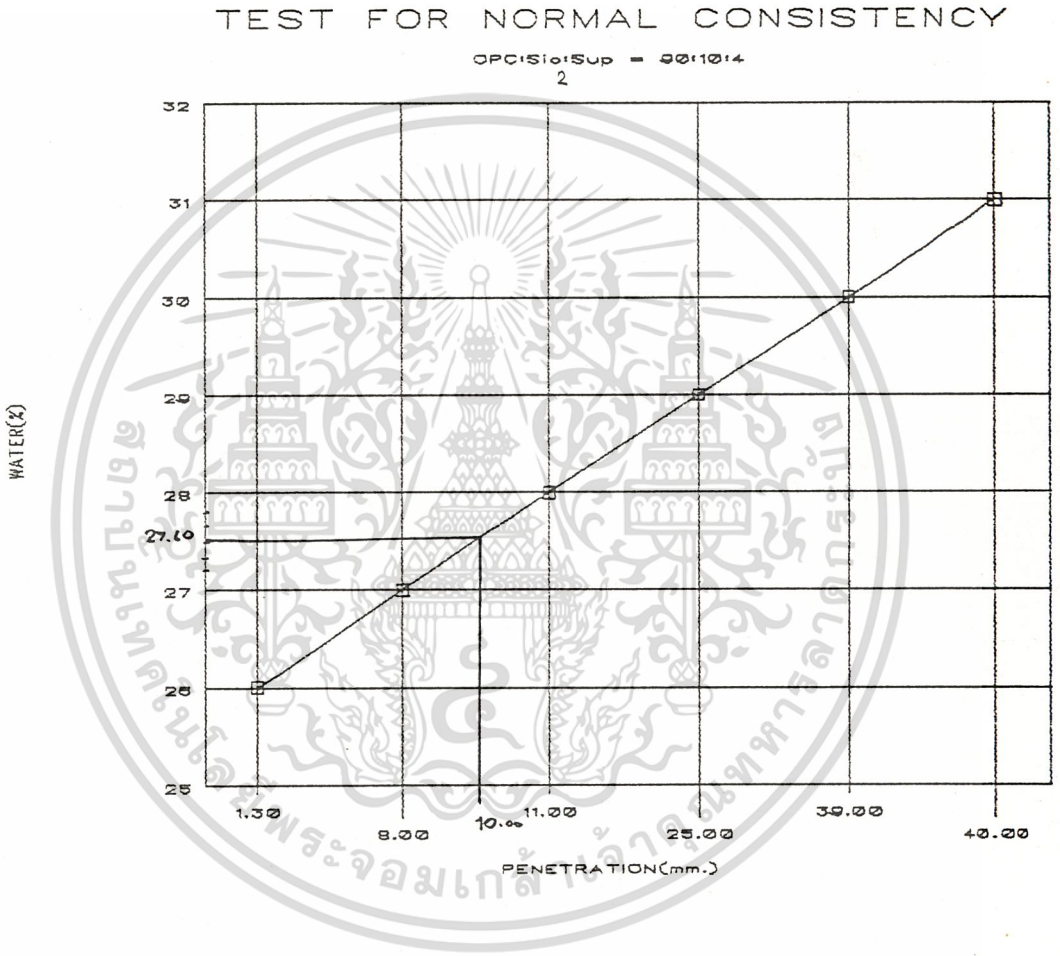

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 28.60 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 90 : 10 : 4



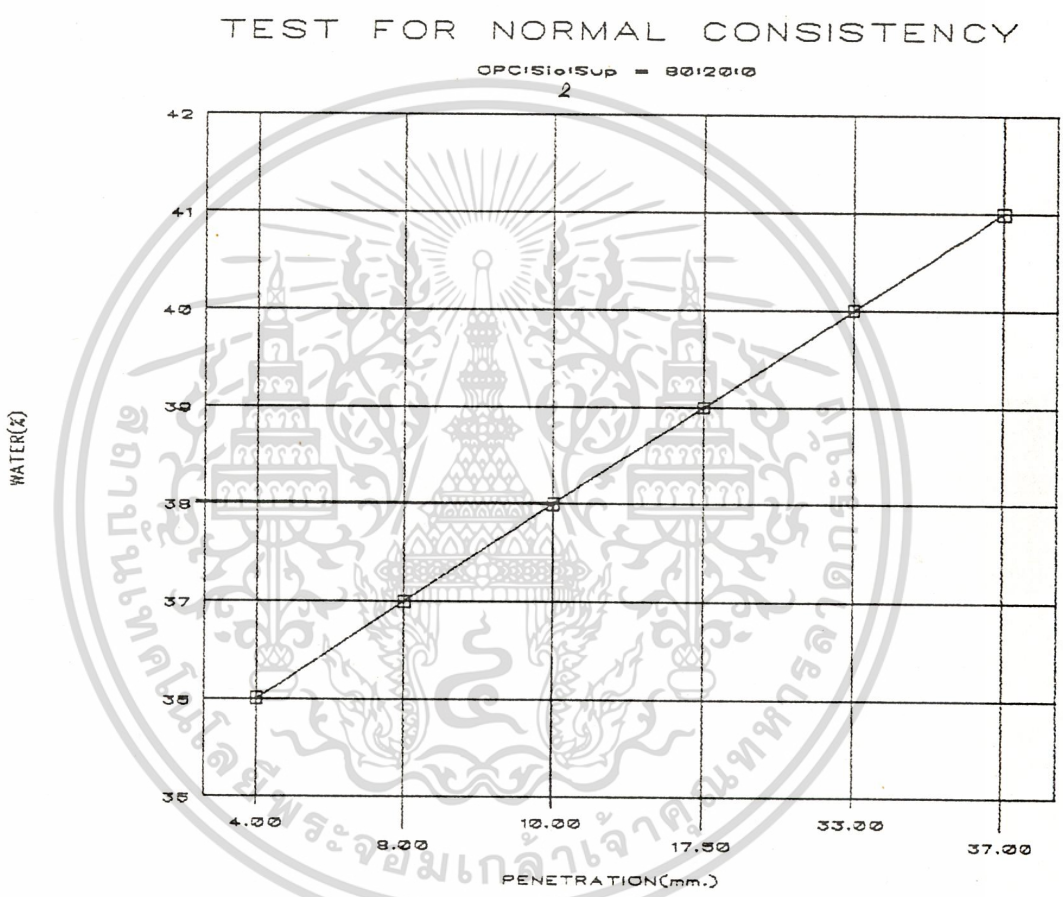

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 27.60 %.

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 80 : 20 : 0



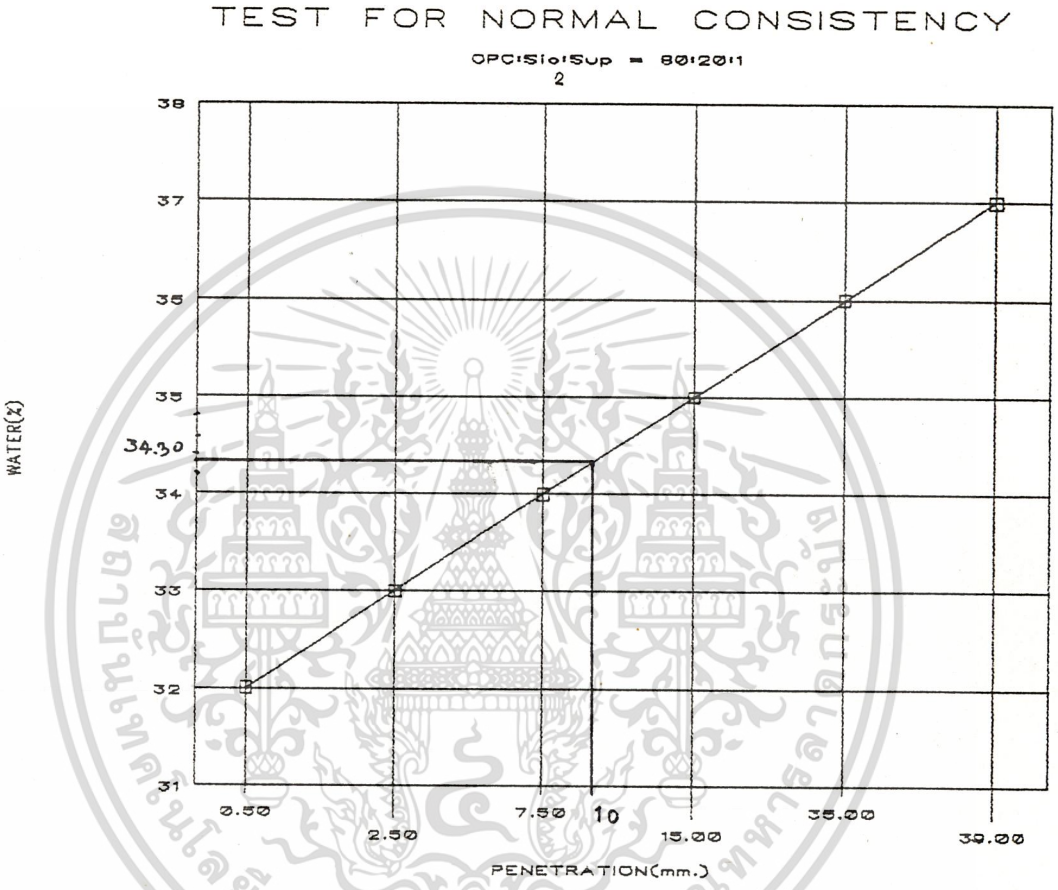

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 38.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 80 : 20 : 1



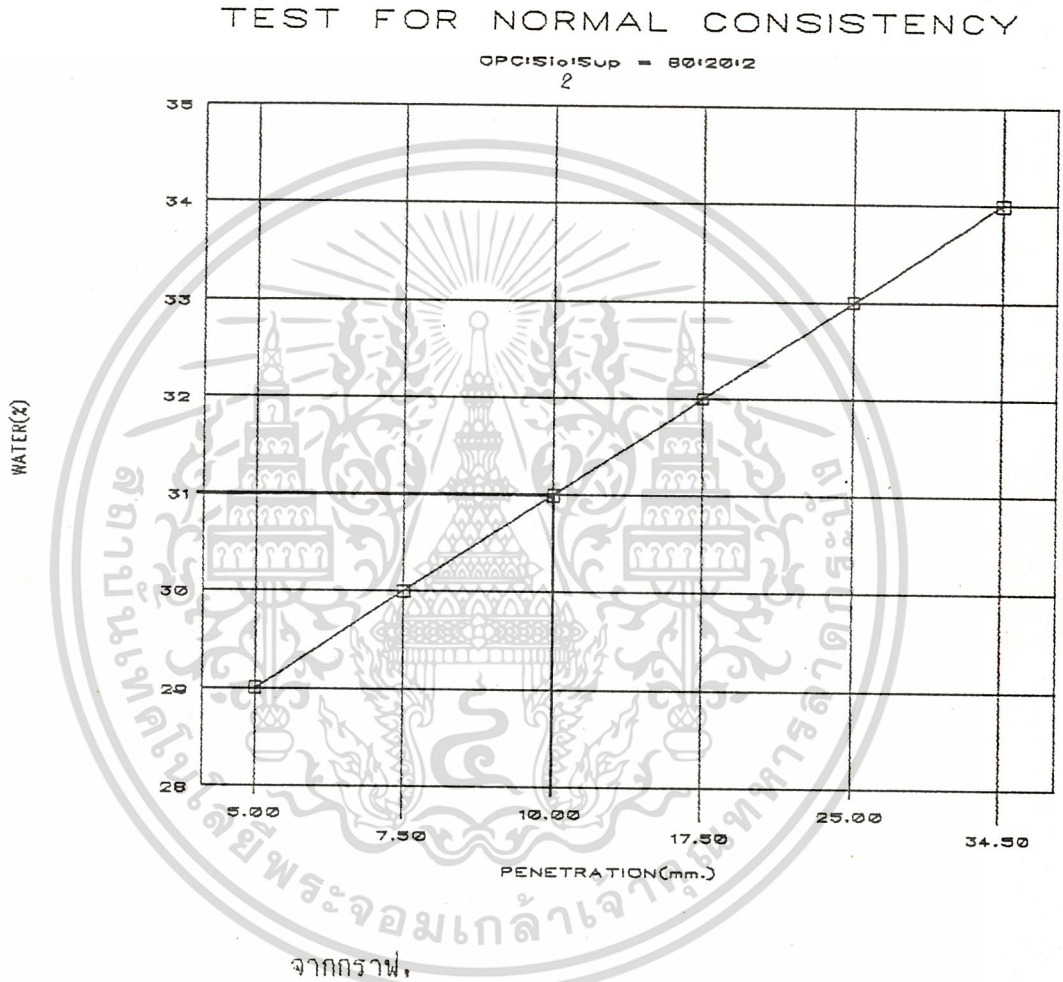

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 34.30 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 80 : 20 : 2



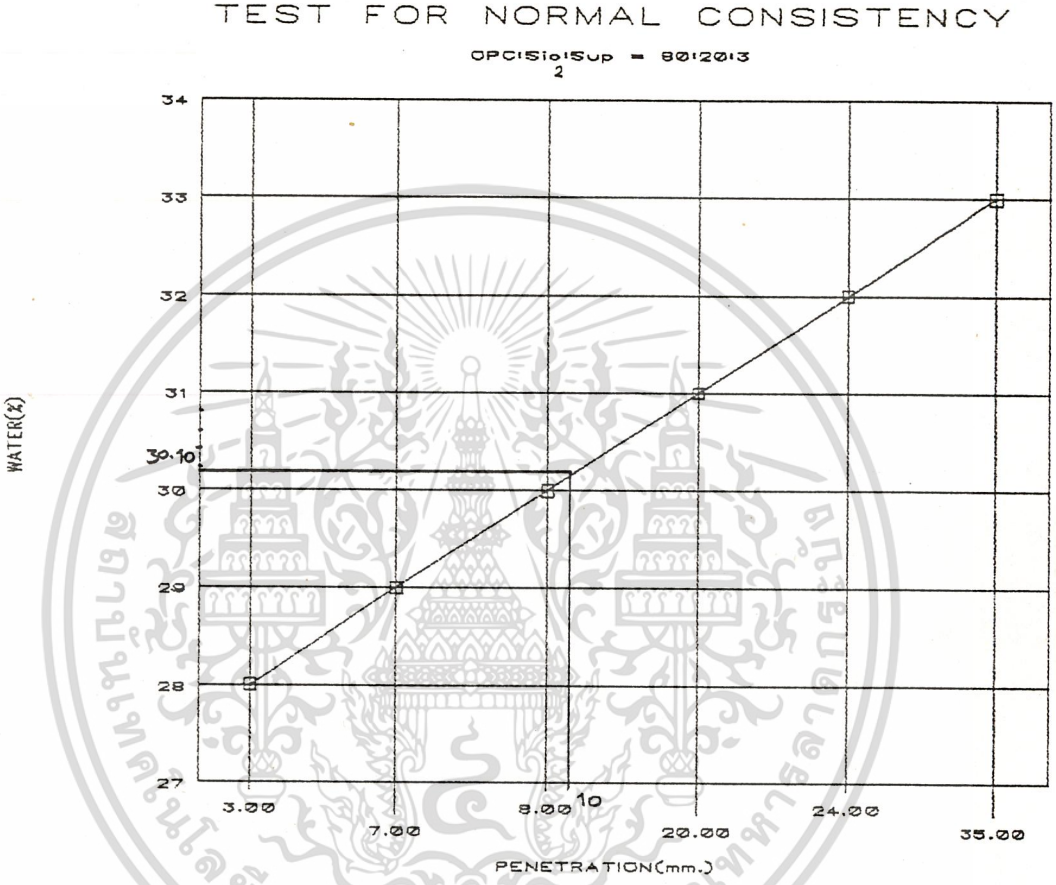

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 31.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 80 : 20 : 3



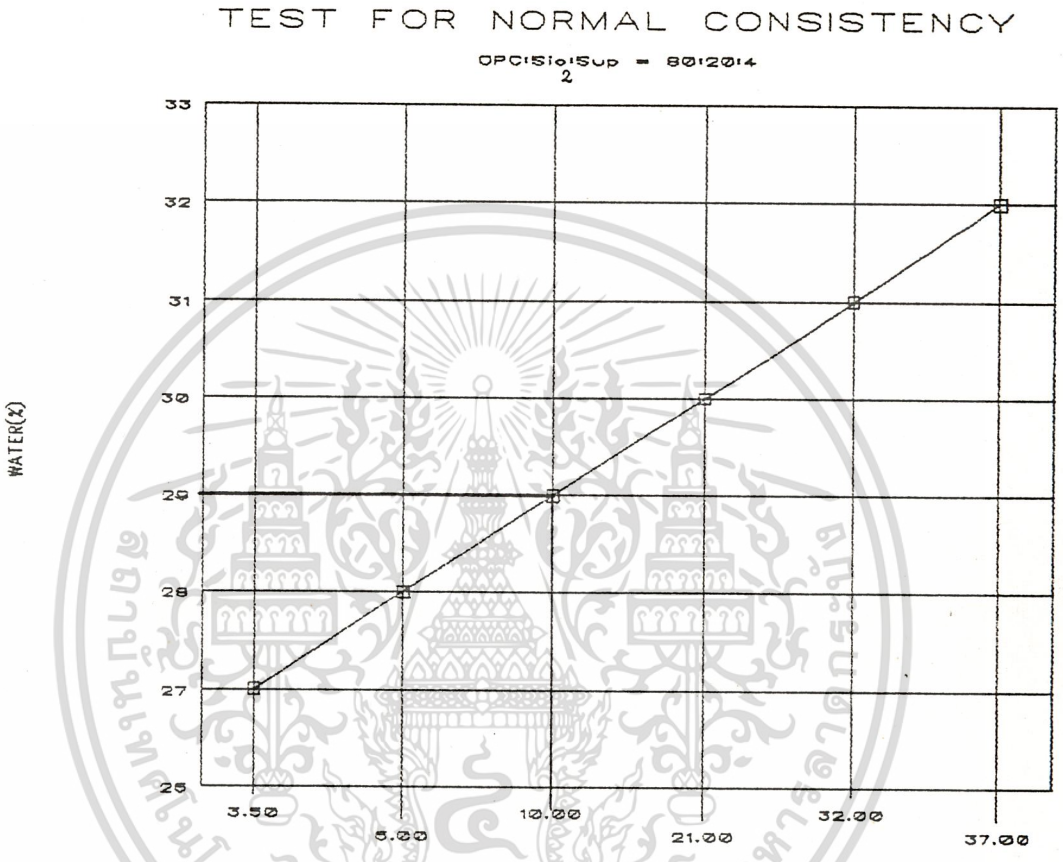

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 30.10 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 80 : 20 : 4



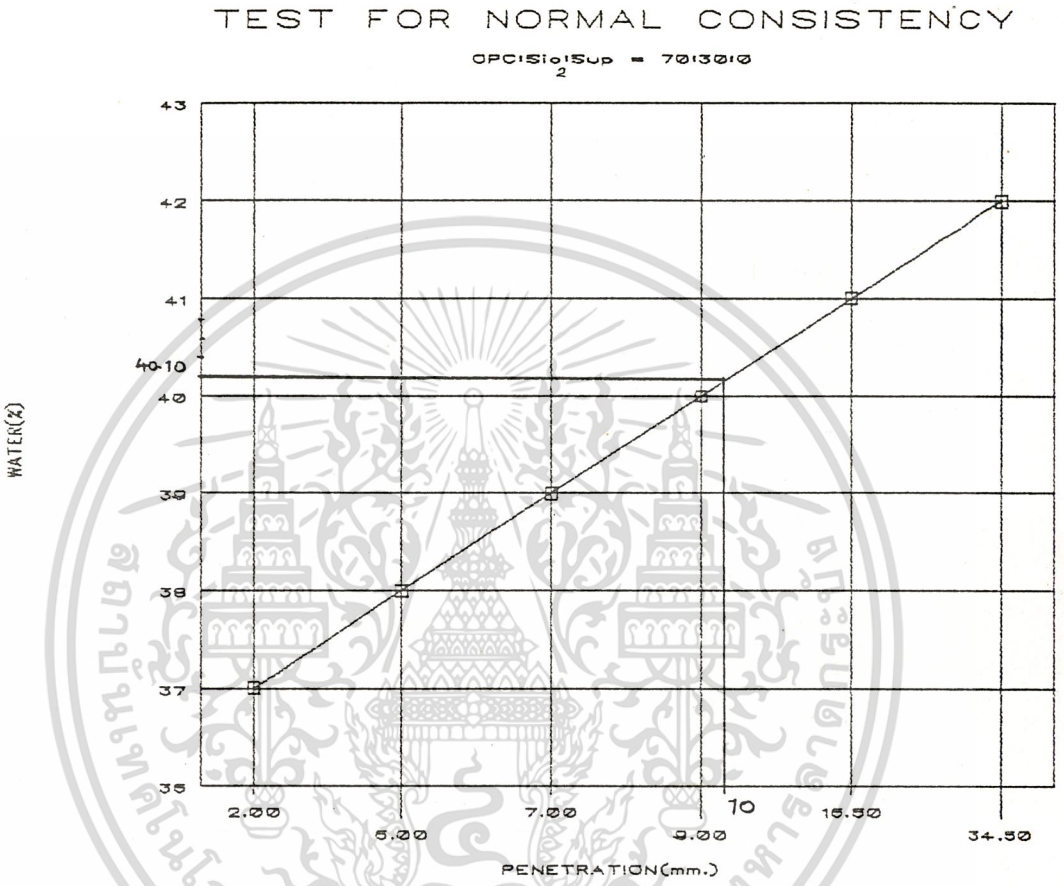

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 29.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 70 : 30 : 0



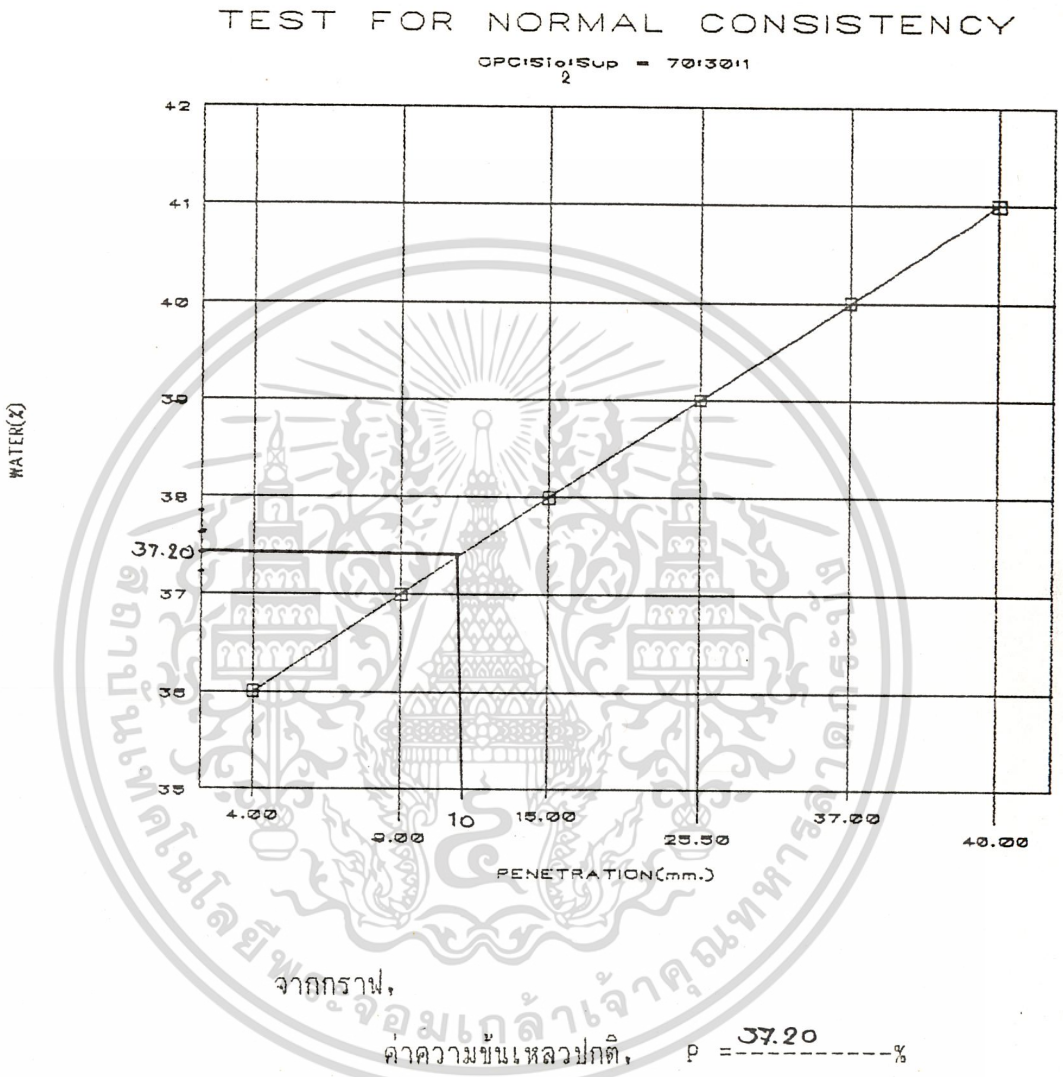

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 40.10 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอร์ดแลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 70 : 30 : 1



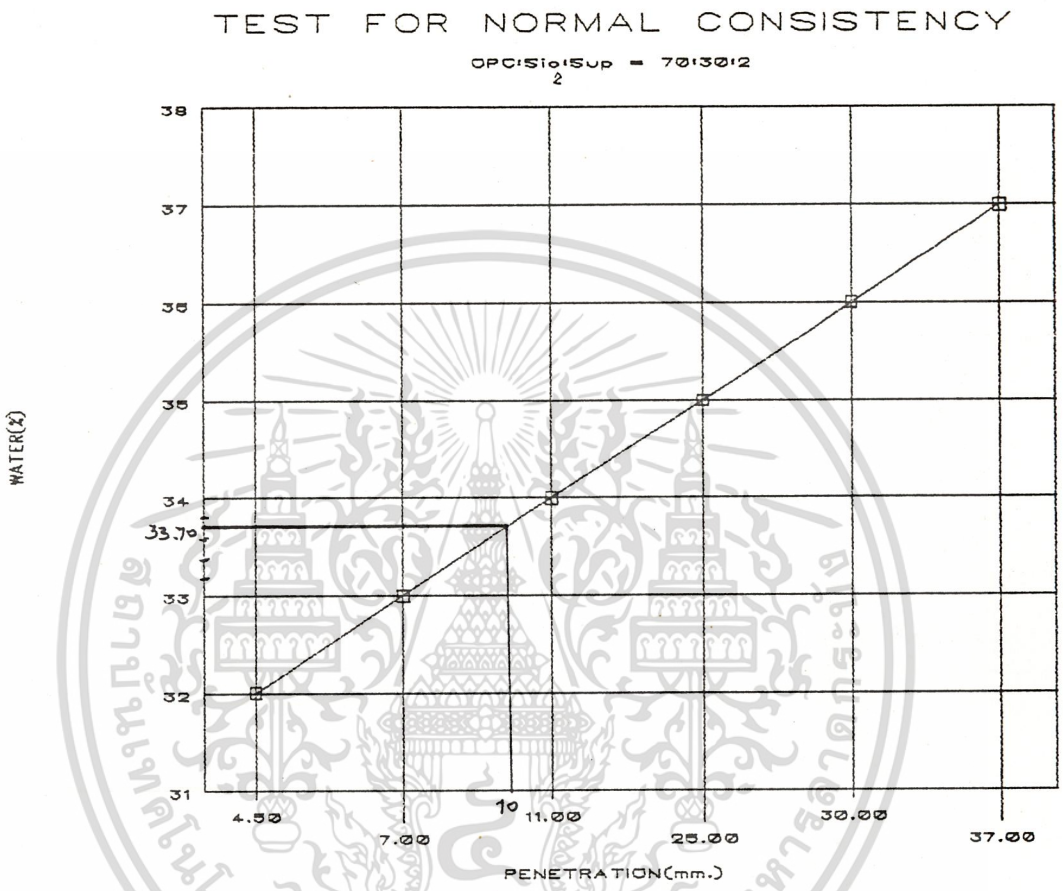

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 37.20 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 70 : 30 : 2



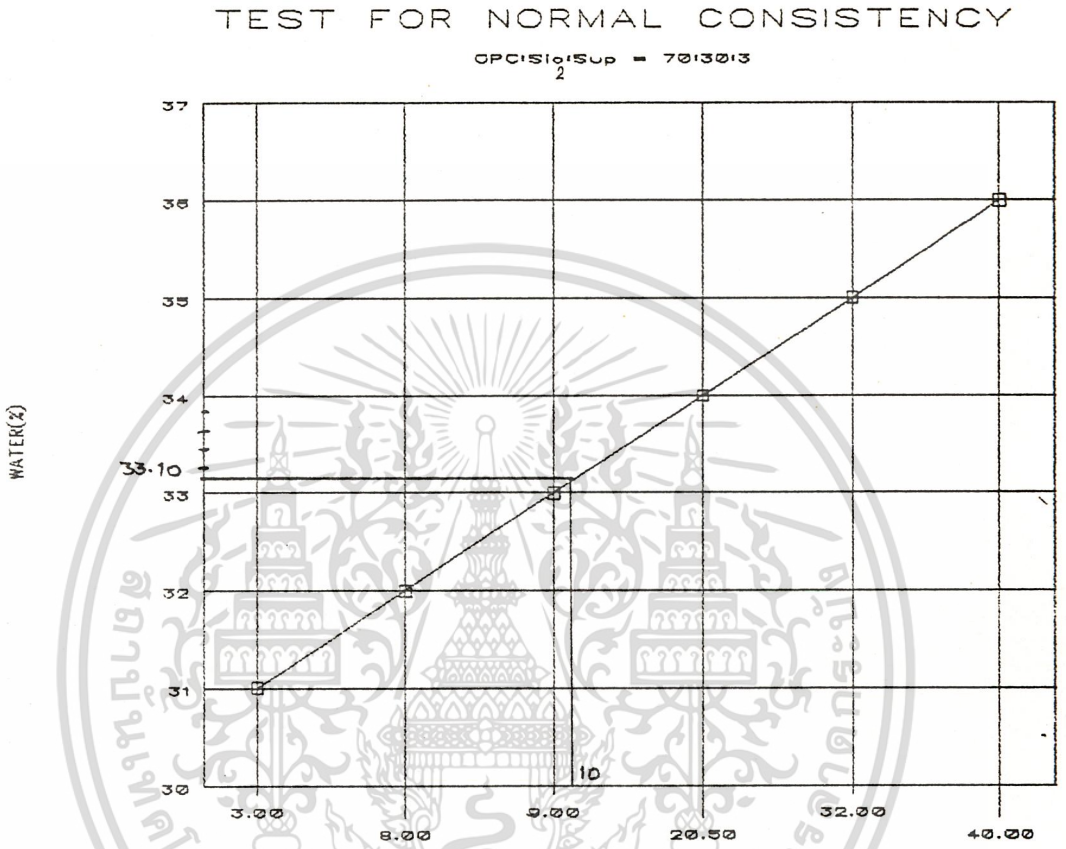

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 33.70 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 70 : 30 : 3



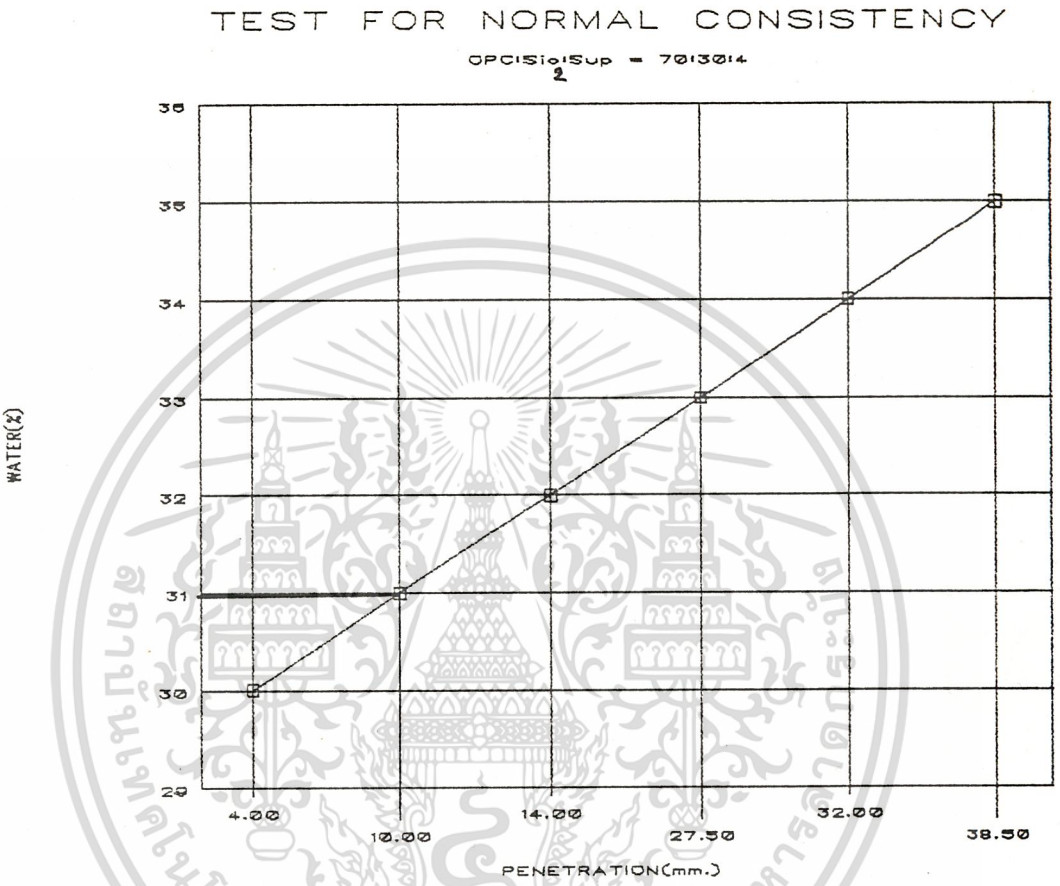

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 33.10 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 70 : 30 : 4



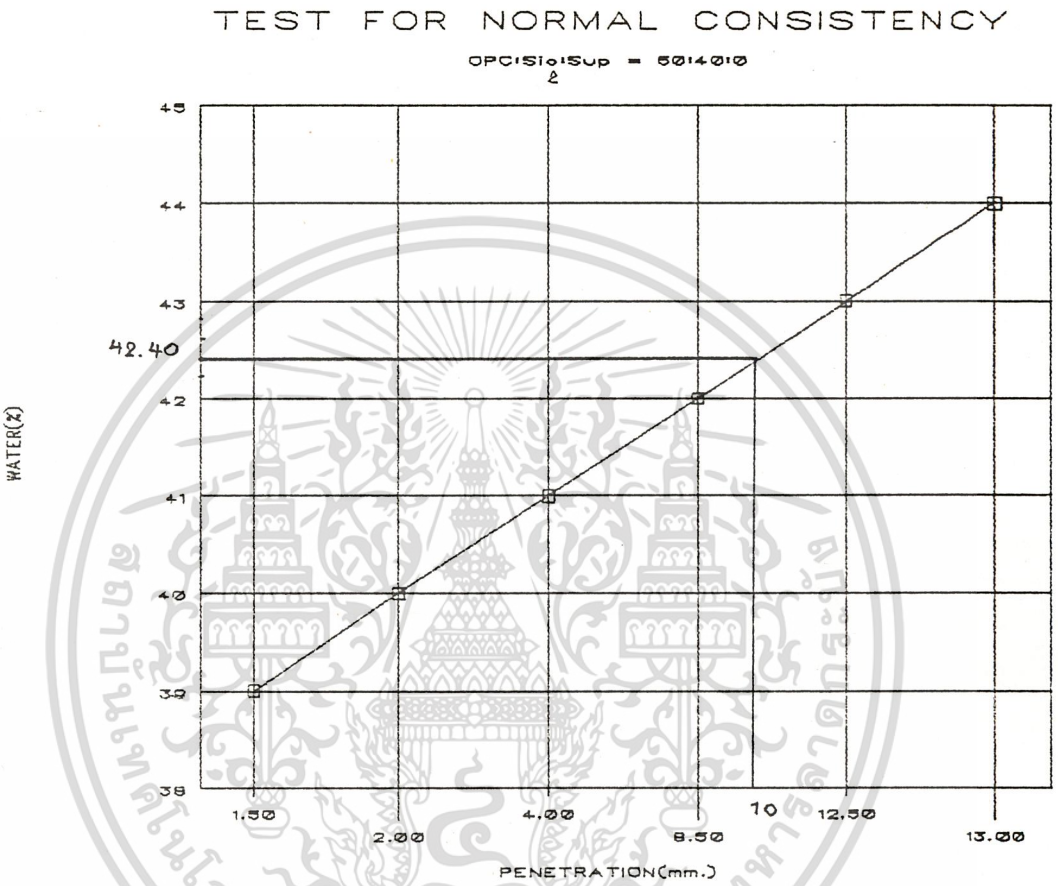

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 31.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 60 : 40 : 0



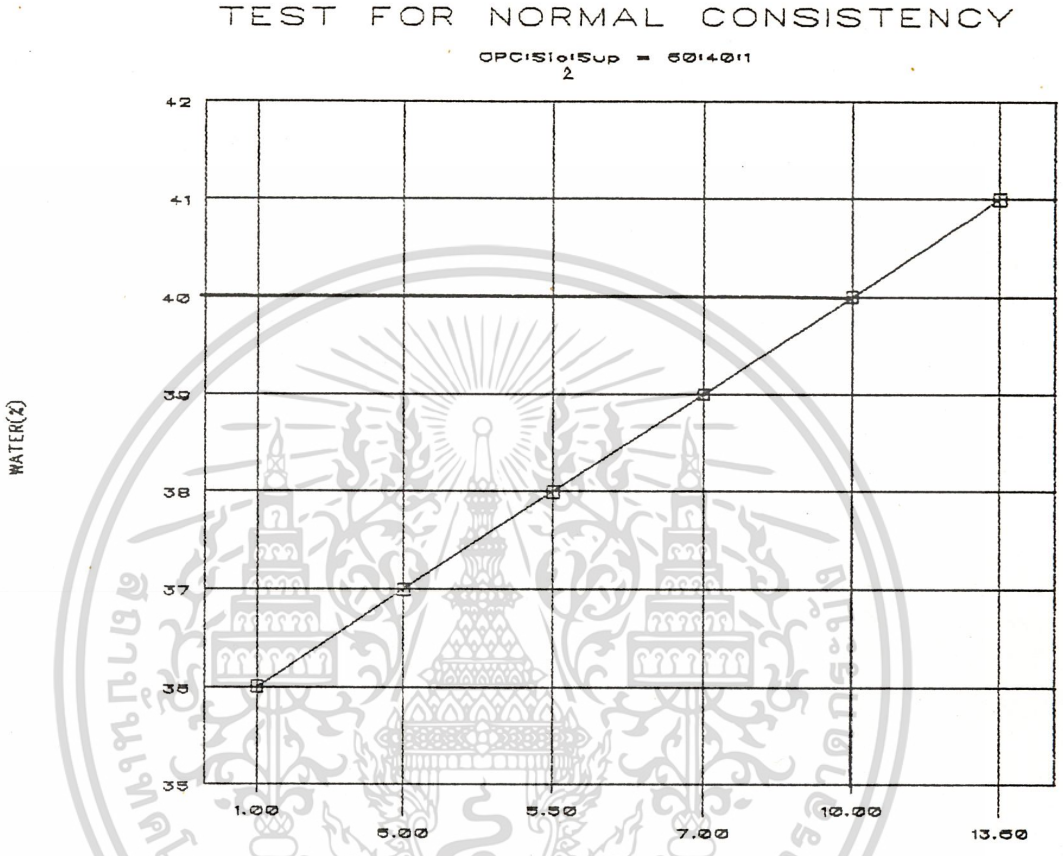

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 42.40 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 60 : 40 : 1



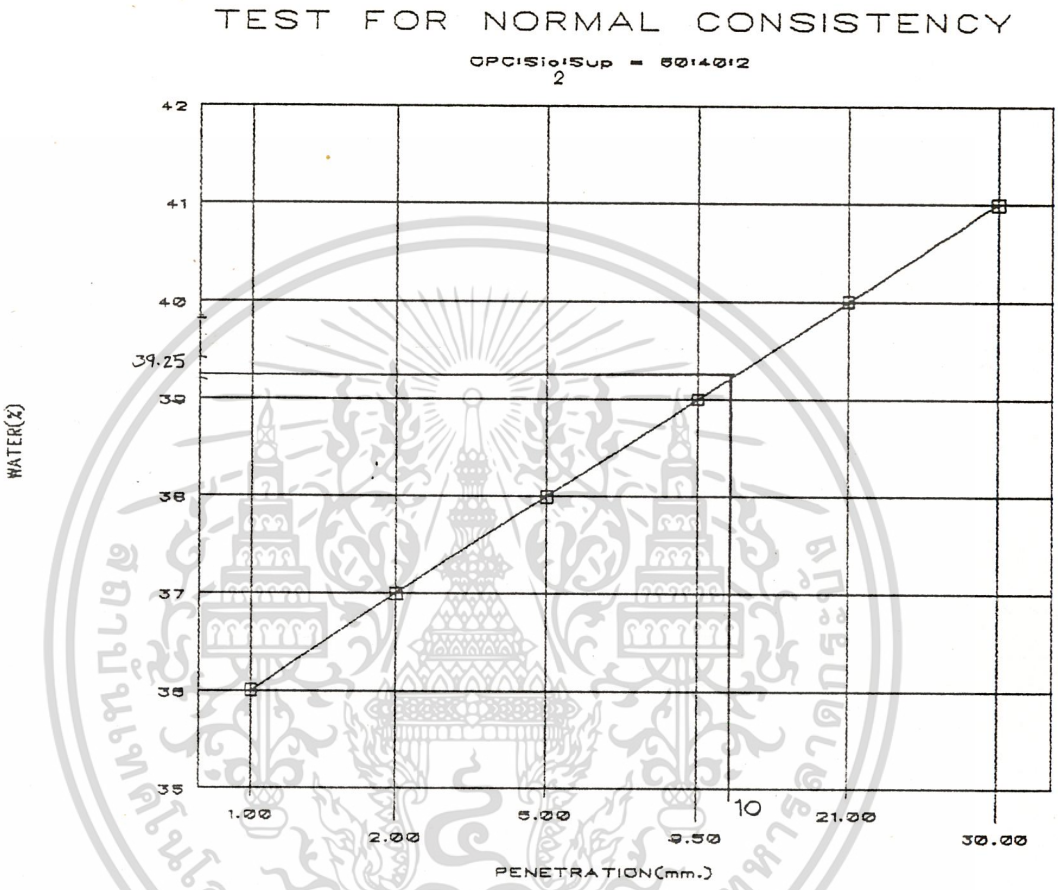

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 40.00 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 60 : 40 : 2



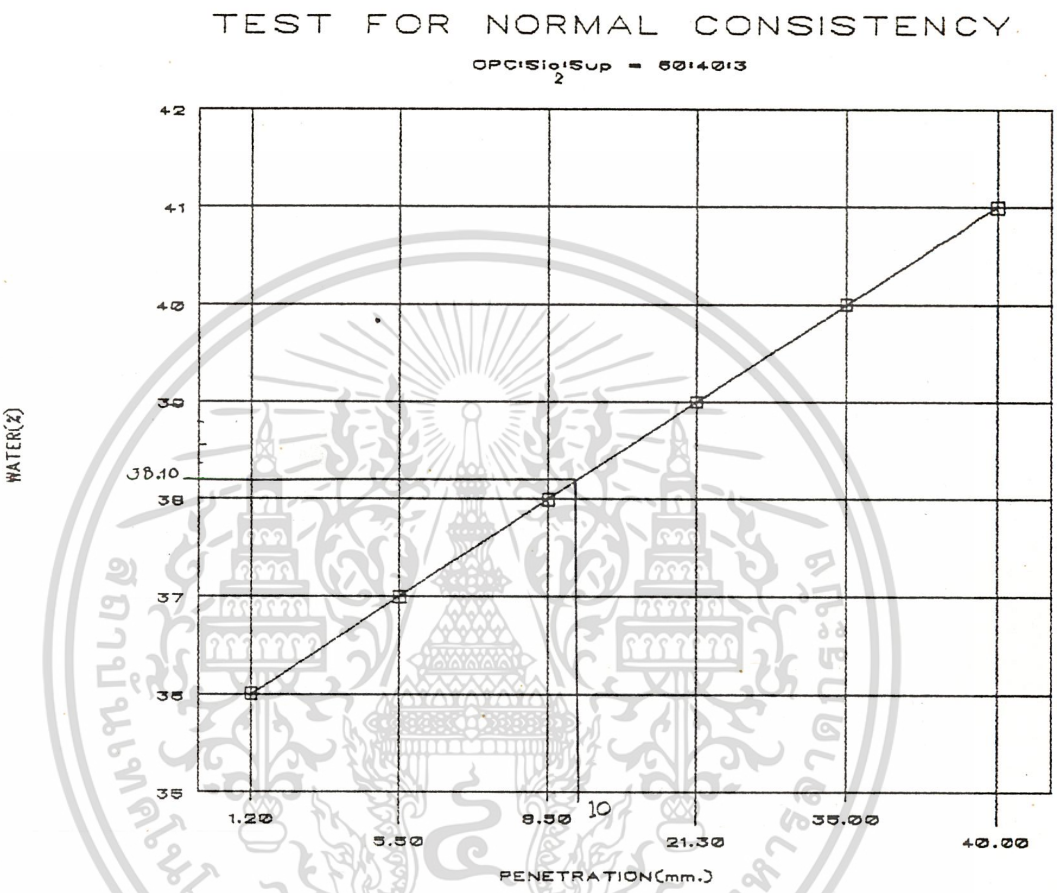

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 39.25 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 60 : 40 : 3



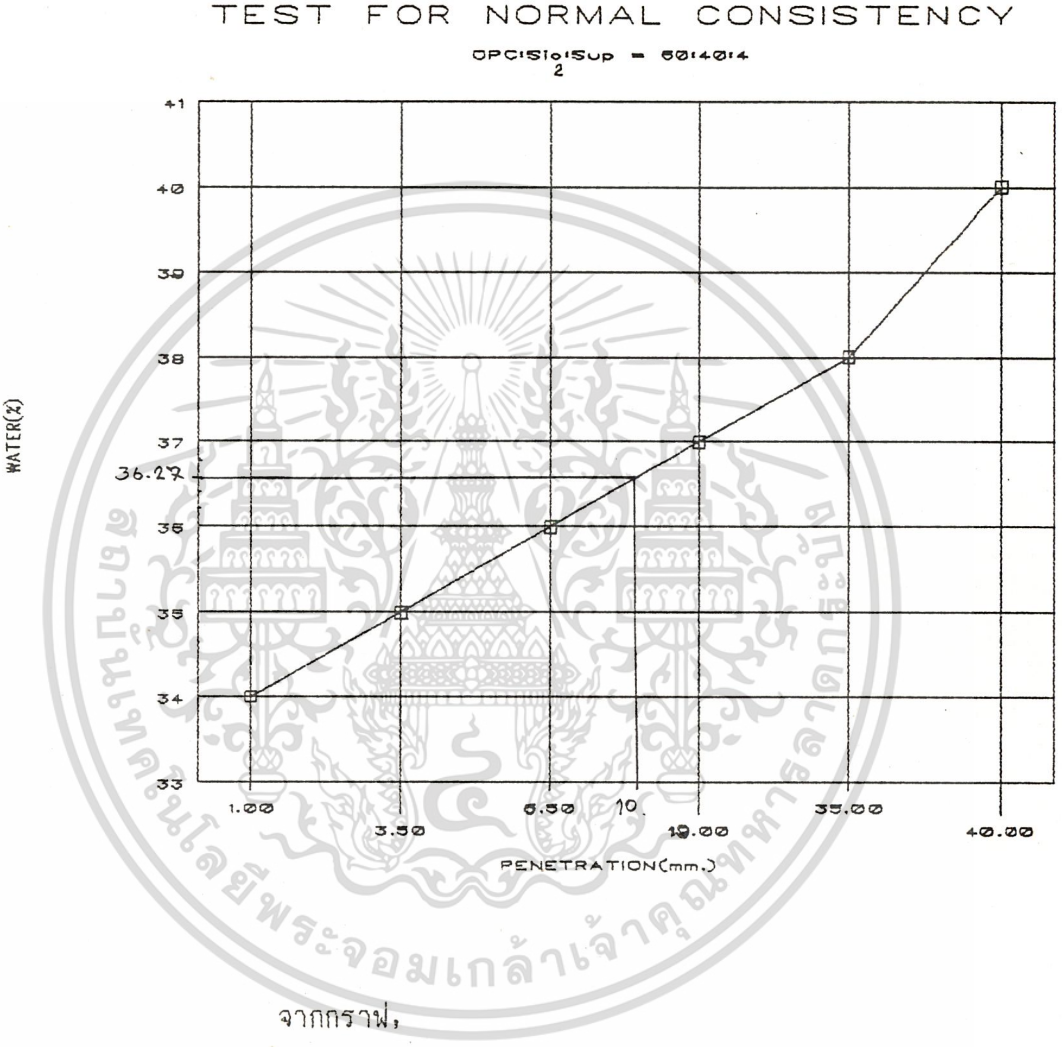

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 38.10 ----------%

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 60 : 40 : 4



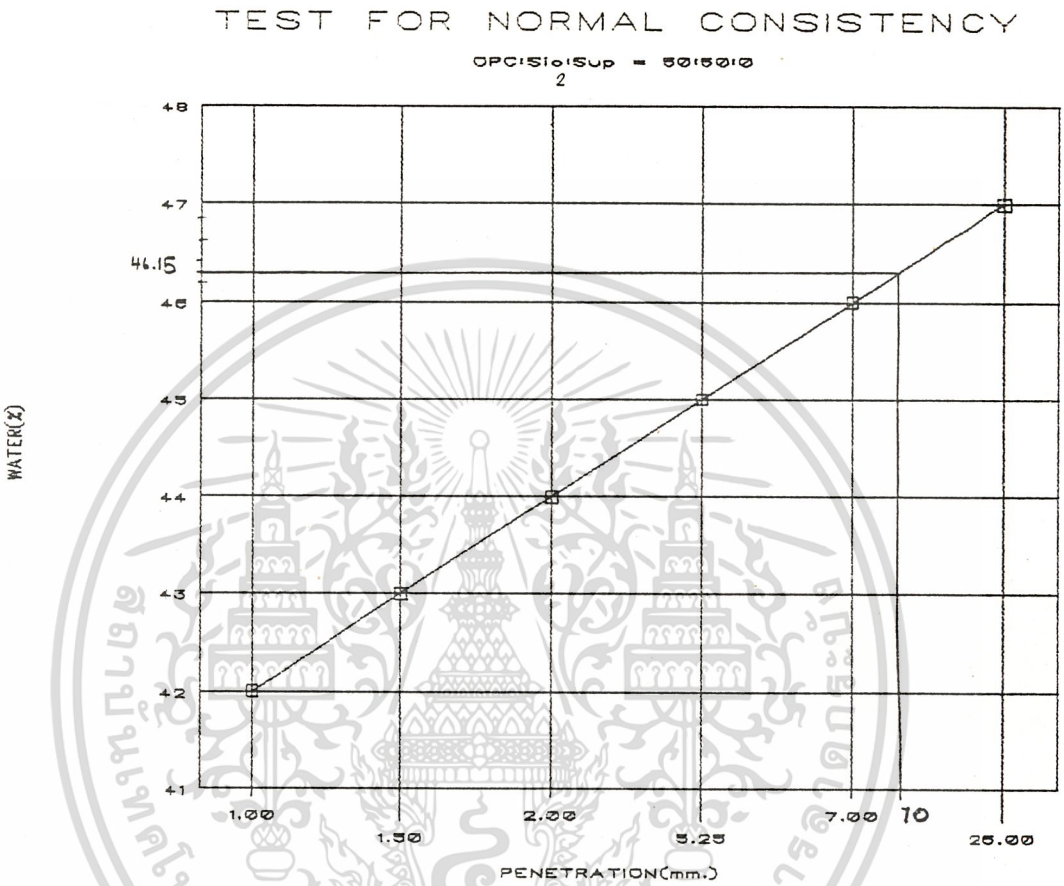

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 36.27 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 50 : 50 : 0



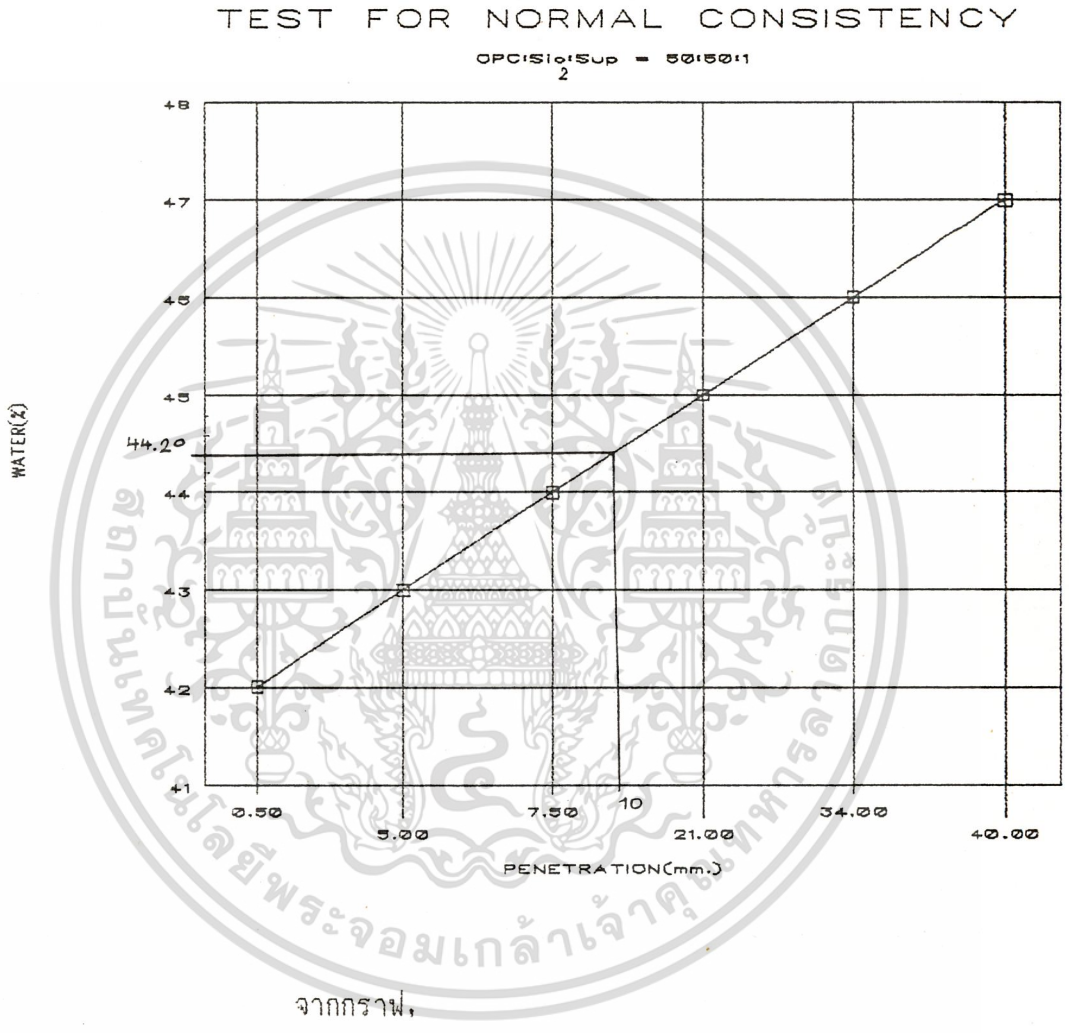

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 46.15 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์
ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 50 : 50 : 1



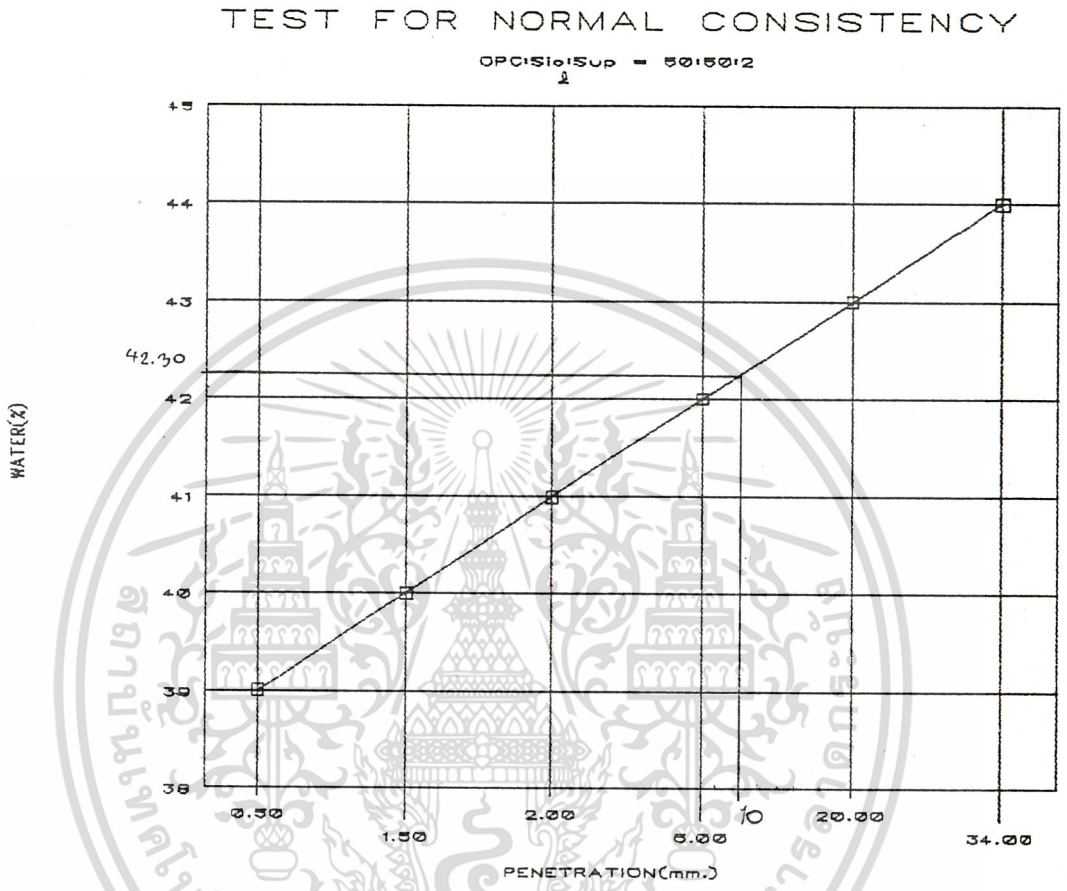

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 44.20 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 50 : 50 : 2



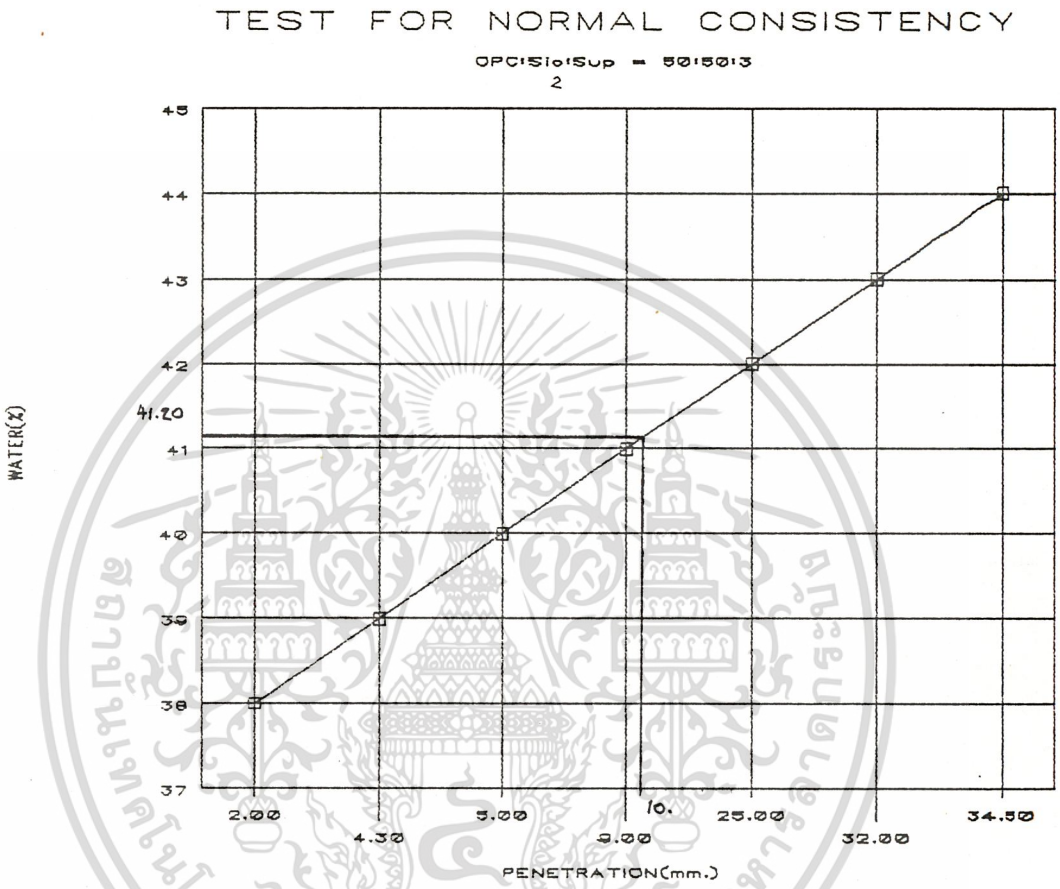

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 42.30 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 50 : 50 : 3



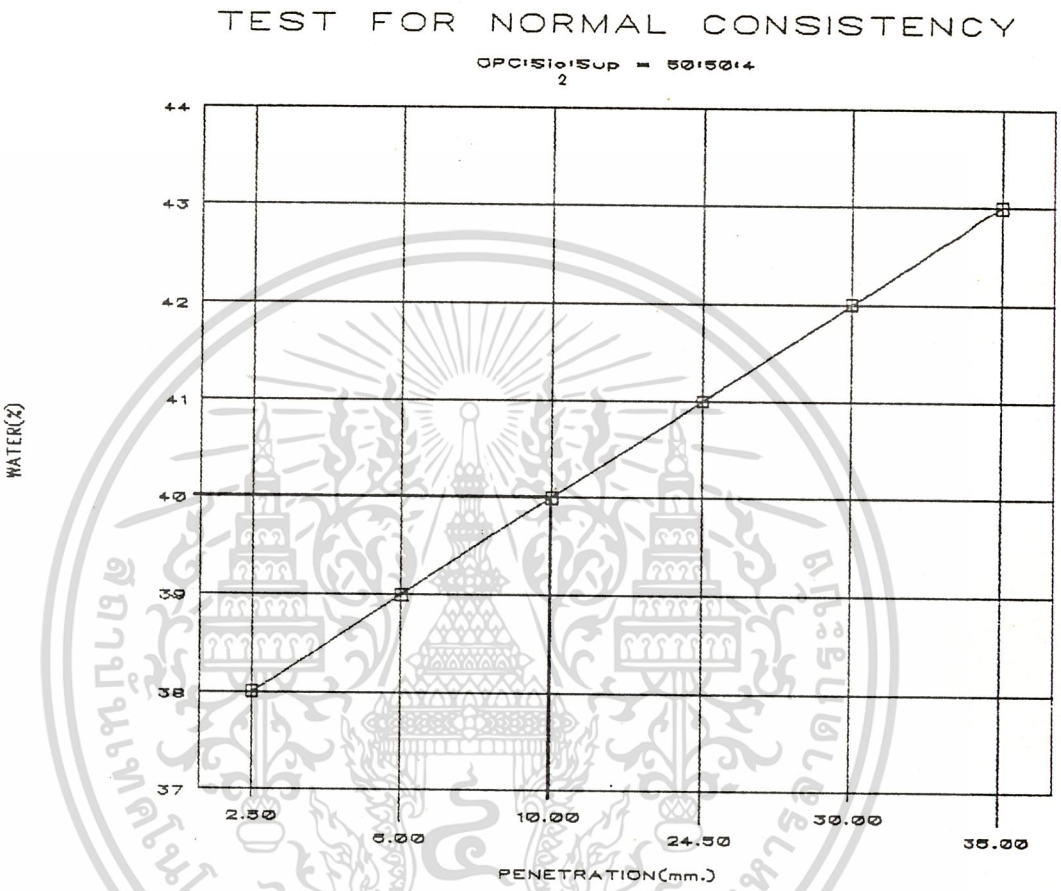

จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 41.20 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ก(ต่อ) ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา : สารลดน้ำพิเศษ 50 : 50 : 4




จากกราฟ,

ค่าความข้นเหลวปกติ, P = 40 %

(Normal Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ก ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

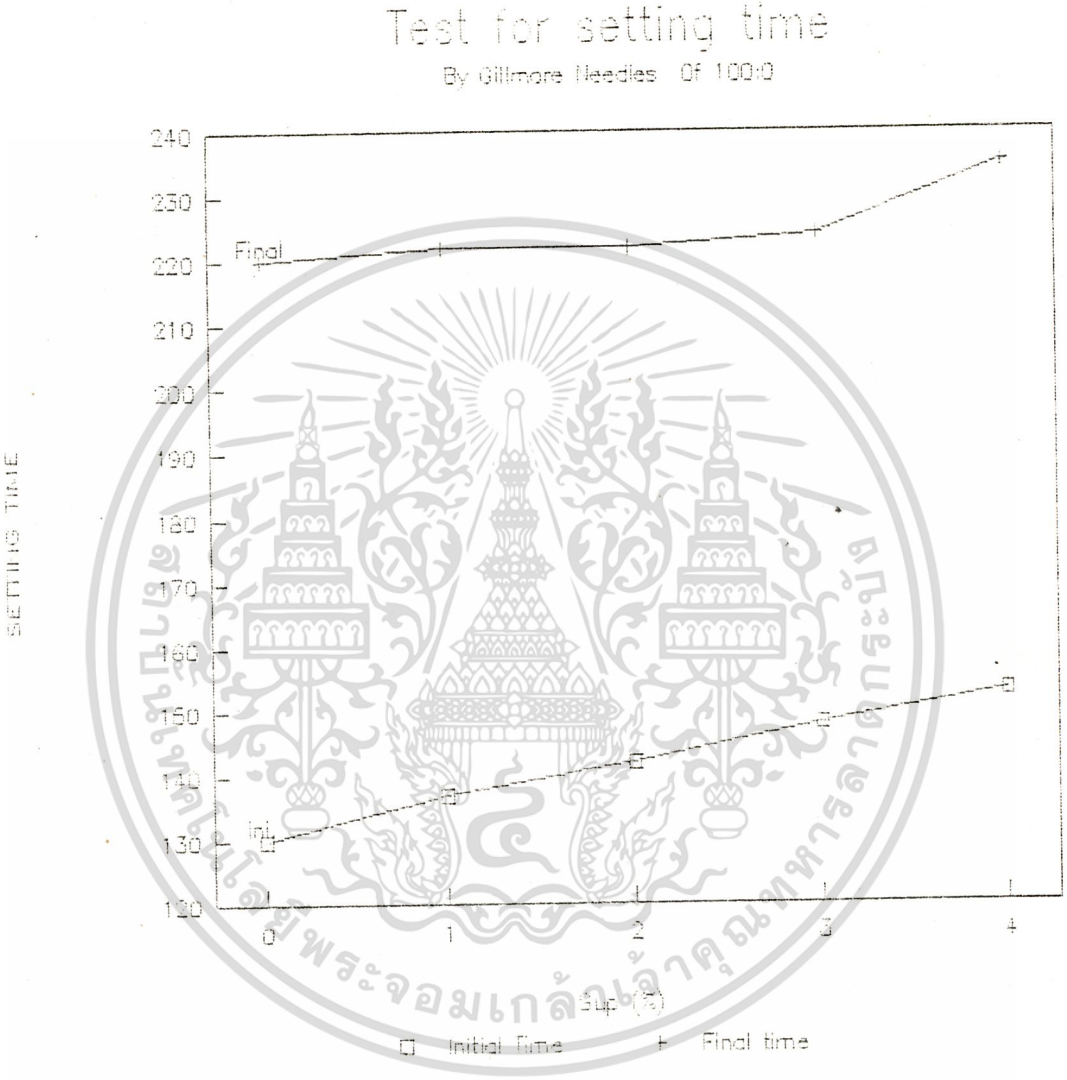
TEST FOR SETTING TIME

| OPC:$Sio_2$:Sup. | NORMAL CONSISTENCY | INITIAL SETTING TIME 1 | 2 | 3 | Avg. | FINAL SETTING TIME 1 | 2 | 3 | Avg. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100:0:0 | 33 | 131 | 130 | 129 | 130 | 225 | 220 | 215 | 220 |
| 100:0:1 | 30.3 | 140 | 142 | 130 | 137 | 223 | 221 | 222 | 222 |
| 100:0:2 | 29.3 | 137 | 151 | 152 | 148 | 210 | 222 | 235 | 222 |
| 100:0:3 | 25.8 | 140 | 151 | 152 | 148 | 220 | 227 | 226 | 224 |
| 100:0:4 | 24 | 145 | 158 | 156 | 153 | 231 | 235 | 238 | 235 |
| 90:10:0 | 34 | 132 | 140 | 142 | 138 | 207 | 211 | 213 | 210 |
| 90:10:1 | 33.5 | 145 | 138 | 138 | 140 | 220 | 220 | 218 | 219 |
| 90:10:2 | 29.5 | 150 | 144 | 141 | 145 | 230 | 218 | 220 | 223 |
| 90:10:3 | 28.6 | 150 | 156 | 160 | 155 | 230 | 222 | 225 | 226 |
| 90:10:4 | 27.6 | 169 | 172 | 170 | 170 | 243 | 241 | 237 | 240 |
| 80:20:0 | 38 | 109 | 112 | 108 | 110 | 156 | 162 | 162 | 160 |
| 80:20:1 | 34.3 | 119 | 121 | 121 | 120 | 160 | 161 | 174 | 165 |
| 80:20:2 | 31 | 123 | 124 | 121 | 123 | 172 | 166 | 171 | 170 |
| 80:20:3 | 30.1 | 125 | 126 | 130 | 127 | 177 | 180 | 178 | 178 |
| 80:20:4 | 29 | 133 | 130 | 128 | 130 | 178 | 180 | 187 | 182 |
| 70:30:0 | 40.1 | 98 | 99 | 102 | 100 | 144 | 147 | 145 | 145 |
| 70:30:1 | 37.2 | 100 | 101 | 98 | 100 | 145 | 146 | 151 | 147 |
| 70:30:2 | 33.7 | 105 | 107 | 111 | 108 | 143 | 152 | 154 | 150 |
| 70:30:3 | 33.1 | 110 | 111 | 116 | 112 | 160 | 168 | 169 | 166 |
| 70:30:4 | 31 | 133 | 138 | 136 | 136 | 177 | 177 | 180 | 178 |
| 60:40:0 | 42.4 | 90 | 93 | 92 | 92 | 125 | 120 | 117 | 121 |
| 60:40:1 | 40 | 95 | 96 | 99 | 97 | 130 | 133 | 133 | 132 |
| 60:40:2 | 39.25 | 99 | 97 | 97 | 98 | 153 | 160 | 158 | 157 |
| 60:40:3 | 38.1 | 108 | 104 | 105 | 106 | 166 | 154 | 159 | 160 |
| 60:40:4 | 36.27 | 115 | 112 | 108 | 112 | 176 | 173 | 177 | 175 |
| 50:50:0 | 46.15 | 63 | 67 | 64 | 65 | 111 | 105 | 109 | 108 |
| 50:50:1 | 44.2 | 75 | 76 | 79 | 77 | 114 | 110 | 109 | 111 |
| 50:50:2 | 42.3 | 83 | 82 | 77 | 81 | 118 | 123 | 120 | 120 |
| 50:50:3 | 41.2 | 96 | 99 | 98 | 98 | 141 | 140 | 137 | 139 |
| 50:50:4 | 40 | 110 | 108 | 110 | 109 | 165 | 160 | 163 | 163 |

Remark.
OPC. = portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

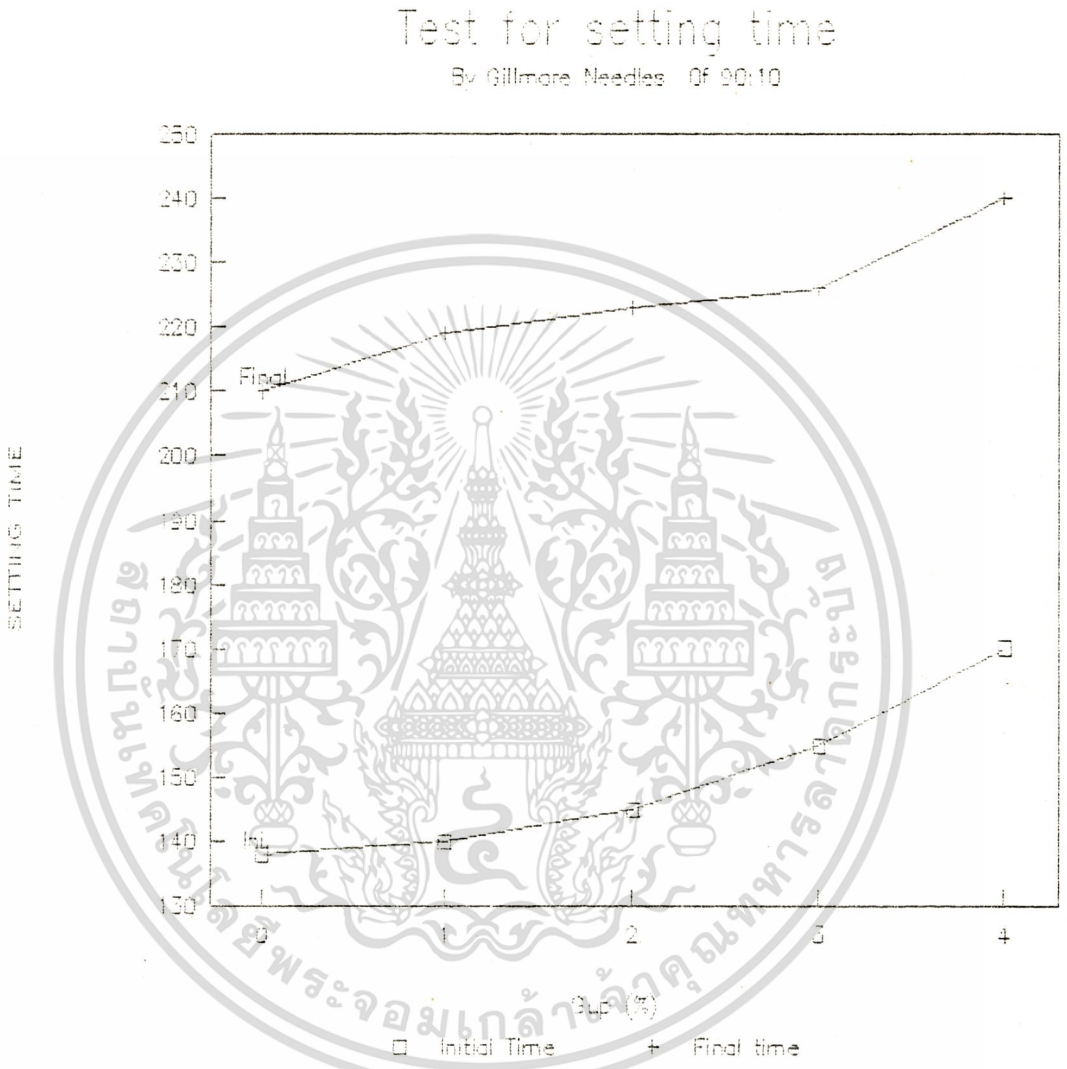
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 100 : 0



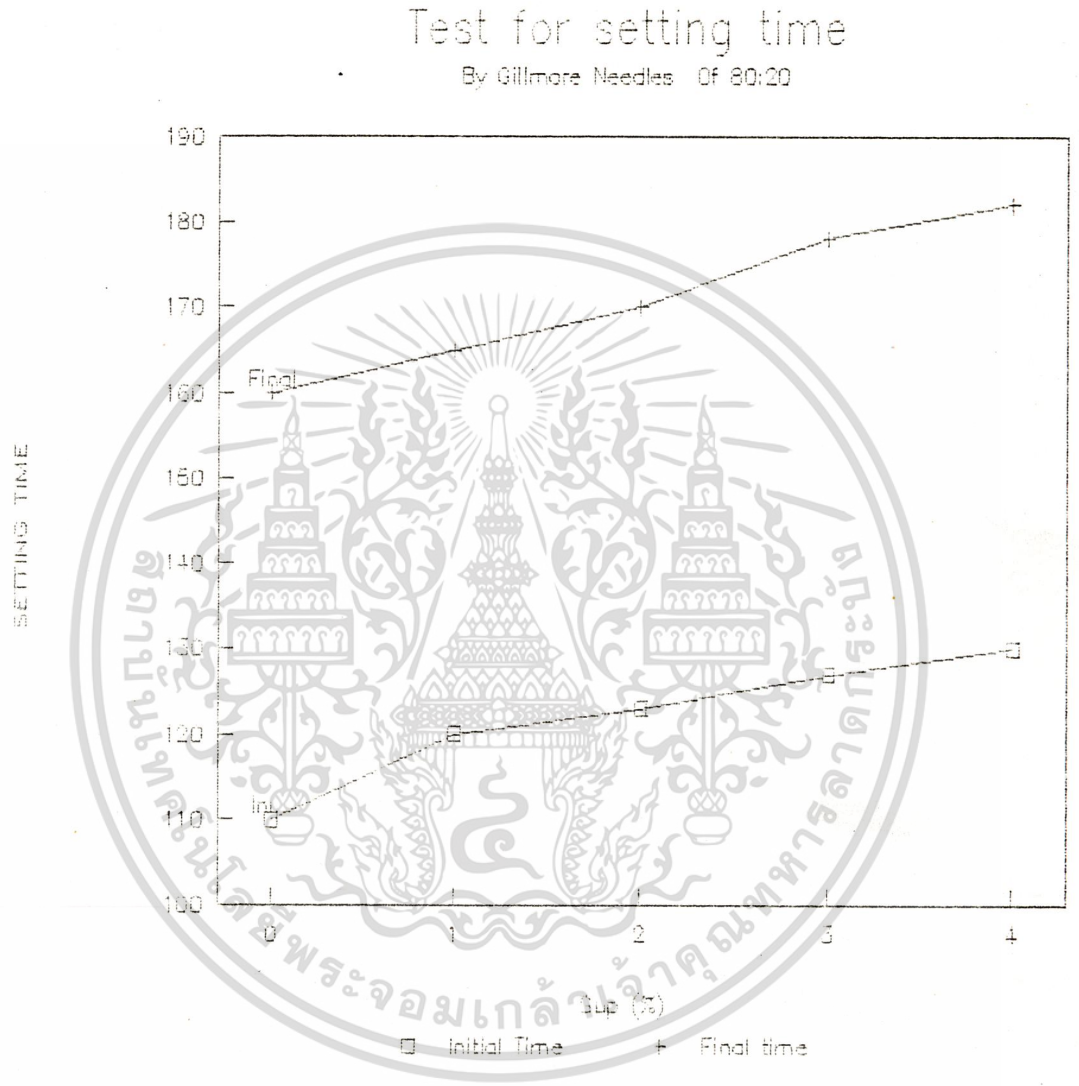

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข(ต่อ) ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 90 : 10



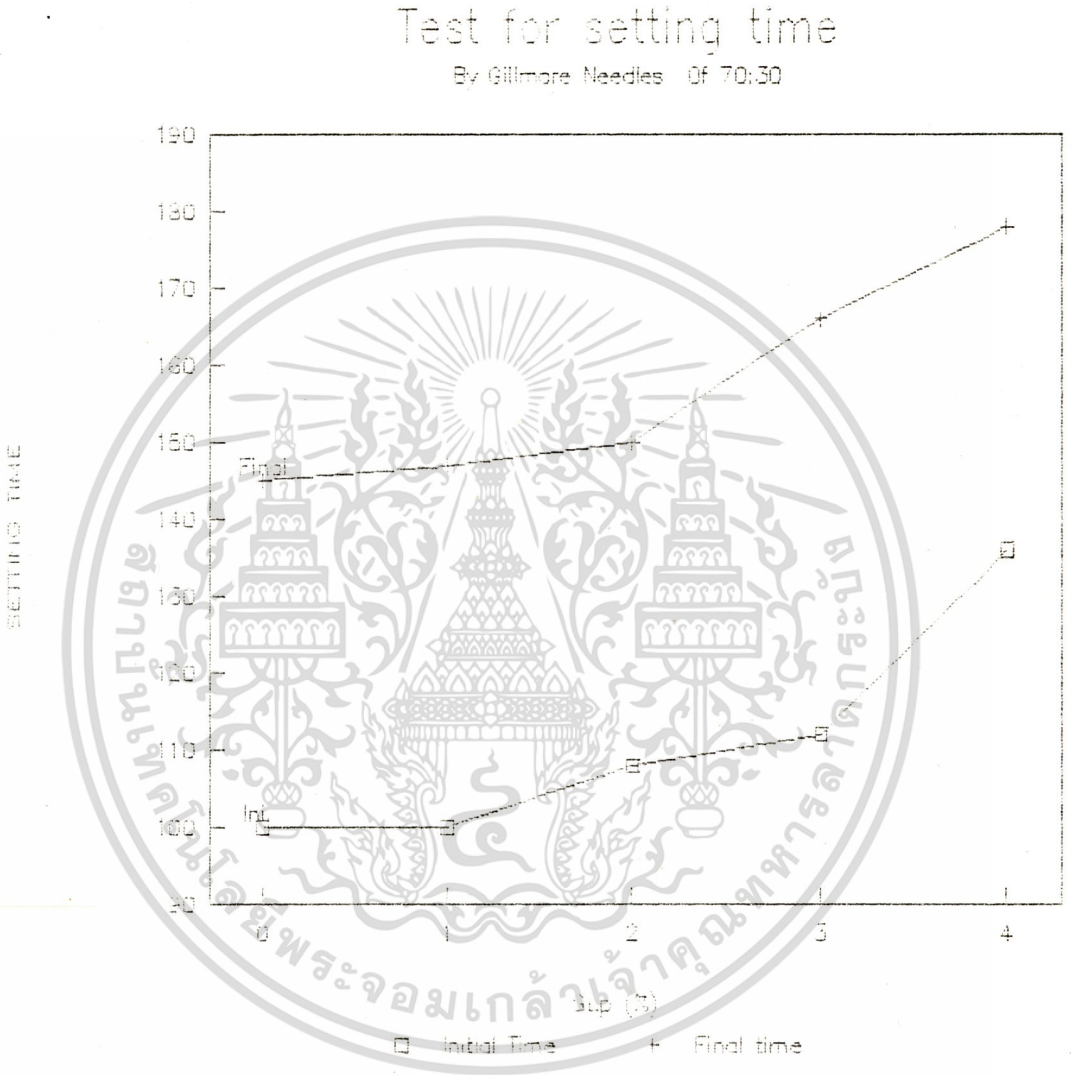

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข(ต่อ) ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 80 : 20



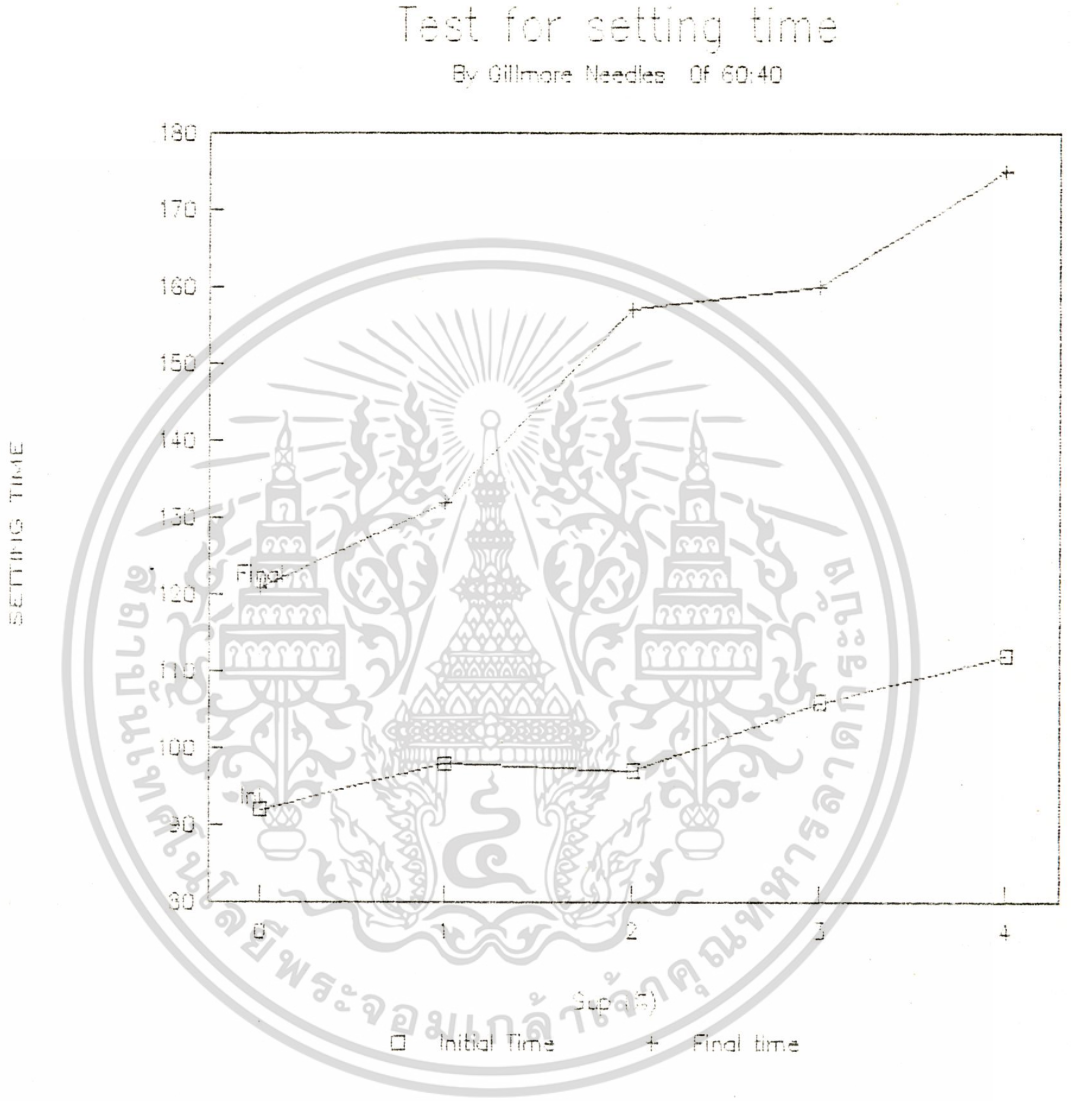

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข(ต่อ) ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 70 : 30



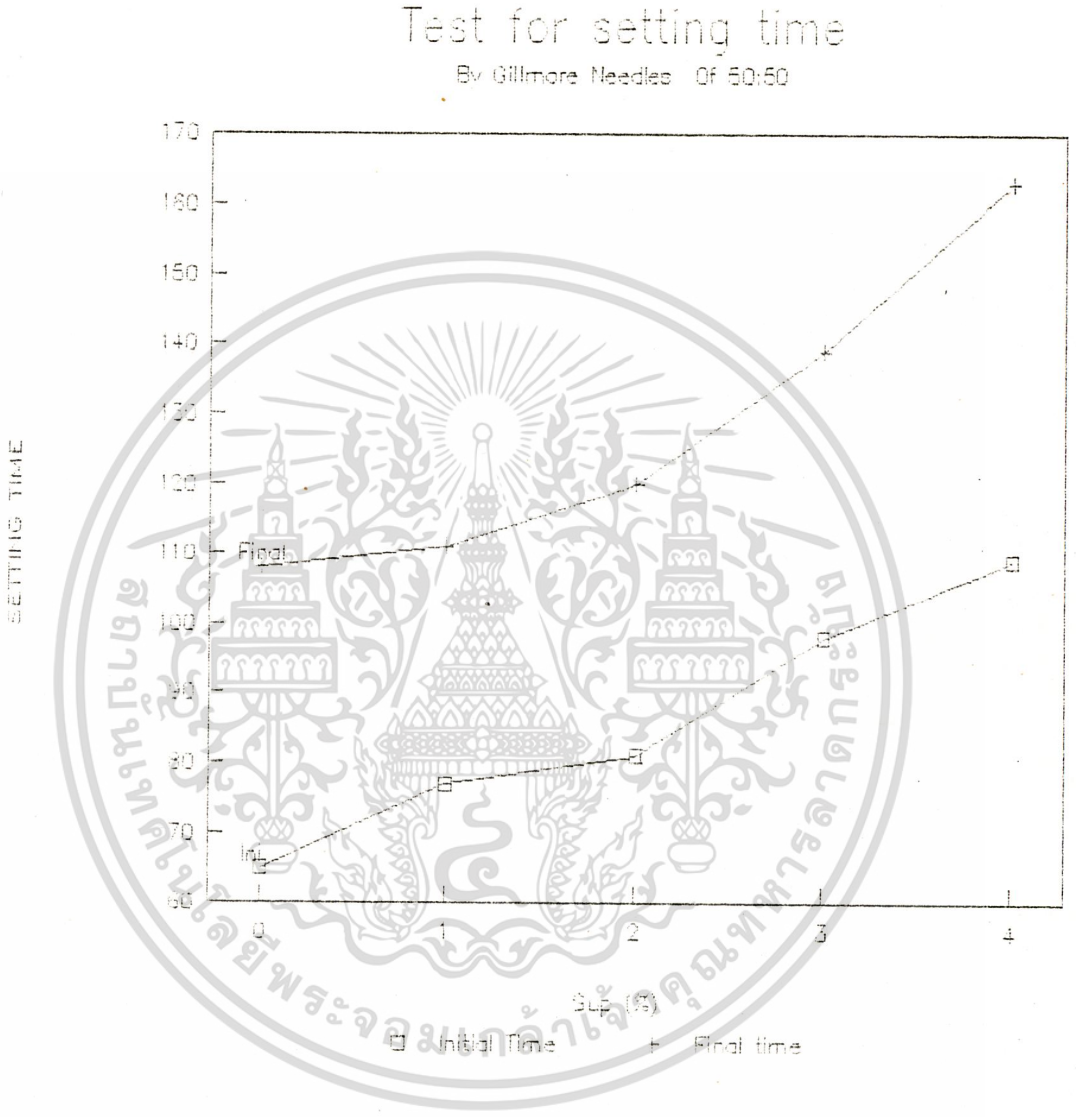

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข(ต่อ) ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 60 : 40




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ข(ต่อ) ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสท์โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์บอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 50 : 50




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ข ผลการทดสอบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์

TEST FOR SOUNDNESS

| OPC:$SiO_2$ | Sup (%) | Spec. No. | Before Curing WEIGHT (g) | Before Curing LENGTH (mm.) | After Curing WEIGHT (g) | After Curing LENGTH (mm.) | After boil WEIGHT (g) | After boil LENGTH (mm.) | DIFFERRENCE D(W) | DIFFERRENCE D(L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 160.60 | 98.00 | 163.09 | 96.90 | 160.47 | 97.20 | -2.62 | 0.30 |
| | 0 | 2 | 167.85 | 103.00 | 170.31 | 97.20 | 167.61 | 97.41 | -2.70 | 0.21 |
| | | 3 | 195.55 | 120.00 | 198.05 | 119.50 | 195.25 | 119.85 | -2.80 | 0.35 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.71 | 0.29 |
| | | 1 | 163.28 | 110.50 | 165.60 | 110.30 | 163.06 | 110.60 | -2.54 | 0.30 |
| | 1 | 2 | 152.10 | 103.00 | 155.20 | 102.76 | 152.90 | 102.90 | -2.30 | 0.14 |
| | | 3 | 180.15 | 122.00 | 182.34 | 120.89 | 180.18 | 121.10 | -2.16 | 0.21 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.33 | 0.22 |
| | | 1 | 114.87 | 98.00 | 117.27 | 97.75 | 115.00 | 98.02 | -2.27 | 0.27 |
| 100:0 | 2 | 2 | 131.40 | 101.80 | 138.76 | 100.90 | 136.50 | 101.10 | -2.26 | 0.20 |
| | | 3 | 180.70 | 140.00 | 186.62 | 137.61 | 184.40 | 137.80 | -2.22 | 0.19 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.25 | 0.22 |
| | | 1 | 150.60 | 112.00 | 152.70 | 111.60 | 150.80 | 111.79 | -1.90 | 0.19 |
| | 3 | 2 | 174.80 | 130.00 | 177.30 | 129.78 | 175.10 | 129.99 | -2.20 | 0.21 |
| | | 3 | 178.80 | 133.80 | 182.50 | 133.20 | 180.50 | 133.40 | -2.00 | 0.20 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.03 | 0.20 |
| | | 1 | 133.72 | 113.20 | 135.82 | 112.95 | 133.32 | 113.18 | -1.90 | 0.23 |
| | 4 | 2 | 118.13 | 100.00 | 120.43 | 99.76 | 118.43 | 99.94 | -2.00 | 0.18 |
| | | 3 | 157.70 | 134.50 | 159.80 | 134.00 | 158.00 | 134.22 | -1.80 | 0.22 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.90 | 0.21 |
| | | 1 | 186.74 | 112.50 | 191.74 | 109.90 | 189.65 | 110.05 | -2.09 | 0.15 |
| | 0 | 2 | 174.29 | 105.00 | 179.90 | 102.60 | 177.45 | 102.80 | -2.45 | 0.20 |
| | | 3 | 171.30 | 103.20 | 176.95 | 100.65 | 174.50 | 101.20 | -2.45 | 0.55 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.33 | 0.30 |
| | | 1 | 191.73 | 126.00 | 193.03 | 124.10 | 196.88 | 124.29 | -2.15 | 0.19 |
| | 1 | 2 | 190.22 | 125.50 | 197.26 | 123.50 | 195.06 | 123.70 | -2.20 | 0.20 |
| | | 3 | 193.55 | 127.70 | 200.85 | 125.75 | 198.30 | 125.90 | -2.55 | 0.15 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.30 | 0.18 |
| | | 1 | 190.36 | 130.00 | 196.36 | 129.00 | 194.46 | 129.16 | -1.90 | 0.16 |
| 90:10 | 2 | 2 | 191.38 | 130.70 | 196.88 | 129.80 | 194.90 | 129.98 | -1.98 | 0.18 |
| | | 3 | 194.90 | 133.10 | 200.72 | 132.20 | 198.60 | 132.40 | -2.12 | 0.20 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.00 | 0.18 |
| | | 1 | 192.28 | 135.00 | 194.78 | 133.30 | 193.13 | 133.43 | -1.65 | 0.13 |
| | 3 | 2 | 200.84 | 141.00 | 203.29 | 139.45 | 201.59 | 139.62 | -1.70 | 0.17 |
| | | 3 | 193.00 | 135.50 | 195.45 | 133.80 | 193.70 | 133.95 | -1.75 | 0.15 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.70 | 0.15 |
| | | 1 | 203.60 | 140.00 | 206.65 | 137.30 | 204.65 | 137.51 | -2.00 | 0.21 |
| | 4 | 2 | 203.89 | 140.20 | 207.19 | 137.43 | 205.29 | 137.60 | -1.90 | 0.17 |
| | | 3 | 200.40 | 137.80 | 203.61 | 135.04 | 201.81 | 135.20 | -1.80 | 0.16 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.90 | 0.18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ข(ต่อ) ผลการทดสอบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์

TEST FOR SOUNDNESS

| OPC:Sio2 | Sup (%) | Spec. No. | Before Curing WEIGHT (g) | Before Curing LENGTH (mm.) | After Curing WEIGHT (g) | After Curing LENGTH (mm.) | After boil WEIGHT (g) | After boil LENGTH (mm.) | DIFFERRENCE D(W) | DIFFERRENCE D(L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 173.04 | 120.10 | 174.94 | 116.78 | 172.94 | 116.97 | -2.00 | 0.19 |
| | 0 | 2 | 174.34 | 121.00 | 176.34 | 117.90 | 174.24 | 118.09 | -2.10 | 0.19 |
| | | 3 | 175.35 | 121.70 | 177.25 | 118.38 | 175.05 | 118.60 | -2.20 | 0.22 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.10 | 0.20 |
| | | 1 | 181.56 | 130.00 | 183.71 | 127.00 | 181.91 | 127.16 | -1.80 | 0.16 |
| | 1 | 2 | 188.55 | 135.00 | 190.70 | 132.10 | 188.70 | 132.27 | -2.00 | 0.17 |
| | | 3 | 181.15 | 134.00 | 189.30 | 132.22 | 187.40 | 132.40 | -1.90 | 0.18 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.90 | 0.17 |
| | | 1 | 206.67 | 135.60 | 208.67 | 133.55 | 206.57 | 133.70 | -2.10 | 0.15 |
| 80:20 | 2 | 2 | 213.83 | 140.30 | 215.33 | 138.20 | 213.63 | 138.38 | -1.70 | 0.18 |
| | | 3 | 208.80 | 137.00 | 210.35 | 134.92 | 208.45 | 135.10 | -1.90 | 0.18 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.90 | 0.17 |
| | | 1 | 199.23 | 135.50 | 200.53 | 133.60 | 199.01 | 133.69 | -1.52 | 0.09 |
| | 3 | 2 | 201.00 | 136.70 | 202.86 | 134.70 | 201.38 | 134.81 | -1.48 | 0.11 |
| | | 3 | 198.20 | 134.80 | 199.75 | 132.80 | 198.40 | 132.90 | -1.35 | 0.10 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.45 | 0.10 |
| | | 1 | 199.20 | 135.00 | 200.70 | 132.90 | 199.40 | 133.05 | -1.30 | 0.15 |
| | 4 | 2 | 191.80 | 130.00 | 193.45 | 127.70 | 191.75 | 127.80 | -1.70 | 0.10 |
| | | 3 | 197.70 | 134.00 | 199.35 | 131.69 | 197.55 | 131.80 | -1.80 | 0.11 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.60 | 0.12 |
| | | 1 | 161.01 | 122.00 | 165.06 | 120.50 | 162.81 | 120.72 | -2.25 | 0.22 |
| | 0 | 2 | 162.73 | 123.30 | 166.83 | 121.00 | 164.63 | 121.25 | -2.20 | 0.25 |
| | | 3 | 160.35 | 121.50 | 163.17 | 120.18 | 161.00 | 120.40 | -2.17 | 0.22 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.21 | 0.23 |
| | | 1 | 176.78 | 123.30 | 179.68 | 121.10 | 177.58 | 121.33 | -2.10 | 0.23 |
| | 1 | 2 | 176.35 | 123.00 | 179.21 | 120.82 | 176.91 | 121.04 | -2.30 | 0.22 |
| | | 3 | 175.35 | 122.30 | 179.40 | 120.12 | 177.20 | 120.30 | -2.20 | 0.18 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.20 | 0.21 |
| | | 1 | 187.08 | 138.00 | 190.58 | 135.90 | 188.39 | 136.08 | -2.19 | 0.18 |
| 70:30 | 2 | 2 | 191.15 | 141.00 | 194.87 | 138.87 | 192.67 | 139.06 | -2.20 | 0.19 |
| | | 3 | 184.10 | 135.80 | 187.60 | 133.67 | 185.45 | 133.90 | -2.15 | 0.23 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.18 | 0.20 |
| | | 1 | 179.82 | 130.00 | 180.82 | 127.50 | 178.82 | 127.65 | -2.00 | 0.15 |
| | 3 | 2 | 181.89 | 131.50 | 182.87 | 129.05 | 180.86 | 129.22 | -2.01 | 0.17 |
| | | 3 | 177.05 | 128.00 | 178.03 | 125.55 | 176.10 | 125.80 | -1.93 | 0.25 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.98 | 0.19 |
| | | 1 | 176.29 | 131.30 | 178.59 | 130.20 | 176.64 | 130.45 | -1.95 | 0.25 |
| | 4 | 2 | 176.56 | 131.50 | 179.06 | 130.50 | 177.08 | 130.71 | -1.98 | 0.21 |
| | | 3 | 169.85 | 126.50 | 172.35 | 125.50 | 170.28 | 125.70 | -2.07 | 0.20 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.00 | 0.22 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

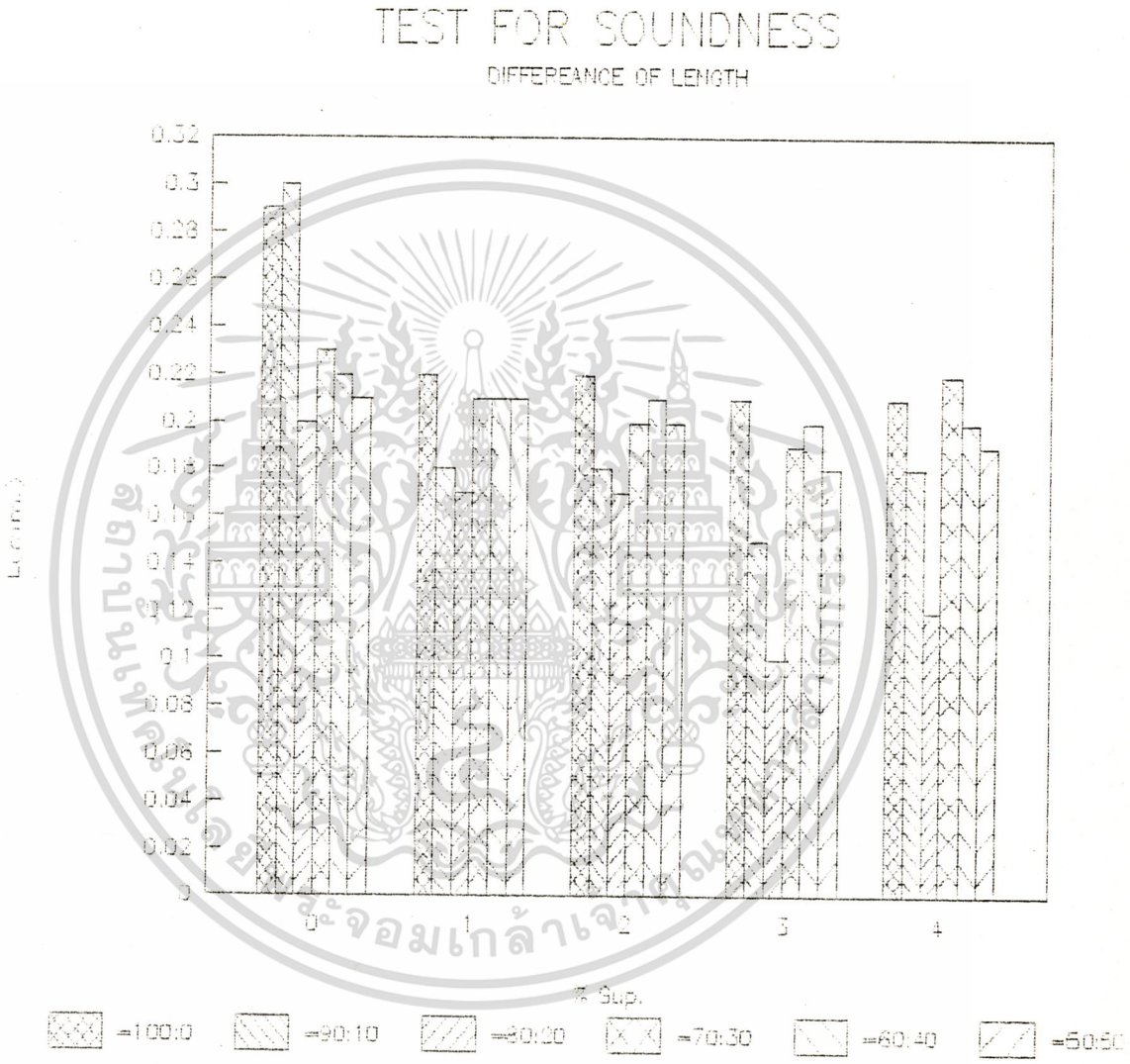
ตารางผนวก ข(ต่อ) ผลการทดสอบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์

TEST FOR SOUNDNESS

| DPC:Si$o_2$ | Sup (%) | Spec. No. | Before Curing WEIGHT (g) | Before Curing LENGTH (mm.) | After Curing WEIGHT (g) | After Curing LENGTH (mm.) | After boil WEIGHT (g) | After boil LENGTH (mm.) | DIFFERRENCE D(W) | DIFFERRENCE D(L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 190.31 | 133.70 | 193.31 | 131.20 | 191.16 | 131.43 | -2.15 | 0.23 |
| | 0 | 2 | 183.50 | 128.90 | 186.45 | 126.50 | 184.00 | 126.76 | -2.45 | 0.26 |
| | | 3 | 180.20 | 126.60 | 183.15 | 124.23 | 180.85 | 124.40 | -2.30 | 0.17 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.30 | 0.22 |
| | | 1 | 188.02 | 120.50 | 190.52 | 118.50 | 188.32 | 118.73 | -2.20 | 0.23 |
| | 1 | 2 | 185.71 | 119.00 | 188.19 | 117.01 | 186.01 | 117.22 | -2.18 | 0.21 |
| | | 3 | 188.65 | 120.90 | 191.13 | 118.91 | 188.85 | 119.10 | -2.28 | 0.19 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.22 | 0.21 |
| | | 1 | 174.17 | 118.50 | 176.17 | 115.90 | 174.07 | 116.12 | -2.10 | 0.22 |
| 60:40 | 2 | 2 | 176.37 | 120.00 | 178.49 | 117.40 | 176.40 | 117.60 | -2.09 | 0.20 |
| | | 3 | 172.70 | 117.50 | 174.82 | 114.90 | 172.65 | 115.10 | -2.17 | 0.20 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.12 | 0.21 |
| | | 1 | 181.21 | 131.00 | 183.21 | 129.50 | 181.26 | 129.70 | -1.95 | 0.20 |
| | 3 | 2 | 180.79 | 130.70 | 182.74 | 128.98 | 180.49 | 129.16 | -2.25 | 0.18 |
| | | 3 | 175.95 | 127.20 | 180.00 | 125.48 | 177.90 | 125.70 | -2.10 | 0.22 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.10 | 0.20 |
| | | 1 | 177.80 | 131.40 | 180.80 | 129.20 | 178.90 | 129.40 | -1.90 | 0.20 |
| | 4 | 2 | 176.72 | 130.60 | 179.87 | 128.42 | 177.87 | 128.64 | -2.00 | 0.22 |
| | | 3 | 173.20 | 128.00 | 176.35 | 125.82 | 174.40 | 126.00 | -1.95 | 0.18 |
| | | Avg. | | | | | | | -1.95 | 0.20 |
| | | 1 | 175.12 | 120.60 | 178.12 | 118.10 | 175.80 | 118.32 | -2.32 | 0.22 |
| | 0 | 2 | 175.41 | 120.80 | 178.31 | 118.48 | 176.01 | 118.67 | -2.30 | 0.19 |
| | | 3 | 174.25 | 120.00 | 176.43 | 117.68 | 174.00 | 117.90 | -2.43 | 0.22 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.35 | 0.21 |
| | | 1 | 173.33 | 125.00 | 176.23 | 122.40 | 173.87 | 122.58 | -2.36 | 0.18 |
| | 1 | 2 | 170.70 | 123.10 | 173.70 | 120.54 | 171.46 | 120.73 | -2.24 | 0.19 |
| | | 3 | 164.05 | 118.30 | 166.95 | 115.74 | 164.65 | 116.00 | -2.30 | 0.26 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.30 | 0.21 |
| | | 1 | 189.38 | 123.50 | 191.88 | 121.40 | 189.78 | 121.60 | -2.10 | 0.20 |
| 50:50 | 2 | 2 | 184.01 | 120.00 | 186.71 | 117.95 | 184.41 | 118.20 | -2.30 | 0.25 |
| | | 3 | 178.80 | 116.60 | 181.50 | 114.55 | 179.30 | 114.70 | -2.20 | 0.15 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.20 | 0.20 |
| | | 1 | 167.43 | 118.90 | 169.43 | 117.40 | 167.43 | 117.55 | -2.00 | 0.15 |
| | 3 | 2 | 171.80 | 122.00 | 173.55 | 120.35 | 171.70 | 120.49 | -1.85 | 0.14 |
| | | 3 | 167.15 | 118.70 | 169.80 | 117.05 | 167.35 | 117.30 | -2.45 | 0.25 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.10 | 0.18 |
| | | 1 | 185.60 | 123.50 | 188.30 | 121.20 | 186.55 | 121.36 | -1.75 | 0.16 |
| | 4 | 2 | 187.85 | 125.00 | 190.50 | 122.71 | 188.35 | 122.93 | -2.15 | 0.22 |
| | | 3 | 184.25 | 122.60 | 186.00 | 120.31 | 183.90 | 120.50 | -2.10 | 0.19 |
| | | Avg. | | | | | | | -2.00 | 0.19 |

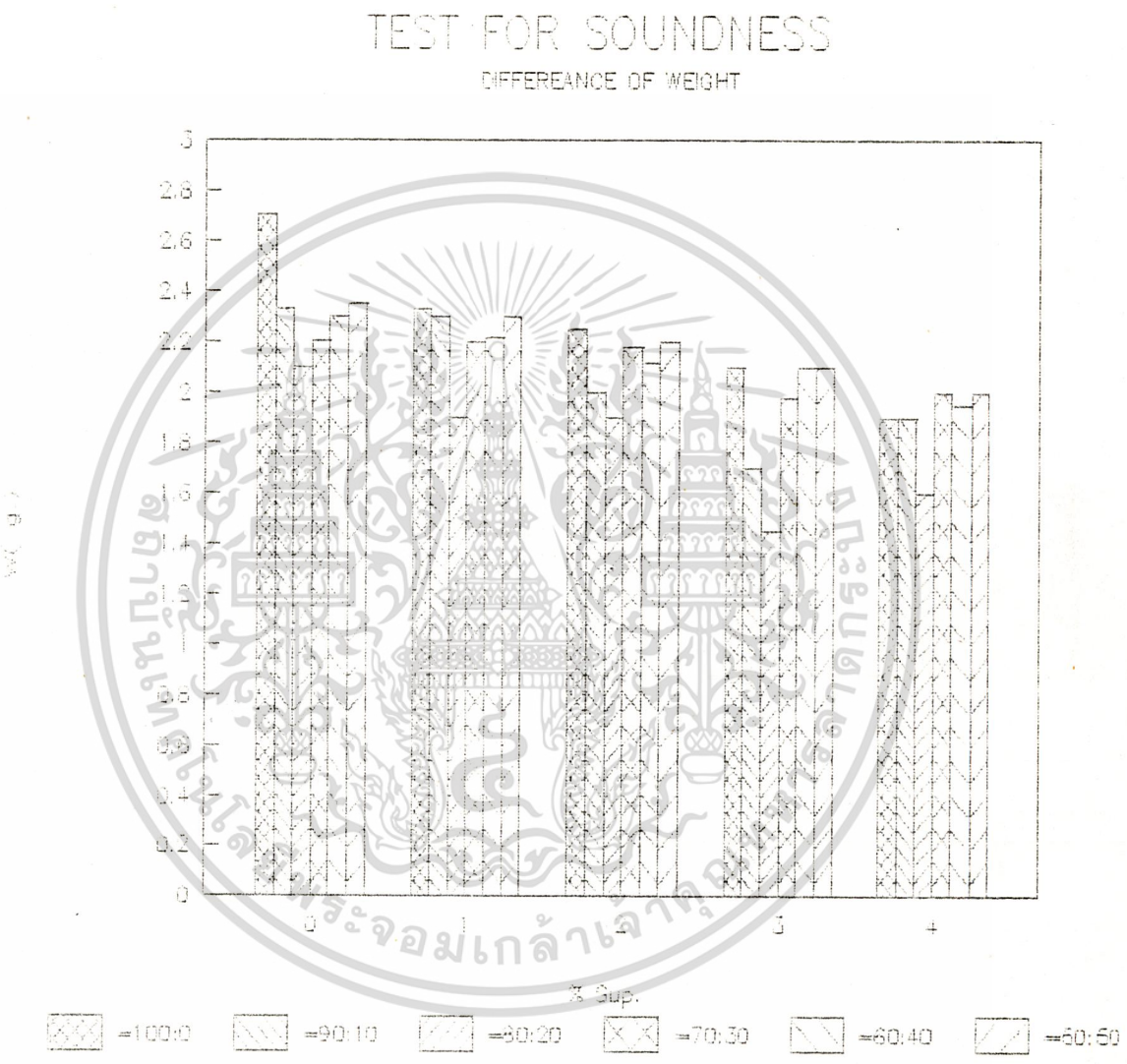
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ค เปรียบเทียบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์โดยใช้ผลต่างของความยาว




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ง เปรียบเทียบค่าความอยู่ตัวของวุ้นซีเมนต์โดยใช้ผลต่างของน้ำหนัก




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 1

| $OPC_2$:Sio:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 26.52 | 3,685 | 138.95 | |
| | | 1 | 2 | 26.10 | 3,735 | 143.09 | |
| | | | 3 | 27.04 | 3,810 | 140.91 | 141 |
| | | | 1 | 26.36 | 5,194 | 197.01 | |
| 100:0:0 | 0.702 | 3 | 2 | 26.52 | 4,855 | 183.05 | |
| | | | 3 | 26.52 | 5,040 | 190.05 | 190 |
| | | | 1 | 26.52 | 6,900 | 260.18 | |
| | | 7 | 2 | 26.27 | 6,935 | 264.04 | |
| | | | 3 | 26.52 | 6,948 | 261.99 | 262 |
| | | | 1 | 25.50 | 4,185 | 164.12 | |
| | | 1 | 2 | 26.27 | 4,125 | 157.05 | |
| | | | 3 | 26.78 | 4,020 | 150.11 | 157 |
| | | | 1 | 27.83 | 5,700 | 204.85 | |
| 100:0:1 | 0.644 | 3 | 2 | 26.31 | 5,500 | 209.03 | |
| | | | 3 | 27.03 | 5,838 | 215.98 | 210 |
| | | | 1 | 27.56 | 7,440 | 269.96 | |
| | | 7 | 2 | 26.11 | 7,155 | 274.05 | |
| | | | 3 | 25.50 | 7,010 | 274.90 | 273 |
| | | | 1 | 26.68 | 5,310 | 199.06 | |
| | | 1 | 2 | 27.32 | 5,110 | 187.02 | |
| | | | 3 | 26.05 | 4,795 | 184.05 | 190 |
| | | | 1 | 26.57 | 6,110 | 229.95 | |
| 100:0:2 | 0.623 | 3 | 2 | 25.76 | 6,180 | 239.95 | |
| | | | 3 | 26.00 | 6,270 | 241.15 | 237 |
| | | | 1 | 26.42 | 7,660 | 289.94 | |
| | | 7 | 2 | 26.36 | 7,570 | 287.13 | |
| | | | 3 | 27.03 | 7,590 | 280.80 | 286 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
$OPC_2$ = Portland cement
Sio = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 2

| OPC:$SiO_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 25.15 | 4,800 | 190.85 | |
| | | 1 | 2 | 25.65 | 5,130 | 199.99 | |
| | | | 3 | 27.56 | 5,510 | 199.93 | 197 |
| | | | 1 | 26.99 | 6,695 | 248.09 | |
| 100:0:3 | 0.55 | 3 | 2 | 26.57 | 6,560 | 246.91 | |
| | | | 3 | 25.75 | 6,410 | 248.93 | 248 |
| | | | 1 | 26.40 | 8,320 | 315.12 | |
| | | 7 | 2 | 26.36 | 7,750 | 293.96 | |
| | | | 3 | 26.16 | 7,615 | 291.06 | 300 |
| | | | 1 | 28.13 | 5,375 | 191.05 | |
| | | 1 | 2 | 26.78 | 5,140 | 191.93 | |
| | | | 3 | 27.30 | 5,515 | 202.05 | 195 |
| | | | 1 | 28.88 | 6,930 | 240.00 | |
| 100:0:4 | 0.51 | 3 | 2 | 29.90 | 6,880 | 230.07 | |
| | | | 3 | 27.56 | 6,480 | 235.12 | 235 |
| | | | 1 | 27.93 | 7,960 | 284.99 | |
| | | 7 | 2 | 27.91 | 7,925 | 283.95 | |
| | | | 3 | 25.52 | 6,915 | 270.98 | 280 |
| | | | 1 | 28 | 3,950 | 141.07 | |
| | | 1 | 2 | 25.75 | 3,740 | 145.23 | |
| | | | 3 | 26.52 | 3,870 | 145.93 | 144 |
| | | | 1 | 25.86 | 4,915 | 190.08 | |
| 90:10:0 | 0.62 | 3 | 2 | 27.61 | 5,410 | 195.92 | |
| | | | 3 | 27.56 | 5,400 | 195.94 | 194 |
| | | | 1 | 27.82 | 7,510 | 269.95 | |
| | | 7 | 2 | 27.56 | 7,470 | 271.04 | |
| | | | 3 | 27.66 | 7,525 | 272.01 | 271 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$SiO_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 3

| OPC:Sio2:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 26.52 | 4,190 | 157.99 | |
| | | 1 | 2 | 28.36 | 4,650 | 163.99 | |
| | | | 3 | 26.99 | 4,425 | 163.98 | 162 |
| | | | 1 | 27.56 | 5,650 | 205.01 | |
| 90:10:1 | 0.61 | 3 | 2 | 27.30 | 5,950 | 217.99 | |
| | | | 3 | 27.56 | 6,120 | 222.06 | 215 |
| | | | 1 | 28.62 | 8,300 | 290.01 | |
| | | 7 | 2 | 27.83 | 8,125 | 292.00 | |
| | | | 3 | 27.66 | 8,135 | 294.06 | 292 |
| | | | 1 | 25.35 | 5,070 | 200.00 | |
| | | 1 | 2 | 26.32 | 5,525 | 209.95 | |
| | | | 3 | 25.00 | 5,275 | 211.00 | 207 |
| | | | 1 | 25.65 | 6,130 | 238.96 | |
| 90:10:2 | 0.54 | 3 | 2 | 27.54 | 6,470 | 234.93 | |
| | | | 3 | 27.56 | 6,780 | 246.01 | 240 |
| | | | 1 | 28.62 | 9,845 | 343.99 | |
| | | 7 | 2 | 27.83 | 9,630 | 346.09 | |
| | | | 3 | 28.24 | 10,165 | 360.00 | 350 |
| | | | 1 | 28.08 | 6,965 | 248.04 | |
| | | 1 | 2 | 25.20 | 6,070 | 240.87 | |
| | | | 3 | 27.04 | 6,245 | 230.95 | 240 |
| | | | 1 | 25.50 | 8,160 | 320.00 | |
| 90:10:3 | 0.523 | 3 | 2 | 25.91 | 8,445 | 325.96 | |
| | | | 3 | 26.01 | 8,555 | 328.91 | 325 |
| | | | 1 | 28.34 | 11,650 | 411.08 | |
| | | 7 | 2 | 27.30 | 11,330 | 415.02 | |
| | | | 3 | 27.04 | 10,680 | 394.97 | 407 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 4

| OPC:Sio$_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 27.03 | 6,190 | 229.00 | |
| | | 1 | 2 | 27.30 | 6,360 | 232.97 | |
| | | | 3 | 26.27 | 6,225 | 237.01 | 233 |
| | | | 1 | 26.01 | 8,065 | 310.07 | |
| 90:10:4 | 0.5 | 3 | 2 | 27.03 | 8,515 | 315.02 | |
| | | | 3 | 26.36 | 8,040 | 304.96 | 310 |
| | | | 1 | 27.03 | 10,165 | 376.06 | |
| | | 7 | 2 | 25.50 | 9,690 | 380.00 | |
| | | | 3 | 27.56 | 10,335 | 375.00 | 377 |
| | | | 1 | 27.56 | 3,970 | 144.05 | |
| | | 1 | 2 | 26.78 | 4,100 | 153.10 | |
| | | | 3 | 26.52 | 4,135 | 155.92 | 151 |
| | | | 1 | 29.26 | 5,850 | 199.93 | |
| 80:20:0 | 0.656 | 3 | 2 | 28.89 | 5,920 | 204.95 | |
| | | | 3 | 28.89 | 5,890 | 203.91 | 203 |
| | | | 1 | 28.46 | 8,110 | 284.94 | |
| | | 7 | 2 | 27.25 | 8,175 | 300.02 | |
| | | | 3 | 28.35 | 8,505 | 300.00 | 295 |
| | | | 1 | 26.01 | 4,600 | 176.86 | |
| | | 1 | 2 | 26.52 | 4,720 | 177.98 | |
| | | | 3 | 28.62 | 5,125 | 179.07 | 178 |
| | | | 1 | 27.09 | 6,260 | 231.06 | |
| 80:20:1 | 0.592 | 3 | 2 | 27.03 | 6,350 | 234.92 | |
| | | | 3 | 27.04 | 6,275 | 232.06 | 233 |
| | | | 1 | 25.14 | 8,525 | 339.06 | |
| | | 7 | 2 | 25.00 | 8,325 | 333.00 | |
| | | | 3 | 26.01 | 8,505 | 326.99 | 333 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 5

| OPC:$SiO_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 27.04 | 6,220 | 230.03 | |
| | | 1 | 2 | 26.01 | 6,140 | 236.06 | |
| | | | 3 | 25.50 | 6,095 | 239.02 | 235 |
| | | | 1 | 27.30 | 7,100 | 260.07 | |
| 80:20:2 | 0.536 | 3 | 2 | 27.56 | 7,195 | 261.07 | |
| | | | 3 | 27.87 | 7,300 | 261.91 | 261 |
| | | | 1 | 27.70 | 11,775 | 425.03 | |
| | | 7 | 2 | 27.97 | 11,970 | 427.93 | |
| | | | 3 | 27.67 | 12,120 | 438.06 | 430 |
| | | | 1 | 27.83 | 7,510 | 269.90 | |
| | | 1 | 2 | 27.56 | 7,580 | 275.04 | |
| | | | 3 | 26.21 | 7,260 | 276.97 | 274 |
| | | | 1 | 26.00 | 9,645 | 370.96 | |
| 80:20:3 | 0.52 | 3 | 2 | 26.32 | 9,895 | 376.01 | |
| | | | 3 | 27.04 | 10,220 | 377.96 | 375 |
| | | | 1 | 26.52 | 13,260 | 499.95 | |
| | | 7 | 2 | 27.56 | 13,780 | 500.00 | |
| | | | 3 | 29.70 | 15,205 | 511.95 | 504 |
| | | | 1 | 26.78 | 6,960 | 259.94 | |
| | | 1 | 2 | 29.43 | 7,740 | 263.04 | |
| | | | 3 | 29.97 | 7,700 | 256.92 | 260 |
| | | | 1 | 27.04 | 10,030 | 370.93 | |
| 80:20:4 | 0.505 | 3 | 2 | 26.27 | 9,900 | 376.93 | |
| | | | 3 | 27.93 | 10,280 | 368.05 | 372 |
| | | | 1 | 28.56 | 13,825 | 484.07 | |
| | | 7 | 2 | 30.14 | 14,680 | 487.06 | |
| | | | 3 | 29.70 | 14,730 | 495.96 | 489 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$SiO_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 6

| OPC:$Sio_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 27.03 | 4,460 | 165.00 | |
| | | 1 | 2 | 26.78 | 4,445 | 165.98 | |
| | | | 3 | 26.01 | 4,450 | 171.09 | 167 |
| | | | 1 | 27.82 | 4,925 | 177.03 | |
| 70:30:0 | 0.788 | 3 | 2 | 27.56 | 4,850 | 175.98 | |
| | | | 3 | 28.25 | 5,030 | 178.06 | 177 |
| | | | 1 | 28.62 | 5,865 | 204.93 | |
| | | 7 | 2 | 27.56 | 5,375 | 195.03 | |
| | | | 3 | 26.52 | 5,305 | 200.04 | 200 |
| | | | 1 | 27.83 | 4,895 | 175.92 | |
| | | 1 | 2 | 28.35 | 4,930 | 173.90 | |
| | | | 3 | 28.62 | 4,835 | 168.94 | 173 |
| | | | 1 | 28.30 | 5,375 | 189.96 | |
| 70:30:1 | 0.731 | 3 | 2 | 26.73 | 5,240 | 196.04 | |
| | | | 3 | 28.19 | 5,610 | 199.02 | 195 |
| | | | 1 | 28.30 | 5,940 | 209.92 | |
| | | 7 | 2 | 26.73 | 5,665 | 211.94 | |
| | | | 3 | 28.08 | 5,840 | 207.98 | 210 |
| | | | 1 | 27.04 | 4,730 | 174.93 | |
| | | 1 | 2 | 27.83 | 5,090 | 182.93 | |
| | | | 3 | 27.30 | 5,050 | 185.02 | 181 |
| | | | 1 | 26.37 | 6,355 | 241.01 | |
| 70:30:2 | 0.705 | 3 | 2 | 27.46 | 6,865 | 250.03 | |
| | | | 3 | 25.50 | 6,450 | 252.94 | 248 |
| | | | 1 | 26.16 | 7,820 | 298.92 | |
| | | 7 | 2 | 27.04 | 7,920 | 292.90 | |
| | | | 3 | 26.01 | 7,540 | 289.89 | 294 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 7

| OPC:$Sio_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 26.57 | 5,820 | 219.01 | |
| | | 1 | 2 | 27.54 | 6,060 | 220.04 | |
| | | | 3 | 27.56 | 6,090 | 220.97 | 220 |
| | | | 1 | 28.36 | 8,365 | 295.01 | |
| 70:30:3 | 0.687 | 3 | 2 | 27.25 | 8,145 | 298.92 | |
| | | | 3 | 28.33 | 8,355 | 294.97 | 296 |
| | | | 1 | 27.40 | 10,550 | 385.02 | |
| | | 7 | 2 | 28.08 | 10,895 | 388.06 | |
| | | | 3 | 26.31 | 10,210 | 388.04 | 387 |
| | | | 1 | 27.04 | 5,680 | 210.09 | |
| | | 1 | 2 | 27.56 | 5,375 | 195.03 | |
| | | | 3 | 27.54 | 5,370 | 194.99 | 200 |
| | | | 1 | 27.35 | 7,490 | 273.88 | |
| 70:30:4 | 0.609 | 3 | 2 | 28.60 | 7,810 | 273.08 | |
| | | | 3 | 27.92 | 7,760 | 277.96 | 275 |
| | | | 1 | 26.52 | 9,280 | 349.92 | |
| | | 7 | 2 | 25.60 | 8,985 | 350.93 | |
| | | | 3 | 26.01 | 9,310 | 357.94 | 353 |
| | | | 1 | 25.81 | 3,120 | 120.90 | |
| | | 1 | 2 | 25.60 | 3,150 | 123.03 | |
| | | | 3 | 25.50 | 2,960 | 116.08 | 120 |
| | | | 1 | 26.21 | 3,540 | 135.04 | |
| 60:40:0 | 0.8 | 3 | 2 | 25.76 | 3,530 | 137.06 | |
| | | | 3 | 25.25 | 3,585 | 141.98 | 138 |
| | | | 1 | 25.60 | 3,865 | 150.96 | |
| | | 7 | 2 | 25.65 | 3,925 | 153.00 | |
| | | | 3 | 25.45 | 4,100 | 161.09 | 155 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH

| OPC:$Sio_2$:Sup. | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 25.00 | 3,000 | 120.00 | |
| | | 1 | 2 | 25.15 | 3,070 | 122.07 | |
| | | | 3 | 25.65 | 3,410 | 132.92 | 125 |
| | | | 1 | 27.30 | 3,960 | 145.05 | |
| 60:40:1 | 0.776 | 3 | 2 | 28.86 | 4,185 | 145.01 | |
| | | | 3 | 28.62 | 4,235 | 147.97 | 146 |
| | | | 1 | 26.83 | 4,455 | 166.03 | |
| | | 7 | 2 | 26.99 | 4,505 | 166.93 | |
| | | | 3 | 27.14 | 4,720 | 173.90 | 169 |
| | | | 1 | 27.14 | 3,530 | 130.09 | |
| | | 1 | 2 | 27.04 | 3,595 | 132.95 | |
| | | | 3 | 27.20 | 3,455 | 127.04 | 130 |
| | | | 1 | 27.30 | 4,395 | 161.02 | |
| 60:40:2 | 0.75 | 3 | 2 | 27.56 | 4,575 | 166.00 | |
| | | | 3 | 28.62 | 4,380 | 153.04 | 160 |
| | | | 1 | 28.29 | 5,090 | 179.95 | |
| | | 7 | 2 | 26.78 | 4,820 | 179.99 | |
| | | | 3 | 27.46 | 5,025 | 183.01 | 181 |
| | | | 1 | 26.01 | 3,590 | 138.02 | |
| | | 1 | 2 | 26.11 | 3,550 | 135.95 | |
| | | | 3 | 27.30 | 3,575 | 130.98 | 135 |
| | | | 1 | 26.78 | 4,580 | 171.02 | |
| 60:60:3 | 0.7 | 3 | 2 | 25.65 | 4,515 | 175.99 | |
| | | | 3 | 25.91 | 4,380 | 169.06 | 172 |
| | | | 1 | 26.52 | 5,010 | 188.91 | |
| | | 7 | 2 | 25.76 | 4,920 | 191.03 | |
| | | | 3 | 27.56 | 5,235 | 189.95 | 190 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 9

| OPC:$Sio_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ulfimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 25.55 | 3,500 | 136.97 | |
| | | 1 | 2 | 25.05 | 3,255 | 129.94 | |
| | | | 3 | 25.40 | 3,155 | 124.21 | 130 |
| | | | 1 | 27.56 | 4,550 | 165.08 | |
| 60:60:4 | 0.666 | 3 | 2 | 27.56 | 4,575 | 166.00 | |
| | | | 3 | 29.43 | 5,180 | 176.01 | 169 |
| | | | 1 | 27.56 | 4,905 | 177.98 | |
| | | 7 | 2 | 27.81 | 4,785 | 172.06 | |
| | | | 3 | 27.56 | 4,820 | 174.89 | 175 |
| | | | 1 | 27.56 | 1,380 | 50.07 | |
| | | 1 | 2 | 27.69 | 1,440 | 52.00 | |
| | | | 3 | 26.00 | 1,640 | 63.08 | 55 |
| | | | 1 | 27.82 | 1,950 | 70.09 | |
| 50:50:0 | 0.905 | 3 | 2 | 27.81 | 1,975 | 71.02 | |
| | | | 3 | 29.16 | 2,360 | 80.94 | 74 |
| | | | 1 | 26.05 | 2,005 | 76.97 | |
| | | 7 | 2 | 27.86 | 2,090 | 75.01 | |
| | | | 3 | 26.52 | 2,095 | 78.99 | 77 |
| | | | 1 | 27.20 | 1,630 | 59.93 | |
| | | 1 | 2 | 27.04 | 1,760 | 65.09 | |
| | | | 3 | 29.15 | 1,660 | 56.95 | 61 |
| | | | 1 | 27.04 | 2,300 | 85.06 | |
| 50:50:1 | 0.856 | 3 | 2 | 28.09 | 2,415 | 85.97 | |
| | | | 3 | 28.35 | 2,125 | 74.96 | 82 |
| | | | 1 | 27.76 | 2,750 | 99.07 | |
| | | 7 | 2 | 26.98 | 2,700 | 100.09 | |
| | | | 3 | 28.35 | 2,695 | 95.06 | 98 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ค(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

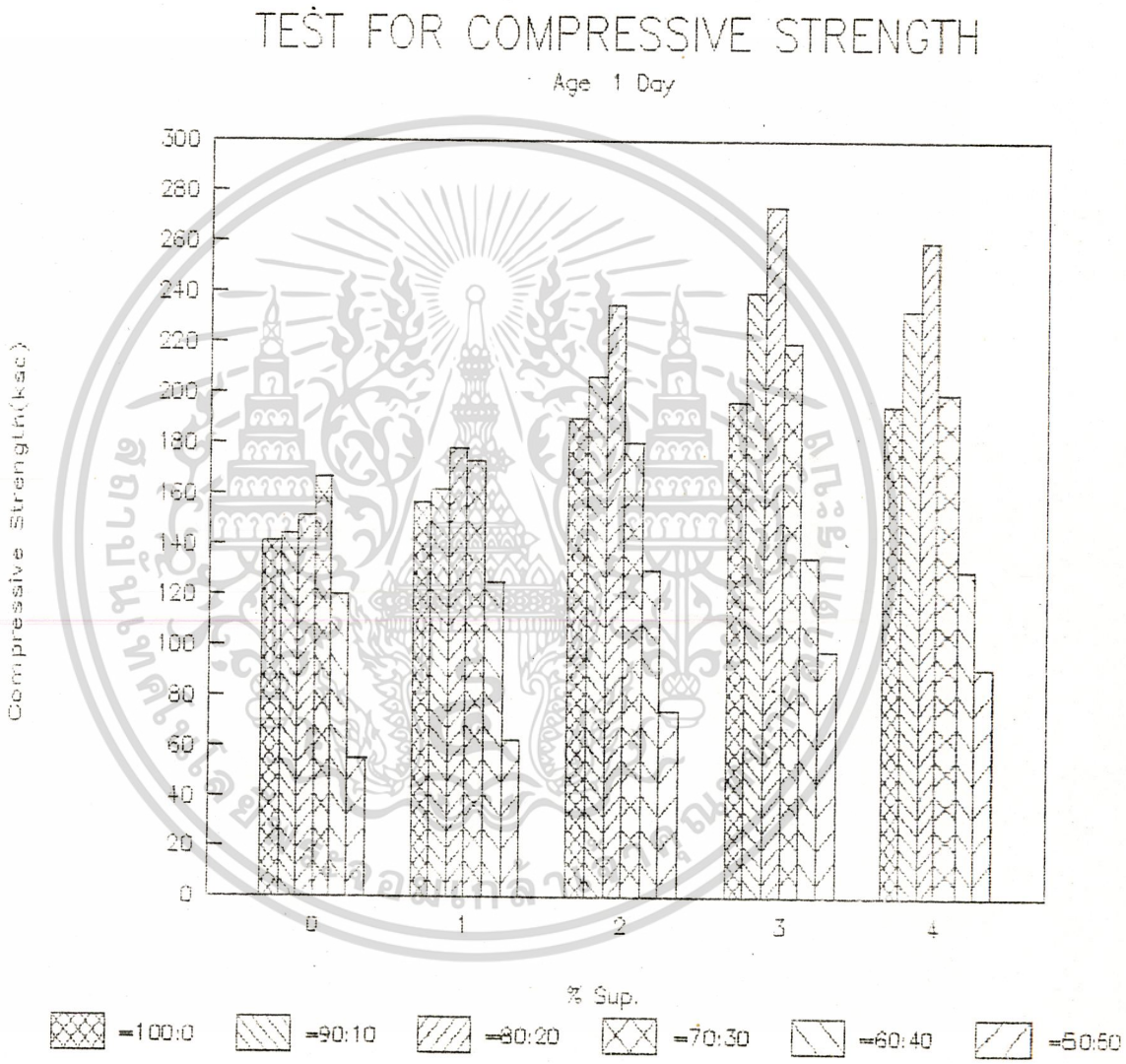
TEST FOR COMPRESSIVE STRENGTH 10

| OPC:$Sio_2$:Sup | W/C Ratio | Age Day | Sample No. | Cross-Section (cm2) | Ultimate Load (kg.) | Compressive Strength (kg/cm2) | Average (kg/cm2) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 28.08 | 2,050 | 73.01 | |
| | | 1 | 2 | 28.09 | 1,965 | 69.95 | |
| | | | 3 | 26.88 | 2,125 | 79.04 | 74 |
| | | | 1 | 27.56 | 3,530 | 128.08 | |
| 50:50:2 | 0.805 | 3 | 2 | 28.62 | 3,405 | 118.97 | |
| | | | 3 | 28.08 | 3,175 | 113.07 | 120 |
| | | | 1 | 28.03 | 3,730 | 133.05 | |
| | | 7 | 2 | 29.70 | 4,190 | 141.08 | |
| | | | 3 | 28.51 | 4,160 | 145.89 | 140 |
| | | | 1 | 25.45 | 2,420 | 95.08 | |
| | | 1 | 2 | 25.05 | 2,405 | 96.01 | |
| | | | 3 | 25.60 | 2,640 | 103.11 | 98 |
| | | | 1 | 27.03 | 4,245 | 157.05 | |
| 50:50:3 | 0.75 | 3 | 2 | 27.30 | 4,040 | 147.99 | |
| | | | 3 | 27.04 | 4,000 | 147.93 | 151 |
| | | | 1 | 27.03 | 4,325 | 160.01 | |
| | | 7 | 2 | 28.62 | 4,750 | 165.97 | |
| | | | 3 | 27.04 | 4,570 | 169.01 | 165 |
| | | | 1 | 26.01 | 2,600 | 99.96 | |
| | | 1 | 2 | 26.52 | 2,335 | 88.05 | |
| | | | 3 | 27.03 | 2,300 | 85.09 | 91 |
| | | | 1 | 27.56 | 3,860 | 140.06 | |
| 50:50:4 | 0.712 | 3 | 2 | 28.89 | 4,160 | 144.02 | |
| | | | 3 | 28.09 | 4,240 | 150.94 | 145 |
| | | | 1 | 27.76 | 4,440 | 159.91 | |
| | | 7 | 2 | 28.08 | 4,635 | 165.06 | |
| | | | 3 | 27.67 | 4,300 | 155.42 | 160 |

Remark: Sand:cement = 2.75:1
Flow(%) = 110±5
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

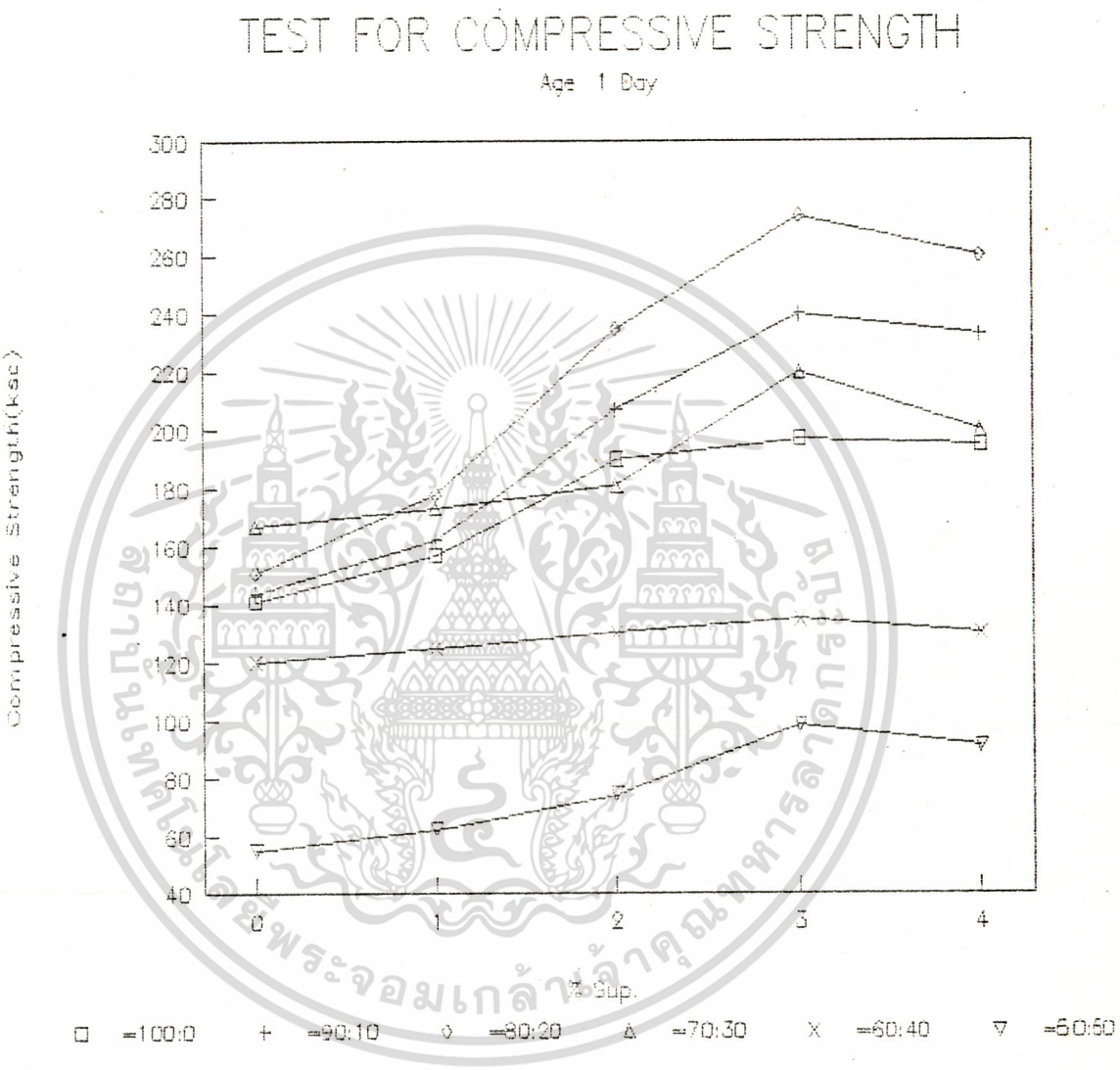
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก จ เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน



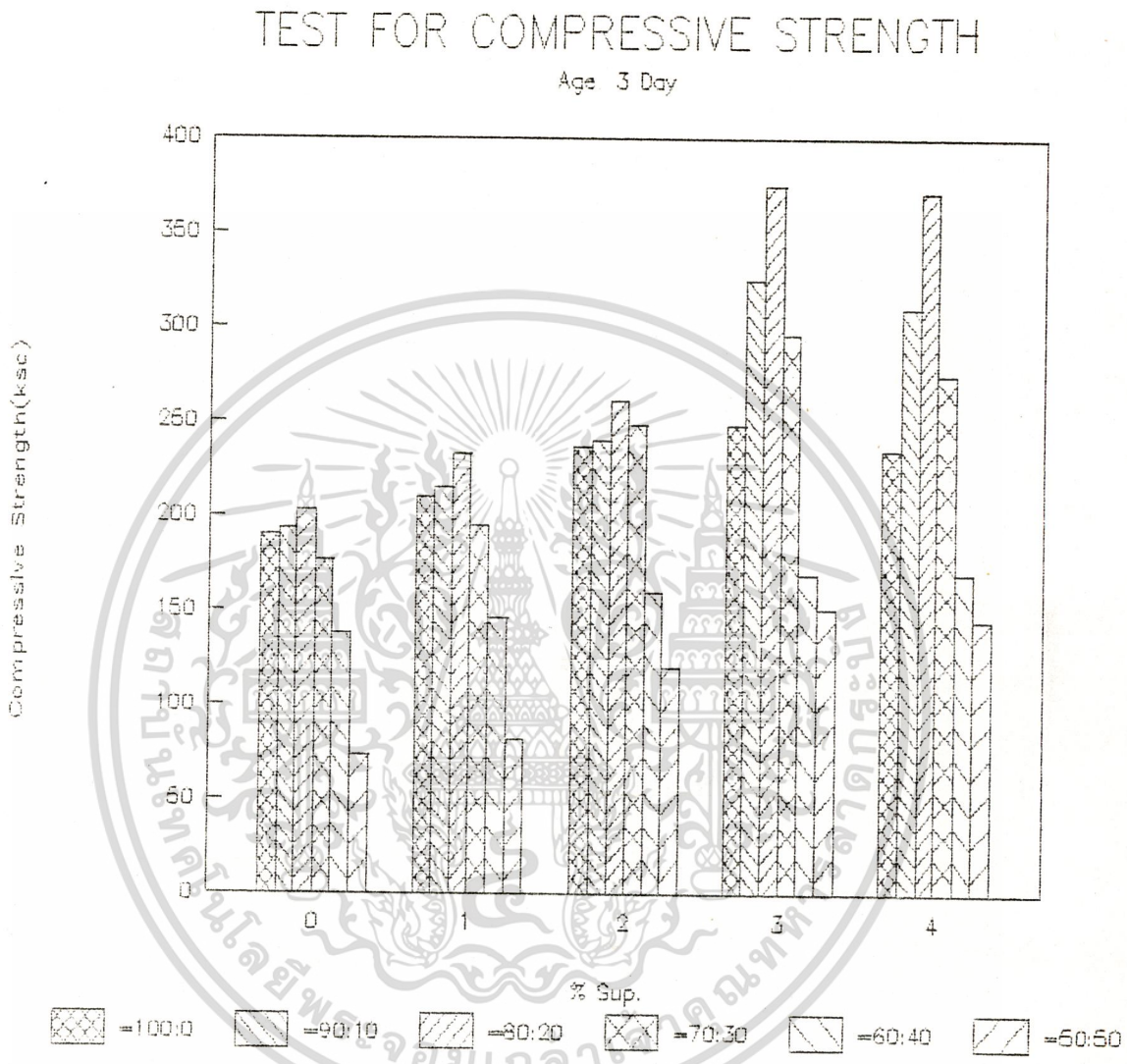

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก จ(ต่อ) เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน



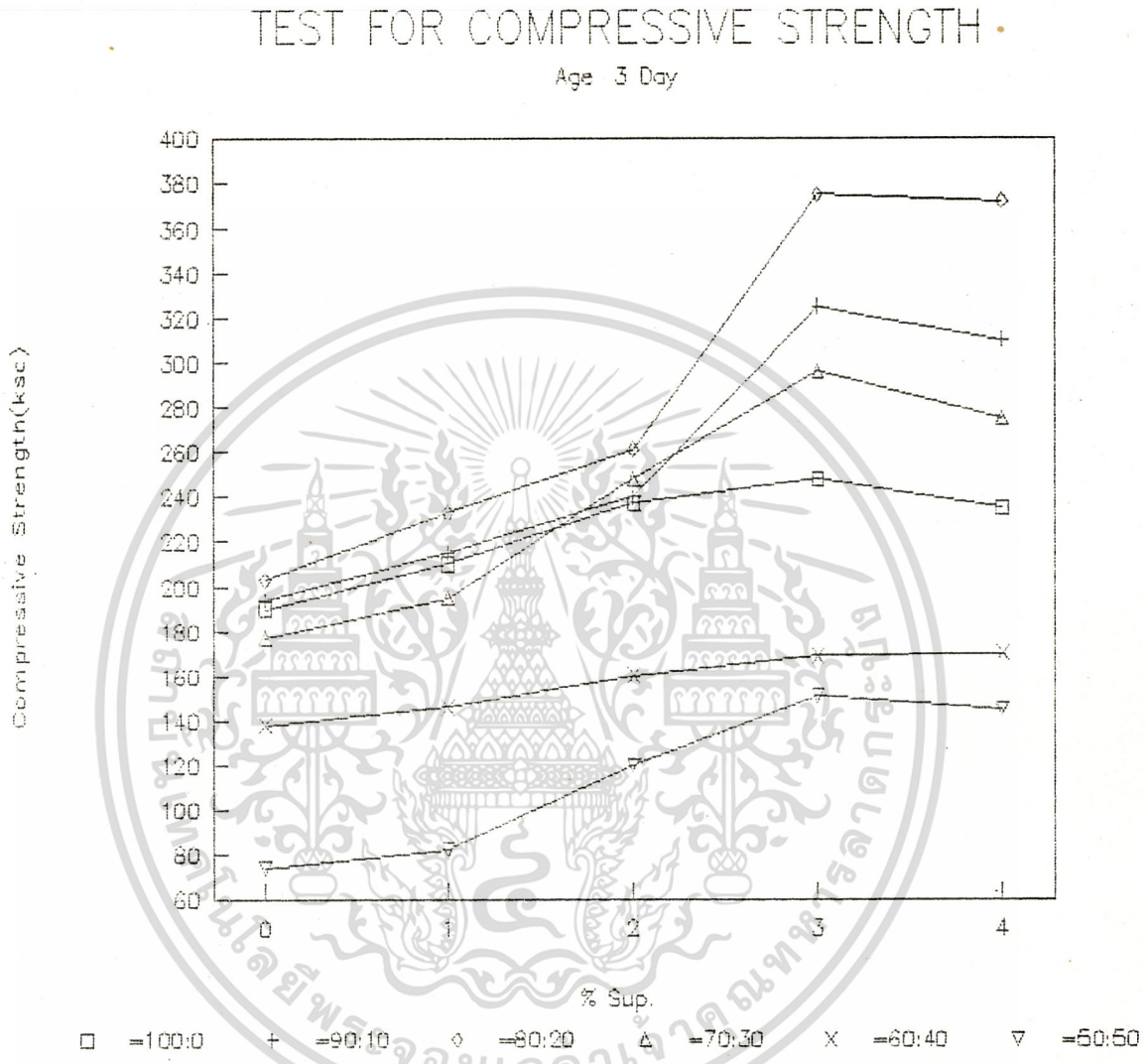

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฉ เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน



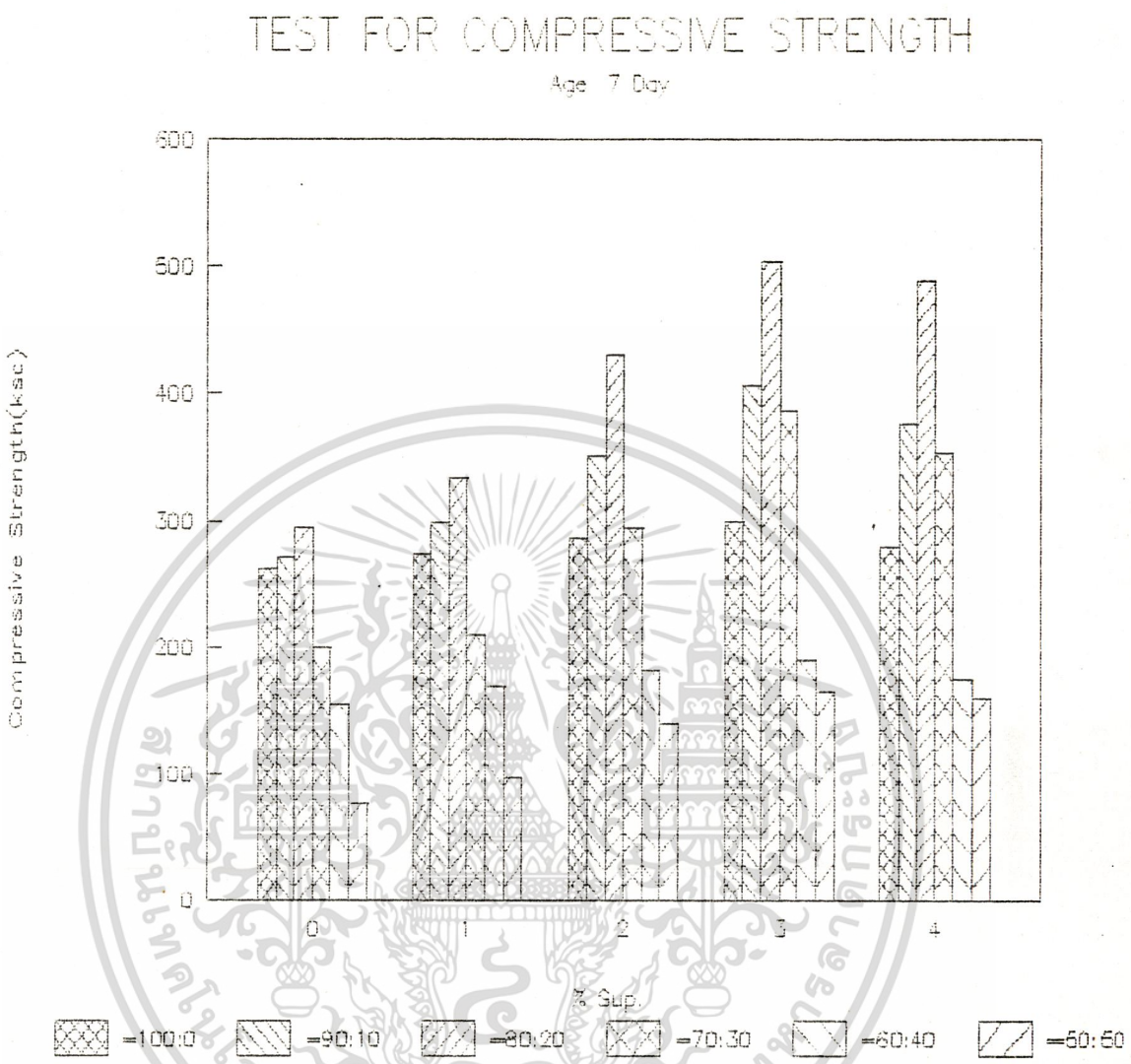

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฉ(ต่อ) เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน



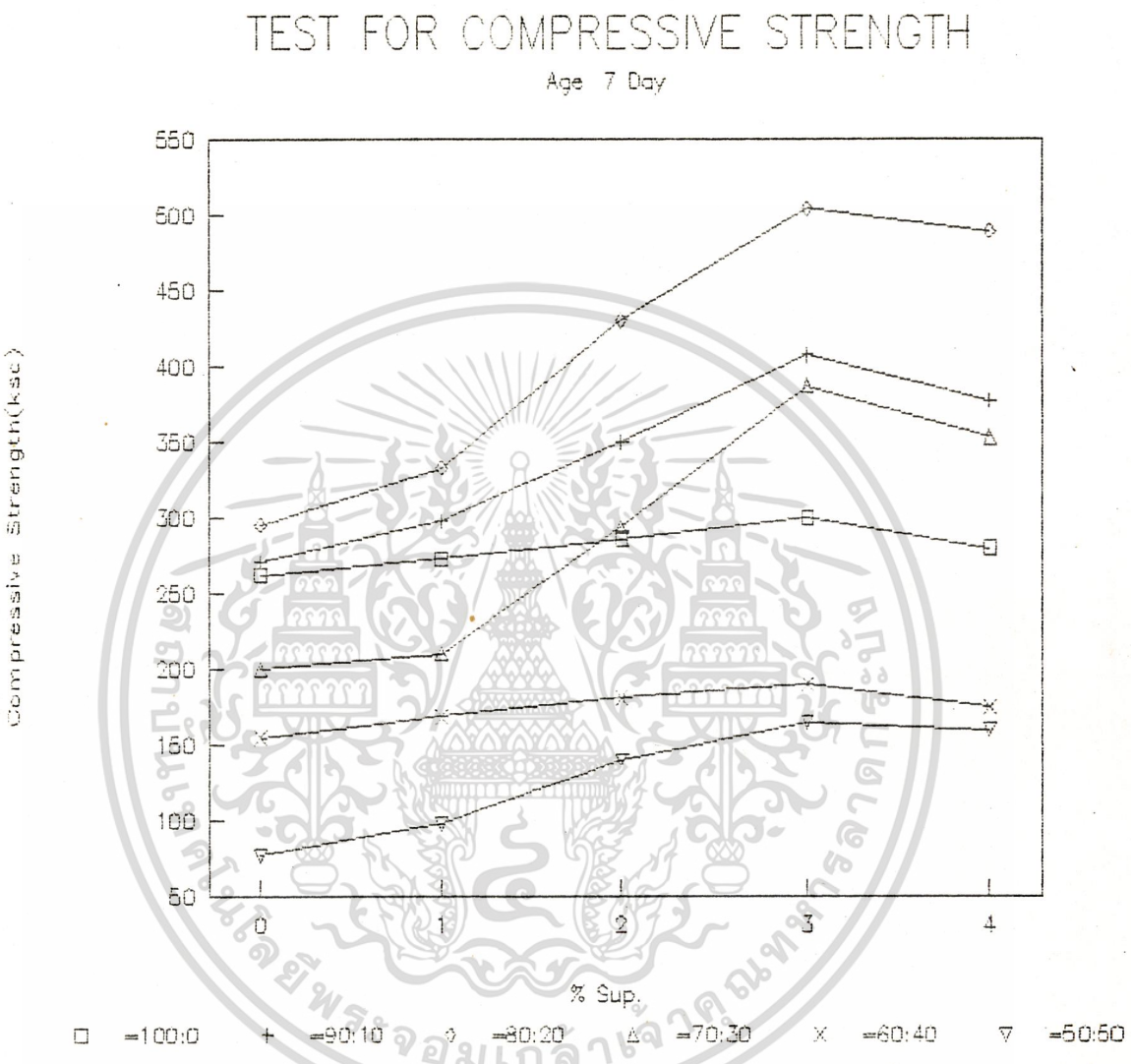

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ช เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ช(ต่อ) เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 1

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.15 | 165.00 | 143.48 | | |
| | 1 | 2 | 1.11 | 195.00 | 176.04 | | |
| | | 3 | 1.16 | 180.00 | 155.79 | 158 | 11 |
| | | 1 | 1.12 | 231.00 | 206.90 | | |
| 100:0:0 | 3 | 2 | 1.21 | 219.00 | 180.69 | | |
| | | 3 | 1.06 | 225.00 | 213.12 | 200 | 14 |
| | | 1 | 1.03 | 232.00 | 225.20 | | |
| | 7 | 2 | 1.23 | 225.00 | 182.93 | | |
| | | 3 | 1.08 | 230.00 | 212.87 | 207 | 15 |
| | | 1 | 1.08 | 200.00 | 185.83 | | |
| | 1 | 2 | 1.21 | 193.00 | 159.72 | | |
| | | 3 | 1.16 | 195.00 | 168.83 | 171 | 12 |
| | | 1 | 1.17 | 270.00 | 230.62 | | |
| 100:0:1 | 3 | 2 | 1.16 | 295.00 | 254.23 | | |
| | | 3 | 1.12 | 285.00 | 255.26 | 247 | 17 |
| | | 1 | 1.06 | 298.00 | 280.89 | | |
| | 7 | 2 | 1.02 | 313.00 | 307.14 | | |
| | | 3 | 1.12 | 310.00 | 276.29 | 288 | 20 |
| | | 1 | 1.12 | 210.00 | 187.87 | | |
| | 1 | 2 | 1.13 | 235.00 | 208.43 | | |
| | | 3 | 1.08 | 220.00 | 203.42 | 200 | 14 |
| | | 1 | 1.16 | 280.00 | 242.29 | | |
| 100:0:2 | 3 | 2 | 1.37 | 265.00 | 193.34 | | |
| | | 3 | 1.13 | 270.00 | 239.20 | 225 | 16 |
| | | 1 | 1.10 | 333.00 | 303.62 | | |
| | 7 | 2 | 1.16 | 370.00 | 320.35 | | |
| | | 3 | 1.16 | 370.00 | 320.35 | 315 | 22 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 2

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.26 | 300.00 | 238.10 | | |
| | 1 | 2 | 1.18 | 290.00 | 245.10 | | |
| | | 3 | 1.27 | 295.00 | 232.51 | 239 | 17 |
| | | 1 | 1.25 | 413.00 | 330.16 | | |
| 100:0:3 | 3 | 2 | 1.17 | 389.00 | 333.56 | | |
| | | 3 | 1.21 | 400.00 | 331.80 | 332 | 23 |
| | | 1 | 1.18 | 447.00 | 379.65 | | |
| | 7 | 2 | 1.13 | 451.00 | 400.00 | | |
| | | 3 | 1.26 | 450.00 | 357.14 | 379 | 27 |
| | | 1 | 1.31 | 249.00 | 188.83 | | |
| | 1 | 2 | 1.26 | 250.00 | 198.63 | | |
| | | 3 | 1.20 | 251.00 | 208.47 | 199 | 14 |
| | | 1 | 1.19 | 250.00 | 209.49 | | |
| 100:0:4 | 3 | 2 | 1.24 | 256.00 | 207.12 | | |
| | | 3 | 1.12 | 253.00 | 226.88 | 214 | 15 |
| | | 1 | 1.18 | 301.00 | 254.55 | | |
| | 7 | 2 | 1.32 | 230.00 | 173.85 | | |
| | | 3 | 1.10 | 270.00 | 245.04 | 224 | 16 |
| | | 1 | 1.18 | 210.00 | 177.59 | | |
| | 1 | 2 | 1.23 | 233.00 | 189.43 | | |
| | | 3 | 1.21 | 220.00 | 182.19 | 183 | 13 |
| | | 1 | 1.26 | 247.00 | 195.48 | | |
| 90:10:0 | 3 | 2 | 1.18 | 264.00 | 223.26 | | |
| | | 3 | 1.10 | 253.00 | 228.97 | 216 | 15 |
| | | 1 | 1.23 | 263.00 | 213.61 | | |
| | 7 | 2 | 1.20 | 297.00 | 247.65 | | |
| | | 3 | 1.18 | 270.00 | 228.33 | 230 | 16 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 3

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.24 | 236.00 | 190.28 | | |
| | 1 | 2 | 1.30 | 217.00 | 166.37 | | |
| | | 3 | 1.07 | 225.00 | 210.08 | 189 | 13 |
| | | 1 | 1.15 | 274.00 | 238.72 | | |
| 90:10:1 | 3 | 2 | 1.18 | 295.00 | 250.85 | | |
| | | 3 | 1.16 | 284.00 | 245.07 | 245 | 17 |
| | | 1 | 1.15 | 330.00 | 287.46 | | |
| | 7 | 2 | 1.16 | 339.00 | 292.95 | | |
| | | 3 | 1.16 | 334.00 | 289.18 | 290 | 20 |
| | | 1 | 1.21 | 234.00 | 193.79 | | |
| | 1 | 2 | 1.15 | 237.00 | 206.23 | | |
| | | 3 | 1.08 | 235.00 | 218.35 | 206 | 15 |
| | | 1 | 1.18 | 281.00 | 238.95 | | |
| 90:10:2 | 3 | 2 | 1.12 | 300.00 | 269.04 | | |
| | | 3 | 1.08 | 290.00 | 269.45 | 259 | 18 |
| | | 1 | 1.16 | 401.00 | 346.21 | | |
| | 7 | 2 | 1.19 | 325.00 | 273.86 | | |
| | | 3 | 1.08 | 372.00 | 343.97 | 321 | 23 |
| | | 1 | 1.19 | 291.00 | 244.95 | | |
| | 1 | 2 | 1.10 | 285.00 | 259.24 | | |
| | | 3 | 1.16 | 289.00 | 250.08 | 251 | 18 |
| | | 1 | 1.18 | 434.00 | 368.67 | | |
| 90:10:3 | 3 | 2 | 1.26 | 416.00 | 329.79 | | |
| | | 3 | 1.37 | 425.00 | 310.08 | 336 | 24 |
| | | 1 | 1.09 | 430.00 | 392.80 | | |
| | 7 | 2 | 1.11 | 440.00 | 396.57 | | |
| | | 3 | 1.10 | 435.00 | 385.38 | 392 | 28 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 4

| OPC:$SiO_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.13 | 270.00 | 239.47 | | |
| | 1 | 2 | 1.05 | 264.00 | 251.03 | | |
| | | 3 | 1.08 | 266.00 | 245.52 | 245 | 17 |
| | | 1 | 1.07 | 295.00 | 275.44 | | |
| 90:10:4 | 3 | 2 | 1.08 | 280.00 | 260.16 | | |
| | | 3 | 1.10 | 287.00 | 260.32 | 265 | 19 |
| | | 1 | 1.21 | 330.00 | 273.09 | | |
| | 7 | 2 | 1.31 | 312.00 | 237.71 | | |
| | | 3 | 1.05 | 350.00 | 334.77 | 282 | 20 |
| | | 1 | 1.11 | 228.00 | 205.42 | | |
| | 1 | 2 | 1.15 | 225.00 | 196.03 | | |
| | | 3 | 1.09 | 223.00 | 204.21 | 202 | 14 |
| | | 1 | 1.13 | 258.00 | 228.82 | | |
| 80:20:0 | 3 | 2 | 1.18 | 265.00 | 225.15 | | |
| | | 3 | 1.16 | 261.00 | 225.46 | 226 | 16 |
| | | 1 | 1.08 | 266.00 | 247.15 | | |
| | 7 | 2 | 1.09 | 273.00 | 251.21 | | |
| | | 3 | 1.05 | 270.00 | 256.74 | 252 | 18 |
| | | 1 | 1.08 | 241.00 | 223.93 | | |
| | 1 | 2 | 1.06 | 228.00 | 215.96 | | |
| | | 3 | 1.05 | 235.00 | 223.46 | 221 | 16 |
| | | 1 | 1.11 | 255.00 | 229.19 | | |
| 80:20:1 | 3 | 2 | 1.13 | 267.00 | 235.42 | | |
| | | 3 | 1.10 | 261.00 | 236.73 | 234 | 16 |
| | | 1 | 1.08 | 358.00 | 332.64 | | |
| | 7 | 2 | 1.21 | 341.00 | 281.96 | | |
| | | 3 | 1.04 | 350.00 | 338.08 | 318 | 22 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$SiO_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 5

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.04 | 244.00 | 235.11 | | |
| | 1 | 2 | 1.13 | 230.00 | 203.77 | | |
| | | 3 | 1.32 | 235.00 | 177.63 | 206 | 14 |
| | | 1 | 1.31 | 316.00 | 240.76 | | |
| 80:20:2 | 3 | 2 | 1.31 | 227.00 | 172.95 | | |
| | | 3 | 1.13 | 300.00 | 265.78 | 226 | 16 |
| | | 1 | 1.02 | 415.00 | 405.58 | | |
| | 7 | 2 | 1.08 | 447.00 | 415.33 | | |
| | | 3 | 1.03 | 430.00 | 419.10 | 413 | 29 |
| | | 1 | 1.08 | 280.00 | 260.16 | | |
| | 1 | 2 | 1.22 | 285.00 | 234.04 | | |
| | | 3 | 1.04 | 274.00 | 263.89 | 253 | 18 |
| | | 1 | 1.13 | 370.00 | 327.80 | | |
| 80:20:3 | 3 | 2 | 1.14 | 381.00 | 333.04 | | |
| | | 3 | 1.06 | 375.00 | 353.61 | 338 | 24 |
| | | 1 | 1.16 | 500.00 | 432.90 | | |
| | 7 | 2 | 1.09 | 488.00 | 446.89 | | |
| | | 3 | 1.06 | 504.00 | 474.07 | 451 | 32 |
| | | 1 | 1.11 | 270.00 | 242.47 | | |
| | 1 | 2 | 1.16 | 265.00 | 227.99 | | |
| | | 3 | 1.13 | 248.00 | 218.67 | 230 | 16 |
| | | 1 | 1.08 | 370.00 | 343.45 | | |
| 80:20:4 | 3 | 2 | 1.19 | 381.00 | 319.52 | | |
| | | 3 | 1.16 | 372.00 | 319.94 | 328 | 23 |
| | | 1 | 1.04 | 470.00 | 451.75 | | |
| | 7 | 2 | 1.05 | 450.00 | 428.32 | | |
| | | 3 | 1.03 | 480.00 | 468.22 | 449 | 32 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 6

| OPC:Sio2:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.10 | 155.00 | 140.67 | | |
| | 1 | 2 | 1.10 | 174.00 | 157.82 | | |
| | | 3 | 1.05 | 160.00 | 153.04 | 151 | 11 |
| | | 1 | 1.03 | 188.00 | 183.41 | | |
| 70:30:0 | 3 | 2 | 1.08 | 163.00 | 151.45 | | |
| | | 3 | 1.08 | 177.00 | 163.66 | 166 | 12 |
| | | 1 | 1.16 | 207.00 | 179.12 | | |
| | 7 | 2 | 1.37 | 200.00 | 145.92 | | |
| | | 3 | 1.13 | 195.00 | 172.76 | 166 | 12 |
| | | 1 | 1.08 | 165.00 | 153.31 | | |
| | 1 | 2 | 1.18 | 190.00 | 161.43 | | |
| | | 3 | 1.08 | 173.00 | 160.74 | 158 | 11 |
| | | 1 | 1.08 | 207.00 | 191.03 | | |
| 70:30:1 | 3 | 2 | 1.11 | 186.00 | 167.17 | | |
| | | 3 | 1.22 | 195.00 | 160.13 | 173 | 12 |
| | | 1 | 1.11 | 224.00 | 201.74 | | |
| | 7 | 2 | 1.15 | 190.00 | 165.51 | | |
| | | 3 | 1.12 | 210.00 | 187.79 | 185 | 13 |
| | | 1 | 1.13 | 175.00 | 155.04 | | |
| | 1 | 2 | 1.04 | 190.00 | 183.08 | | |
| | | 3 | 1.16 | 181.00 | 156.71 | 165 | 12 |
| | | 1 | 1.21 | 255.00 | 210.74 | | |
| 70:30:2 | 3 | 2 | 1.10 | 243.00 | 221.62 | | |
| | | 3 | 1.09 | 248.00 | 227.11 | 220 | 15 |
| | | 1 | 1.18 | 288.00 | 244.33 | | |
| | 7 | 2 | 1.10 | 300.00 | 272.11 | | |
| | | 3 | 1.09 | 294.00 | 270.53 | 262 | 18 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 7

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.08 | 195.00 | 181.18 | | |
| | 1 | 2 | 1.16 | 210.00 | 181.31 | | |
| | | 3 | 1.13 | 220.00 | 195.12 | 186 | 13 |
| | | 1 | 1.20 | 320.00 | 267.56 | | |
| 70:30:3 | 3 | 2 | 1.19 | 285.00 | 240.20 | | |
| | | 3 | 1.11 | 300.00 | 269.63 | 259 | 18 |
| | | 1 | 1.08 | 395.00 | 366.59 | | |
| | 7 | 2 | 1.09 | 406.00 | 373.02 | | |
| | | 3 | 1.08 | 387.00 | 359.58 | 366 | 26 |
| | | 1 | 1.10 | 197.00 | 179.79 | | |
| | 1 | 2 | 1.12 | 215.00 | 191.39 | | |
| | | 3 | 1.08 | 200.00 | 185.83 | 186 | 13 |
| | | 1 | 1.18 | 280.00 | 236.32 | | |
| 70:30:4 | 3 | 2 | 1.19 | 250.00 | 209.51 | | |
| | | 3 | 1.13 | 275.00 | 242.48 | 229 | 16 |
| | | 1 | 1.21 | 350.00 | 289.86 | | |
| | 7 | 2 | 1.14 | 246.00 | 216.22 | | |
| | | 3 | 1.21 | 353.00 | 291.89 | 266 | 19 |
| | | 1 | 1.13 | 110.00 | 97.56 | | |
| | 1 | 2 | 1.11 | 135.00 | 121.75 | | |
| | | 3 | 1.13 | 120.00 | 106.31 | 109 | 8 |
| | | 1 | 1.10 | 140.00 | 127.55 | | |
| 60:40:0 | 3 | 2 | 1.06 | 127.00 | 120.17 | | |
| | | 3 | 1.29 | 138.00 | 106.98 | 118 | 8 |
| | | 1 | 1.17 | 166.00 | 141.98 | | |
| | 7 | 2 | 1.11 | 141.00 | 127.04 | | |
| | | 3 | 1.01 | 155.00 | 153.09 | 141 | 10 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH 8

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.10 | 120.00 | 108.91 | | |
| | 1 | 2 | 1.10 | 133.00 | 120.63 | | |
| | | 3 | 1.10 | 125.00 | 113.38 | 114 | 8 |
| | | 1 | 1.09 | 143.00 | 130.95 | | |
| 60:40:1 | 3 | 2 | 1.16 | 152.00 | 131.30 | | |
| | | 3 | 1.14 | 146.00 | 127.57 | 130 | 9 |
| | | 1 | 1.05 | 175.00 | 166.24 | | |
| | 7 | 2 | 1.19 | 160.00 | 134.18 | | |
| | | 3 | 1.11 | 169.00 | 152.56 | 151 | 11 |
| | | 1 | 1.10 | 130.00 | 117.91 | | |
| | 1 | 2 | 1.03 | 135.00 | 131.71 | | |
| | | 3 | 1.10 | 130.00 | 117.98 | 123 | 9 |
| | | 1 | 1.08 | 155.00 | 143.88 | | |
| 60:40:2 | 3 | 2 | 1.13 | 160.00 | 141.75 | | |
| | | 3 | 1.13 | 160.00 | 141.75 | 142 | 10 |
| | | 1 | 1.13 | 185.00 | 163.12 | | |
| | 7 | 2 | 1.16 | 179.00 | 153.95 | | |
| | | 3 | 1.21 | 181.00 | 149.19 | 155 | 11 |
| | | 1 | 1.03 | 145.00 | 141.44 | | |
| | 1 | 2 | 1.14 | 130.00 | 114.41 | | |
| | | 3 | 1.13 | 135.00 | 119.38 | 125 | 9 |
| | | 1 | 1.10 | 175.00 | 158.73 | | |
| 60:60:3 | 3 | 2 | 1.14 | 170.00 | 148.54 | | |
| | | 3 | 1.02 | 172.00 | 167.86 | 158 | 11 |
| | | 1 | 1.10 | 200.00 | 181.51 | | |
| | 7 | 2 | 1.13 | 175.00 | 155.04 | | |
| | | 3 | 1.08 | 190.00 | 175.68 | 171 | 12 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

TEST FOR TENSILE STRENGTH

| OPC:$Sio_2$:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.13 | 130.00 | 114.96 | | |
| | 1 | 2 | 1.09 | 125.00 | 114.79 | | |
| | | 3 | 1.13 | 130.00 | 115.17 | 115 | 8 |
| | | 1 | 1.20 | 165.00 | 137.43 | | |
| 60:60:4 | 3 | 2 | 1.13 | 165.00 | 146.18 | | |
| | | 3 | 1.02 | 170.00 | 165.91 | 150 | 11 |
| | | 1 | 1.13 | 183.00 | 161.68 | | |
| | 7 | 2 | 1.13 | 177.00 | 156.37 | | |
| | | 3 | 1.13 | 175.00 | 155.21 | 158 | 11 |
| | | 1 | 1.18 | 54.00 | 45.71 | | |
| | 1 | 2 | 1.03 | 60.00 | 58.31 | | |
| | | 3 | 1.10 | 55.00 | 49.89 | 51 | 4 |
| | | 1 | 1.05 | 72.00 | 68.57 | | |
| 50:50:0 | 3 | 2 | 1.03 | 79.00 | 77.07 | | |
| | | 3 | 1.02 | 74.00 | 72.22 | 73 | 5 |
| | | 1 | 1.08 | 74.00 | 68.76 | | |
| | 7 | 2 | 1.08 | 83.00 | 77.12 | | |
| | | 3 | 1.11 | 77.00 | 69.18 | 72 | 5 |
| | | 1 | 1.37 | 62.00 | 45.21 | | |
| | 1 | 2 | 1.03 | 65.00 | 63.40 | | |
| | | 3 | 1.19 | 62.00 | 52.24 | 54 | 4 |
| | | 1 | 1.18 | 95.00 | 80.42 | | |
| 50:50:1 | 3 | 2 | 1.03 | 70.00 | 68.28 | | |
| | | 3 | 1.03 | 82.00 | 79.69 | 76 | 5 |
| | | 1 | 1.08 | 100.00 | 92.90 | | |
| | 7 | 2 | 1.08 | 79.00 | 73.40 | | |
| | | 3 | 1.05 | 98.00 | 93.33 | 87 | 6 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
$Sio_2$ = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผนวก ง(ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์

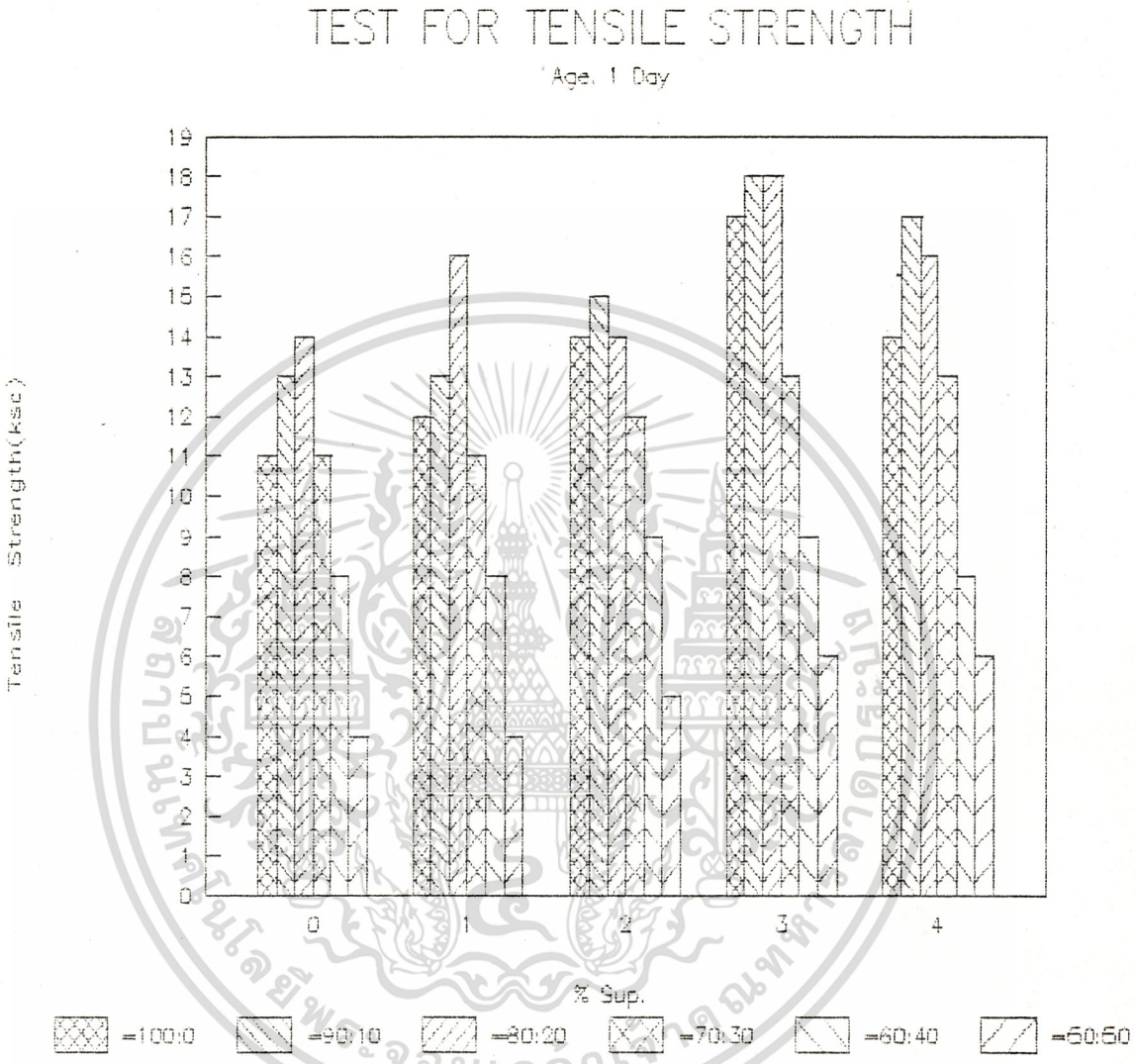
TEST FOR TENSILE STRENGTH 10

| OPC:Sio:Sup | Age Day | Sample No. | Cross-Section (in2) | Ultimate Load (lbs.) | Tensile Strength (lbs/inch2) | Tensile Average (Psi) | Tensile Average (ksc) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 1.08 | 80.00 | 74.33 | | |
| | 1 | 2 | 1.22 | 75.00 | 61.59 | | |
| | | 3 | 1.08 | 74.00 | 68.76 | 68 | 5 |
| | | 1 | 1.13 | 115.00 | 101.88 | | |
| 50:50:2 | 3 | 2 | 1.04 | 120.00 | 115.38 | | |
| | | 3 | 1.06 | 120.00 | 112.87 | 110 | 8 |
| | | 1 | 1.13 | 160.00 | 141.22 | | |
| | 7 | 2 | 1.12 | 135.00 | 120.19 | | |
| | | 3 | 1.08 | 140.00 | 130.08 | 130 | 9 |
| | | 1 | 1.07 | 100.00 | 93.13 | | |
| | 1 | 2 | 1.16 | 102.00 | 88.27 | | |
| | | 3 | 1.08 | 98.00 | 90.63 | 91 | 6 |
| | | 1 | 1.09 | 150.00 | 136.99 | | |
| 50:50:3 | 3 | 2 | 1.17 | 155.00 | 132.28 | | |
| | | 3 | 1.08 | 151.00 | 140.30 | 137 | 10 |
| | | 1 | 1.21 | 170.00 | 140.50 | | |
| | 7 | 2 | 1.19 | 160.00 | 134.68 | | |
| | | 3 | 1.37 | 178.00 | 129.78 | 135 | 10 |
| | | 1 | 1.02 | 99.00 | 96.75 | | |
| | 1 | 2 | 1.08 | 78.00 | 72.47 | | |
| | | 3 | 1.03 | 91.00 | 88.77 | 86 | 6 |
| | | 1 | 1.16 | 150.00 | 129.87 | | |
| 50:50:4 | 3 | 2 | 1.09 | 135.00 | 123.63 | | |
| | | 3 | 1.13 | 145.00 | 128.46 | 127 | 9 |
| | | 1 | 1.11 | 166.00 | 149.20 | | |
| | 7 | 2 | 1.14 | 155.00 | 136.14 | | |
| | | 3 | 1.08 | 160.00 | 148.66 | 145 | 10 |

Remark. Sand:cement = 3:1
OPC. = Portland cement
Sio = Microsilica
Sup. = Superplasticizer

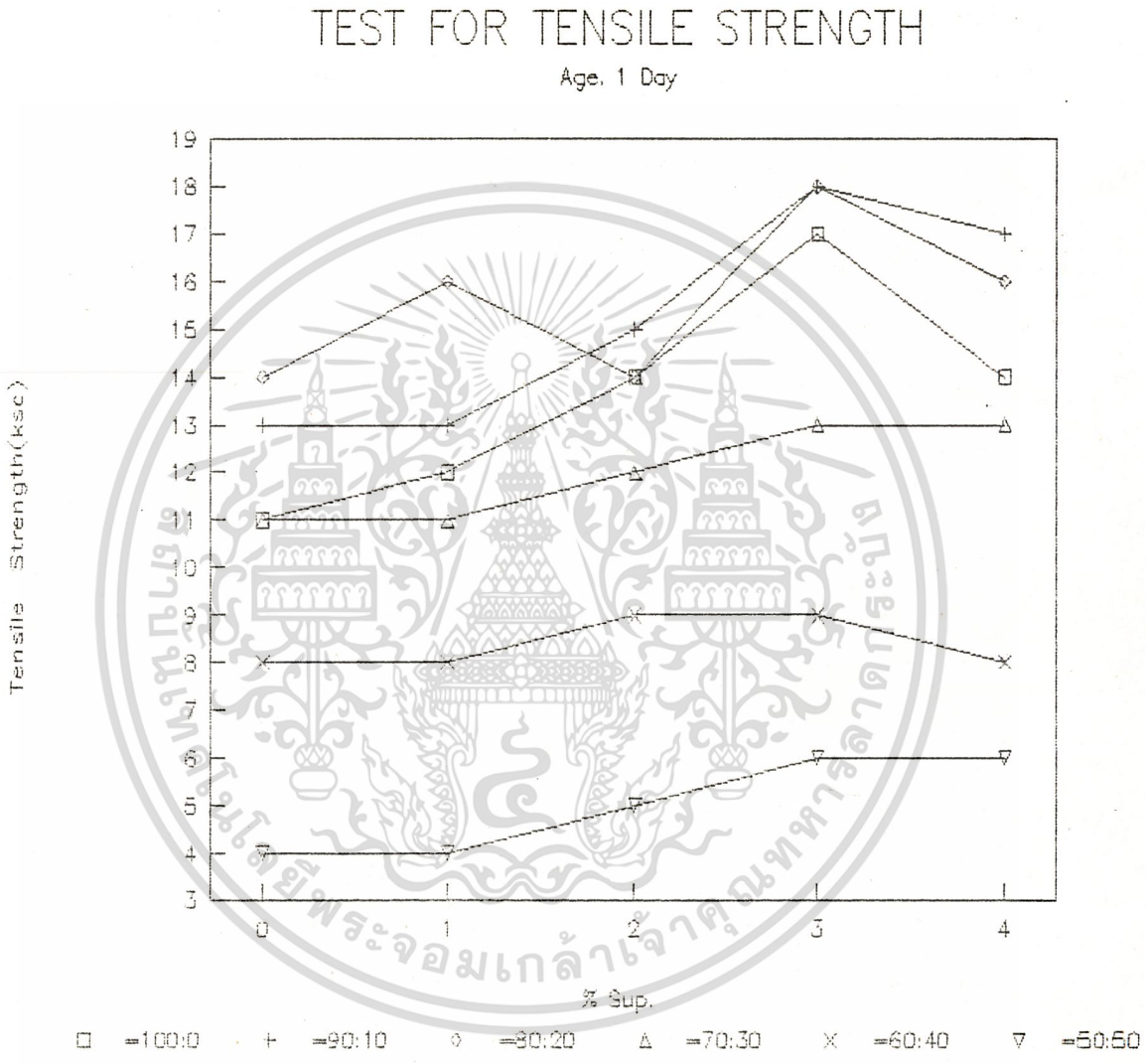
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ช เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน



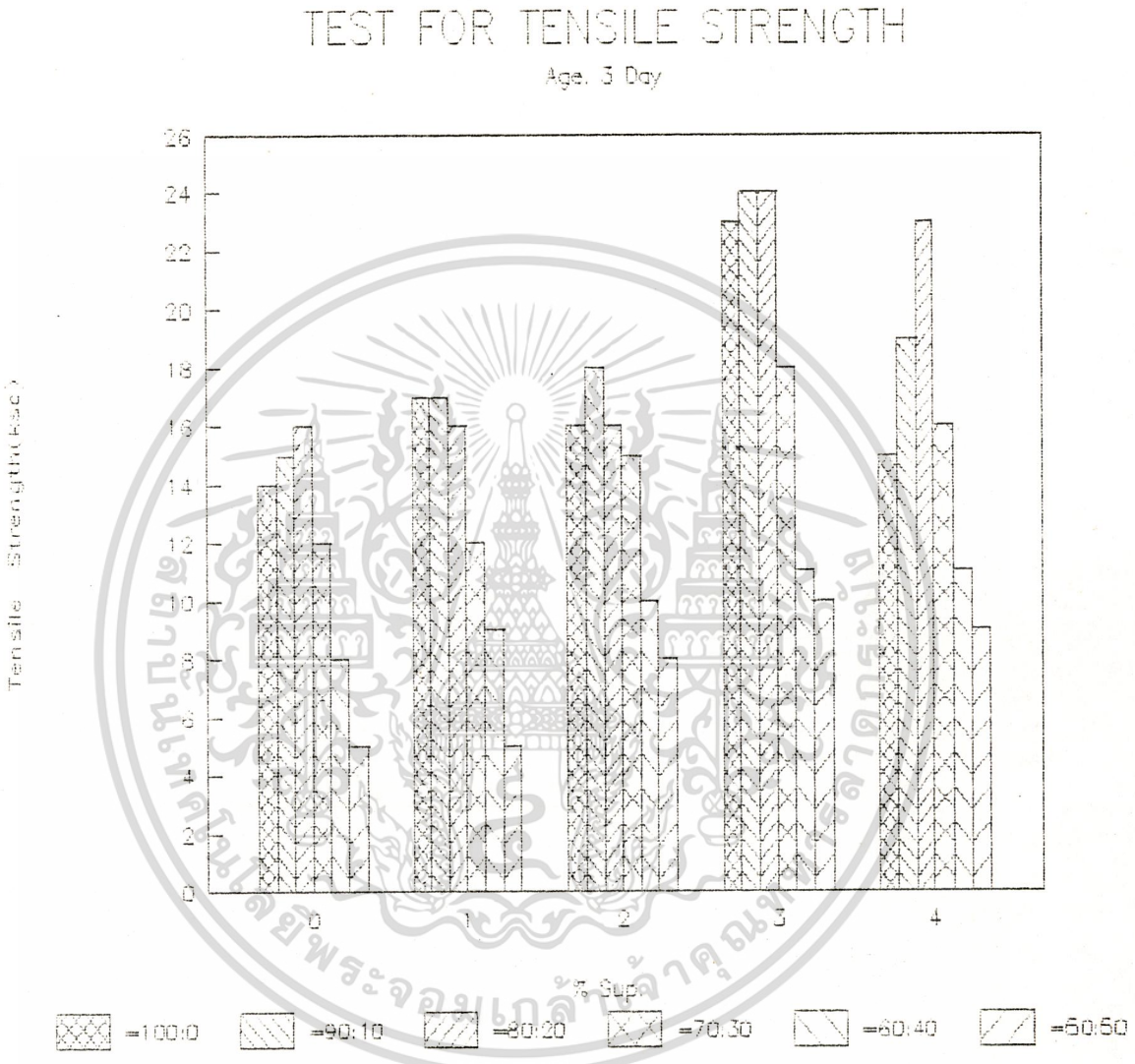

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ซ(ต่อ) เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน



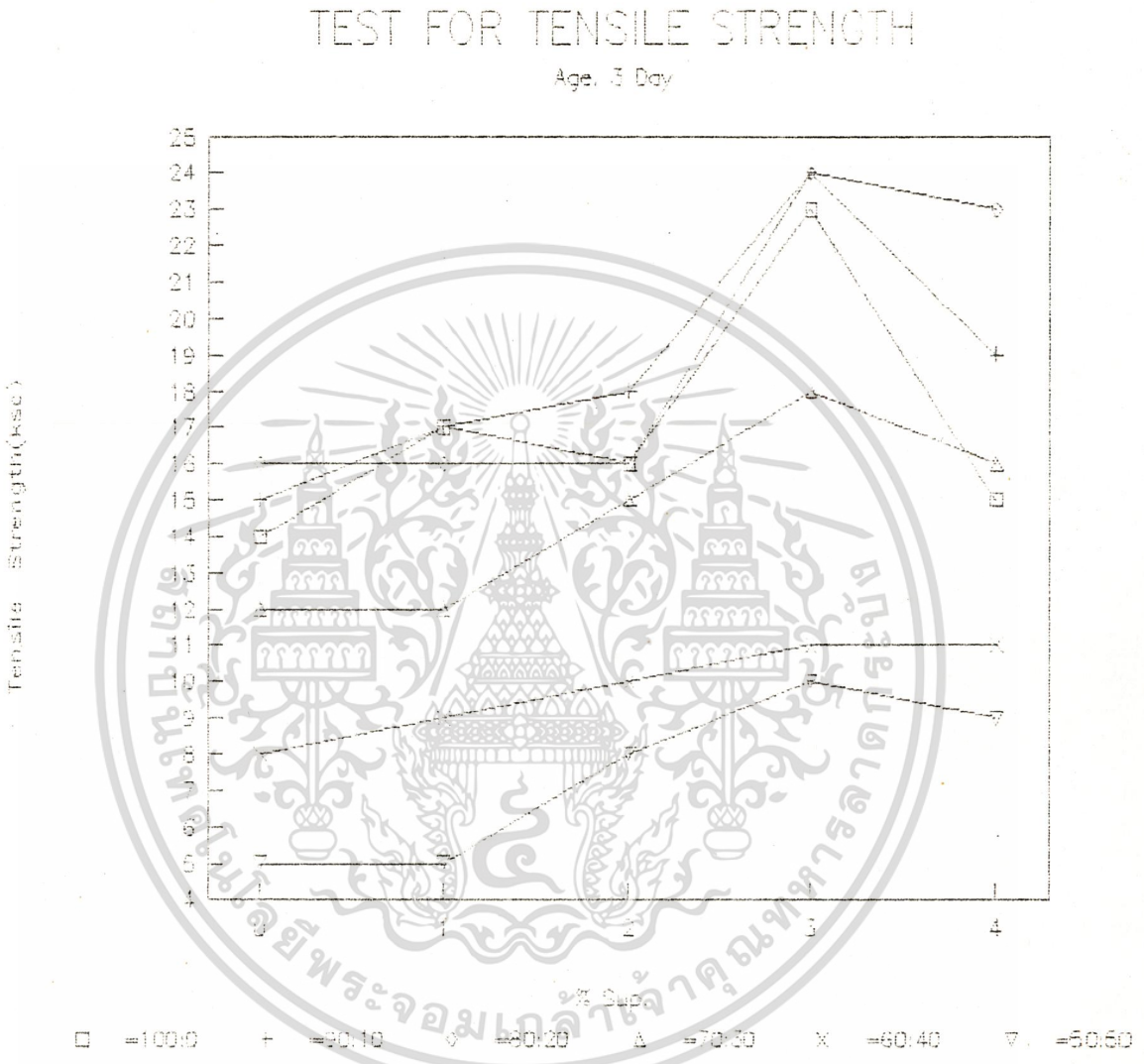

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน



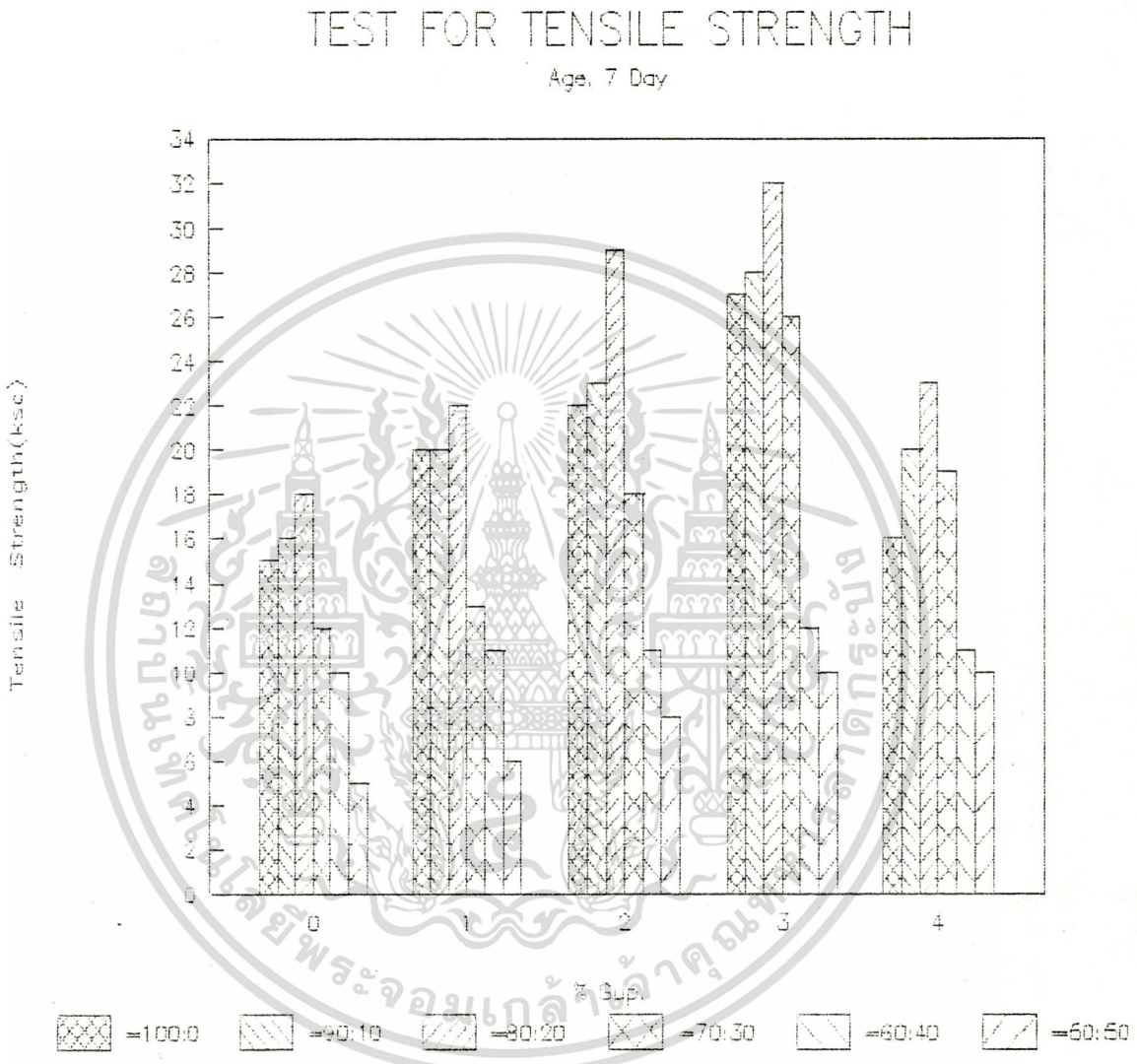

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ(ต่อ) เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน



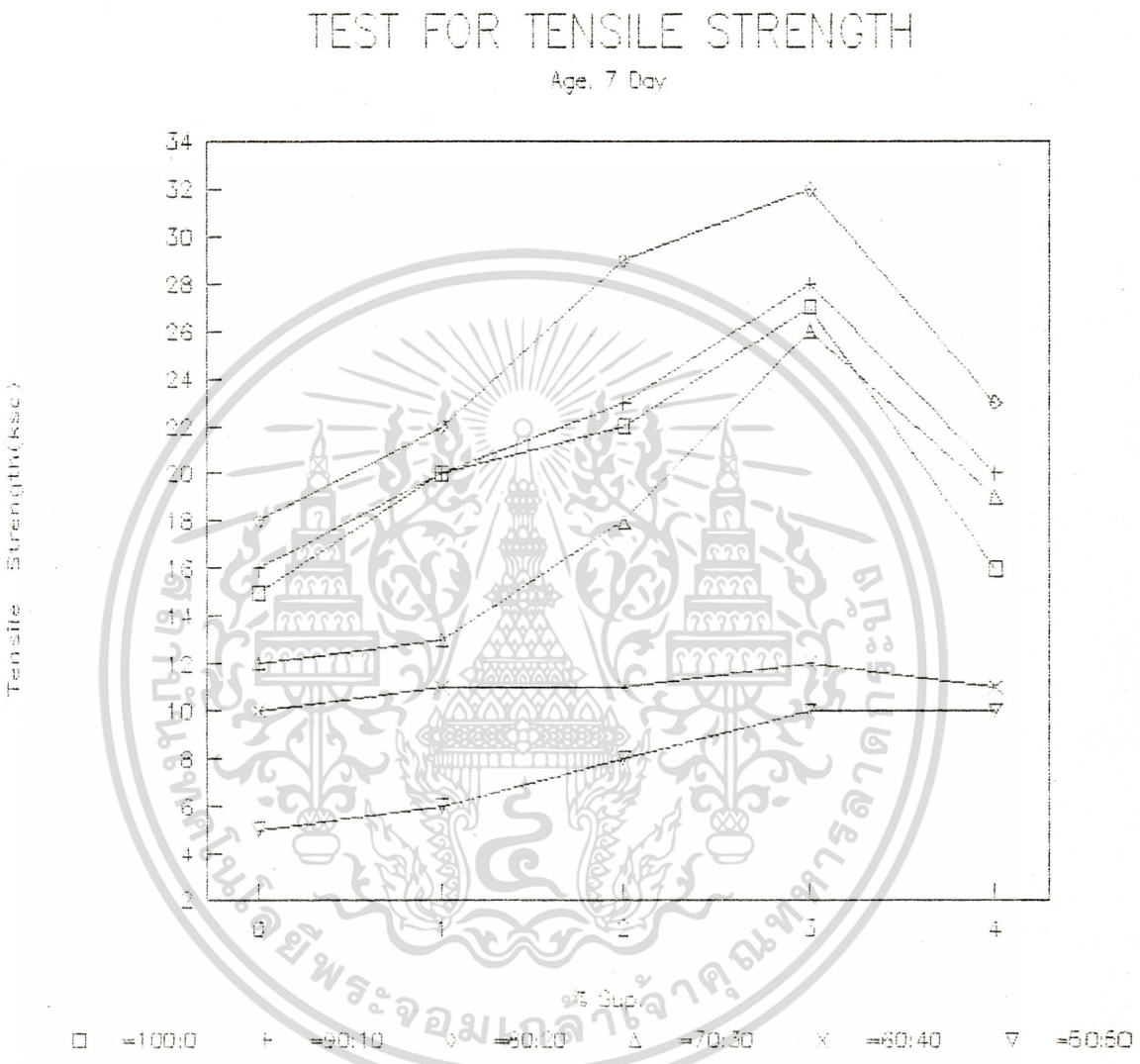

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ญ เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน



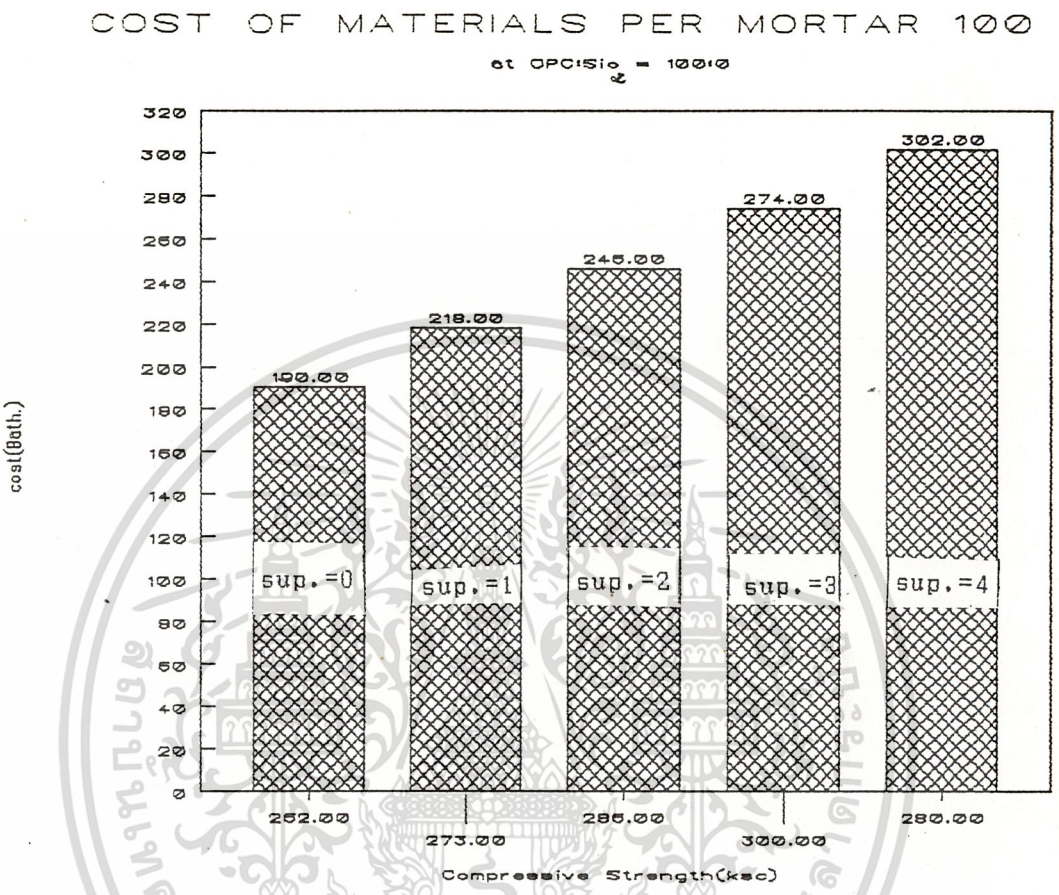

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ญ(ต่อ) เปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน



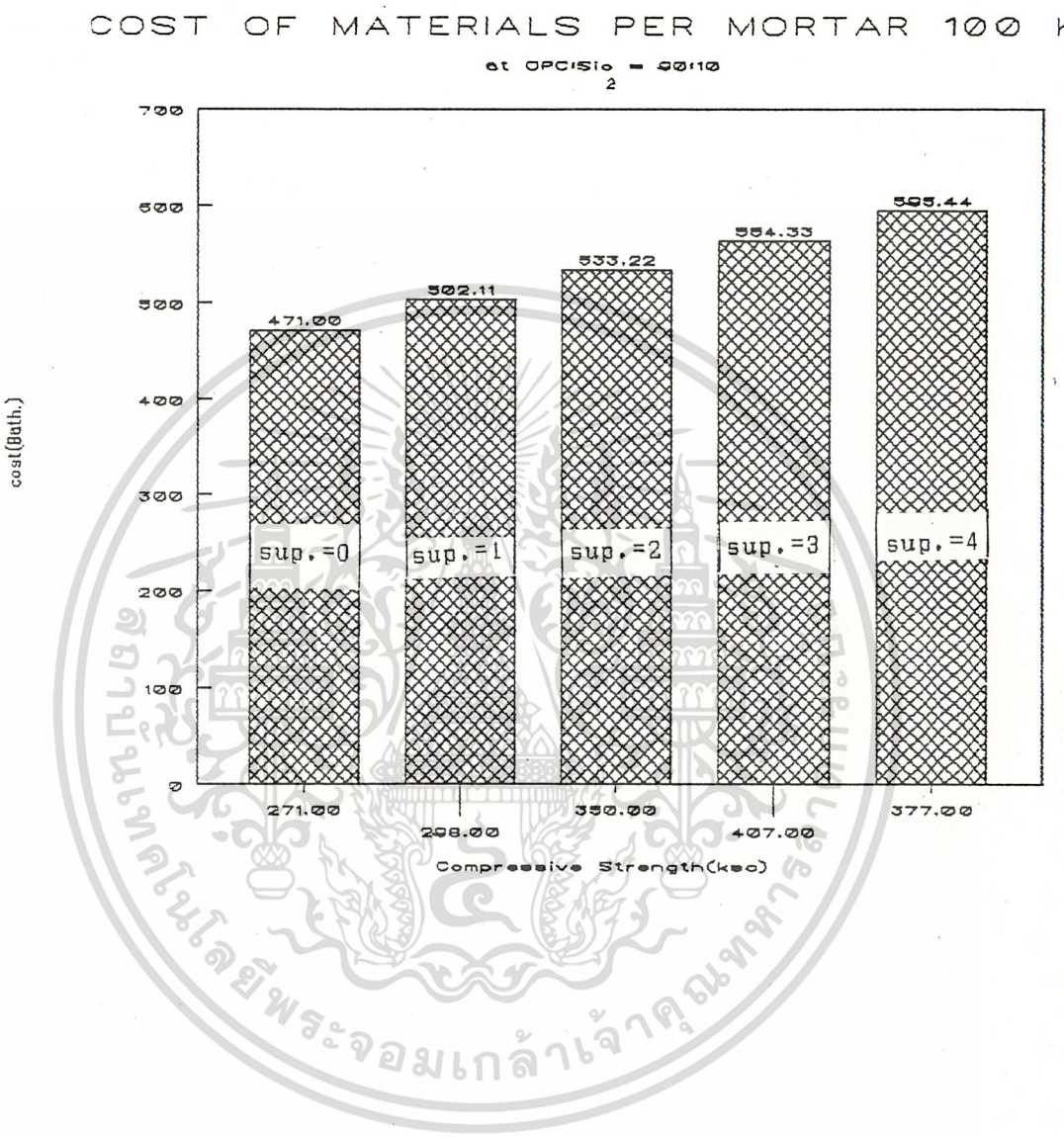

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 100 : 0



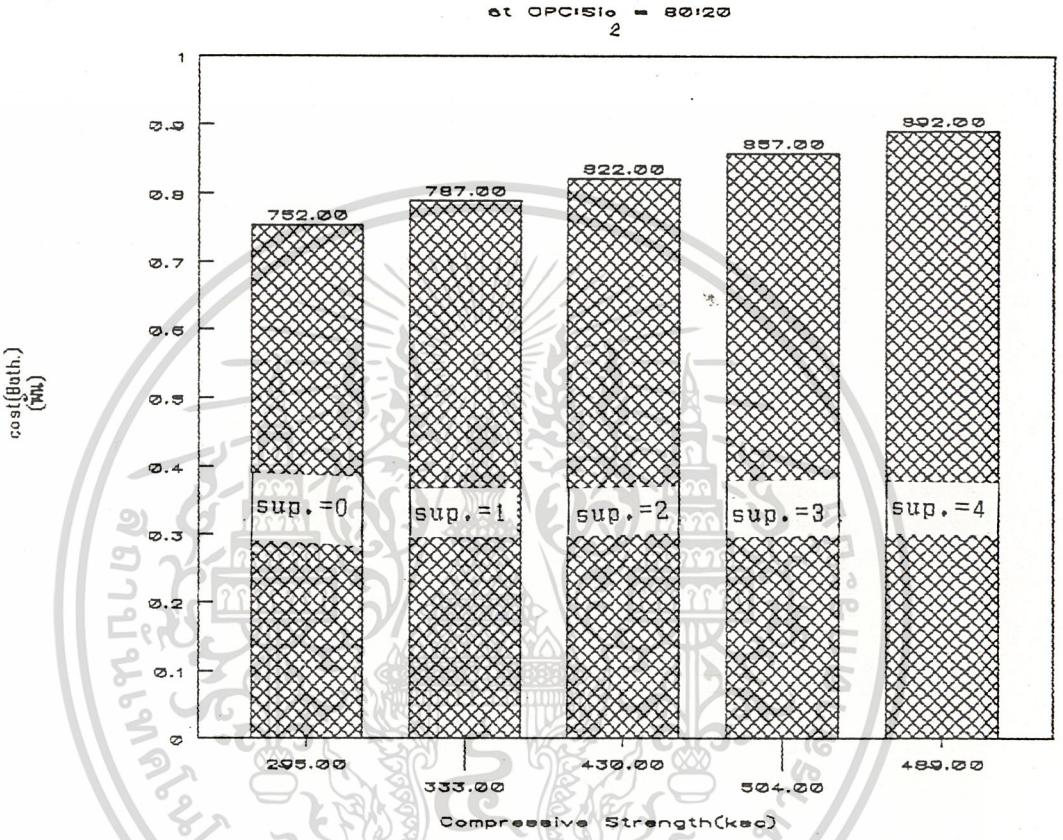

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ(ต่อ) เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 90 : 10



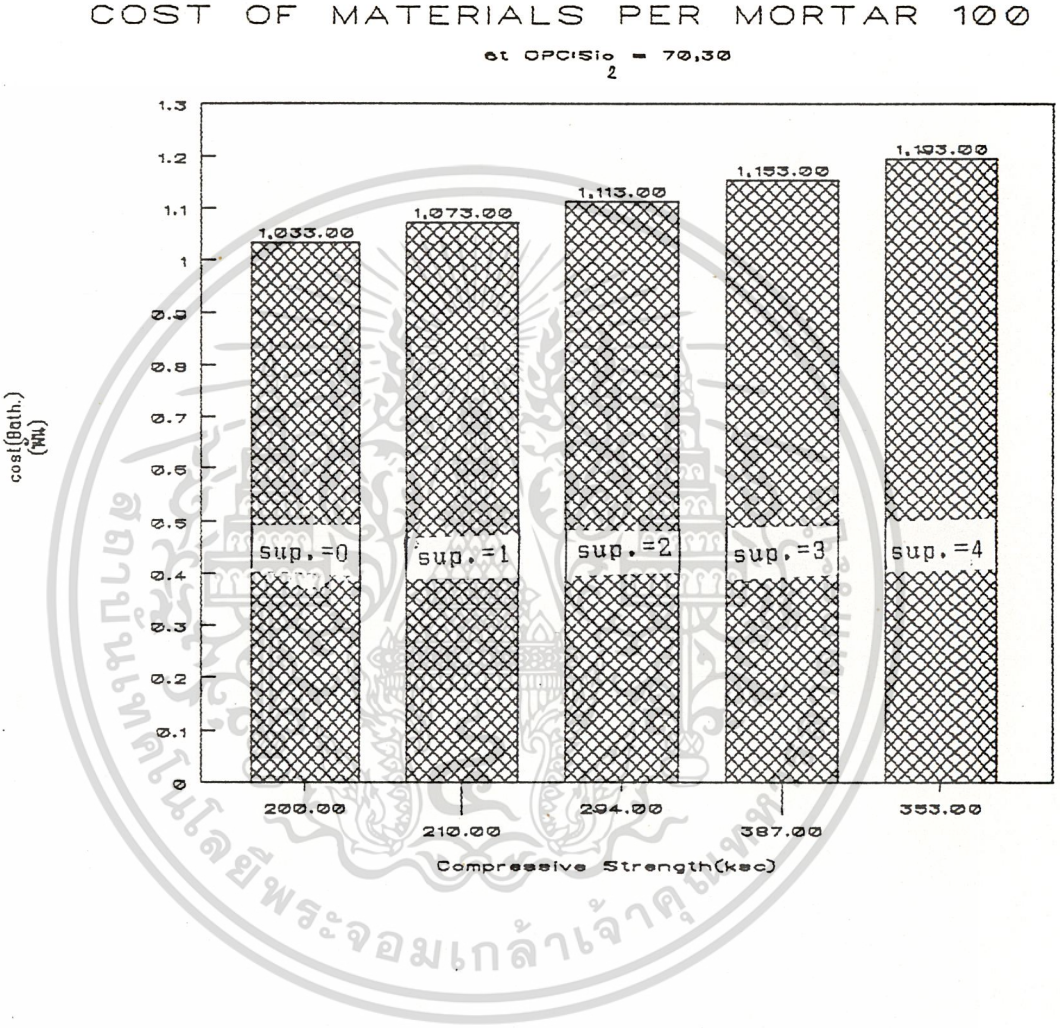

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ(ต่อ) เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 80 : 20



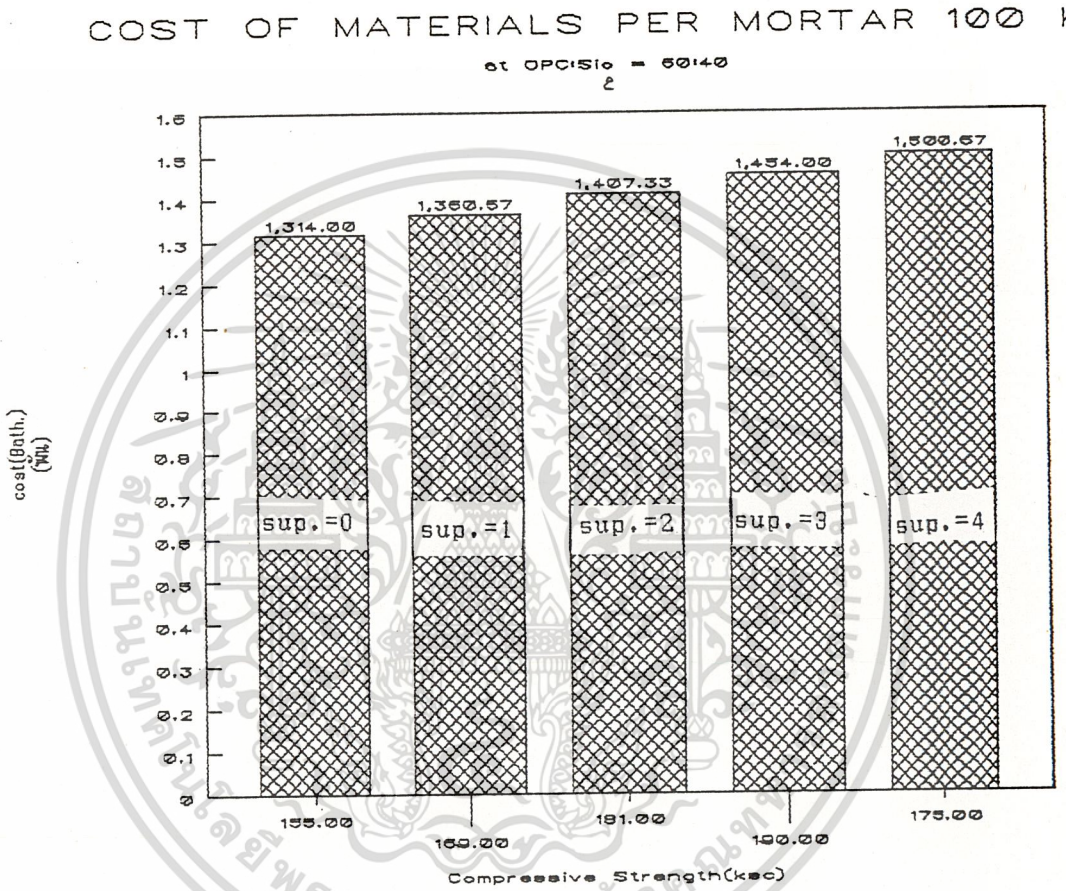

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ(ต่อ) เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. โดยใช้อัตราส่วน
ปูนซีเมนต์ปอรด์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 70 : 30



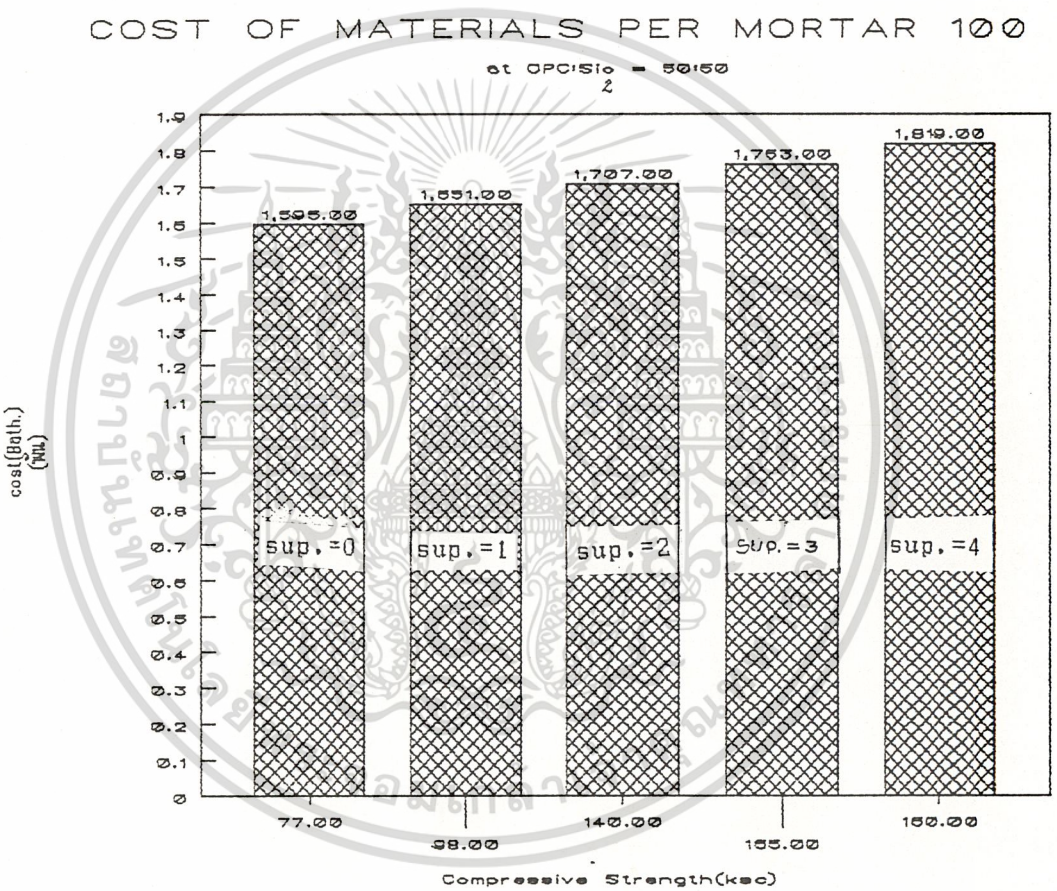

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฒ(ต่อ) เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 60 : 40




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปผนวก ฌ(ต่อ) เปรียบเทียบราคาของส่วนผสมของมอร์ตาร์ต่อ 100 กก. โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ประเภทที่ 3 : ไมโครซิลิกา 50 : 50




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม

ชัยสวัสดิ์ ศรีรัตนรัฐ. 2523. "การผลิตคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทย" เอกสารประกอบประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีคอนกรีตกำลังสูง วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 19 มิถุนายน 2533.

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และคณะ. 2532. "การผลิตคอนกรีตกำลังอัดสูงมาก" , เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง ความก้าวหน้าในงานคอนกรีต วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 10-11 เมษายน 2532. 15 หน้า

เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ. 2532. "ความเป็นมาของคอนกรีตกำลังสูง" , เอกสารประกอบการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง ความก้าวหน้าในงานคอนกรีต วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 19 มิถุนายน 2533. 17 หน้า

ผศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. "ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี" , ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศจ.ดร.วินิต ช่อวิเชียร. "คอนกรีตเทคโนโลยี" , ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ACI Committee 212 1989. "Chemical Admixture for Concrete" In ACI Materials Journal. Vol.86 No.3, May-June

Theodor, A. 1989. "Microsilica-a new tecnology" Sika Information. Switzerland.

Rixom, M.R. 1978. "Chemical Admixture for Concrete" Division of John weley & son, Inc., New York.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้