

การศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิวต่อคุณสมบัติ
ของคอนกรีตในสภาวะการบ่มต่างๆ

A STUDY ON INFLUENCE OF LOW SURFACE TENSION WATER CURING
IN ANY CURING CONDITIONS ON PROPERTIES OF CEMENTITIOUS
MATERIALS

รุ่งโรจน์ หนูนุรัตน์
RUNGROTE NOONURAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิวต่อคุณสมบัติ
ของคอนกรีตในสภาวะการบ่มต่างๆ**

**A STUDY ON INFLUENCE OF LOW SURFACE TENSION WATER CURING
IN ANY CURING CONDITIONS ON PROPERTIES OF CEMENTITIOUS
MATERIALS**



รุ่งโรจน์ หนูนรัตน์

RUNGROTE NOONURAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**A STUDY ON INFLUENCE OF LOW SURFACE TENSION WATER CURING
IN ANY CURING CONDITIONS ON PROPERTIES OF CEMENTITIOUS
MATERIALS**

RUNGROTE NOONURAT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงดึงผิวต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาวะการบ่มต่างๆ
นักศึกษา	นายรุ่งโรจน์ หนูนุรัตน์
รหัสนักศึกษา	48061505
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.คมสัน มาลีสี

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการบ่มในเงื่อนไขและสภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน โดยใช้สารกักกระจายฟองอากาศผสมลงในน้ำทำให้น้ำมีแรงดึงผิวลดลง โดยพิจารณาถึงความสามารถในการซึมผ่าน ปฏิกริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมี การหดตัว ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และการตรวจสอบอนุภาคของซีเมนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) โดยทำการเปรียบเทียบการบ่มแบบปล่อยไว้ในสภาวะปกติ บ่มโดยแช่น้ำ บ่มโดยการแช่น้ำผสมสารลดแรงดึงผิว และบ่มโดยวิธีป้องกันการสูญเสียน้ำ ซึ่งทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลา และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องกัน คือทำการทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วัน หลังจากนั้นทำการบ่มด้วยน้ำและน้ำที่ผสมสารลดแรงดึงผิว จนกระทั่งขึ้นตัวอย่างมีอายุที่ 28 วัน จึงทำการทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างวิธีการและระยะเวลาในการบ่ม ที่ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) 0.25, 0.30 และ 0.44

จากผลการวิจัยพบว่าน้ำที่มีแรงดึงผิวต่ำมีคุณสมบัติในการซึมผ่านได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยเฉพาะที่อายุของซีเมนต์เพสต์ที่มากขึ้น อีกทั้งมีคุณสมบัติในการซึมผ่านจากผิวนอกที่ทำการบ่มได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยปฏิกริยาไฮเดรชันที่ทุกระดับความลึกมีค่ามากกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา และทำให้การรับกำลังของคอนกรีตมีเพิ่มขึ้น

Thesis Title	A Study on Influence of Low Surface Tension Water Curing in any Curing Conditions on Properties of Cementitious Materials
Student	Mr.Rungrote Noonurat
Student ID.	48061505
Degree	Master of Engineer
Program	Civil Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Dr.Komsan MALEESEE

ABSTRACT

This report is about a test for studying on effects of admixtures in concrete curing conditions. Considering of capability on permeability Absorption, Hydration reaction, Autogenous Shrinkage, Compressive Strength and Scanning Electron Microscope (SEM) by using Air-Entraining agent mixed with water to be low surface tension water curing. The comparisons of the change condition usual curing method, Water curing, Low surface tension water curing and Wrapping. With to perform curing consecutively the time at 1, 3, 7, 14, 28 and 60 day at cement paste ages. And to perform curing inconsecutively to perform control of temperature room at 25 °C hydrometric 50 % In the age 1, 3, 7 and 14 day maintain the specimen in the control room and after that curing in water and AE-water. Until sample to be at the age of 28 and 60, therefore test and to compare between a periods of time curing at varied water/cement ratios (W/C) is 0.25, 0.30 and 0.44 respectively.

This report expresses use of admixtures in concrete curing, at curing consecutively and curing inconsecutively, to check capability on permeability by water and low surface tension water. by to perform analyses and to compare properties of concrete. With admixtures type low surface tension to assist capability on permeability reaction of cement everywhere, and to capability concrete at curing consecutively and inconsecutively properties in the vicinity curing consecutively ordinarily. Consequence capability to take to be a use to construct by capability curing method periods of time curing to choose admixture to assist curing and may be compressive strength to increase

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก คร. คมสัน มาลีสี ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวรวมทั้งผู้ใกล้ชิดของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ กุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

รุ่งโรจน์ หนูณรงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 นิยามและความหมายของคำต่างๆ.....	5
2.1.1 สารผสมเพิ่ม.....	5
2.1.2 สารกักกระจายฟองอากาศ.....	6
2.1.3 การบ่มคอนกรีต.....	6
2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์.....	7
2.2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันของคลัสซีมซิลิเกต (C_3S และ C_2S).....	7
2.2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรคลัสซีมอลูมิเนต (C_3A).....	8
2.2.3 ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตระคลัสซีมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF).....	9
2.3 การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์.....	9
2.3.1 ส่วนประกอบในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว.....	10
2.4 พลังงานของแรงดึงผิวของน้ำ.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม.....	13
2.6 ก่ออิฐฉาบปูนแบบตอม่อ.....	13
2.6.1 ก่ออิฐฉาบปูนอิฐก่อ.....	13
2.6.2 หลักการของก่ออิฐฉาบปูนแบบตอม่อ.....	14
2.6.3 ลักษณะของสัญญาณชนิดต่างๆ.....	14
2.6.4 ระบบการทำงานของก่ออิฐฉาบปูนแบบตอม่อ.....	14
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	17
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มอก. 15-2532.....	17
3.1.2 สารเคมี (Admixtures).....	17
3.1.3 น้ำ (Water).....	18
3.1.4 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์.....	18
3.1.5 ชุดอุปกรณ์การหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็ง.....	18
3.1.6 ชุดอุปกรณ์ทดสอบปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	19
3.1.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหดตัวของซีเมนต์.....	20
3.1.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหดตัวของซีเมนต์เพสต์.....	22
3.1.9 ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	22
3.1.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	24
3.2 วิธีการทดสอบ.....	24
3.2.1 การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ตัวอย่างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04.....	24
3.2.2 การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัวใน แต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ อิงอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 การทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่า การหดตัวทางเคมี อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312.....	26
3.2.4 การทดลองสำหรับการทดลองการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129.....	28
3.2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108.....	29
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
4.1 กล่าวนำ.....	31
4.2 การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว.....	32
4.3 ผลการทดสอบการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ.....	38
4.4 ผลการทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี.....	45
4.5 การทดสอบการหดตัวในซีเมนต์เพสต์.....	48
4.6 การทดลองสำหรับการทดสอบกำลังอัด.....	52
4.7 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม.....	70
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	90

สารบัญรูป

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติทั่วไปของซีเมนต์ประเภทที่ 1.....	42

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่ม.....	2
1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกของตัวอย่าง W/C 0.25.....	2
1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศต่างๆ.....	3
2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	10
2.2 ผลึกภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	10
2.3 แรงยึดเหนี่ยวของอะตอม.....	11
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ.....	17
3.2 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์.....	18
3.3 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร.....	19
3.4 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร.....	19
3.5 เตาอบที่อุณหภูมิ 105° C.....	20
3.6 เตาอบที่อุณหภูมิ 950° C.....	20
3.7 ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร.....	21
3.8 จุกยาง.....	21
3.9 หลอดปิเปต.....	21
3.10 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง ขนาด กว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตร.....	22
3.11 เครื่องวัดการหดตัว.....	22
3.12 อุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	23
3.13 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	23
3.14 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม.....	24
3.15 ตัวอย่างในการทดสอบหาความสามารถการซึมผ่าน.....	25
3.16 ตัวอย่างในการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัวในแต่ละระดับชั้น ความลึกต่างๆ.....	26
3.17 ตัวอย่างในการทดสอบการดำเนิน ไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี.....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 ตัวอย่างในการทดสอบหาความหาคัด.....	29
3.19 การวัดขนาดตัวอย่างทดสอบกำลังอัด.....	30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ ที่อายุ 28 วัน.....	32
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการบ่มแบบ Wrapping ที่อายุ 28 วัน.....	32
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการบ่มด้วยน้ำ ที่อายุ 28 วัน.....	33
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % ที่ทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ.....	33
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มแบบ Wrapping.....	34
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มด้วยน้ำ.....	34
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % ที่ทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ.....	35
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มแบบ Wrapping.....	35
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทดสอบโดยทดสอบด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มด้วยน้ำ.....	36
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทดสอบโดยน้ำ ที่ทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ.....	36
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการ ทดสอบโดยน้ำ โดยทำการบ่มแบบ Wrapping.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยน้ำ โดยทำการบ่มด้วยน้ำ.....	37
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด ที่อายุ 28 วัน W/C 0.25.....	39
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด ที่อายุ 28 วัน W/C 0.30.....	39
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด ที่อายุ 28 วัน W/C 0.44.....	40
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.25.....	40
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.25..	41
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.25.....	41
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.30.....	42
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.30....	42
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.30.....	43
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.44.....	43
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.44....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.44.....	44
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำ.....	46
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน กับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำ.....	46
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %	47
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %.....	47
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วยน้ำที่ W/C 0.25.....	48
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ W/C 0.25.....	49
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25.....	49
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ 3 วัน เปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25.....	50
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ 7 วัน เปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25.....	50
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ 14 วัน เปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25.....	51
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Strength) กับค่ากำลังที่ออกแบบ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาคือด้วย Wrapping น้ำ และ AE เข้มข้น 1 % ที่อายุ 28 วัน.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Strength) กับค่ากำลังออกแบบที่ 250 ksc. โดยบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำ และน้ำผสมAE เข้มข้น 1 %.....	53
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Strength) กับค่ากำลังออกแบบที่ 450 ksc. โดยบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำ และน้ำผสมAE เข้มข้น 1 %.....	53
4.38 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบต่อเนื่อง.....	55
4.39 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.38 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	55
4.40 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบต่อเนื่องด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %.....	56
4.41 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.40 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	56
4.42 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบต่อเนื่องด้วย Wrapping.....	57
4.43 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.42 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	57
4.44 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบไม่ต่อเนื่องที่ 3 วัน.....	58
4.45 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.44 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	58
4.46 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบไม่ต่อเนื่องที่ 7 วัน.....	59
4.47 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.46 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	59
4.48 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบไม่ต่อเนื่องที่ 14 วัน.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.48 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	60
4.50 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ 3 วัน.....	61
4.51 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.50 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	61
4.52 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ 7 วัน.....	62
4.53 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.52 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	62
4.54 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ 14 วัน.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป วิธีที่จะควบคุมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณภาพที่ดีวิธีหนึ่งคือการบ่มคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตจะช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีตและจะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้การบ่มจึงมีอิทธิพลมากต่องานก่อสร้างทั่วไปในปัจจุบัน

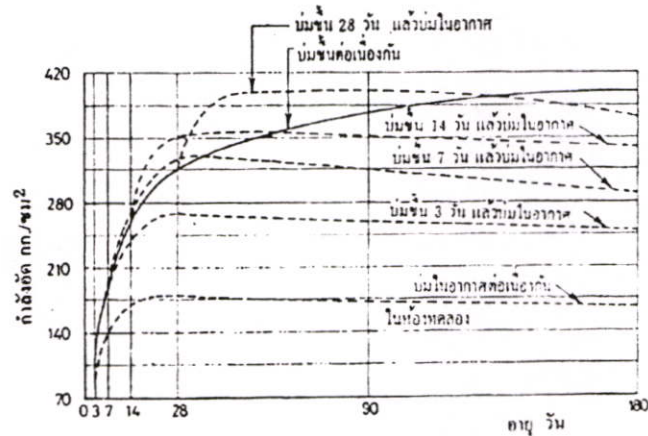
ในระหว่างที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวอยู่นั้น คอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเพียงพอ หากน้ำมีไม่เพียงพอในระยะใดระยะหนึ่ง การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีก็จะหยุดในระยะนั้น และถ้าอยู่ในระยะที่ความแข็งแรงไม่พอที่ด้านทานการหดตัว อันเนื่องจากการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแล้ว อาจทำให้เกิดการเสียหายแตกร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีตหรือตามผิวที่แห้งก่อนนั้น ได้ทุกเมื่อ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเก็บน้ำให้ชุ่มตลอดเวลา เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินอย่างต่อเนื่องให้มากที่สุด หรือจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากผู้รับเหมาก่อสร้างส่วนใหญ่ ไม่ค่อยให้ความสำคัญในงานบ่มผิวคอนกรีตเท่าที่ควรซึ่งมักละเลยการบ่มทำให้น้ำระเหยออกจากผิวคอนกรีต เป็นผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์และทำให้ความสามารถรับกำลังอัดในคอนกรีตที่ได้ต่ำลง รวมทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวที่เนื้อคอนกรีตหรือตามผิวที่แห้งก่อนตามมามากด้วย

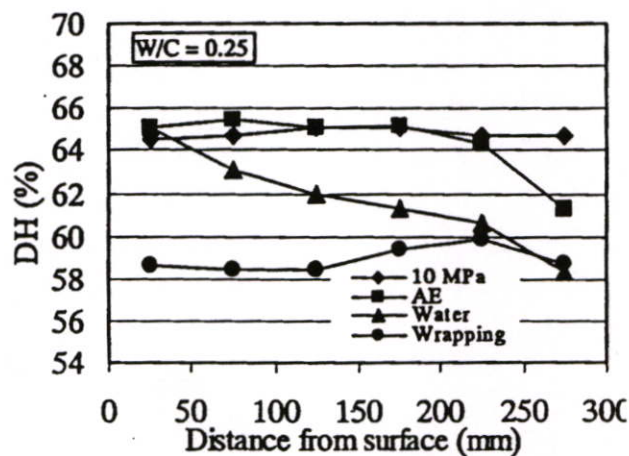
คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยน้ำที่ใช้บ่มผิวคอนกรีตได้ซึมผ่านเข้าไปภายใน ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มปริมาณน้ำในช่องว่างภายในของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และน้ำที่ใช้บ่มนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย สำหรับงานก่อสร้างทั่วไปนั้นมักพบเสมอว่าไม่ได้ดำเนินการบ่มคอนกรีตที่ต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงวันแรกๆ และเมื่อมีการบ่มคอนกรีตในช่วงหลังพบว่าการซึมผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตของน้ำที่ใช้บ่มเป็นไปได้อย่างขึ้นเนื่องจากคอนกรีตมีโครงสร้างผลึกที่แน่นขึ้น ดังนั้นจึงต้องพยายามหาวิธีการให้น้ำที่ใช้บ่มสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ คร.คมสัน มาลีสี (2545) พบว่าน้ำที่มีแรงดึงผิวต่ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในแท่งคอนกรีตตัวอย่างได้ดีกว่าการ

บ่มด้วยน้ำธรรมดาทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงขึ้น ซึ่งน้ำที่มีค่าแรงดึงผิวต่ำนั้นน่าจะมีส่วนช่วยในการบ่มคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตมีโครงสร้างที่แข็งตัวมากขึ้นแล้ว ได้ศึกษาการบ่มด้วยน้ำธรรมดา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองบ่มคอนกรีตด้วยเงื่อนไขของการบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อที่จะวัดความสามารถในการแพร่ของน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตทั้งน้ำธรรมดาและน้ำที่มีแรงดึงผิวต่ำโดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต



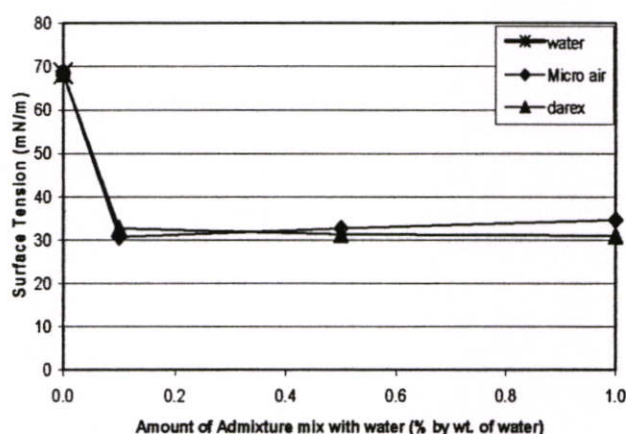
รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่ม (วินิต ช่อวิเชียร, 2539)

จาก ดร.คมสัน มาลีสี (2545) ได้ศึกษาพบว่าสารกักกระจายฟองอากาศ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงดึงผิว (AE-Water) เมื่อนำมาบ่มกับคอนกรีตจะมีความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ได้ดีมากกว่าน้ำปกติที่ 28 วัน ดังรูปที่ 1.1. จึงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงดึงผิวในการบ่มคอนกรีต จึงได้นำมาพิจารณา



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึกของตัวอย่าง W/C 0.25

จากการศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิว Influence of Low Surface Tention Curing on Properties of Cementitious Material ของ นายไชยเดช ไช้ไพโรจน์ และ นายอานนท์ ปทุมานนท์ พบว่าน้ำผสมสาร Micro air ที่ปริมาณ 1 % มีการซึมผ่านช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่ได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสม่ำเสมอในชั้นความลึกต่างๆ ได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น ดังนั้นจึงนำข้อมูลนี้มาศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการบ่มเพิ่มเติมโดยการคิดวิธีการบ่มเพื่อเปรียบเทียบการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air ที่ปริมาณ 1 % การบ่มด้วยน้ำ การบ่มด้วยอากาศ การบ่มแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้ที่น้ำผสม Micro air ที่ปริมาณ 1 % บ่มด้วยน้ำ และ การบ่มแบบ Wrapping



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศต่างๆ

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 ศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตที่ระยะเวลาต่างๆ

1.3.2 วิเคราะห์ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการซึมผ่านของน้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตเข้าไปยังแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวและเงื่อนไขการบ่มต่างๆ ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่าน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมี การหดตัวภายนอก และความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต

1.3.4 เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการบ่มคอนกรีตก่อสร้าง ในการเลือกใช้วิธีการบ่มและการใช้สารผสมเพิ่ม ณ สถานที่ก่อสร้างจริง เพื่อให้งานก่อสร้างมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % ซึ่งมีค่า

Surface Tension ประมาณ 32 mN/m เปรียบเทียบกับการบ่มแบบต่อเนื่องด้วย น้ำ อากาศ Wrapping และการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง คือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงทำการทดสอบ โดยทำการวัดค่าความซึมผ่าน ปฏิกริยาไฮเดรชัน และการหดตัว (Autogenous Shrinkage) ของซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 1

1.4.2 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำและน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % เพื่อทดสอบหาการดำเนินไปของปฏิกริยาไฮเดรชันโดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage)

1.4.3 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % เปรียบเทียบกับการบ่มด้วย น้ำ อากาศ Wrapping และการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำการวัดค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ 250 และ 450 ksc. ที่อายุของคอนกรีต 1, 3, 7 และ 28 วัน โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type 1

1.4.4 ศึกษาอิทธิพลของการบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % เปรียบเทียบกับการบ่มด้วย น้ำ อากาศ Wrapping และการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทำการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : SEM

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวนำ ความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการวิจัย พื้นฐานนิยามและความหมายของคำต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยสารผสมเพิ่ม การบ่มคอนกรีต (Curing) ปฏิกริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ พลังงานของแรงตึงผิวของน้ำ (Surface Tension Energy of Water) การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการศึกษา วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดสอบ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการวิจัย พื้นฐานนิยามและความหมายของคำต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยสารผสมเพิ่ม การบ่มคอนกรีต (Curing) การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ พลังงานของแรงดึงผิวของน้ำ (Surface Tension Energy of Water) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา

2.1. นิยามและความหมายของคำต่างๆ

ในการวิจัย มีคำต่างๆ ที่จะต้องเกี่ยวข้องกับการศึกษาค้างนี้

2.1.1 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม (Admixtures) หมายถึงสารอื่นๆ นอกเหนือจากปูนซีเมนต์ วัสดุผสมและน้ำ ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต ไม่ว่าจะก่อนหรือในขณะที่กำลังผสม เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ข้อหนึ่งหรือหลายข้อตามต้องการ ดังต่อไปนี้

ทำให้คอนกรีตผสมใหม่ๆ มีความสามารถที่ได้ดีขึ้นเพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใส่ผสมคอนกรีตให้น้อยลงเกิดการกักกระจายฟองอากาศทำให้มีความทนทานเพิ่มขึ้น เร่งการก่อตัวและการแข็งตัว ทำให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วกว่าปกติหน่วงการก่อตัวให้ช้าลงเกิดการกระจายซีเมนต์ทำให้ซีเมนต์เปียกทั่วเมื่อผสมกับน้ำช่วยขับน้ำและกันน้ำซึมทำให้มีความทึบน้ำหรือต้านทานมิให้น้ำซึมผ่าน ได้ดีขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาของสารปอซโซลาน ลดการเย็นหรือการคายน้ำทำให้คอนกรีตไม่หดตัวและแตกร้าว เมื่อก่อตัวและแข็งตัวแล้วทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีขึ้นทำให้เกิดสีและ ฯลฯ

สารผสมเพิ่มที่ใช้ร่วมกับคอนกรีต จะให้ผลแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ขนาดรูปร่างและส่วนขนาดคละของวัสดุผสม น้ำ สัดส่วนการผสม ระยะเวลาการผสม และอุณหภูมิ ดังนั้นในการใช้สารผสมเพิ่มจึงควรศึกษาถึงส่วนผสมและข้อเสนอแนะของผู้ผลิตโดยละเอียด จะต้องทดสอบและควบคุมปริมาณที่ใช้ให้ถูกต้อง เพราะสารเหล่านี้จะให้ผลดีต่อเมื่อใช้ในอัตราที่พอเหมาะ ปริมาณที่ผิดไปจะก่อให้เกิดผลเสีย หรือเกิดผลในทางตรงกันข้ามก่อนการตัดสินใจเลือกใช้สารผสมเพิ่มควรพิจารณาว่า

1. จะมีวิธีการอย่างไรบ้างหรือไม่ ที่จะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมหรือวิธีการผสม เพื่อให้คอนกรีต มีคุณสมบัติตามความต้องการ แทนที่จะเลือกใช้สารผสมเพิ่มซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อคุณภาพได้
2. เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย เมื่อใช้สารผสมเพิ่มกับการที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มแต่ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมหรืออย่างอื่นที่จะทำให้คอนกรีตอย่างเดียวกัน
3. ผลที่จะเกิดจากการใช้สารผสมเพิ่ม นอกเหนือไปจากวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

2.1.2 สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixtures)

สารชนิดนี้ จะช่วยให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ (มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า) แฝบปนอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต แต่ฟองอากาศนี้ไม่ทะลุถึงกันและกัน ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร อาจมีฟองอากาศเล็กๆนี้ประมาณ 3 - 6 % ของเนื้อคอนกรีตทั้งหมด ฟองอากาศที่เกิดขึ้นทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้และหล่อง่ายขึ้น ทำให้ลดปริมาณน้ำผสมคอนกรีตลงได้ (ประมาณ 3 % ต่อฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น 1 %) ช่วยต้านทานมิให้น้ำในคอนกรีตแข็งเป็นน้ำแข็งก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัวด้วย ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหล่อคอนกรีตในฤดูหนาว นอกจากนี้แล้วสารกระจายกักฟองอากาศยังช่วยลดการแยกและการแยกตัว และการสูญเสียน้ำของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ แลดูสวย แน่นไม่ร่วนซึม รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตด้วย ข้อเสียของการใช้สารนี้คือทำให้คอนกรีตมีกำลังลดต่ำลงประมาณ 3 - 4 % ต่อปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น 1 % และนอกจากนี้ต้องระวังเรื่องการใช้เครื่องเขย่าให้มาก เพราะถ้าเขย่ามากจะทำให้จำนวนฟองอากาศลดน้อยลงไปเกือบ 50 %

สารกระจายกักฟองอากาศเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำมีอยู่หลายชนิด ซึ่งอาจจะทำมาจากยางไม้ ไขมันหรือน้ำมันสัตว์และพืช หรือจากกรดซึ่งได้มาจากยางไม้หรือไขมันของสัตว์และพืชเป็นต้น มีทั้งชนิดผงและชนิดเหลวอัตราการใช้ประมาณ 0.005 - 0.05 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2.1.3 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่มหรือบำรุงคอนกรีต (Curing) เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ระเหยออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้วเร็วเกินไปเพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและความทนทานตามต้องการ

หลังจากเทคอนกรีตและทิ้งไว้จนผิวหน้าคอนกรีตหมาดแข็งปราศจากรอยแล้วจะต้องทำการบ่มทันทีด้วยวิธีที่ถูกต้องโดยปกคลุมผิวมิให้ถูกแดดหรือลมร้อน และมีให้ถูกรบกววนหรือสะเทือนโดยเฉพาะภายในระยะ 24 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ อีกทั้งการป้องกันการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตที่เทใหม่ๆ มิฉะนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวเร็ว ทำให้เกิดแรงที่ผิวที่กำลังจะแห้งเป็นผลให้เกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ช่วง

ระยะเวลาที่ป้องกันและรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลังจากเทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว เรียกว่า ระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต (Curing Period)

กำลังของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ควบคู่กันที่ซึ่งมีความชื้นให้ซีเมนต์ปฏิกิริยากับ น้ำได้ต่อไปอีก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็วในระยะแรกและค่อยๆ ช้าลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิที่พอเหมาะ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จากเส้นสัมพันธ์จะเห็นว่า หลังจากบ่มในอากาศแห้งแล้วบ่มขึ้นตลอดเวลา ซึ่งสภาพของงานก่อสร้างจริงไม่อาจจะบ่มขึ้น ตลอดเวลานานๆ ได้ เพราะมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาก่อสร้างและค่าใช้จ่าย ฉะนั้นจึงควรทำการ บ่มชื้นให้ต่อเนื่องกันตั้งแต่ต้นประมาณ 7 - 14 วัน เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังประมาณ 70 % ของกำลัง อัดที่ต้องการ

2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของ ปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คืออาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่ จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

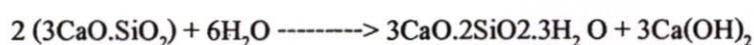
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะโดยในช่วงแรกจะอาศัยสาร ละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์จะประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณา ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์

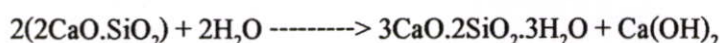
2.2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันของคลัสเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

คลัสเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด "คลัสเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)" ประมาณ 15 - 25% และสารประกอบคลัสเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรง ดังสมการ ต่อไปนี้

สมการของ C_3S



สมการของ C_2S



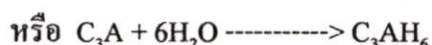
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

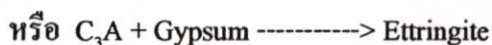
2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นที่ทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3A



ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ชิปซัมเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยชิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้เกิดการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอัลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้ จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite

2.3 การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ (Chemical Shrinkage of Cement Paste)

การหดตัวทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ (Chemical Shrinkage) คือ ปรากฏการณ์ซึ่ง ปริมาตรสุทธิในกระบวนการไฮเดรชันน้อยกว่าปริมาตรรวมของซีเมนต์และน้ำก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน Chemical Shrinkage จะอธิบายโดยสมการดังนี้

$$S_{sh} = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \quad (\%) \quad (2.1)$$

โดยที่ S_{sh} = Chemical shrinkage ratio (%)

V_{ci} = Volume of cement before mixing

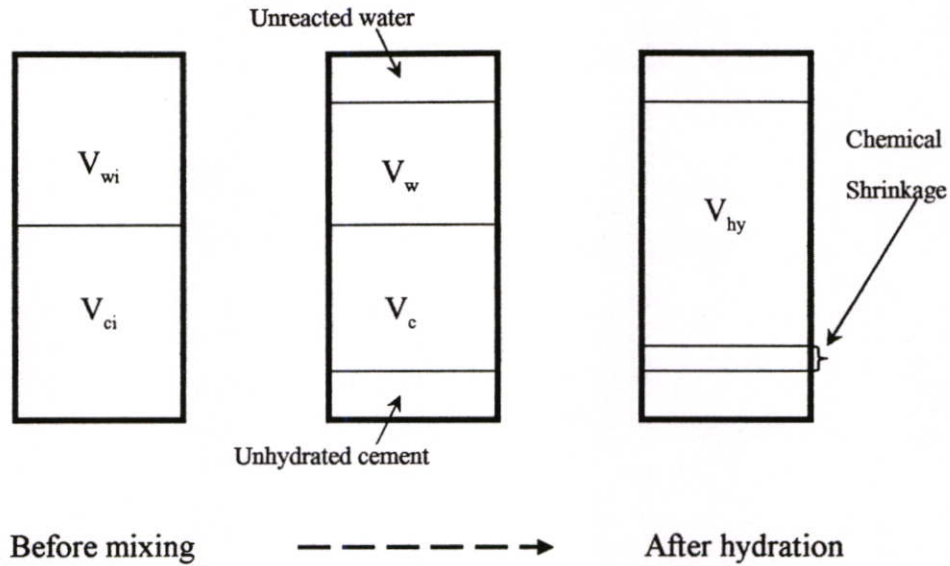
V_c = Volume of hydrate cement

V_{wi} = Volume of water before mixing

V_w = Volume of reacted water

V_{hy} = Volume of hydration products

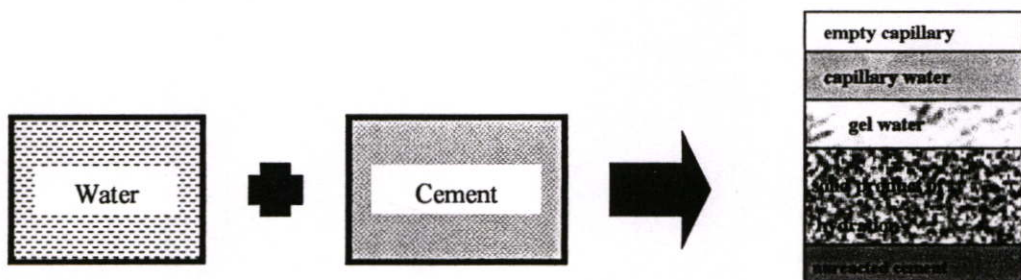
เมื่อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วถูกพิจารณาเป็นส่วนประกอบของ สภาวะของแข็ง (ซีเมนต์ที่ปราศจากน้ำและผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ส่วนของของเหลว (น้ำที่ยังไม่ได้ผสม) และ สภาวะของก๊าซ (ฟองอากาศที่ยังคงอยู่หลังจากผสมและรูอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) จะถูกพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์โดยสมบูรณ์ นั่นคือ สภาวะของแข็งบวกสภาวะของเหลว ในทางตรงกันข้าม Autogenous Shrinkage จะถูกพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรภายนอก ตั้งแต่โครงสร้างของมวลเริ่มก่อตัวขึ้น (ดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.3.1 ส่วนประกอบในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว (The Component in Hardened Cement Paste)

ช่องว่างที่เห็นได้ชัดสำหรับผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันประกอบด้วย ปริมาตรสุทธิของซีเมนต์ที่แห้งตัวรวมกับปริมาตรของน้ำที่ถูกผสมเข้ากัน น้ำที่สูญเสียชีวิตเล็กน้อยเนื่องจากการ Bleeding และ โครงสร้างของเพสต์ในขณะที่ยังคงเป็นสถานะพลาสติกอยู่ จะไม่นำมาพิจารณาในสถานะนี้ น้ำจะสร้างพันธะทางเคมี โดย C_3S และ C_2S จะถูกแสดงอย่างประมาณคือ 24 % และ 22 % ของน้ำหนักของซิลิกาสองชนิดตามลำดับ โดยลักษณะที่สอดคล้องกันสำหรับ C_3A และ C_4AF คือ 40 และ 37 % ตามลำดับ



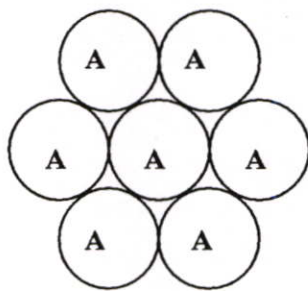
รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วประกอบด้วย ซีเมนต์ที่ปราศจากน้ำ, ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นของแข็งของปฏิกิริยาไฮเดรชัน Gel Water, Capillary Water และอากาศดังแสดง

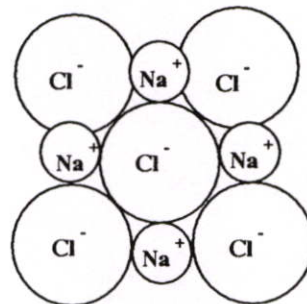
ในรูปด้านบนปริมาตรของแต่ละส่วนประกอบมีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างกระบวนการของปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลที่ตามมาจะทำให้ Pore จะเพิ่มขึ้นด้วย การกลายเป็นไอของน้ำประกอบไปด้วย Capillary water และ Gel Water ซึ่งการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 105°C น้ำที่ไม่มีการระเหย คือ น้ำจากพันธะเคมีในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยปราศจากน้ำที่อุณหภูมิ 950°C จำนวนของ Non-Evaporable Water จะเพิ่มขึ้น เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปแต่ในเฟสที่ชุ่มด้วยน้ำ Non-Evaporable Water จะไม่สามารถมีมากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำทั้งหมด ในซีเมนต์ที่ประกอบไปด้วยน้ำที่ดี ซีเมนต์ Non-Evaporable Water จะประมาณ 18 % โดยน้ำหนักของวัสดุซึ่งไม่มีน้ำ สัดส่วนนี้จะเพิ่มถึงประมาณ 23 % ในซีเมนต์ที่ผสมน้ำอย่างสมบูรณ์ (ดังรูปที่ 2.2)

2.4 พลังงานของแรงตึงผิวของน้ำ (Surface Tension Energy of Water)

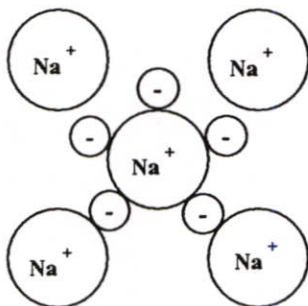
บทนำทางเคมีที่ได้อธิบายถึงโครงสร้างอะตอมและวิธีของพันธะทางเคมีที่ทำให้แน่ใจว่าการรวมตัวของอะตอมเป็นรูปร่างต่างๆ โดยการเพิ่ม ถด หรือแอริโออิเล็กตรอน ลักษณะของชนิดต่างๆ ของพันธะจะบอกว่าเป็นวัสดุชนิดใด สิ่งนี้จะสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือพันธะที่แข็งแรงระหว่างอะตอม (ไอออนิก โคเวเลนต์ และพันธะโลหะ) และพันธะอย่างอ่อนคือพันธะวานเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุล ลักษณะต่างๆ ไปของการประกอบเป็น คลิสตอล จะถูกแสดงในรูปที่ 2.3 (a)



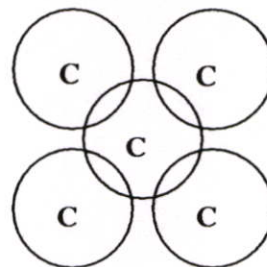
(a) Vander Waals Bonding (Solid Argon)



(b) Ionic Bonding (Sodium Chloride)



(c) Metallic Bonding (Sodium Metal)



(d) Covalent Bonding (Diamond)

รูปที่ 2.3 แรงยึดเหนี่ยวของอะตอม

ในรูป (a) โดยธรรมชาติของอะตอมจะสร้างพันธะอย่างหลวมๆ ด้วยแรง วานเดอร์ วาลส์ (Vander Walls) ซึ่งอะตอมจะเรียงต่อกันด้วยความไม่แน่นอนในการกระจายตัวของประจุ ในรูป (b) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากอะตอมค่า (Alkali) ไปยังอะตอมฮาโลเจน (Halogen) ผลที่ได้คือไอออนจะยึดติดกันแรงไฟฟ้าระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ ในรูป (c) วาเลนซ์อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแต่ละอะตอมค่า (Alkali Atom) ไปยังบริเวณแหล่งรวมของอิเล็กตรอนซึ่งในบริเวณนั้นประจุบวกจะสลายตัวไปหมด ในรูป (d) อะตอมจะสร้างพันธะกันโดยส่วนที่ซ้อนทับกันของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวอยู่ ในกรณีพิเศษทั้งในพันธะ วานเดอร์วาลส์ เคลื่อนจากบริเวณที่มีแรงไฟฟ้ามากโดยเป็นแรงระหว่าง ไฮโดรเจนอะตอมและอะตอมของ O, F หรือ N ในโมเลกุลจะประกอบด้วยพันธะมีขั้ว C-O, H-F หรือ H-N เราจะพิจารณาในกรณีของน้ำเพราะว่าพันธะ O-H เป็นพันธะที่มีขั้วสูง อะตอม H มีประจุบวกจำนวนมากในขณะที่อะตอม O เป็นลบ อะตอมขนาดเล็กของ H จะเข้าหาอะตอมของ O ที่อยู่ใกล้มากที่สุด ดังนั้นจึงเกิดแรงไฟฟ้าที่แข็งแรงระหว่างอะตอมทั้งสอง

แรงภายในของอะตอมจะถูกพิจารณาโดยอะตอมทั้งหมดที่แสดงตัวเป็น อะตอมข้างเคียงที่อยู่ใกล้ที่สุด อะตอมที่อยู่ในช่วงกลาง (ของแข็งหรือของเหลว) ถือว่ามันอยู่ในช่วงของเหลว จะมีพลังงานของปฏิกิริยาเท่ากันในทุกทิศทาง แต่เมื่ออะตอมที่บริเวณผิวหน้าหรืออยู่ใกล้กับผิวหน้าแรงบริเวณนั้นจะไม่เหมาะสมในการสร้างพันธะเพราะว่าไม่มีอะตอมข้างเคียง จากผลดังกล่าว อะตอมจะมีพลังงานภายในสูง ตำแหน่งของมันบน Cordon-Morse Diagram จะเพิ่มขึ้น 1-3 ลำดับ จะพบว่าสมมูลของอะตอมบริเวณผิวหน้าจะดีกว่าบริเวณที่เป็นช่วงกว้าง (Bulk Phase) ถ้าวัสดุที่สามารถหาสมมูลที่ผิวหน้าก็จะเกิดการแยกตัวของอะตอม สมที่ได้นี้เกิดจากการเกิดรูปร่างผิวขากกลม ซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิวเล็กที่สุด (และบอกพลังงานที่ผิว) ใช้สำหรับบอกปริมาตรของวัสดุ หยดเล็กๆ ของของเหลวหรือฟองของก๊าซจะเป็นวงกลมเนื่องจากอะตอมมีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่สมมูลบริเวณพื้นผิว (Surfactants) เป็นสารประกอบซึ่งดูดซับได้ดีที่บริเวณส่วนเชื่อมต่อดังนั้นความตึงผิวจึงน้อย โมเลกุลที่ผิวจะเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว แต่ละโมเลกุลจะมี Hydrophilic End (ของน้ำ) และ Hydrophobic (กลับขั้ว) ดังนั้นโมเลกุลจะเรียงตัวที่ขอบระหว่าง 2 ส่วนไม่สามารถรวมกันได้ โดยที่ Hydrophilic ในน้ำและ Hydrophobic End ในของเหลวไม่มีขั้ว การเรียงตัวนี้จะต่ำกว่า Interfacial Energy มันเป็นไปได้ที่จะกระจายของเหลวภายในมวลของหยดน้ำเล็กๆ สารกักกระจายฟองอากาศมีลักษณะเป็นโมเลกุลโซ่ยาวๆ (Long-Chain Molecule) กับกลุ่มขั้วที่ปลาย ดังนั้นจะมาเป็นความเข้มข้นที่ผิวหน้าอากาศและของเหลวกับกลุ่มของขั้วในของเหลวและส่วนที่ไม่มีขั้ว ฟองอากาศจะถูกสร้างขึ้นจากอากาศที่ค้างอยู่ แต่เมื่อมีสารลดแรงตึงผิวแล้ว ฟองอากาศก็จะถูกทำลายเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลว สารลดแรงตึงผิวมีความตึงผิวน้อยกว่าและทำให้เกิดเสถียรภาพมากกว่า สารลดแรงตึงผิว (AE) มีส่วนประกอบโดยง่ายอย่างเช่น กลีโกลิซอเลียมของไขมันหรือกรด Alkyl Aryl Sulfuric แต่บางตัวนอกเหนือจากนี้อาจมีความซับซ้อน

2.5 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการและประหยัด คุณสมบัติของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบ การควบคุมคุณภาพของวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างมาก นอกจากนี้ การควบคุมการทำงานและการทดสอบที่เป็นมาตรฐานเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และต้องให้ความสำคัญต่อความสามารถเท่าใด กำลังและความคงทนของคอนกรีต ความสามารถทำงานได้ง่ายเมื่อคอนกรีตยังหลวมอยู่ สามารถรับแรงกระทำเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วและเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตสามารถทนทานต่อการใช้งานในสภาพต่างๆ ภายหลังจากการออกแบบส่วนผสมแล้ว จะต้องมีการทดลองผสมเพื่อตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตทั้งในห้องปฏิบัติและในภาคสนาม ซึ่งหากส่วนผสมไม่เป็นไปตามที่ต้องการจำเป็นต้องมีการปรับส่วนผสมใหม่ ทั้งนี้การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จริงในการผสมและทำคอนกรีต ย่อมทำให้เกิดความมั่นใจว่าจะได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพที่ต้องการ

2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : SEM

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Optical Microscope
2. Electron Microscope
 - Scanning Electron Microscope (SEM) สำหรับดูพื้นผิวของตัวอย่าง
 - Transmission Electron Microscope (TEM) สำหรับดูโครงสร้างภายในของตัวอย่าง

2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสง โดยใช้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าบังคับกระแสนอิเล็กตรอนให้พุ่งไปรวมกันที่จุดใด จุดหนึ่ง บนตัวอย่างในทำนองเดียวกับการใช้เลนส์รวมแสงไปที่จุดโฟกัสในกล้องจุลทรรศน์ แบบธรรมดาซึ่งจะได้ภาพจะเกิดขึ้นบนจอมอนิเตอร์โดยสามารถที่จะเลือกบริเวณ ที่จะดูได้อย่างสะดวก โดยระบบของ เครื่องจะอยู่ในสภาพสุญญากาศ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขา เพราะใช้ส่องให้มองเห็นรูปร่าง ลักษณะของแบคทีเรีย ไวรัส และผลึกที่ประกอบขึ้นเป็นโลหะซึ่งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้

2.6.2 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

ด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary Electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ (High Voltage) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบบนชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะได้สัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary Electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered Electron) หรือ X-Ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดย Detector แต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด จากภาพแสดงถึงระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน โดยเริ่มตั้งแต่แหล่งกำเนิดพลังงานอิเล็กตรอน (Electron Gun) ระบบเลนส์ (Electro Magnetic Lens) สัญญาณภาพต่างๆ (Signal Images) ตลอดจนหัวดักจับสัญญาณต่างๆ (Signal Detectors) ที่ให้ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน

2.6.3 ลักษณะของสัญญาณชนิดต่างๆ

Secondary Electrons ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวจริงของวัตถุมีลักษณะสูงต่ำและร่องรอยที่เกิดขึ้นจริงบนวัตถุ

Back Scattered Electrons ให้ข้อมูลในลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุในลักษณะแบ่งเป็นเฟสสว่างและเฟสมืด ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ (Z) ที่ผสมอยู่ในวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า

X - Ray ให้ข้อมูลลักษณะบอกเป็นธาตุที่ประกอบอยู่ในวัตถุนั้น โดยแสดงออกมาเป็นกราฟหรือพื้นที่ภาพที่แทนด้วยสีเพื่อบอกตำแหน่งที่อยู่ของธาตุนั้นๆ

2.6.4 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) สามารถแบ่งระบบการทำงานออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. High Vacuum Mode ระบบภายใน Column, Specimen Chamber จะมีความเป็นสุญญากาศสูงประมาณ 10^{-5} - 10^{-6}

2. Variable Pressure Mode ระบบภายใน Column จะเป็นสุญญากาศสูง แต่ภายใน Specimen Chamber จะสามารถปรับแรงดันสุญญากาศได้ตั้งแต่ 1 - 400 Pa.

2.6.4.1 ลักษณะตัวอย่างที่จะสามารถดูในโหมด High Vacuum Mode

1. ต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ถ้าตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องทำการเตรียมตัวอย่างให้นำไฟฟ้าเสียก่อน

2. ต้องมีลักษณะแห้งไม่มีการระเหยของสารใดๆ

3. ต้องมีขนาดเล็กที่จะสามารถวางบนที่ติดตัวอย่างได้ โดยปกติอยู่ที่ กว้าง ยาว สูง ไม่เกินประมาณ 1 เซนติเมตรหรือมีลักษณะเป็นผง

ประโยชน์ของ High Vacuum Mode เป็นโหมดที่ใช้ความสามารถของเครื่อง SEM ได้เต็มที่ที่สุดในการดูพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะให้ภาพที่คมชัด และใช้กำลังขยายที่สูงกว่า VP Mode ซึ่งความคมชัดของภาพขึ้นกับความนำไฟฟ้าของตัวอย่างด้วย

2.6.4.2 ระบบแบบปรับแรงดันสุญญากาศ (Variable Pressure Mode)

จุดประสงค์และประโยชน์ของระบบ Variable Pressure (VP SEM)

1. สามารถดูตัวอย่างได้โดยตรง โดยลดขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างและไม่ต้องเคลือบผิวด้วยวัสดุนำไฟฟ้า ทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้โดยไม่ทำลายพื้นผิว (Non Destructive Analysis)

2. สามารถดูตัวอย่างได้ทุกชนิดที่มีความชื้น เช่น วัสดุศาสตร์ และชีววิทยา

3. ลดการ Charge up ที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้พื้นผิวตัวอย่างถูกทำลาย

4. ทำให้วิเคราะห์ตัวอย่างได้รวดเร็วขึ้น โดยลดแรงดันสุญญากาศลง

หลักการการทำงานของระบบ VP โครงสร้างของ VP SEM สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็น (High Vacuum) ประกอบด้วย

- Electron Gun
- Column (CL, OL)
- Differential Pumping Aperture (DPA)
- Pumping System (TMP, RP)
- Chamber Isolation Valve
- Penning Gauge

2. ส่วนที่สามารถปรับแรงดันสุญญากาศ (Variable Pressure) ประกอบด้วย

- Specimen Chamber
- Leak Valve
- Pirani Gauge
- 3 Way Valve

การทำงานของ VP SEM

1. ในส่วนของคอลัมน์ที่เป็น High Vacuum จะทำงานภายใต้สุญญากาศตั้งแต่ $8.50e^{-005}$ mBar จนถึง $1.65e^{-006}$ mBar

2. ในห้องใส่ตัวอย่าง (Specimen Chamber) สามารถปรับแรงดันสุญญากาศได้ระหว่าง 1 - 400 Pa. โดยมี Chamber Isolation Valve ปิดกั้นระหว่าง Pumping System กับ Specimen Chamber และด้านบนจะมี Differential Pumping Aperture ซึ่งเป็นแผ่นโลหะกลมเจาะรูเล็กๆ ตรงกลาง ปิดกั้นแรงดันสุญญากาศ ระหว่าง Specimen Chamber กับ Electron Column

3. Leak Valve จะทำหน้าที่ปล่อยให้อากาศภายนอกเข้าไปภายในห้องใส่ตัวอย่างตามจำนวนที่กำหนด เพื่อให้มี Gas Molecules เป็นตัวกลางลดประจุอิเล็กตรอนที่สะสมอยู่บนพื้นผิวตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ Charge up ในกรณีที่ตัวอย่างไม่นำกระแสไฟฟ้า และ 3 Way Valve จะเปิดดูดอากาศออกจากภายในห้องใส่ตัวอย่างเพื่อให้ได้สุญญากาศตามที่ต้องการ

4. เมื่อ Incident Electron Beam กระทบกับพื้นผิวตัวอย่างทำให้เกิดพลังงานสัญญาณต่างๆ เช่น Secondary Electron, Backscattered Electron and X-Ray etc.

5. โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ที่ปรับแรงดันสุญญากาศได้ จะรับเพียงสัญญาณของ Backscattered Electron ซึ่งมีความเข้มของพลังงานที่สามารถผ่านโมเลกุลแก๊สไปได้ ดังนั้นในระบบ VP Mode ทั่วไปจึงต้องใช้ Backscattered Electron Detector (BSD) ไปตรวจจับสัญญาณ ทำให้ได้ภาพที่มีรายละเอียดแสดงส่วนประกอบโครงสร้างของตัวอย่าง (Compositional Image) เท่านั้น

6. LEO ได้ผลิต Detector ที่สามารถตรวจจับสัญญาณจากพื้นผิวของตัวอย่างภายใต้ระบบ VP Mode ซึ่งเรียก Detector นี้ว่า VPSE Detector เนื่องจาก Secondary Electron ต่งออกมา กระทบเข้ากับโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ภายในห้องใส่ตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณของ Photons Emission ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีรายละเอียดพื้นผิวของตัวอย่าง เหมือนกับดูจาก Secondary Electron โดยตรง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มอก. 15-2532

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทั่วไปของซีเมนต์ประเภทที่ 1

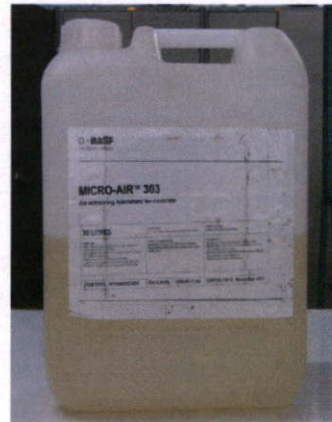
Cement	Fineness (cm^2/g)	Density (g/cm^3)	Mineral Composition (Mass %)					Ig. Loss (Mass %)
			C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaSO_4	
Type I	3300	3.15	62.4	13.5	8.3	8.5	2.4	2.00

3.1.2 สารเคมี (Admixtures)

- สารกักกระจายฟองอากาศชนิด Darex AEA ดังรูปที่ 3.1(a)
- สารกักกระจายฟองอากาศชนิด Micro air ดังรูปที่ 3.1(b)



(a) สารกักกระจายฟองอากาศ Darex AEA



(b) สารกักกระจายฟองอากาศ Micro air

รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.3 น้ำ (Water) มีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องไม่มีวัตถุหรือสิ่งของที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งทำให้สี กลิ่น และรสของน้ำ เปลี่ยนไปจากธรรมชาติ
2. ความเป็นกรด-เบสของน้ำ (pH) ต้องมีค่าระหว่าง 5.0-9.0
3. ออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีหรือบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ในน้ำ ต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 °C
6. แรงตึงผิวของน้ำเท่ากับ 72 dynes/cm ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.1.4 เครื่องผสมซีเมนต์เพสท์ (Hobart Type)

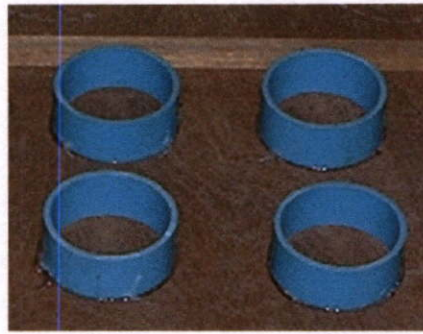
สำหรับผสมซีเมนต์และน้ำ ให้คลุกเคล้ากันดี ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องผสมซีเมนต์เพสท์ (Hobart Type)

3.1.5 ชุดอุปกรณ์การหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสท์แข็งตัว อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

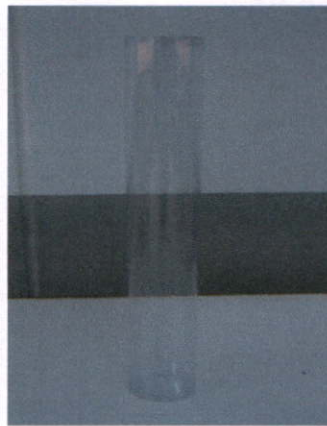
1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3
2. ถาดสังกะสี (Pan)



รูปที่ 3.3 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร

3.1.6. ชุดอุปกรณ์ทดสอบปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4
2. คินน้ำมัน
3. ตู้อบอุณหภูมิ 105° C ดังรูปที่ 3.5
4. ตู้อบอุณหภูมิ 950° C ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 แบบหล่อขึ้นตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 เตาอบที่อุณหภูมิ 105° C



รูปที่ 3.6 เตาอบที่อุณหภูมิ 950° C

3.1.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.7
2. จุกยาง ดังรูปที่ 3.8
3. หลอดปิเปต ดังรูปที่ 3.9
4. แผ่นฟิล์ม (Micro film)



รูปที่ 3.7 ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร



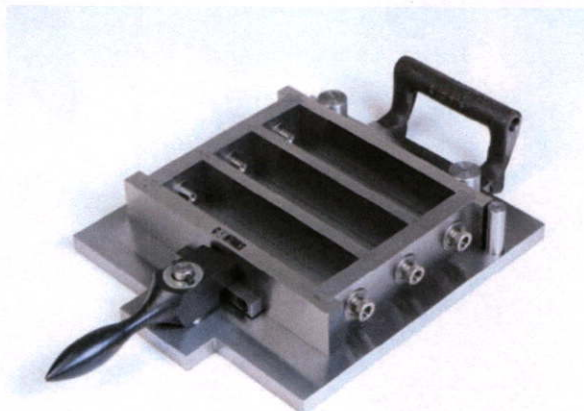
รูปที่ 3.8 จุกยาง



รูปที่ 3.9 หลอดปิเปต

3.1.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ (Autogenous Shrinkage) ตามมาตรฐาน JIS A 1129 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. แบบหล่อขึ้นตัวอย่างขนาด กว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.10
2. เครื่องวัดค่าการยืดหดตัว ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง ขนาด กว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตร

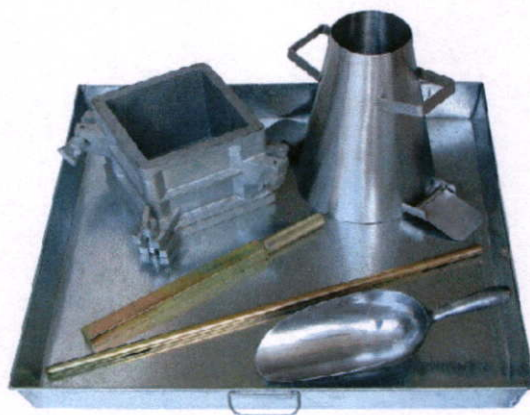


รูปที่ 3.11 เครื่องวัดการหดตัว

3.1.9 ชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 เซนติเมตร
2. เหล็กกระทุ้ง หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว

3. น้ำยาและแปรงทาแบบ
4. ช้อนตัก
5. เครื่องเหล็ก
6. แผ่นพลาสติก
7. เครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.1.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 g



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม

3.2 วิธีการทดสอบ

การดำเนินการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 5 การทดสอบ คือ

1. การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04
2. การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312
3. การทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312
4. การทดลองสำหรับการทดลองการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129
5. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108

3.2.1. การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04

ใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 5 เซนติเมตร ด้านหนึ่งเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 นำมาเทลงในแบบ ไล่ฟองอากาศปาดผิวหน้าทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างโดยทดสอบก่อนทำการบ่ม (หลังจากถอดแบบ) และทดสอบหลังจากบ่มมาแล้ว โดยทำการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และปล่อยให้แห้งไว้ในอากาศ ทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาจนอายุของซีเมนต์เพสต์ครบ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบ นำเข้าเตาอบ

$50 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและวัดขนาด ทำการทดสอบโดยวางในสภาพที่เรียบที่มีน้ำและอากาศที่มี AE ความเข้มข้น 1% ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นระยะจนครบ 7 วัน โดยคำนวณหาความสามารถการซึมผ่าน ได้สมการดังนี้

$$\text{Weight of Penetration water} = \frac{(W_n - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ Weight of Penetration water = เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ซึมผ่าน

W_0 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_n = น้ำหนักตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ (กรัม)



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างในการทดสอบหาความสามารถการซึมผ่าน

3.3.2 การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312

ใช้แบบพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 และสูง 40 เซนติเมตร ด้านหนึ่งของหลอดพลาสติกเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 โดยเทชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร และทำการกระทุ้ง จนถึงความสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยทำการบ่มด้วยวิธีการบ่มด้วยน้ำบริสุทธิ์ ด้วยน้ำผสม AE ความเข้มข้น 1% โดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาจนอายุครบ 28 วัน และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จนได้อายุที่ 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงเทน้ำบ่มที่ผิวบนของตัวอย่าง ในปริมาณที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการบ่ม เมื่อครบกำหนด 28 วัน จึงนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ออกมาตัดเป็น 6 ส่วน ขนาดเท่าๆ กัน สูงประมาณ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.12 นำตัวอย่างทั้ง 6 ส่วน ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{105^\circ\text{C}}$)

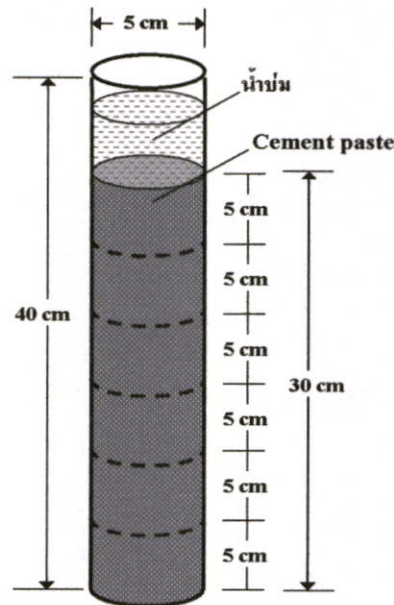
และนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{950^{\circ}\text{C}}$) คำนวณหาค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สมการดังนี้

$$\text{Degree of Hydration} = \frac{M_{105^{\circ}\text{C}} - M_{950^{\circ}\text{C}}}{M_{950^{\circ}\text{C}}} \times \frac{100}{23} \quad (3.2)$$

โดยที่ Degree of Hydration = ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$M_{105^{\circ}\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 105 °C หน่วยเป็นกรัม (g)

$M_{950^{\circ}\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 950 °C หน่วยเป็นกรัม (g)



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างในการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Penetration)

3.3.3 การทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312

ใช้ขวดแก้วปากกว้าง 2.5 และสูง 7 เซนติเมตร นำไปชั่งน้ำหนัก (M_1) ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30, และ 0.44 เมื่อผสมคลุกเคล้ากันดีแล้ว นำมาใส่ในขวดแก้ว โดยให้ซีเมนต์เพสต์สูงจากก้นขวดแก้วประมาณ 2 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนัก (M_2) ทำการเทน้ำและน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศ ความเข้มข้น 1% ลงขวดแก้วอย่างช้าๆ จนเต็มนำจุกยางมาปิดให้สนิท ซึ่งจุกยางนี้จะเจาะรูตรงกลางจุกยางเพื่อใส่หลอดปิเปตเข้าไปในจุกยาง หลังจากปิดจุกยาง

เรียบร้อย น้ำจะดันขึ้นมาในหลอดปิเปต อุดรูอากาศรอบๆ จุกยางด้วยกาว เพื่อให้เป็นระบบปิด ปิดปากหลอดปิเปตด้วยแผ่นฟิล์ม (Micro film) เพื่อไม่ให้น้ำในหลอดปิเปตระเหยออกไป และจดค่าระดับน้ำในหลอดปิเปตที่ลดลง เป็นระยะๆ ทุกๆ วันจนครบ 28 วัน คำนวณ หาค่าการหดตัวทางเคมี ได้สมการดังนี้

$$V_p = \frac{(M_2 - M_1) \times (w/c) / D_w + 1 / D_c}{(w/c) + 1} \quad (3.3)$$

โดยที่ V_p = ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ในขวดแก้ว หน่วยเป็นมิลลิลิตร (mL)

M_1 = น้ำหนักของขวดแก้ว หน่วยเป็นกรัม (g)

M_2 = น้ำหนักซีเมนต์เพสต์และขวดแก้ว หน่วยเป็นกรัม (g)

w/c = อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

D_w = ความหนาแน่นของน้ำ หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร (g/mm^3)

D_c = ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

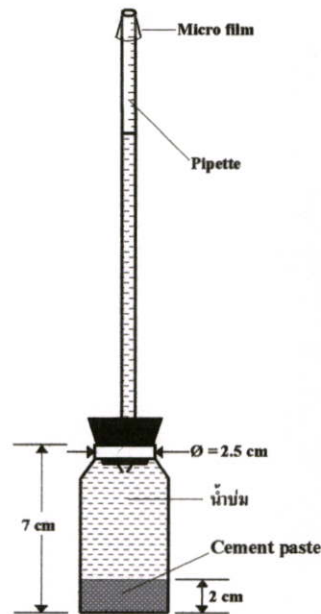
$$Shy = \frac{H_n - H_o}{V_p} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ Shy = ค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ที่ระยะเวลาต่างๆ

H_n = ระดับน้ำที่จุดเริ่มจับเวลา หน่วยเป็นมิลลิลิตร (mL)

H_o = ระดับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ หน่วยเป็นมิลลิลิตร (mL)

ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า Shy ในแนวแกน y และระยะเวลาในแนวแกน x หาสมการเส้นแนวโน้มของกราฟนี้ แทนค่าในสมการ โดยสมมุติให้ค่าในแกน x เป็นระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ เพื่อหาค่าในแกน y เป็นการเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งก็คือค่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ 100% เช่นกัน การเปรียบเทียบค่า Shy ที่ระยะเวลาต่างๆ เป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างในการทดสอบการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage)

3.3.4 การทดลองสำหรับการทดลองการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129

เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาดกว้าง 4 สูง 4 ยาว 16 เซนติเมตร ติดตั้งเกจปลັกดและวัดระยะบันทึกค่า (L_0) ผสมซีเมนต์เพสต์ในอัตราน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 โดยแบ่งการเทซีเมนต์เพสต์เข้าแบบเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน แล้วทำการปาดหน้าซีเมนต์เพสต์ให้เรียบ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วถอดแบบหลังจากถอดแบบวัดระยะของตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบบันทึกค่า (X_0) จากนั้นนำตัวอย่างมาทำการบ่มโดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลา และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วันแล้วจึงทำการบ่มตัวอย่าง โดยวัดระยะของตัวอย่างทุกๆ วันจนอายุครบกำหนดบันทึกค่า (X_n) คำนวณหาค่าการหดตัว ได้สมการดังนี้

$$\text{Autogenous Shrinkage} = \frac{(X_0 - X_n)}{L_0} \quad (3.5)$$

โดยที่ Autogenous Shrinkage = ค่าการหดตัว

X_0 = ระยะเริ่มต้นที่อายุ 1 วันหลังถอดแบบ (มิลลิเมตร)

X_n = ระยะที่อายุ 2 วันถึงอายุ 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_0 = ระยะห่างของหัวเกจปลັกด (มิลลิเมตร)



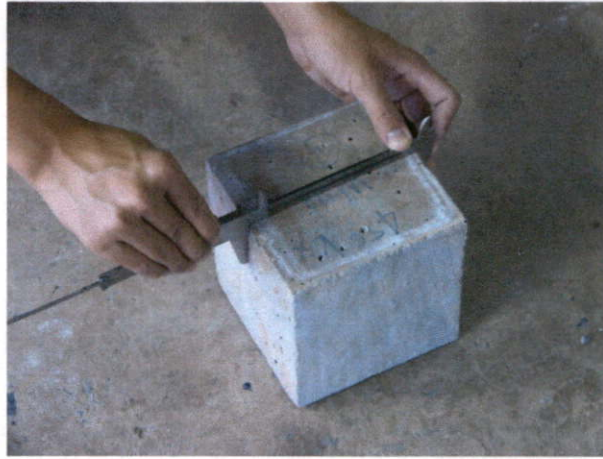
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างในการทดสอบหาความหกดัด

3.3.4. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108

ใช้แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108 ทำความสะอาดแบบหล่อคอนกรีต แล้วทาน้ำมันที่ผิวในทุกด้าน ตักคอนกรีตใส่แบบโดยแบ่งเป็น 3 ชั้นชั้นละเท่าๆ กัน โดยประมาณ ในแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็ก 25 ครั้ง ตัวอย่างคอนกรีตที่กระทุ้งเสร็จปาดผิวหน้าให้เรียบ คลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องแล้วนำมาทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ทดสอบโดยการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4 - 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที กดก่อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณกำลังอัดประลัย

$$\text{การคำนวณกำลังอัดประลัย} = \frac{\text{น้ำหนักกำลังประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \quad (3.6)$$

หน่วยที่ใช้ คือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc.)



รูปที่ 3.19 การวัดขนาดตัวอย่างทดสอบกำลังอัด

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

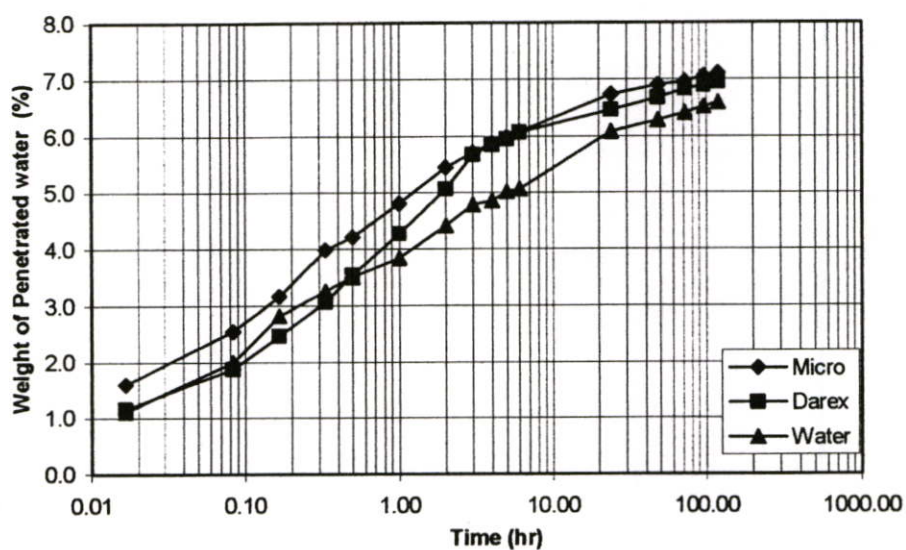
4.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาเพื่อจะได้ทราบพฤติกรรมของสารละลายลดแรงดึงผิวเมื่อใช้ในการบ่มคอนกรีตที่ได้รับการบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องในสภาวะที่แตกต่างกัน โดยการแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 การทดสอบ คือ

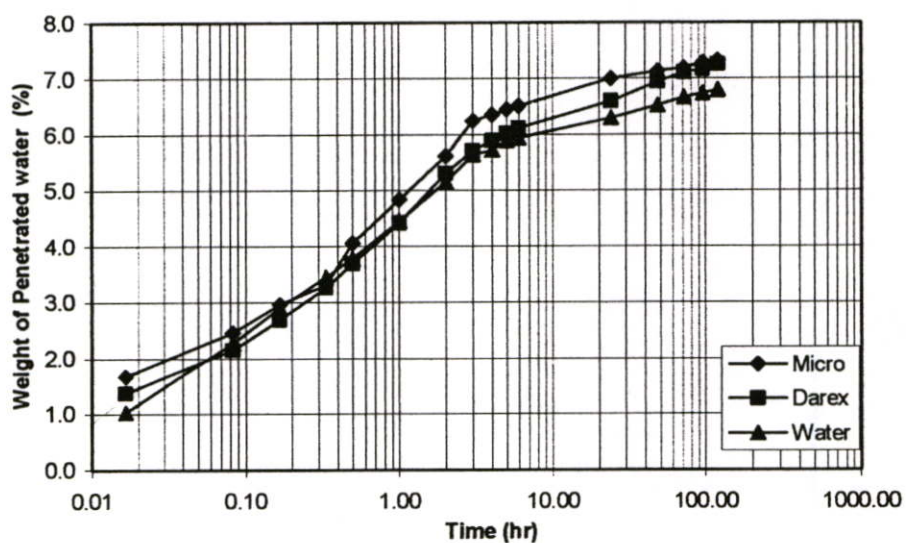
1. การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04
2. การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Hydration) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312
3. การทดสอบสำหรับการหาค่าการค้ำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) อ้างอิง JSCE. No. 767 / V-64, pp. 301-312
4. การทดสอบสำหรับการทดลองการยึดหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129
5. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108
6. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

4.2 การทดสอบสำหรับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 1585-04

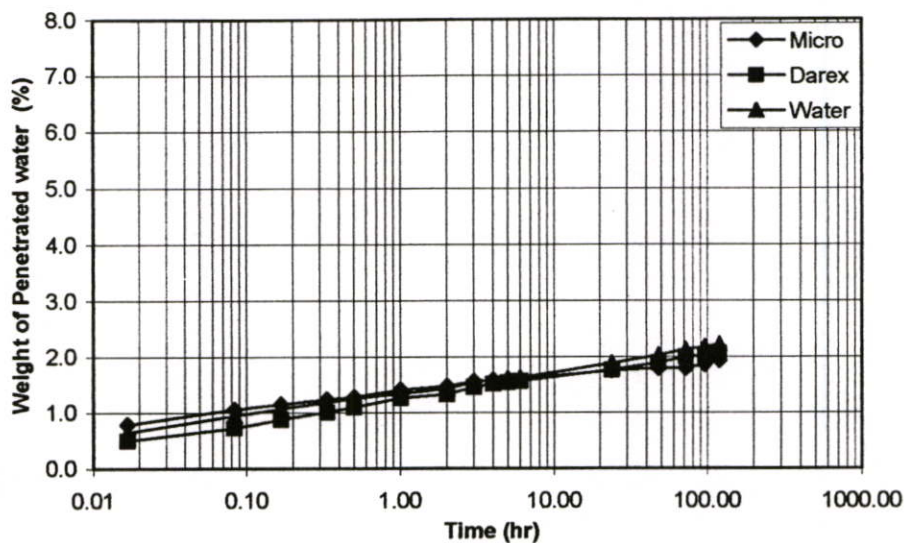
การวัดค่าการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว เป็นการวัดน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากชั้นตัวอย่างได้สัมผัสน้ำแล้ว ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเกิดจากมีน้ำหนักของน้ำที่ทดสอบซึมผ่านเข้าไป เมื่อทำการทดสอบไปเป็นเวลานานๆ น้ำที่ซึมผ่านจะมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ไม่สามารถซึมผ่านได้อีก น้ำหนักของตัวอย่างก็จะคงที่ สภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ เพื่อแสดงให้เห็นค่าการซึมผ่านได้อย่างชัดเจน และก่อนที่ตัวอย่างจะนำมาทดสอบ จะนำไปบ่มด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาค่าการซึมผ่านเปรียบเทียบระหว่างน้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ว่าสารใดที่ยังสามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้มากกว่ากัน



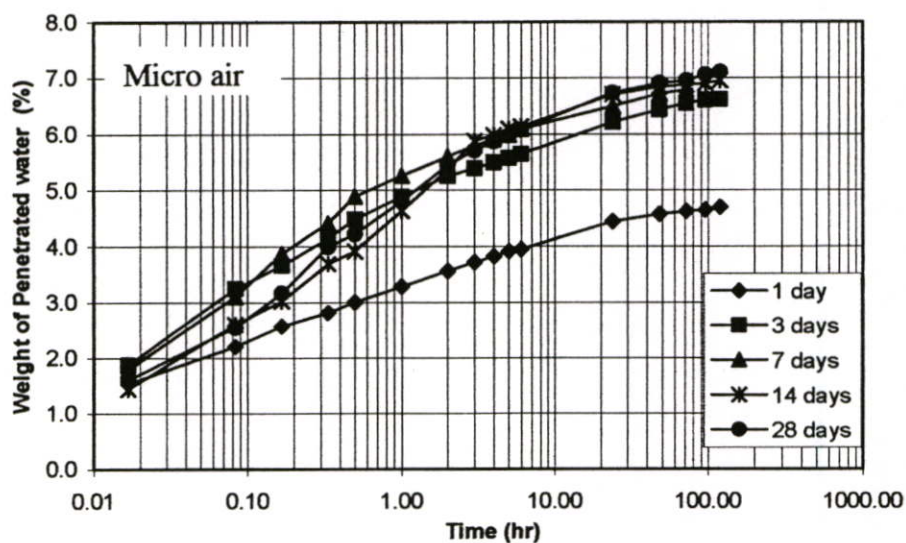
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ ที่อายุ 28 วัน



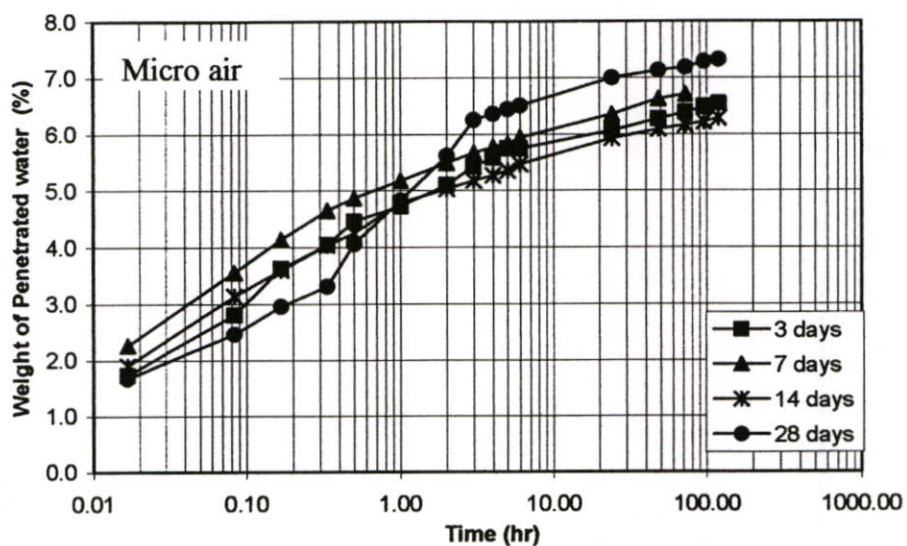
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการบ่มแบบ Wrapping ที่อายุ 28 วัน



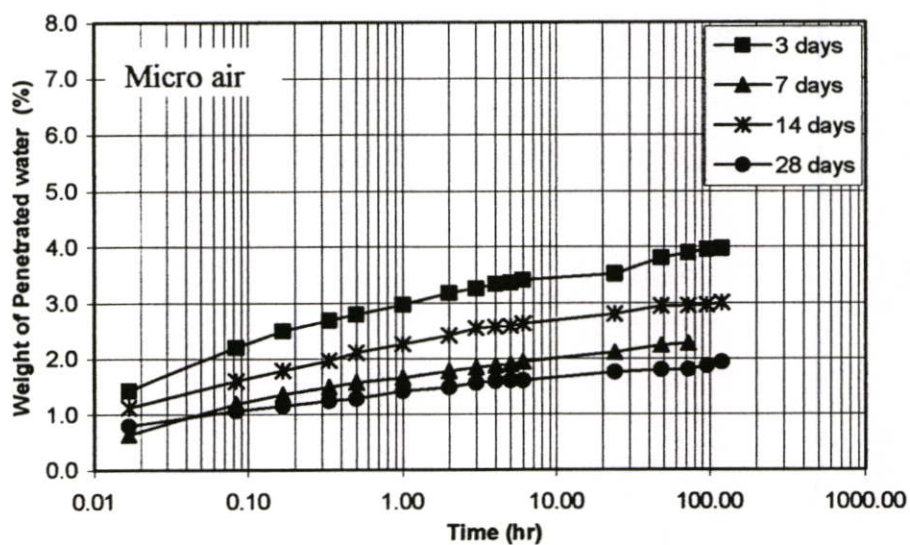
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการบ่มด้วยน้ำ ที่อายุ 28 วัน



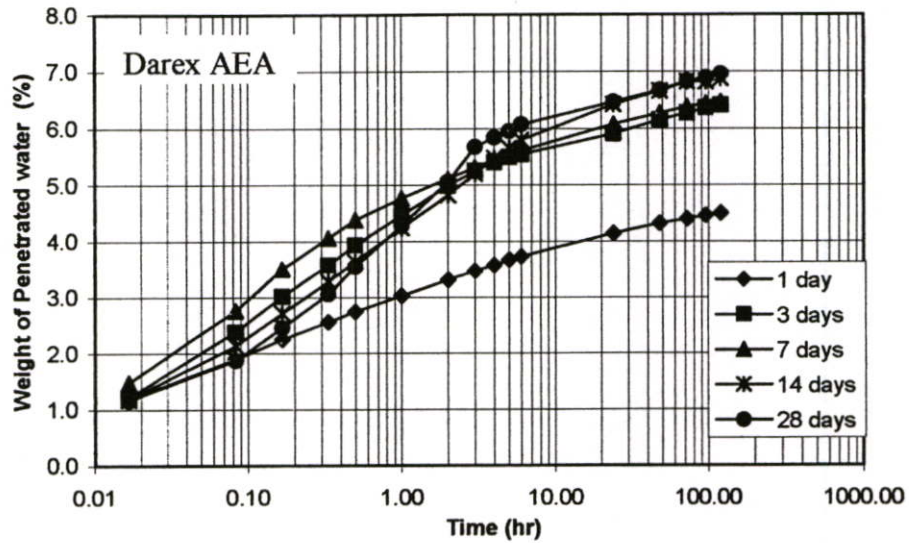
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % ที่ทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ



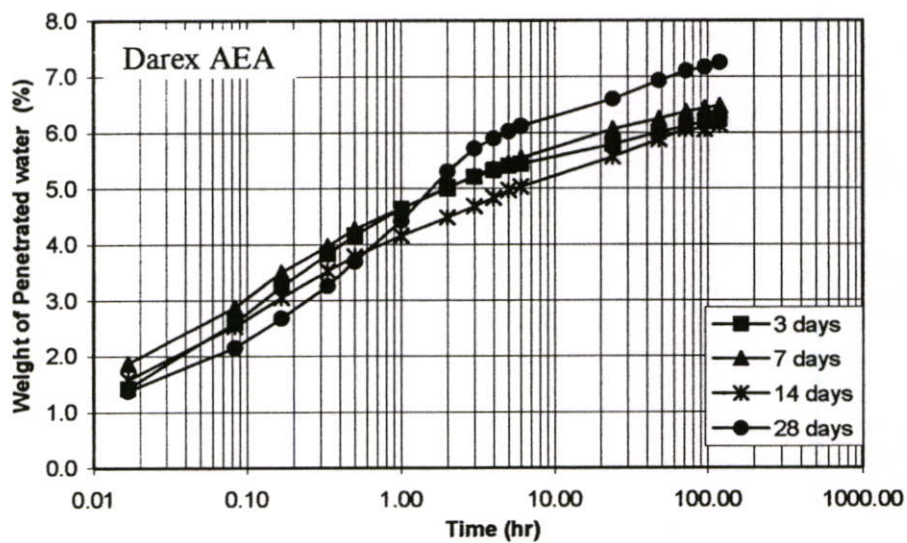
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มแบบ Wrapping



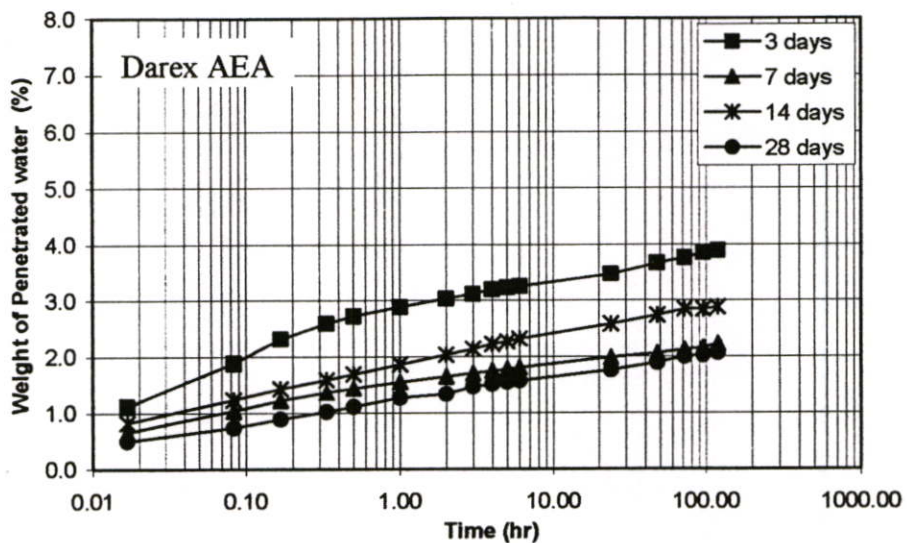
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มด้วยน้ำ



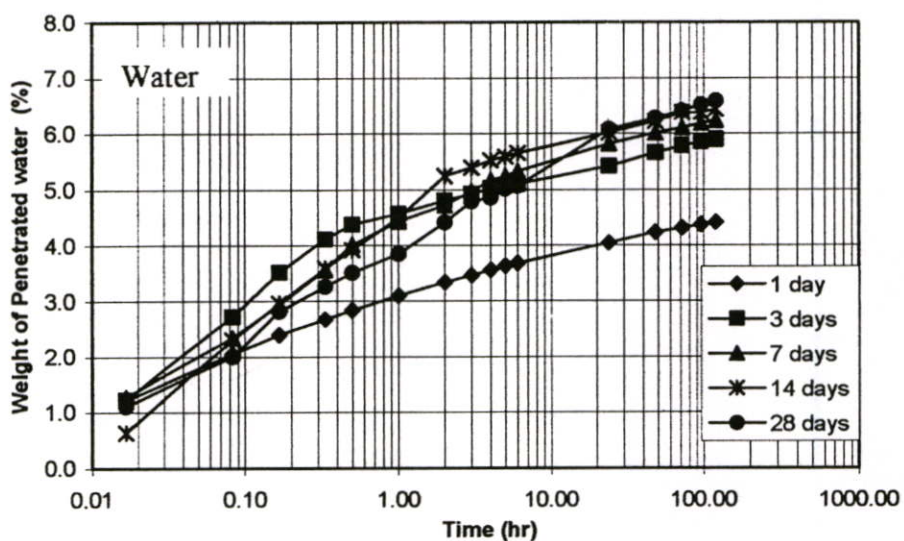
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % ที่ทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ



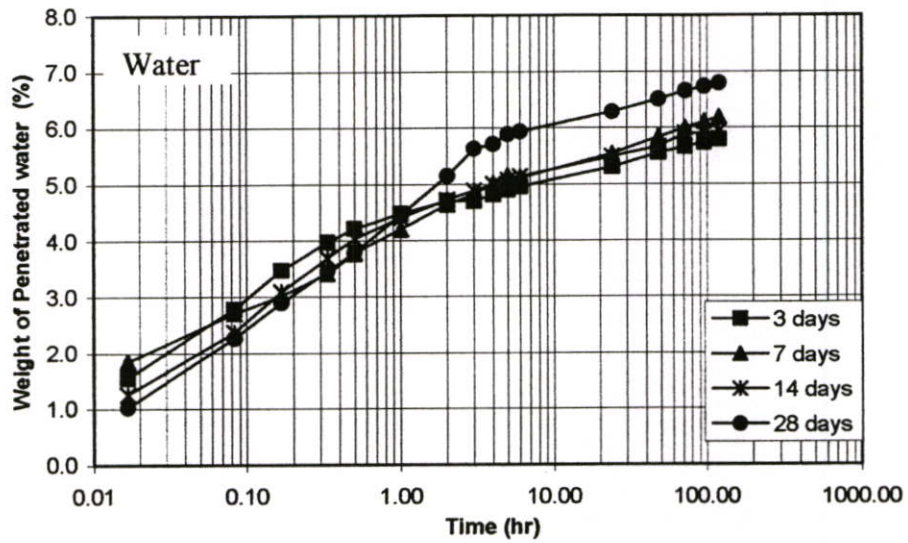
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยทดสอบด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มแบบ Wrapping



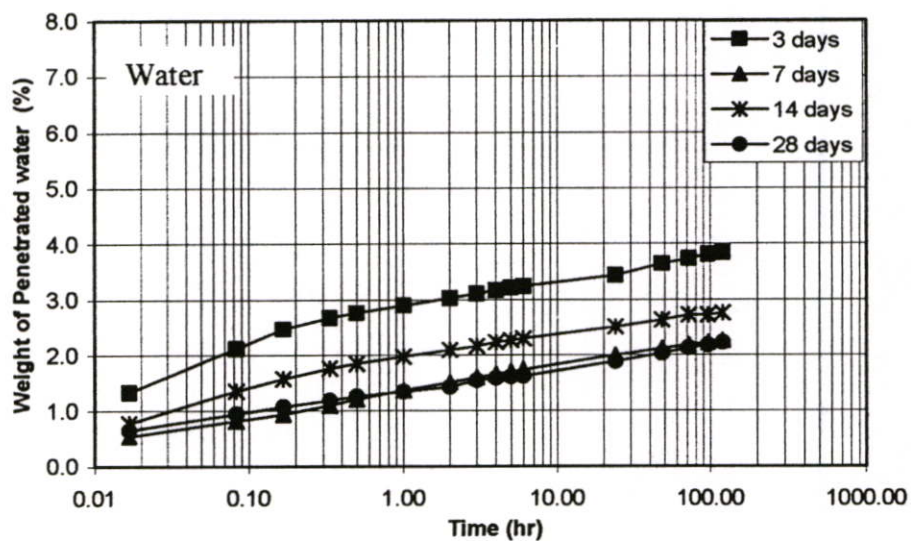
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยทดสอบด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยทำการบ่มด้วยน้ำ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยน้ำ ที่ทำการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยน้ำ โดยทำการบ่มแบบ Wrapping



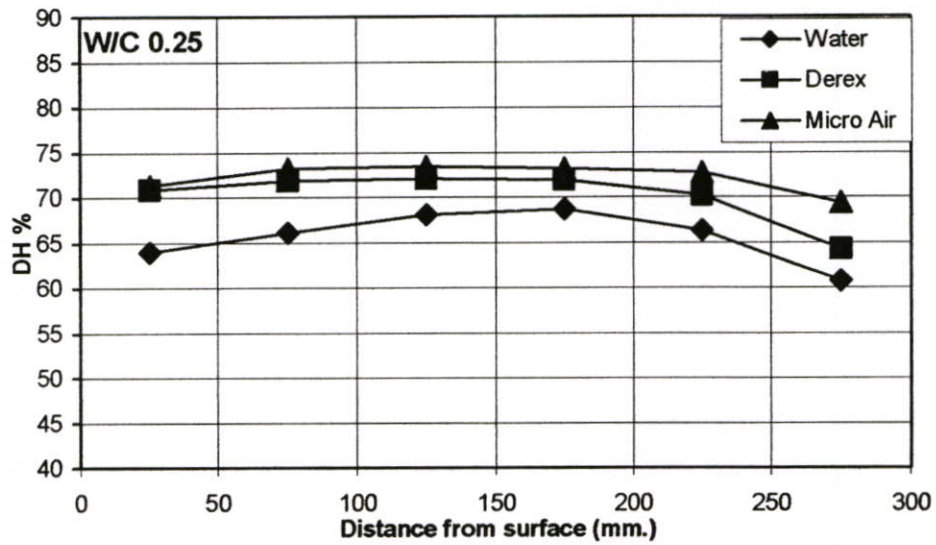
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยน้ำ โดยทำการบ่มด้วยน้ำ

จากรูปที่ 4.1 - 4.4 จะพบว่า การทดสอบตัวอย่างด้วยการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาด้วยการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ ที่อายุ 28 วัน โดยทดสอบด้วยน้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะพบว่า อัตราการซึมผ่านของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าการซึมผ่านที่มากกว่า ตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำ โดยมีผลมาจากน้ำที่มีแรงดึงผิวลดลงทำให้ความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปในตัวสูงขึ้น และจากการทดสอบด้วยการบ่มด้วยอากาศ Wrapping และน้ำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการบ่ม พบว่าการบ่มด้วยอากาศ และ Wrapping มีอัตราการซึมผ่านได้ต่ำกว่าการบ่มด้วยน้ำ เนื่องจากตัวอย่างที่ทำการบ่มด้วยน้ำ ตัวอย่างจะมีความหนาแน่นจากการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ตัวอย่างที่บ่มด้วยอากาศ และ Wrapping ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น

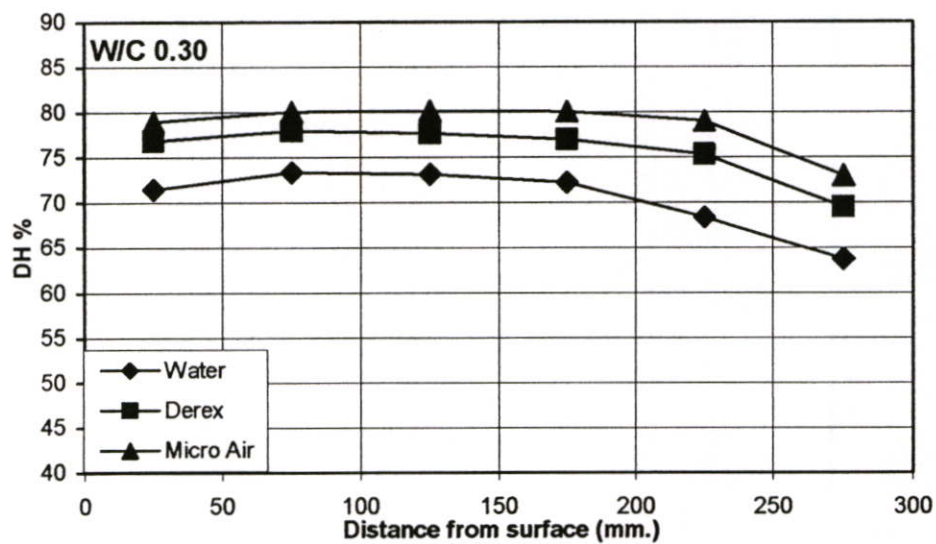
จากรูปที่ 4.5 - 4.12 จะพบว่า การทดสอบตัวอย่างด้วยการบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องจนอายุของซีเมนต์เพสต์ครบ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบ พบว่าการทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด มีอัตราการซึมผ่านที่สูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มแบบปล่อยทิ้งไว้ในอากาศและการบ่มแบบ Wrapping นานขึ้น เนื่องจากน้ำในตัวอย่งระเหยออกไปและไม่มียาน้ำจากภายนอกเข้ามา ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างไม่สมบูรณ์ เป็นผลทำให้ช่องว่างเล็กๆ ที่อยู่ในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ยังมีอยู่ในชั้นตัวอย่างทำให้การซึมผ่านมีมากขึ้น แต่จากการบ่มด้วยน้ำ มีค่ากลับกันคือเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นกลับทำให้อัตราการซึมผ่านมีน้อยลง อันเนื่องมาจากน้ำที่ใช้บ่มซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างเพียงพอ เป็นผลทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น

4.3 ผลการทดสอบการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ (Hydration)

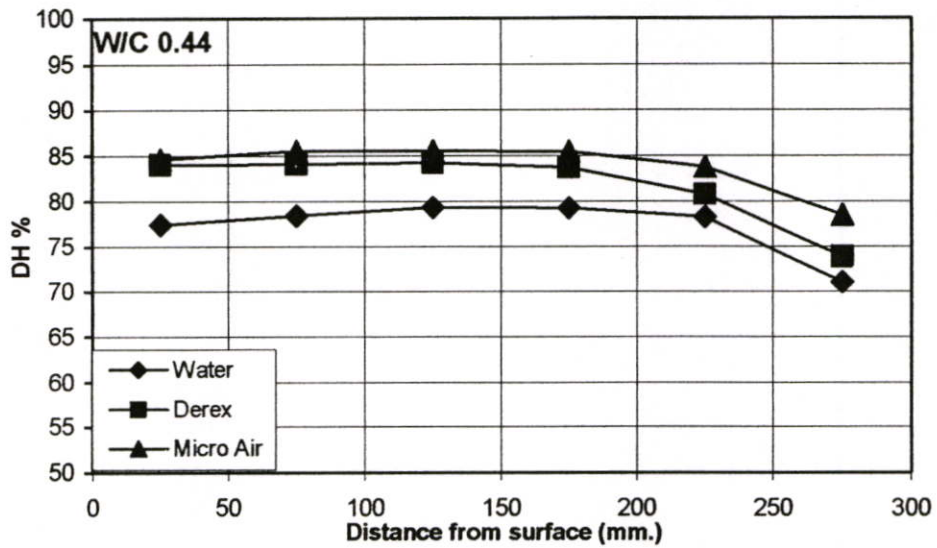
การวัดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ เป็นการวัดการซึมผ่านของน้ำบ่มลงไป ในชั้นความลึกต่างๆ ซึ่งการซึมผ่านของน้ำที่ใช้บ่มนั้นจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปทั่วทั้งตัวอย่าง ในการทดสอบจะเป็นการหาน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างหลังจากผ่านการอบแล้ว ซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปจะนำไปคำนวณหาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน วิธีที่ใช้บ่มทดสอบคือ บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน สภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน



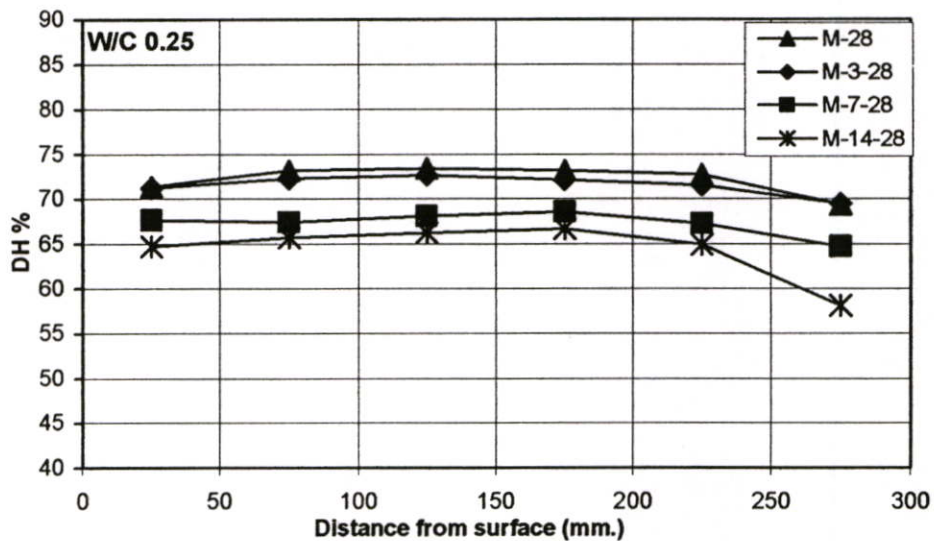
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด ที่อายุ 28 วัน W/C 0.25



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด ที่อายุ 28 วัน W/C 0.30

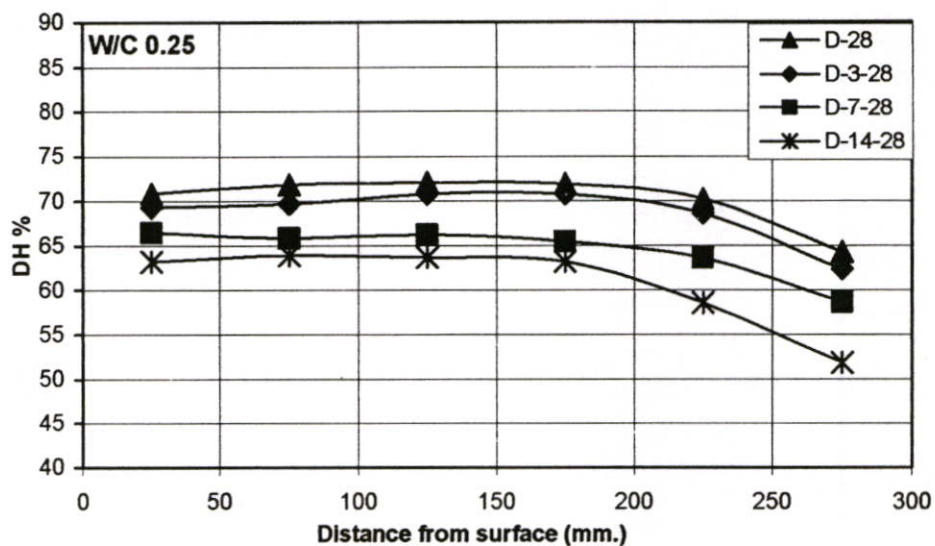


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด ที่อายุ 28 วัน W/C 0.44



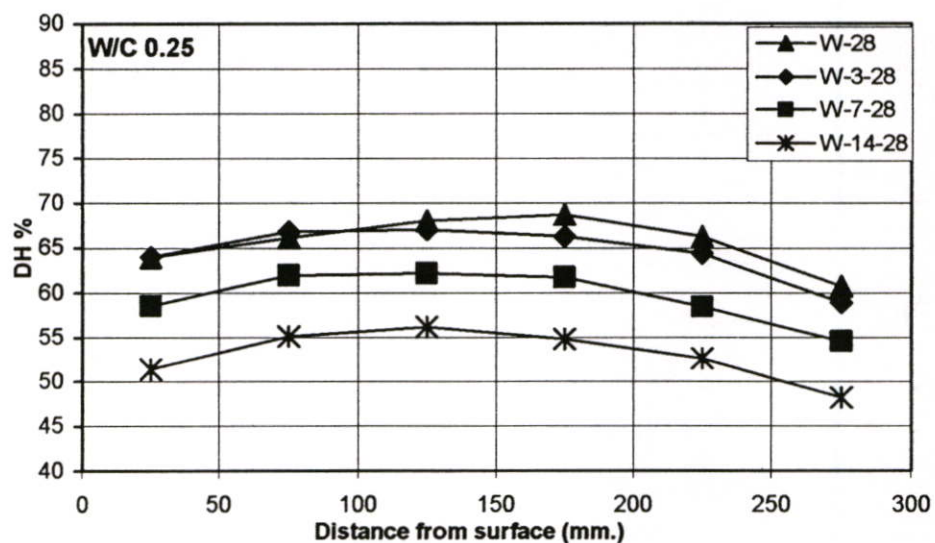
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.25

หมายเหตุ : 1) M-28 หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มตลอดเวลา 28 วันด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ชนิด Micro air
 2) M-3-28, M-7-28 และ M-14-28 หมายถึง ตัวอย่างที่ทำการทิ้งไว้ในห้องทดลองที่อายุ 3, 7, และ 14 วัน แล้วจึงนำมาบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ชนิด Micro air จนอายุ 28 วัน



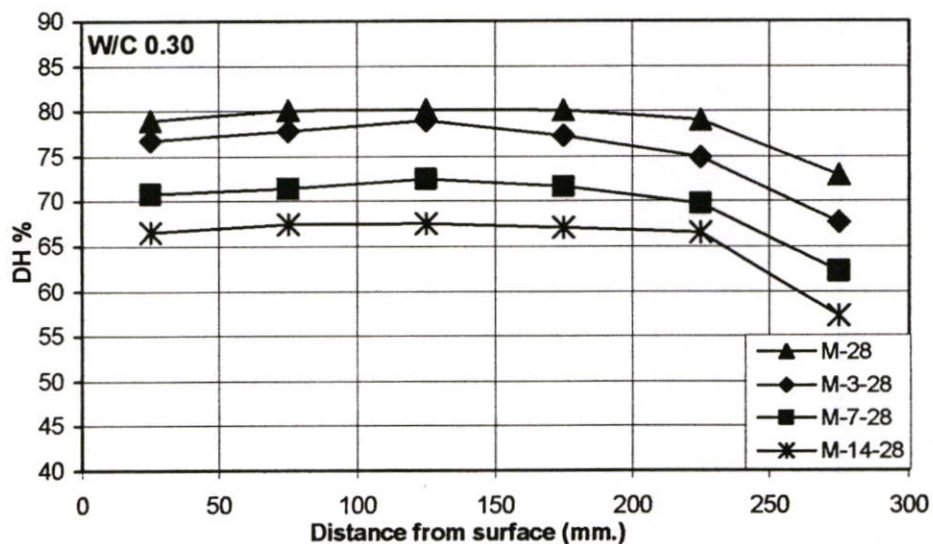
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.25

หมายเหตุ : 1) D-28 หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มตลอดเวลา 28 วันด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ชนิด Darex AEA
 2) D-3-28, D-7-28 และ D-14-28 หมายถึง ตัวอย่างที่ทำการทิ้งไว้ในห้องทดลองที่อายุ 3, 7, และ 14 วัน แล้วจึงนำมาบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ชนิด Darex AEA จนอายุ 28 วัน

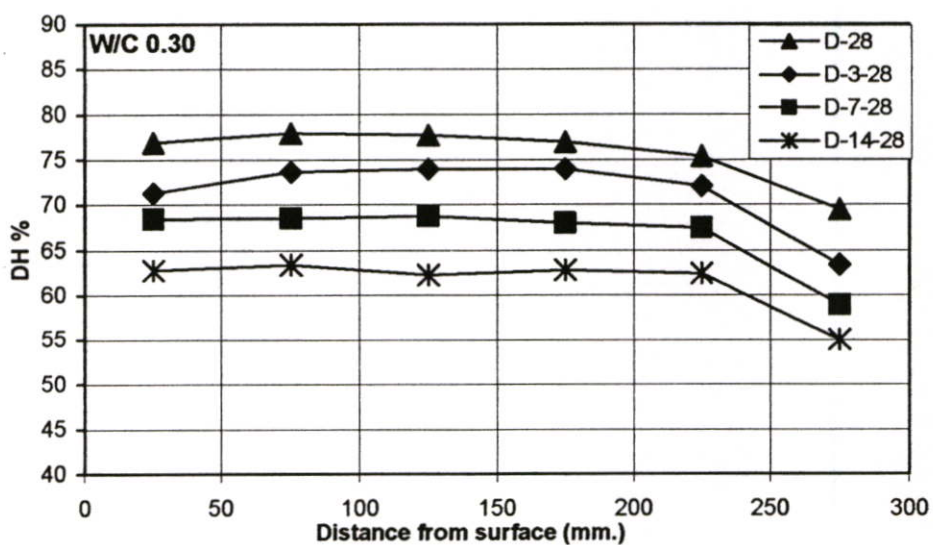


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.25

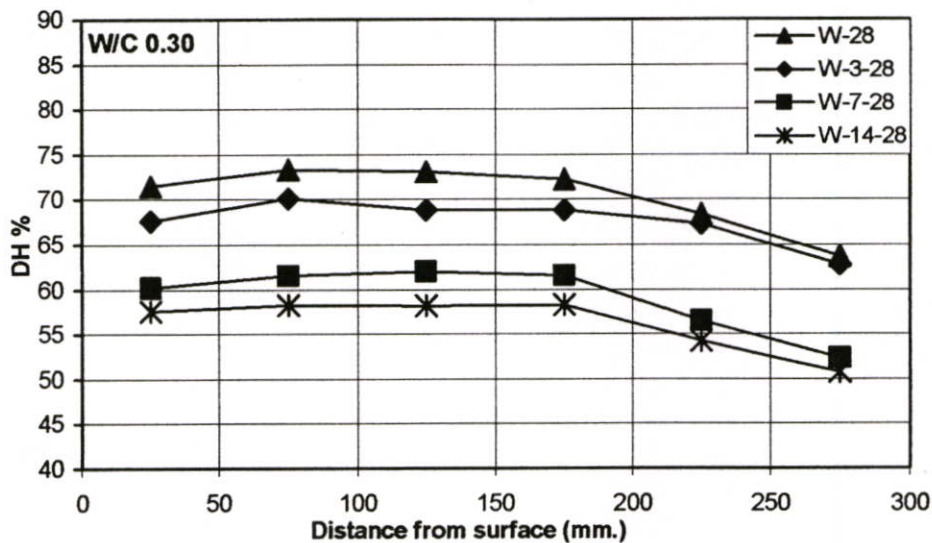
หมายเหตุ : 1) W-28 หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มตลอดเวลา 28 วันด้วยน้ำ
 2) W-3-28, W-7-28 และ W-14-28 หมายถึง ตัวอย่างที่ทำการทิ้งไว้ในห้องทดลองที่อายุ 3, 7, และ 14 วัน แล้วจึงนำมาบ่มด้วยน้ำ จนอายุ 28 วัน



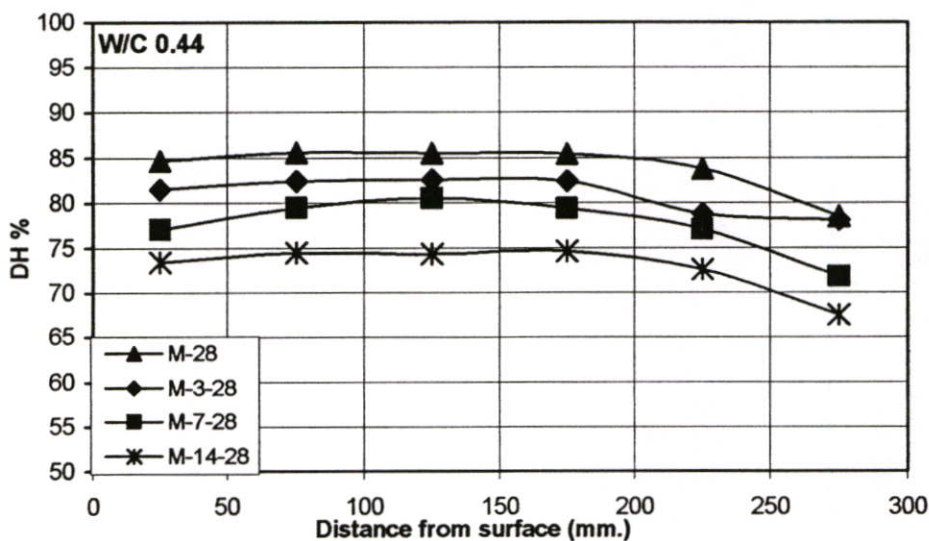
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.30



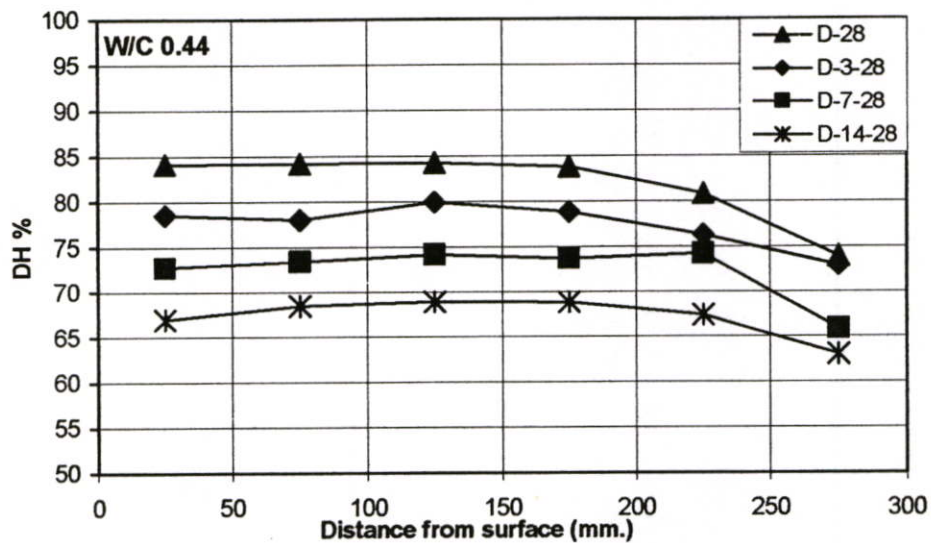
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.30



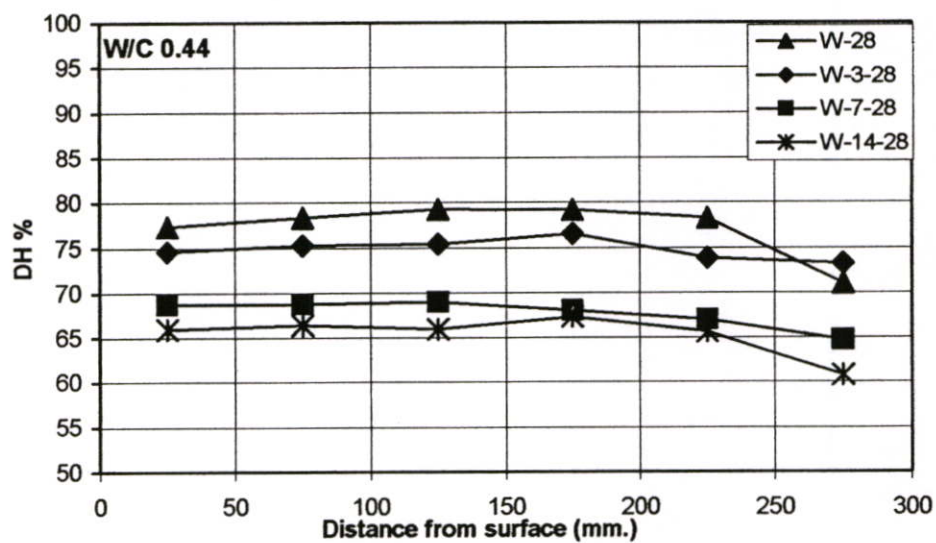
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.30



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Micro air เข้มข้น 1% โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.44



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำผสม Darex AEA เข้มข้น 1 % โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.44



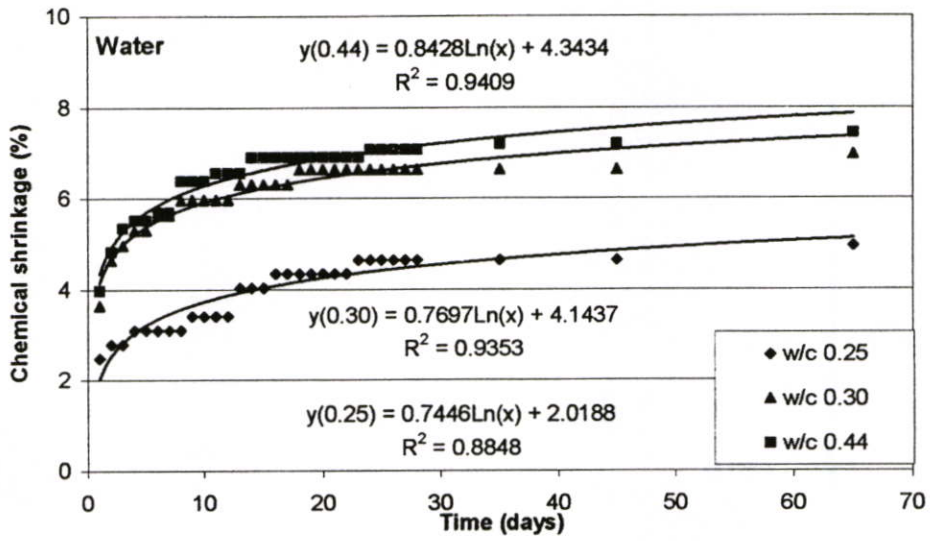
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความลึกของตัวอย่าง ที่ทำการบ่มด้วยน้ำ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่ W/C 0.44

จากรูปที่ 4.13 - 4.15 จะพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 ที่อายุ 28 วัน เมื่อทำการบ่มด้วยน้ำผสมสารลดแรงดึงผิวทั้ง 2 ชนิดจะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันให้สูงขึ้นและยังมีค่าสม่ำเสมอมากกว่าการบ่มด้วยน้ำ โดยมีผลมาจากน้ำที่มีแรงดึงผิวลดลงทำให้ความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างดีขึ้น จึงเป็นผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามมา

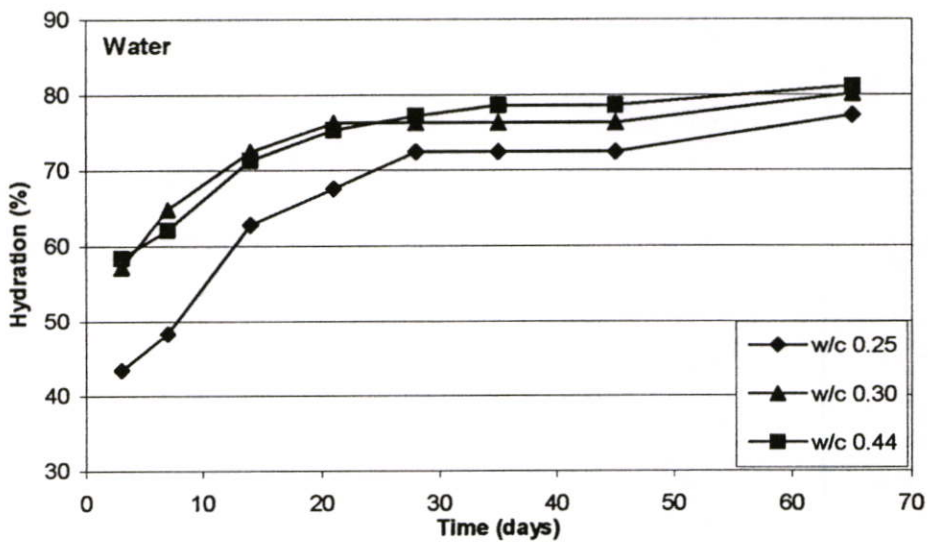
จากรูปที่ 4.16 - 4.24 จะพบว่าจากการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทิ้งตัวอย่างไว้ในห้องทดลองที่อายุ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วทำการบ่มด้วยน้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ทั้ง 2 ชนิด จนอายุซีเมนต์ครบ 28 แล้วนำมาทดสอบ พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าลดลงตามเงื่อนไขแบบไม่ต่อเนื่องในการบ่ม เนื่องจากเมื่อซีเมนต์เพสต์เกิดการแข็งตัวและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จากการเกิดปฏิกิริยาที่ดำเนินไปเรื่อยๆ น้ำธรรมดาจึงไม่สามารถที่จะซึมผ่านเข้าไปได้มาก แต่น้ำที่มีแรงดึงผิวต่ำสามารถแพร่ซึมเข้าไปในตัวอย่างที่มีความหนาแน่นได้ดีกว่าน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังมีค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาความถี่ของตัวอย่างและจะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 14 วันมีค่าใกล้เคียงกับการบ่มด้วยน้ำตลอดเวลา

4.4 ผลการทดลองสำหรับการหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage)

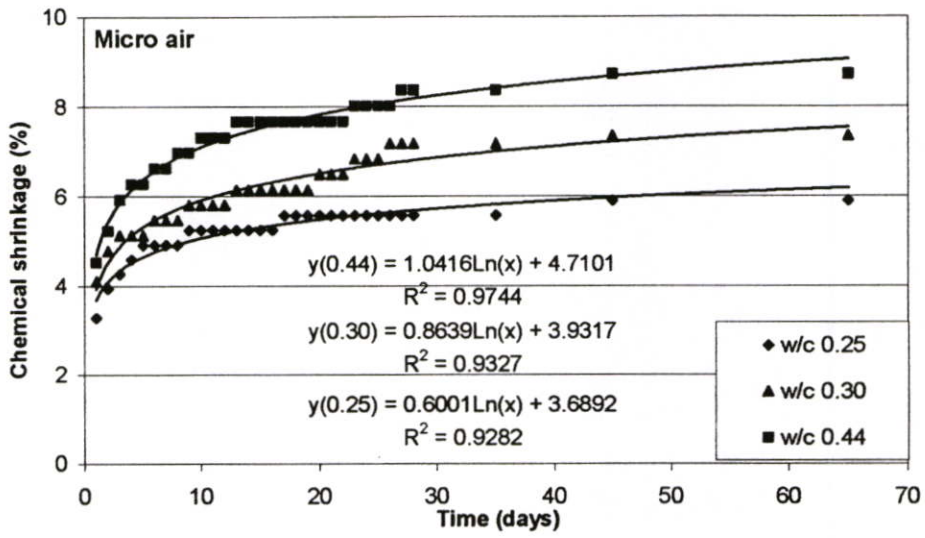
การวัดการเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) เป็นการวัดการหดตัวลงของตัวอย่าง อันเป็นเพราะปริมาณมวลรวมของของเหลวและของแข็งก่อนเกิดปฏิกิริยา มีปริมาณที่ลดลงหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว ซึ่งปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงสามารถนำไปคำนวณการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อีกด้วย ในการทดสอบจะเป็นการนำค่าระดับน้ำในหลอดปิเปตที่ลดลง ซึ่งค่าของระดับน้ำที่ลดลงนั้น จะนำไปคำนวณการเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ได้หลังจากทำการบันทึกข้อมูลจนครบ 28 วัน ก็จะหาค่าการเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) สูงสุดได้ ซึ่งค่านี้จะนำไปเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ 100 % ได้และจะหาการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน สภาพของชิ้นตัวอย่างจะเลือกใช้ชิ้นตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ และ 0.44 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน



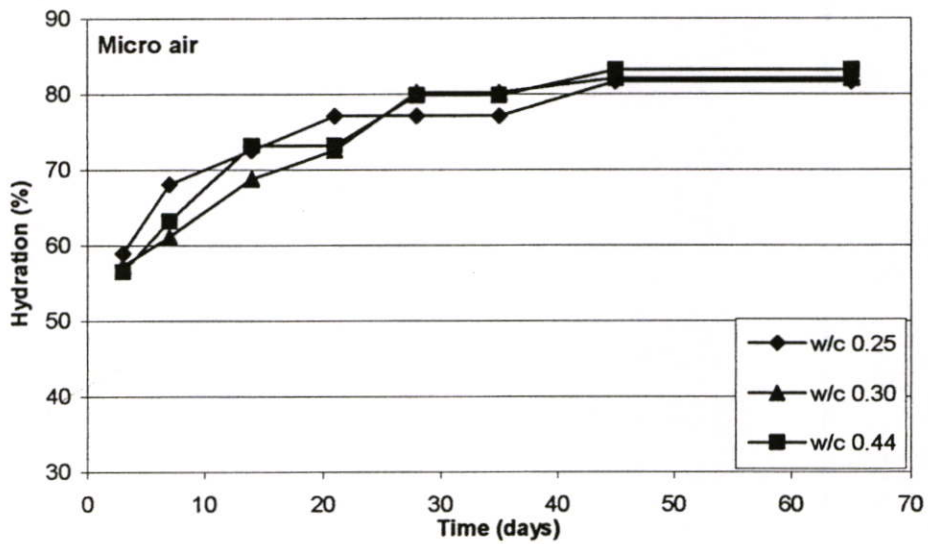
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน กับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำ



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %

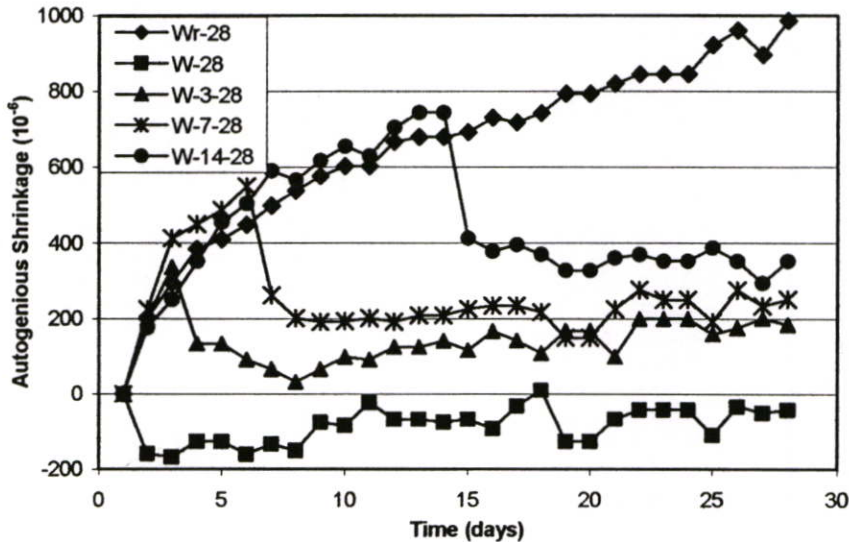


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะเวลา ของตัวอย่างที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %

จากรูปที่ 4.25 - 4.28 จะพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.44 จะเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ และมีแนวโน้มนำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยจากการทดสอบกับน้ำและน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % พบว่า การเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมี ของน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % จะมีแนวโน้มนำที่เกิดขึ้นมากกว่าและต่อเนื่องมากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกว่ามากในช่วงเวลาแรกๆ

4.5 การทดสอบการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129

การวัดการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ (Autogenous Shrinkage) เป็นการวัดการหดตัวภายนอกของซีเมนต์เพสต์ อันเนื่องจากการหดตัวของตัวซีเมนต์เพสต์และเพราะปริมาณมวลรวมของของเหลวและของแข็ง เกิดปฏิกิริยามีปริมาณที่ลดลงหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว โดยทดสอบด้วยการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศเข้มข้น 1 % โดยเลือกใช้ชนิด Micro air มาทำการทดสอบ ตามเงื่อนไขโดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง คือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงทำการบ่ม

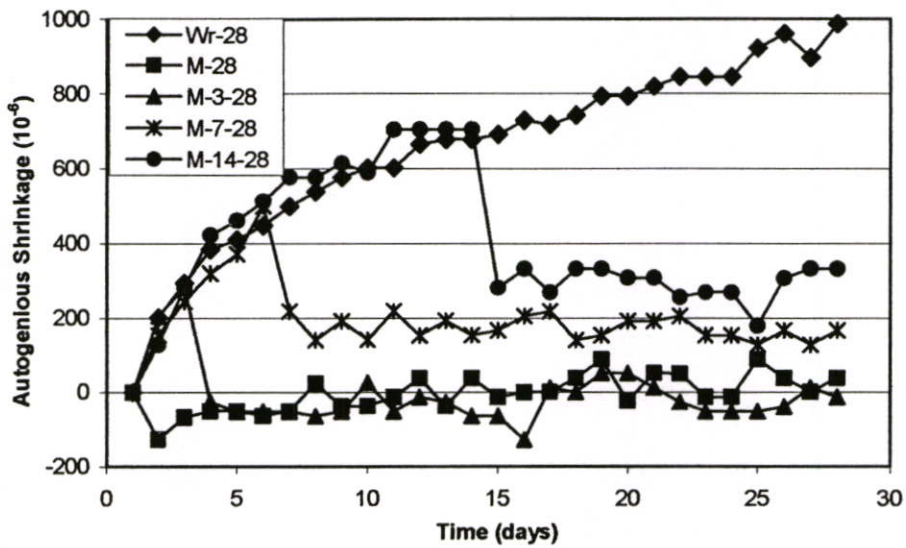


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วยน้ำที่ W/C 0.25

หมายเหตุ : 1) Wr-28 หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มตลอดเวลา 28 วันด้วยวิธี Wrapping

2) W-28 หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มตลอดเวลา 28 วันด้วยน้ำ

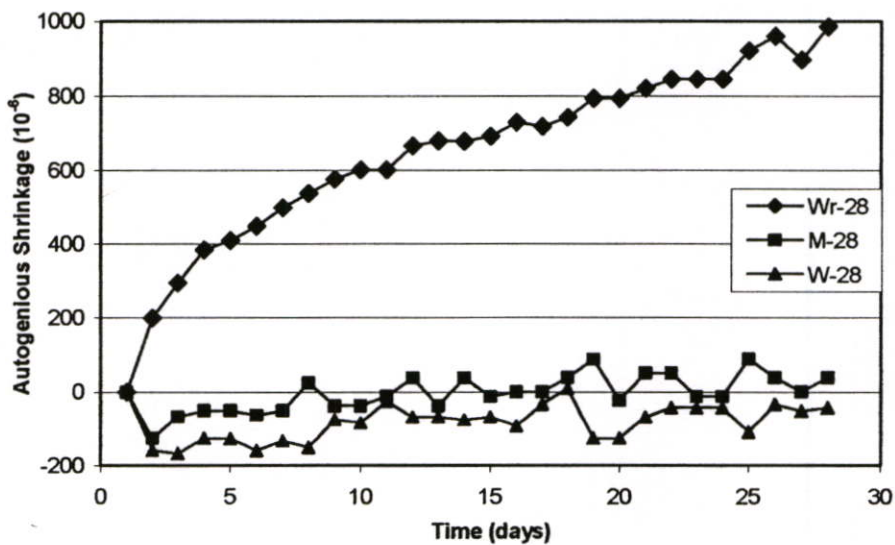
3) W-3-28, W-7-28 และ W-14-28 หมายถึง ตัวอย่างที่ทำการทิ้งไว้ในห้องทดลองที่อายุ 3, 7, และ 14 วัน แล้วจึงนำมาบ่มด้วยน้ำ จนอายุ 28 วัน



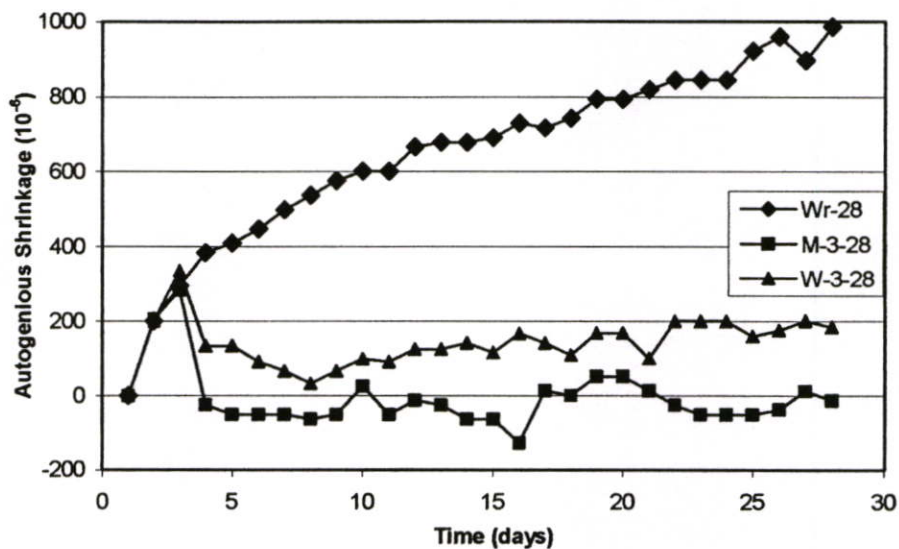
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ W/C 0.25

หมายเหตุ : 1) M-28 หมายถึง ตัวอย่างที่บ่มตลอดเวลา 28 วันด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %

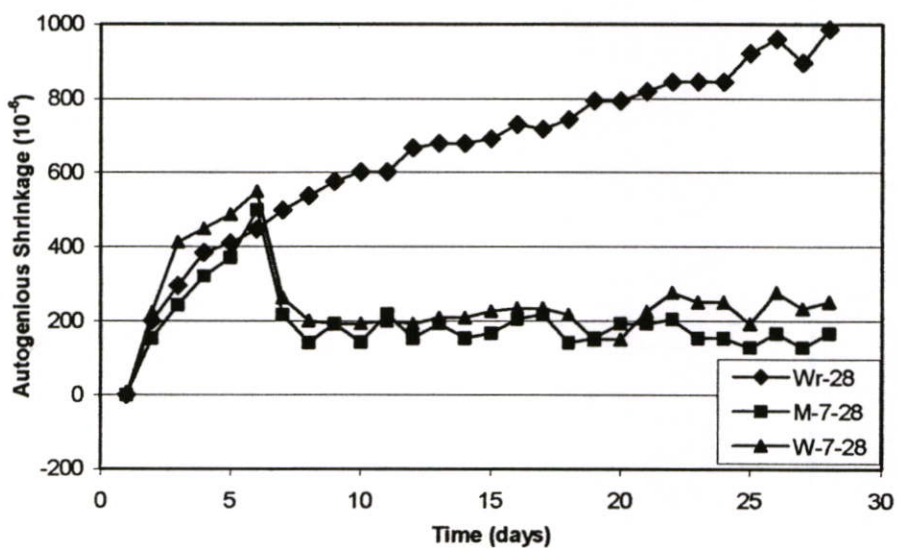
2) M-3-28, M-7-28 และ M-14-28 หมายถึง ตัวอย่างที่ทำการทิ้งไว้ในห้องทดลองที่อายุ 3, 7, และ 14 วัน แล้วจึงนำมาบ่มด้วย AE เข้มข้น 1 % จนอายุ 28 วัน



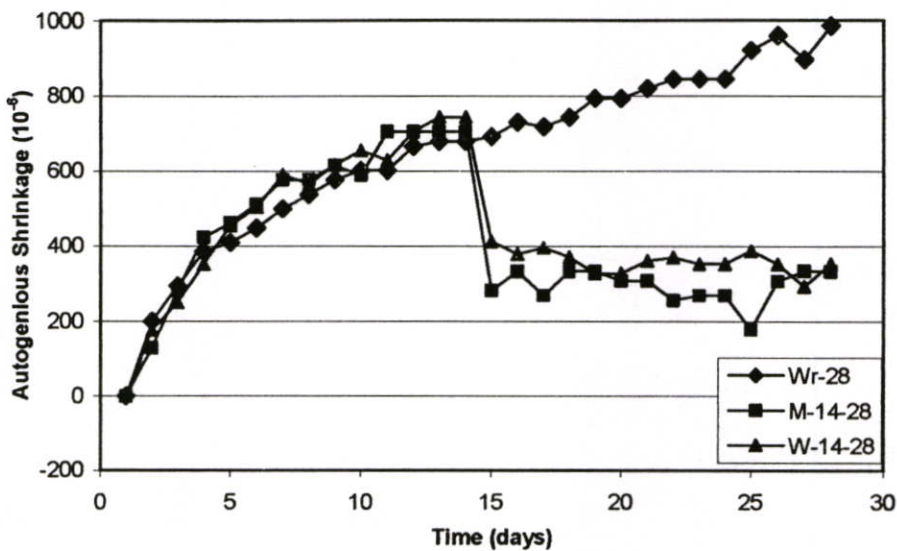
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ 3 วัน เปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ 7 วัน เปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25



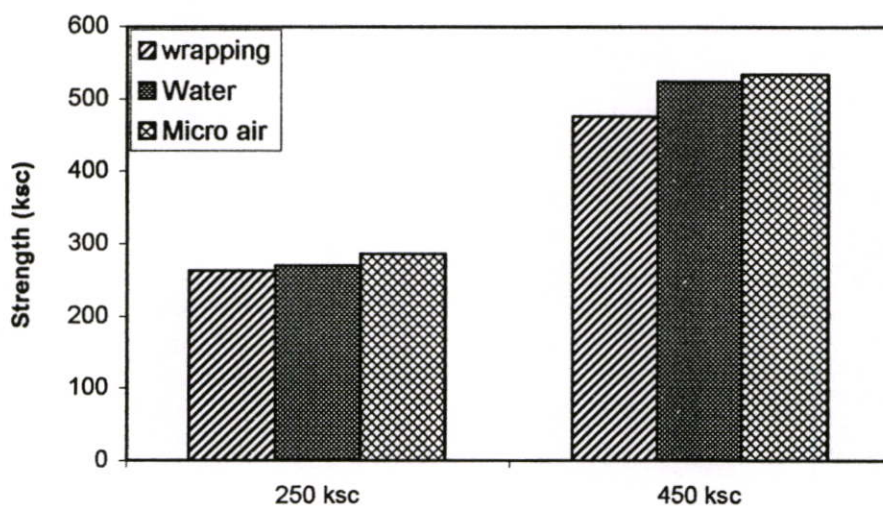
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์กับระยะเวลา ตามเงื่อนไขการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ 14 วัน เปรียบเทียบกับการบ่มแบบ Wrapping ที่ W/C 0.25

จากรูปที่ 4.29 - 4.34 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ทดสอบโดย Wrapping น้ำ และ AE เข้มข้น 1 % ชนิด Micro air พบว่าเมื่อทดสอบโดยการนำมาบ่มด้วยน้ำและน้ำผสม AE ตลอดเวลา จะมีการหดตัวเพียงเล็กน้อย ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ และการบ่มแบบ Wrapping มีการหดตัว อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการทดสอบ แต่เมื่อทดสอบโดยการนำมาบ่มด้วยน้ำและสารลดแรงดึงผิว AE เข้มข้น 1% ผสมกับน้ำแบบไม่ต่อเนื่องจะมีการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงแรกสูง เพราะตัวอย่างสัมผัสอากาศโดยตรง และจะเกิดการขยายตัวเมื่อถึงวันที่ทำการบ่ม

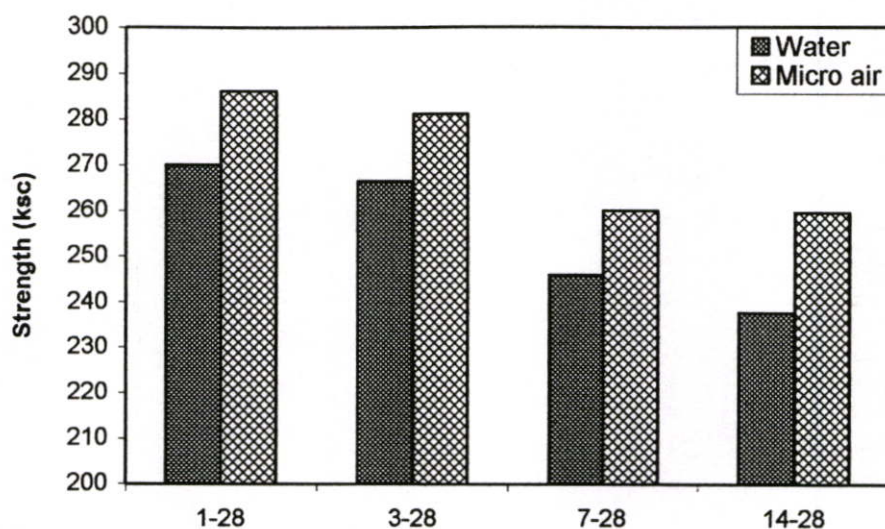
จากรูปที่ 4.32 - 4.35 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ทดสอบโดยการบ่มแบบ Wrapping ตลอดเวลากับการบ่มด้วยน้ำ และสารลดแรงดึงผิว AE เข้มข้น 1% ผสมกับน้ำ แบบไม่ต่อเนื่องที่อายุซีเมนต์เพสต์ 1, 3, 7 และ 14 วัน พบว่าช่วงแรกของการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง มีการหดตัวอย่างต่อเนื่องและมีค่ามากกว่าการทดสอบแบบ Wrapping เนื่องจากตัวอย่างสัมผัสกับอากาศโดยตรงเกิดการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ แต่เมื่อครบกำหนดให้นำตัวอย่างไปทำการบ่ม ตัวอย่างจะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลของน้ำถูกดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดแรงดันแรงยึดเกาะกัน และทำให้แรงดึงผิวของอนุภาคซีเมนต์ลดลง แต่หลังจากทำการบ่มต่อไปแบบต่อเนื่องซีเมนต์เพสต์จะเกิดการหดตัวเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาในการทดสอบ

4.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Strength)

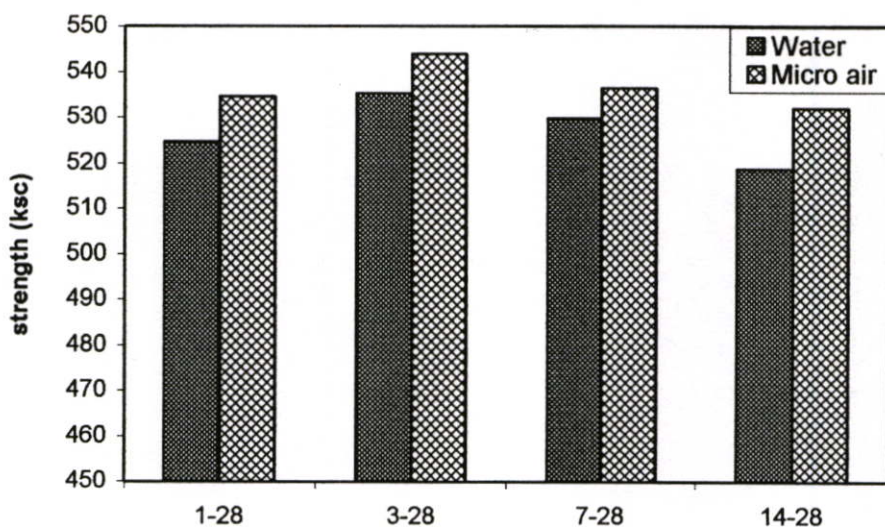
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 Part 108 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ที่ได้รับการบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง โดยตัวอย่างที่เลือกใช้ เป็นตัวอย่างที่ออกแบบให้รับกำลังอัดที่ 250 ksc. และ 450 ksc. เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อทำการเปรียบเทียบ ด้วยวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน โดยทดสอบด้วยการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และบ่มด้วยน้ำผสมสารกักกระจายฟองอากาศ ทำการบ่มแบบต่อเนื่อง ตลอดเวลาและทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Strength) กับค่ากำลังที่ออกแบบ โดยการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาด้วย Wrapping น้ำ และ AE เข้มข้น 1 % ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Strength) กับค่ากำลังออกแบบที่ 250 ksc.
โดยบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %



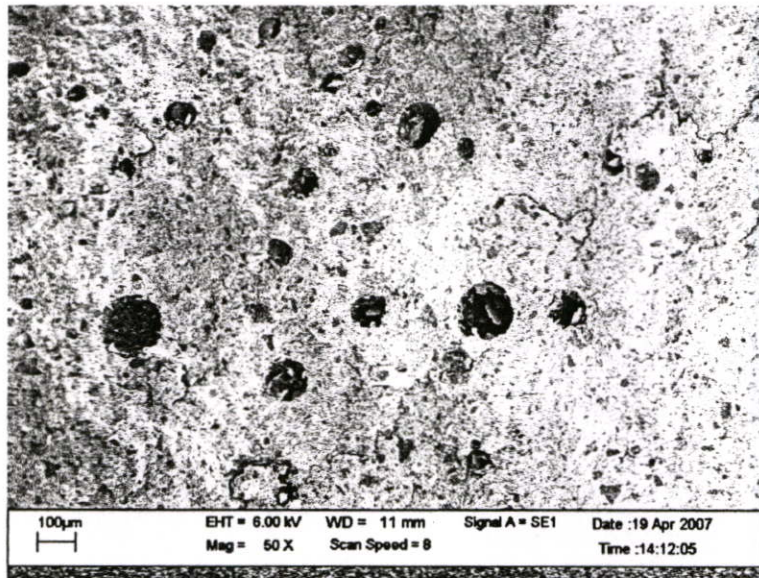
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (Strength) กับค่ากำลังออกแบบที่ 450 ksc.
โดยบ่มแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %

จากรูปที่ 4.36 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่า ที่การออกแบบกำลังอัดคอนกรีต 250 ksc. ที่อายุ 28 วัน โดยการบ่มแบบต่อเนื่องด้วย Wrapping ด้วยน้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และจากการทดสอบที่การออกแบบกำลังอัดคอนกรีต 450 ksc. พบค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าแตกต่างกัน โดยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุด เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ตัวอย่างต้องการน้ำจากภายนอกเข้าไปทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เพียงพอ แต่เนื่องจากการออกแบบที่ต้องการกำลังอัดที่สูง คอนกรีตมีความหนาแน่นมาก ทำให้น้ำธรรมดาซึมผ่านเข้าได้ไม่ทั่วถึง แต่น้ำที่มีแรงดึงต่ำจะมีความสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ดีกว่า

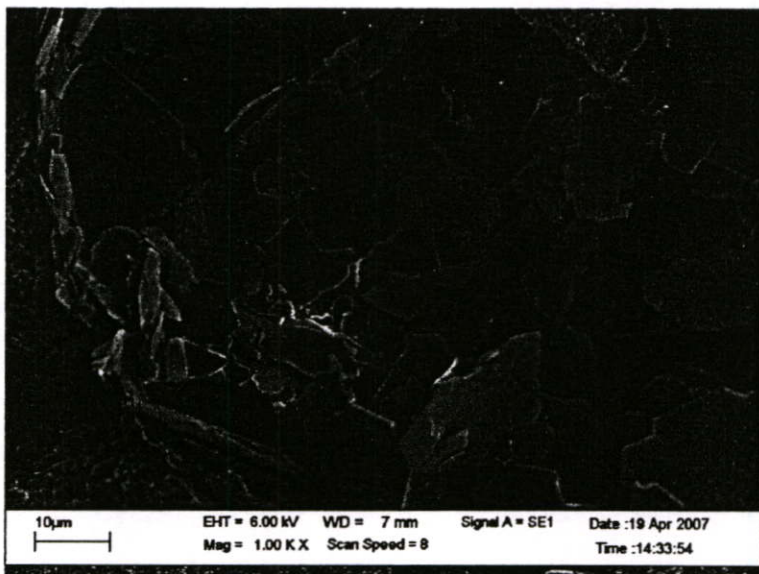
จากรูปที่ 4.37 - 4.38 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและแบบไม่ต่อเนื่องที่ 3, 7 และ 14 วัน พบว่าที่ออกแบบกำลังอัดที่ 250 ksc. และ ที่ 450 ksc. ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าลดลงตามเงื่อนไขของการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องในการบ่ม แต่ตัวอย่างที่บ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % จะมีค่าสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา เนื่องมาจากตัวอย่างที่ปล่อยทิ้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้น้ำธรรมดาไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เพียงพอกำลังอัดของคอนกรีตจึงลดลง แต่น้ำที่มีแรงดึงต่ำสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ดีกว่าทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นนั่นเอง

4.7 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

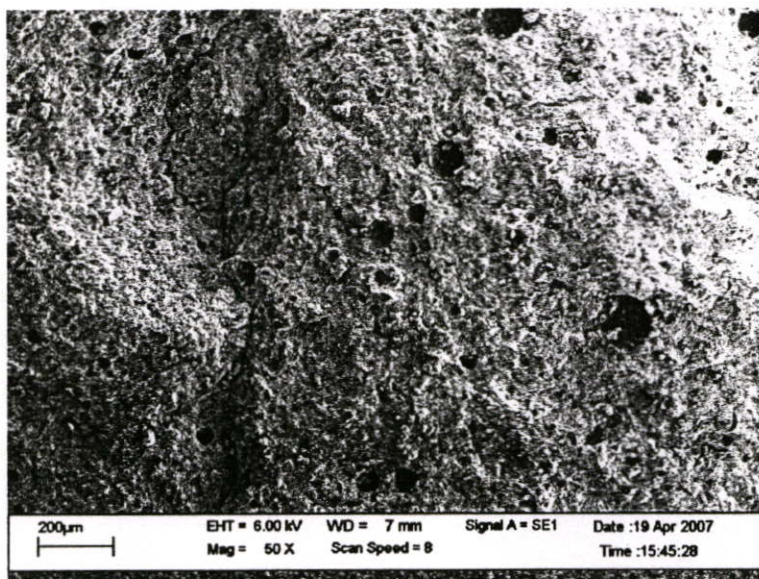
การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้ตัวอย่างที่มี W/C 0.25 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่าง ที่ได้รับการบ่มแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง โดยทดสอบด้วยการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 %



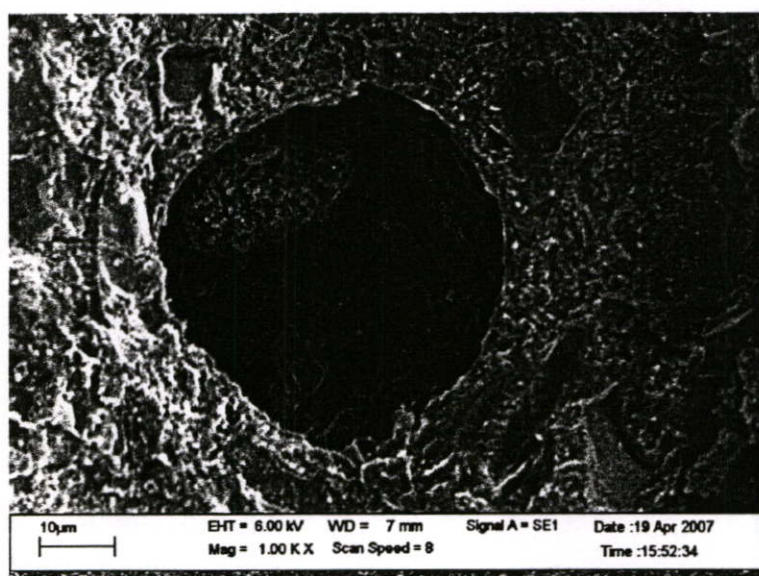
รูปที่ 4.38 แสดง โครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบต่อเนื่อง



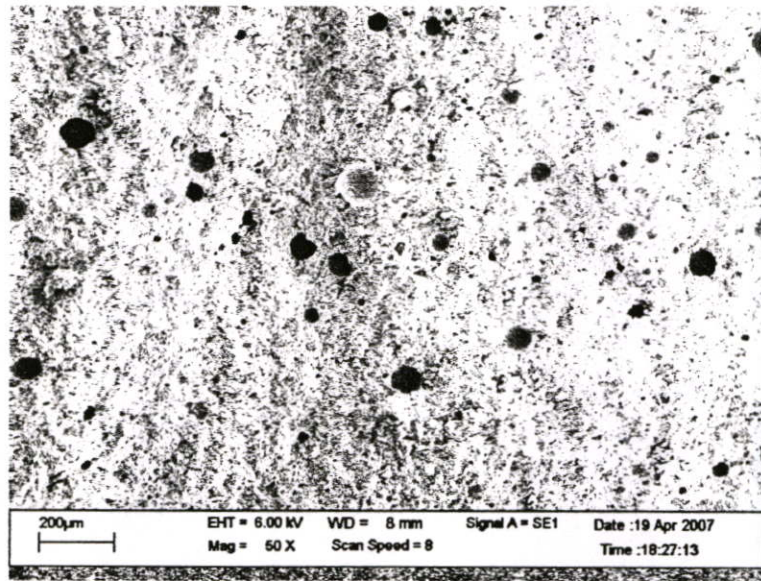
รูปที่ 4.39 แสดง โครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.38 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



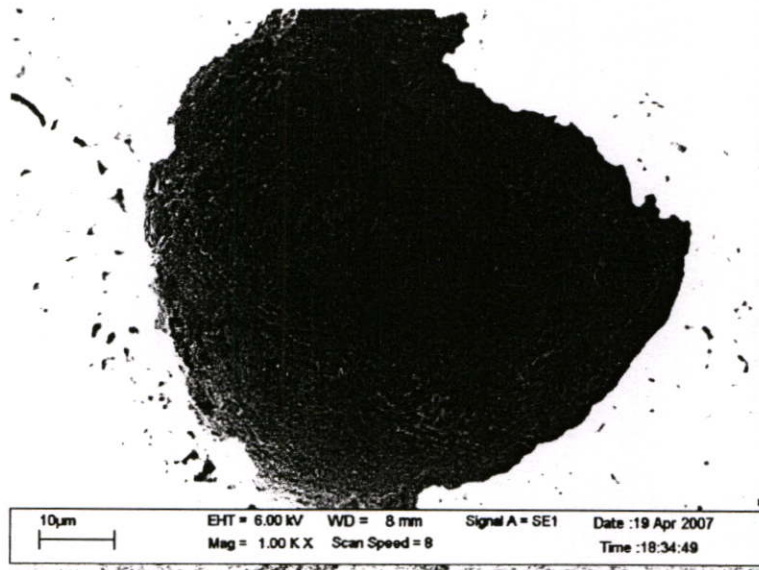
รูปที่ 4.40 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โคชมบ่มแบบต่อเนื่องด้วยน้ำ ผสม AE เข้มข้น 1 %



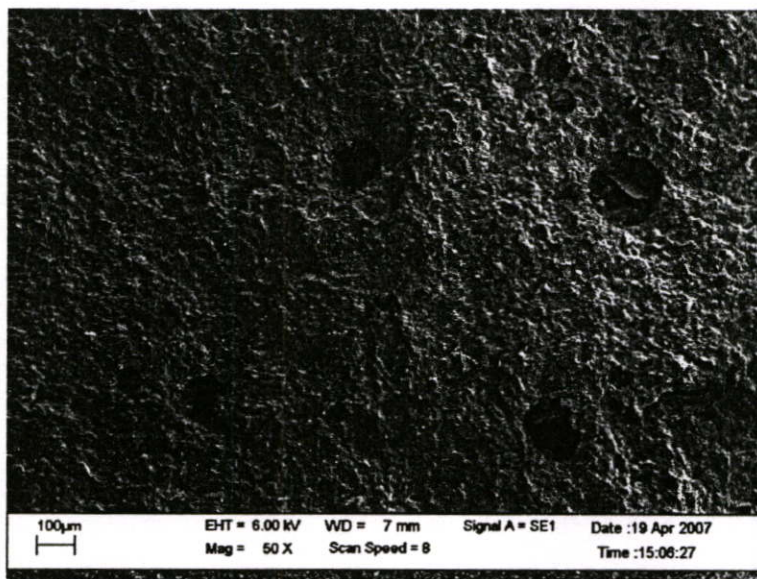
รูปที่ 4.41 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.40 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



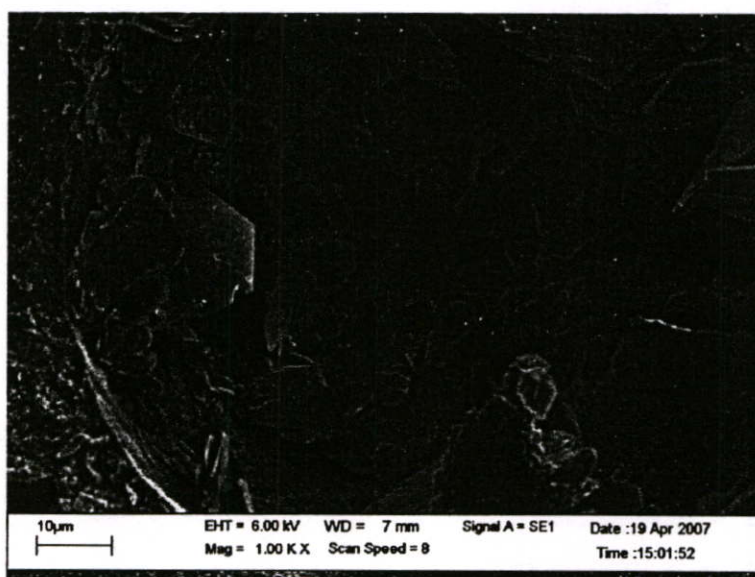
รูปที่ 4.42 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบต่อเนื่อง
ด้วย Wrapping



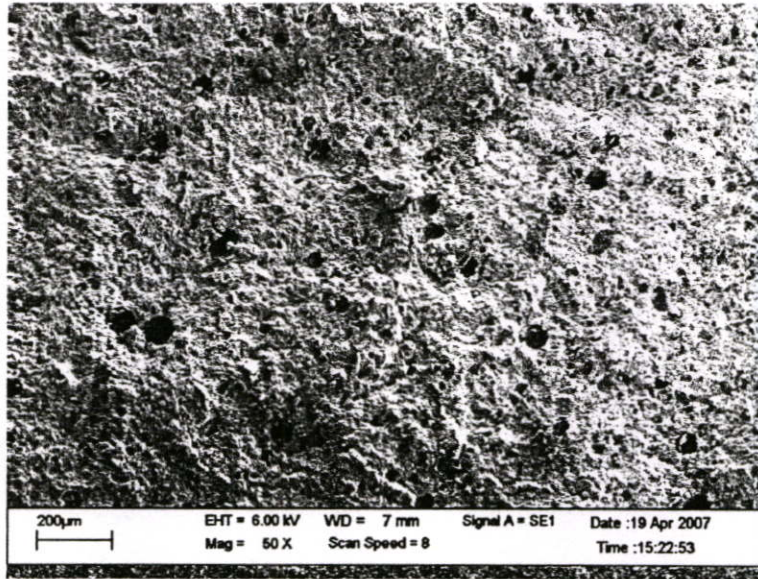
รูปที่ 4.43 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.42 ด้วยกล้อง SEM
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



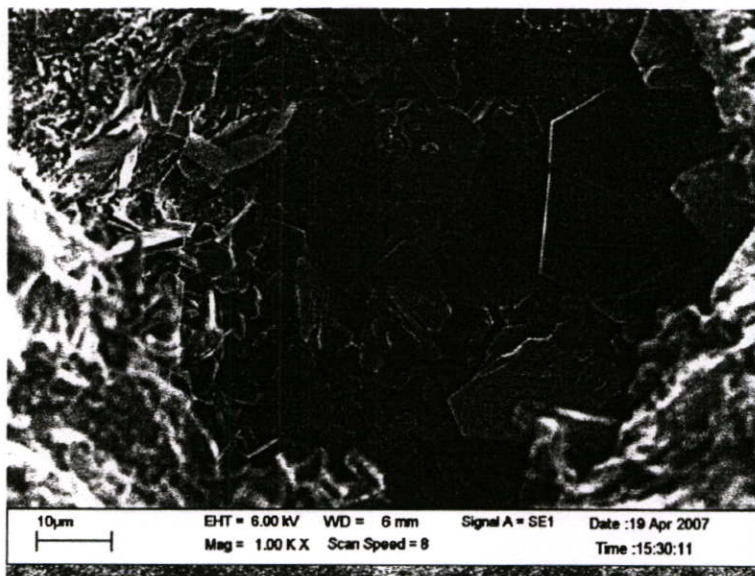
รูปที่ 4.44 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง
ที่ 3 วัน



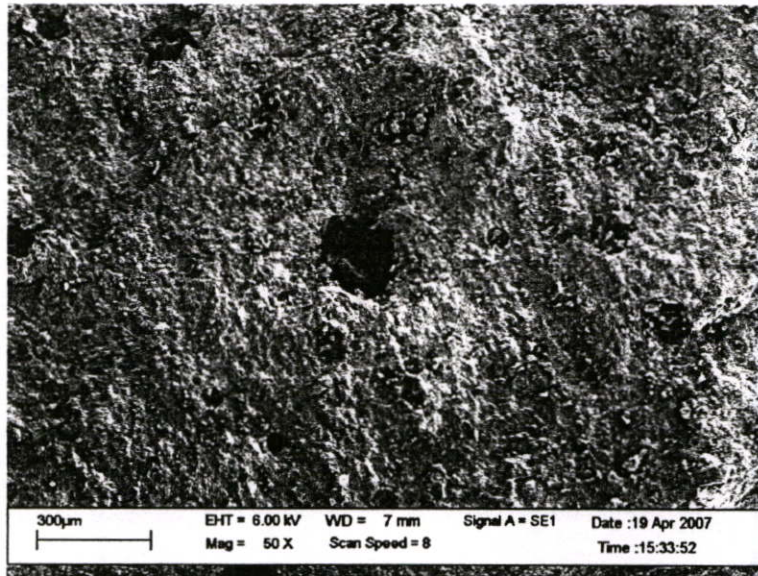
รูปที่ 4.45 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.44 ด้วยกล้อง SEM
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



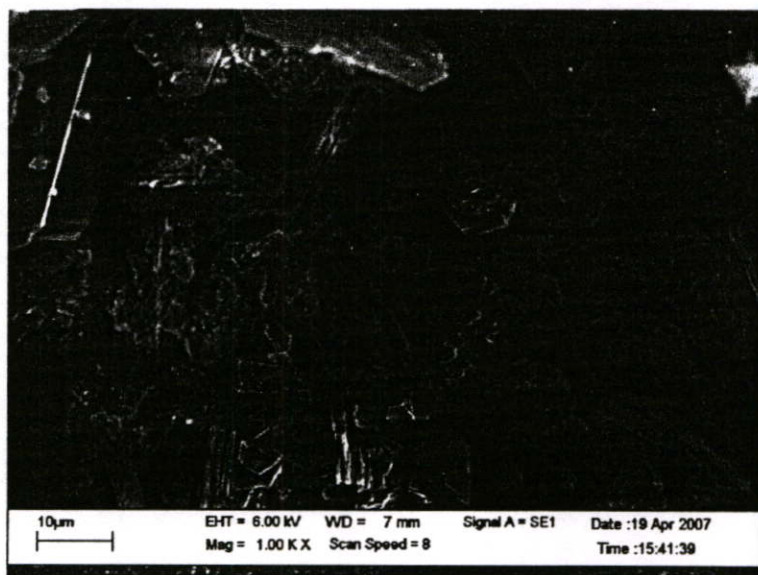
รูปที่ 4.46 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง
ที่ 7 วัน



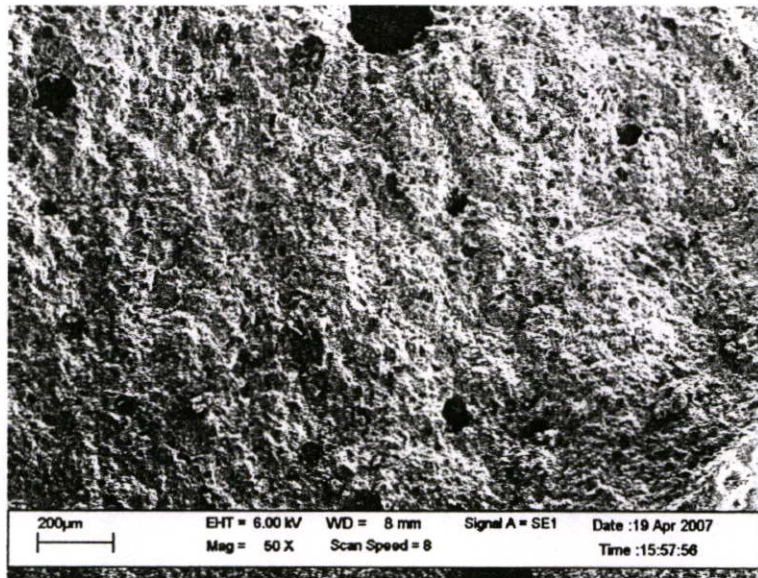
รูปที่ 4.47 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.46 ด้วยกล้อง SEM
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



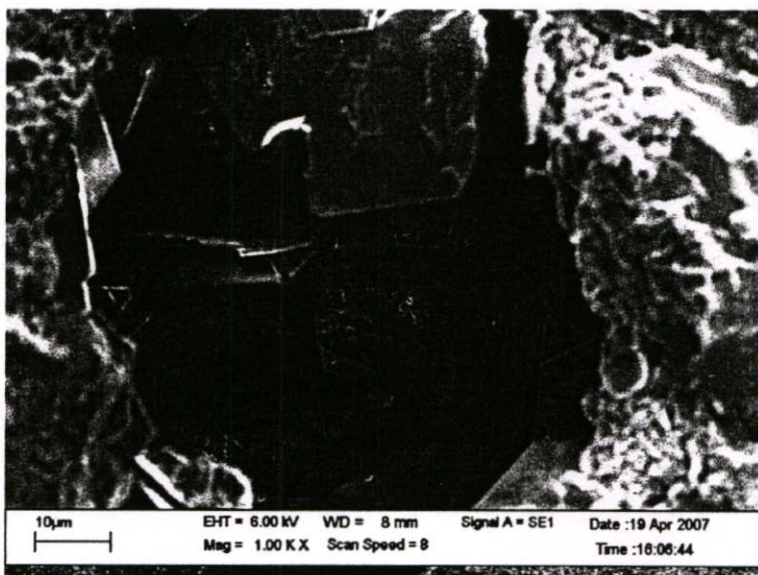
รูปที่ 4.48 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มด้วยน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง
ที่ 14 วัน



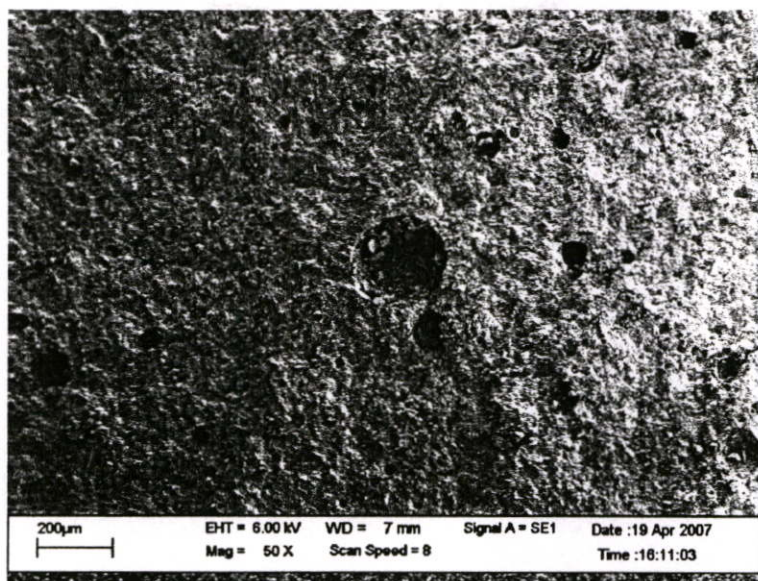
รูปที่ 4.49 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.48 ด้วยกล้อง SEM
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



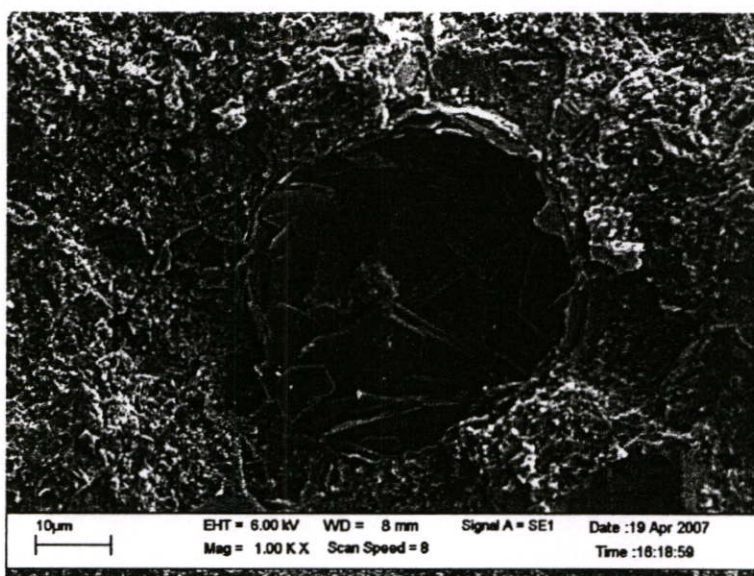
รูปที่ 4.50 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ 3 วัน



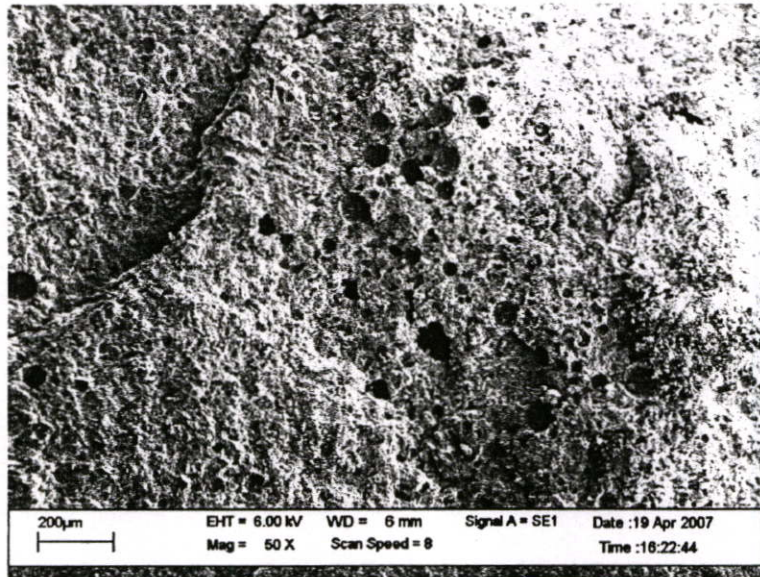
รูปที่ 4.51 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.50 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



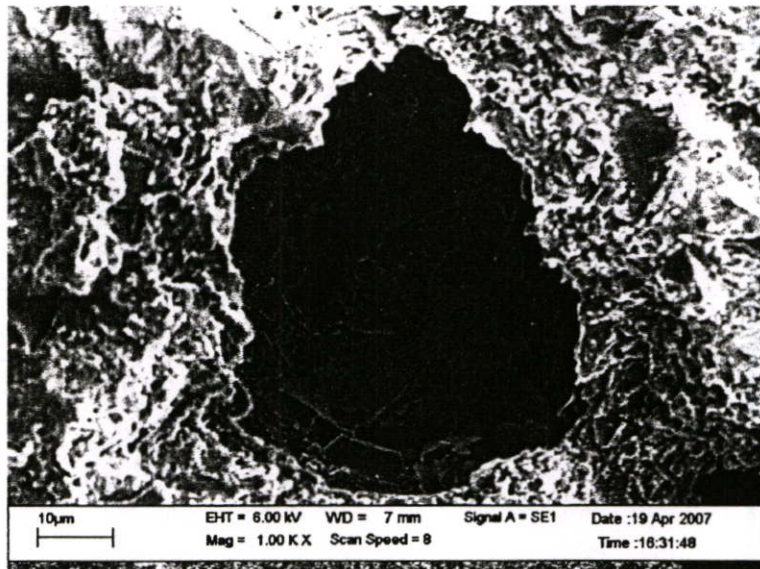
รูปที่ 4.52 แสดง โครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำ ผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ 7 วัน



รูปที่ 4.53 แสดง โครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.52 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.54 แสดงโครงสร้างผลึกด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยบ่มแบบไม่ต่อเนื่องด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % ที่ 14 วัน



รูปที่ 4.55 แสดงโครงสร้างผลึกภายในโพรงช่องว่างของรูปที่ 4.54 ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.38 - 4.43 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) โดยวิธีการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลา พบว่าการก่อตัวของโครงสร้างผลึกจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่ทำการบ่มแบบต่อเนื่องด้วยน้ำ มีช่องว่างเล็กๆ เกิดขึ้นมากกว่าการบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % เพราะว่าการซึมผ่านเข้าไปของน้ำมีมากกว่า ทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า ส่วนตัวอย่างที่ทำการ Wrapping นั้นไม่มีน้ำภายนอกเข้ามาช่วยจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ อยู่มาก และการก่อตัวของโครงสร้างผลึกจึงเกิดขึ้นน้อย

จากรูปที่ 4.44 - 4.55 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) โดยวิธีการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่าการก่อตัวของโครงสร้างผลึกจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแตกต่างกัน เพราะว่าการซึมผ่านเข้าไปของน้ำมีมาน้อยขึ้นอยู่ที่ระยะเวลาในการบ่ม ทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ และการก่อตัวของโครงสร้างผลึก เกิดขึ้นมาน้อยขึ้นอยู่กับระยะเวลาในเงื่อนไขของการบ่ม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์แข็งตัวขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ เพื่อเพิ่มระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ จากการบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจะสามารถเข้าไปช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ และเมื่อทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องจะพบว่าน้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอเท่าสารลดแรงดึงผิว จากการทดสอบพบว่าน้ำภายนอกที่ซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างมีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ และตัวอย่างที่ทิ้งไว้ในอากาศที่เวลาต่างๆ หรือไม่ได้รับการบ่มมาเลย ซึ่งผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว น้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตมีค่าแรงดึงผิวประมาณ 69 mN/m เมื่อทำการผสมด้วยสารกักกระจายฟองอากาศความเข้มข้น 1% จะมีค่าแรงดึงผิวลดลงเหลือประมาณ 32 mN/m ทำให้มีความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ดีกว่าน้ำ และยังสามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างที่ทิ้งไว้ในอากาศที่เวลาต่างๆ กันหรือที่ไม่ได้รับการบ่มมาเลยได้ดีอีกด้วย จากการทดสอบการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ทดสอบตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่ไม่ได้ทำการบ่มเลย จะมีอัตราการซึมผ่านที่มากเป็น 5 เท่าของอัตราการซึมผ่านของตัวอย่างที่บ่มด้วยน้ำมาแล้ว ตัวอย่างที่ทดสอบกับสารลดแรงดึงผิวนั้นมีค่าอัตราการซึมผ่านได้ดีกว่าตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำ เมื่อทำการบ่มแบบต่อเนื่องและบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นผลมาจาก ช่องว่างเล็กๆที่อยู่ในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์เมื่อทำการบ่มไปเรื่อยๆ ช่องว่างเล็กๆ นั้น จะค่อยๆ เล็กลงจนน้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ นั้นได้ง่าย แต่สารลดแรงดึงผิวซึ่งมีคุณสมบัติซึมผ่านได้ดี จะสามารถที่จะซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ ในซีเมนต์เพสต์ได้

2. จากการทดสอบหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ขึ้นความลึกต่างๆ โดยวิธีการบ่มแบบต่อเนื่องและบ่มแบบไม่ต่อเนื่องโดยทิ้งตัวอย่างไว้ในห้องทดลอง 3, 7 และ 14 วัน แล้วทำการบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจนอายุซีเมนต์ครบ 28 วัน พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าที่ลดลงตามเงื่อนไขของการบ่มแต่จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 14 วันมีค่าใกล้เคียงกับการบ่มด้วยน้ำตลอดเวลา จากกรณีการบ่มแบบต่อเนื่องและบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่าการบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิว AE เข้มข้น 1% ชนิด Micro Air เกิดค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องและสม่ำเสมอจนถึงชั้นความลึกของแท่งทดสอบที่ระยะ 22.5 เซนติเมตร ส่วนปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าผกผันตามอายุของการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง การบ่มด้วยน้ำนั้น ระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีลักษณะลดลงตามระยะความลึกจากผิวบ่ม ในทุกๆ ระยะเวลาการบ่ม เป็นเพราะน้ำจากการบ่มที่ผิวบนจะซึมผ่านเข้าไปในช่องว่าง

โครงสร้างซีเมนต์เพสต์ที่ได้ไม่มากนัก ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า ที่น้ำจากผิวบนจะซึมผ่านซีเมนต์เพสต์ได้ยากเพราะน้ำมีแรงดึงผิวที่มากจึงซึมเข้าไปในช่องว่าง โครงสร้างซีเมนต์เพสต์ได้น้อยและใช้เวลานาน สำหรับการบ่มด้วยอากาศหรือไม่ได้บ่ม จะมีระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าการบ่มด้วยวิธีอื่น แต่ถ้าไม่เปรียบเทียบกับวิธีอื่น พบว่าตรงกลางของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างมากเพราะที่ตรงส่วนนี้มีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนอื่น เนื่องจากผิวบนเป็นระบบเปิด น้ำที่ใช้ผสมซีเมนต์ก็ต้องเสียปริมาณส่วนหนึ่งไปกับการระเหย ส่วนผิวล่างซีเมนต์ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะมาก จึงตกลงไปด้านล่างคั่นน้ำขึ้นมาตรงบริเวณตรงกลางของระยะชิ้นตัวอย่าง

3. จากการทำการดำเนิน ไปของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยวัดจากค่าการหดตัวทางเคมี การที่ปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีเกิดขึ้นมาก ในช่วงเวลาแรกนั้น เป็นเพราะมีปริมาณของซีเมนต์อยู่มาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป ซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 จะเกิดปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีลดลง เพราะเกิดการขาดน้ำที่จะนำไปทำปฏิกิริยาต่อ ขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 และ 0.44 ยังพอมีน้ำเพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ จึงทำให้มีค่าปฏิกิริยาการหดตัวทางเคมีมากขึ้น ที่เวลาผ่านไป ตัวอย่างที่ทดสอบกับสารลดแรงดึงผิวนั้น จะมีค่าของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำ ตลอดระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน เป็นผลมาจากสารลดแรงดึงผิวสามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ได้ดีกว่าน้ำ โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ซึ่งมีปริมาณของซีเมนต์อยู่มาก เมื่อทำการทดสอบกับสารลดแรงดึงผิว จะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันมากกว่าการทดสอบกับน้ำถึง 15 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ในช่วง 1-7 วันแรก

4. จากการทดสอบหาการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ พบว่าการบ่มด้วยน้ำ และ AE เข้มข้น 1% การหดตัวเกิดขึ้นต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการบ่มแบบ Wrapping ตัวอย่างมีการหดตัวอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มน้ำมากขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำ และ AE เข้มข้น 1 % ประมาณ $600 \mu\text{m}$ ที่ 28 วัน การบ่มแบบไม่ต่อเนื่องมีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์เป็นอย่างมากจึงจะเห็นได้ชัดจากการบ่มโดยด้วยการ Wrapping จะมีการหดตัวของซีเมนต์เพสต์อย่างต่อเนื่อง และการบ่มโดยน้ำและสารลดแรงดึงผิว กลับพบว่ามีอาการหดตัวที่อยู่ในช่วงระยะเริ่มต้น เมื่อมีการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องจะพบว่าพฤติกรรมหดตัวในช่วงเริ่มต้นเมื่อถึงอายุซีเมนต์เพสต์ที่ต้องนำมาบ่มแบบไม่ต่อเนื่องกลับเป็นการขยายตัวอย่างฉับพลัน ในระยะเวลาการบ่ม 24 ชั่วโมง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำถูกดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดแรงดันแรงยึดเกาะกัน และทำให้แรงดึงผิวของอนุภาคซีเมนต์ลดลง โดยเป็นลักษณะเดียวกันทุกเงื่อนไขการบ่ม แต่พบว่าการบ่มด้วย AE เข้มข้น 1 % มีผลในการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ได้มากกว่า

5. จากการทดสอบกำลังอัด การบ่มแบบต่อเนื่องโดยใช้ น้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % การทดสอบที่การออกแบบกำลังอัดที่ต่ำ น้ำมีปริมาณที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนการออกแบบกำลังอัดที่สูงการบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการบ่มด้วย

น้ำธรรมดาจะเห็นได้ทั้งการบ่มแบบต่อเนื่องและการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง โดยที่อายุคอนกรีตครบ 3, 7 และ 14 วัน พบว่าการบ่มด้วย AE เข้มข้น 1 % จะให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าการบ่มด้วยน้ำ แต่จะมีค่าลดลงมาตามอายุของเงื่อนไขการบ่ม เนื่องจากความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าสูงและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ ออกแบบกำลังอัดมีค่าน้อย จึงทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำที่จะเข้าไปช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชัน น้ำที่ผสมด้วย AE เข้มข้น 1 % จึงซึมผ่านเข้าไปช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา

6. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) โดยวิธีการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลา และวิธีการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่าการก่อตัวของโครงสร้างผลึกจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่ทำการบ่มแบบต่อเนื่องด้วยน้ำ มีช่องว่างเล็กๆ เกิดขึ้นมากกว่าการบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % เพราะว่าการซึมผ่านเข้าไปของน้ำมีมากกว่า ทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า ส่วนตัวอย่างที่ทำการ Wrapping นั้น ไม่มีน้ำภายนอกเข้ามาจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ อยู่มาก และการก่อตัวของโครงสร้างผลึกจึงเกิดขึ้นน้อย และจากวิธีการบ่มแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่าการเกิดช่องว่างเล็กๆ และการก่อตัวของโครงสร้างผลึก เกิดขึ้นมาน้อยขึ้นอยู่กัระยะเวลาในการบ่ม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการบ่มและอายุการบ่มที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับหน้างานจริง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำงานหน้างานไม่สามารถที่จะควบคุมการบ่มให้เหมาะสมและถูกต้องเสมอไปได้ ทำให้คอนกรีตเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เพียงพอ วิธีการที่นำเสนอนี้ เพื่อจะเป็นตัวเลือกในวิธีการบ่มคอนกรีตให้มีคุณสมบัติเป็นไปอย่างที่ต้องการ และเหมาะสมกับการทำงานด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Tazawa, E., **Autogenous Shrinkage of Concrete**, Proceeding of the International Workshop organized by JCI, pp.3-67, 1998.
- [2] Taylor, H.F.W., **Cement chemistry 2nd edition**, pp. 227-255, 1997.
- [3] Neville, A.M., **Properties of Concrete**, pp. 5-53, 1963.
- [4] Bentz, D.P., **Influence of Curing Conditions on Water Loss and Hydration in Cement Pastes with and without Fly Ash Substitution**, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6886, July 2002.
- [5] Powers, T.C., **Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Paste**, PCA Bullentin, No. 10, pp. 2-12, 1959.
- [6] Powers, T.C., **A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete**, Proc. Of the Highway Research Board, 27, pp.178-188, 1974.
- [7] Bentz, D.P., Garboczi, E.J., **Percolation of Phases in a Three-Dimensional Cement Paste Microstructure Model**, Cement and Concrete Research, Vol.21, pp. 325-344, 1991.
- [8] Power, T.C., **Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process**, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27, pp. 790-794, 1935.
- [9] Maleesee, K., Kasai, T., **Effect of Penetration of Curing Water on Self-desiccation and Strength of Cementitious Materials**, Cement Science and Concrete Technology by JCA, Vol.55, pp. 109-115, 2001.
- [10] Maleesee, K., Kasai, T., **Effect of Penetrative Conditions. of Water for Curing on Strength of Concrete**, Proceeding of the first fib Congress 2002, Osaka, Japan, pp. 289-296, 2002.
- [11] Maleesee, K., Panitkulpong, A., Kasai, T., **Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Properties of Hardened Cement Paste**, Concrete Research and Technology by JCI, Vol.25, pp. 581-586, 2003.
- [12] Maleesee, K. and Kasai, T., **Influences of Penetrative Curing on Properties of Cementitious Materials**, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 767 / V-64, pp. 301-312, 2004

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม

DAREX AEA

น้ำยาเพื่อเพิ่มอากาศสำหรับคอนกรีต

คุณสมบัติ

DAREX AEA เป็นน้ำยาที่บริสุทธิ์และเปลี่ยนแปลงเกลือของ Suffocated Hydrocarbon มีตัวเร่งที่ช่วยให้ซีเมนต์แห้งสนิทขึ้นและเร็วขึ้น DAREX AEA ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้ในการเพิ่มอากาศ เป็นตัวนำยาผสมเพื่อเพิ่มอากาศ เป็นตัวนำยาผสมเพิ่มอากาศสำหรับงานคอนกรีต และถูกผลิตด้วยการถูกควบคุมอย่างดีเพื่อให้มีการใช้งานที่คาดการณ์ได้และเสมอต้นเสมอปลาย

ลักษณะ

ลักษณะรูปร่าง	เป็นน้ำยาสีน้ำตาลเข้ม
Specific Gravity (20 Deg.C.)	1.015 ± 0.005
สัดส่วนจำนวนของแข็งทั้งหมด	7.0 – 7.5 %
ผลการจับอากาศ	ดีขึ้น 2 – 8 % ขึ้นอยู่กับจำนวนน้ำยาที่ใช้

วิธีปฏิบัติ

การสร้างฟองอากาศเล็กๆแบบ Semi Microscopic จำทำให้การเพิ่มฟองอากาศสำเร็จ วิธีการดังกล่าวทำโดยผสม โดยปั่นและปล่อยทิ้งไว้ในช่วงการผสมของคอนกรีต ฟองอากาศที่ว่าจะทำหน้าที่เหมือนลูกปืน (ลูกหมาก) เล็กๆ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและทำให้คอนกรีตง่ายต่อการใช้งาน ฉาบ โปก ฯลฯ การแยกตัว การหด หรือ Bleedings ของคอนกรีตจะลดลง DAREX AEA มีตัวเร่งที่ทำให้แห้งเร็วและแห้งสนิทขึ้น ทำให้ซีเมนต์มีแรงดีขึ้นในการผสมที่ค่อนข้างน้อยและสูญเสียความแข็งแรงน้อยที่สุดในการผสมที่เยอะ

การใช้งานโดยทั่วไป

DAREX AEA ใช้ใน Ready – Mix บล็อก งานฉาบปูน และผลิตภัณฑ์คอนกรีตผสมทั่วไป ใช้หน้างานกับเครื่องผสมหน้างาน และที่ที่มีการผสมคอนกรีตและต้องการการเพิ่มฟองอากาศ เนื่องจากทำให้คอนกรีตผสมนุ่มและหนาขึ้นจะเป็นผลดีมากถ้าใช้กับส่วนผสมที่เบา Slag และค่อนข้างจะทำให้เกิดคอนกรีตที่หยาบและทำให้การผสมคอนกรีตที่มีทรายละเอียดน้อยเกิดขึ้นได้

ประโยชน์

การใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น คอนกรีตผสมจะเหนียวขึ้น นุ่มขึ้นเนื่องจากมีฟองอากาศเล็กๆ เป็นล้านๆ ฟอง ช่วยทำให้น้ำที่หล่อลื่นและเป็นตัวกันชน ทำให้การรดน้ำที่จะใช้ในการผสมเกิดขึ้นได้โดยไม่สูญเสีย Slum การแบ่งแยกของคอนกรีต การหดตัว จะลดลงจนแทบไม่มี

ความทนทานเพิ่มขึ้น

DAREX AEA ถ้าใช้กับคอนกรีตผสมจะทำให้คงทนมาก โดยเฉพาะเวลาที่คอนกรีตต้องเจอกับสภาพหนาวจัดหรือละลายตัว และทำให้คอนกรีตต่อสู้กับเกลือ รวมถึงไอน้ำจากทะเลและน้ำที่ค้างได้

ส่วนผสมของคอนกรีต

เนื่องจากฟองอากาศทำให้คอนกรีตขยายตัว จะทำให้ลดซีเมนต์ที่ใช้ในสัดส่วนของคอนกรีต สภาพนี้จะต้องเปลี่ยนแปลงส่วนผสม โดยสัดส่วนของหินหรือทรายละเอียดและต้องลดสัดส่วนของน้ำเนื่องจาก DAREX AEA ใช้ได้กับงานคอนกรีตทั่วไป งานฉาบปูนใช้กับน้ำยาเร่งตัวอื่น น้ำยาลดน้ำหรือน้ำยาทำให้น้ำระเหยช้า ความต้องการของน้ำในส่วนผสมจะลดลงและจะมีความแข็งแรงและคงทนที่เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน น้ำยาแต่ละประเภทควรผสมในคอนกรีตผสมแยกกัน

อัตราส่วนผสม

50 – 100 ml ต่อ 100 กิโลกรัมของซีเมนต์

วิธีการใช้

DAREX AEA เป็นน้ำยาผสมที่ใช้ได้ทันทีไม่ต้องผสมหรือเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ใช้คอนกรีตผสมได้ทันทีที่หน้างานในขณะที่ผสมน้ำลงในคอนกรีต แต่ต้องระวังให้การคลุกเคล้าของน้ำยากับส่วนผสมอื่นเข้ากันได้ดี รถบรรทุกผสม Ready – Mix จะต้องหมุนอย่างน้อย 75 รอบในการผสม DAREX AEA และควรจะตวงน้ำยาใช้อย่างถูกต้อง

ข้อแนะนำทางวิศวกรรม

อย่าให้แข็งตัวแล้วจะต้องปล่อยให้ละลายอย่างช้าๆ เก็บได้นานอย่างน้อย 12 เดือน ถ้ายังไม่ได้เปิดใช้ แต่ถ้าใช้ตามกฎเกณฑ์ของ BS 5075: Part 2: 1982 จะต้องใช้ตามวันหมดอายุข้างถึงบริษัท ดับบริว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด

889 ถนนศรีนครินทร์ – เทพารักษ์ อาคารว่องไววิทย์ ชั้น 2 อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270 โทร.
399-3944, 393-3445, แฟกซ์. 399-3951

MICRO-AIR 303A

MICRO-AIR 303A เป็นสารกักกระจายฟองอากาศ เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างที่สำคัญ
ทั้งหมดที่ใช้เป็นสารลดน้ำ สารเร่งและสารหน่วง

ความแตกต่างของ MICRO-AIR 303A คือสามารถผสมกับพอสโซไลท์โดยปราศจากการ
ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เป็นอันตรายอื่นๆ ในขณะที่ใช้เป็นสารกักกระจายฟองอากาศ สารผสม
ชนิดนี้ไม่ควรที่จะผสมแยกกับสารอื่นก่อนการผสมคอนกรีต หากที่มีผสมก่อนจะละลายระบบการ
ทำงานและทำให้เกิดการตกตะกอน และทำให้ระดับการกักกระจายลดลง

สำหรับประโยชน์อื่นๆ ไม่เพียงแต่การควบคุมคุณภาพการใช้ประโยชน์แต่ยังต้องระวัง
เรื่องการผสม เพียงแค่ผสมหนึ่งถึงกับสารผสมเพิ่มอื่นๆ อาจจะทำให้ราคาของอุปกรณ์ลดลง

คำแนะนำทั่วไป

- MICRO-AIR 303A จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-260
- MICRO-AIR 303A สามารถใช้กับของเหลวหรือของเหลวเจือจางอย่างอื่น
- MICRO-AIR 303A สามารถผสมกับสารผสมเพิ่มพอสโซไลท์ชนิดอื่น โดยไม่ทำ

ปฏิกิริยาเคมี

ข้อดีของการใช้งาน

การกักกระจายฟองอากาศที่ได้ผลดีที่สุดช่วยในการเพิ่มคุณภาพคอนกรีตดังนี้

- ช่วยเพิ่มความเหลวและง่ายต่อการทำงาน
- ลดการแยกออกและลดการ Bleeding
- เพิ่มความทนทานโดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำแข็งหรือน้ำแข็งละลาย
- สารที่มีน้ำเกลืออยู่

ง่ายต่อการใช้

เพียงใช้มือเทวดสารเข้าไปในเครื่องผสม

ความเหมาะสมในการใช้

MICRO-AIR 303A เหมาะที่จะใช้กับคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำอื่นๆ เช่น สารเร่ง ใช้ควบคุมไปกับน้ำ เพื่อเพิ่มการกักกระจายฟองอากาศในคอนกรีต

การประยุกต์ใช้

MICRO-AIR 303A ใช้เป็นสารละลายเจือจางเข้าไปโดยสารนี้ โดยไม่ผสมการสารผสมชนิดอื่น ใส่ MICRO-AIR 303A เข้าไประหว่างผสมคอนกรีตในเครื่องผสมโดยสารกักกระจายฟองอากาศ โดยใส่ไม่เกิน 3 %

ปริมาณสารที่ใส่เข้าไปในคอนกรีต

ไม่มีมาตรฐานของปริมาณที่แน่นอน ปริมาณที่แน่นอนของสารกักกระจายฟองอากาศที่ต้องการไม่สามารถหาค่าได้อย่างแน่นอน เนื่องจากความแตกต่างของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต ปัจจัยต่างๆ ไปที่อาจจะมีอิทธิพลต่อจำนวนของฟองอากาศ คือ อุณหภูมิ ซีเมนต์ การให้วัสดุที่ละเอียดเป็นพิเศษเช่น ใ้ล้อย

ปริมาณของ MICRO-AIR 303A ที่จะใช้ขึ้นอยู่กับจำนวนของอากาศที่ต้องการภายใต้สภาวะการใช้งานที่แท้จริง ในการปรับค่าการผสมใช้ 0.006 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ควบคุมสารผสมเพิ่ม จำนวนของ MICRO-AIR 303A ที่ต้องการคือน้อยกว่าจำนวนที่ต้องการในคอนกรีต ในการผสมที่ต้องการมากกว่าปริมาณที่ได้รับที่ต้องการอากาศ ปรึกษาหัวหน้างานหรือตัวแทนจำหน่ายก่อนใช้

MICRO-AIR 303A ควรเก็บไว้ในเครื่องที่อุณหภูมิ 35 °F (2°C) หรือสูงกว่า เมื่อแช่แข็งควรจะต้องทำการละลายก่อนเพื่อการประกอบกันใหม่โดยเครื่องปั่นก่อนการใช้งานอย่าใช้เครื่องกวนที่เป็นอากาศอัดความดัน

การบรรจุ

MICRO-AIR 303A เก็บในถังเหล็ก 200 ลิตร

ข้อแนะนำพิเศษ

สารผสมเพิ่มชนิดกักกระจายฟองอากาศสามารถใช้กับสิ่งก่อสร้างที่ซับซ้อน MICRO-AIR 303A ตามมาตรฐาน ASTM C-260 และ CRDC-13 สารควรจะแยกออกจากกัน ในการผสมคอนกรีตจำนวนที่ต้องการจะตามปริมาณอากาศ จะทำให้ปริมาณอากาศสูงขึ้นโดยซีเมนต์ มวลรวม และ ส่วนผสมอื่นๆอาจจะต้องพิจารณา

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. คร.คมสัน มาลีสี และรุ่งโรจน์ หนูนุรัตน์, อิทธิพลของการบ่มโดยใช้น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำต่อคุณสมบัติการดูดซึมและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, หน้า MAT115-MAT119, จ.อุตรธานี, ประเทศไทย, ตุลาคม 25-27, 2549.



การประชุมวิชาการดวนกริตประจำปี ครั้งที่ **2**
Annual Concrete Conference



25 - 27 ตุลาคม 2549
 ณ โรงแรมเจริญศรี แกรนด์ รอยัล
 จังหวัดอุดรธานี

จัดโดย... สมาคมดวนกริตไทย (ส.ด.ท.)

อิทธิพลของการบ่มโดยใช้น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำต่อคุณสมบัติการดูดซึมและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์

Influence of Low Surface Tension Water Curing on Surface Absorption and Degree of Hydration of Cement Paste

กมลธัน มาลีสี¹ และ รุ่งโรจน์ หนูบุญรัตน์²

¹ อาจารย์, 'นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการบ่มโดยใช้สารกักการะจายฟองอากาศผสมลงในน้ำทำให้มีแรงตึงผิวลดลง โดยพิจารณาถึงความสามารถในการซึมผ่านและปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ โดยทั่วไปแล้วด้วยวิธีการบ่มที่มีขนาดใหญ่และมี W/C ต่ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตและน้ำที่ใช้ในการบ่มรวมกันแล้วยังไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยวิธีใช้น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าน้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำมีคุณสมบัติในการซึมผ่านได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยเฉพาะที่อายุของซีเมนต์เพสต์ที่มากขึ้น อีกทั้งมีคุณสมบัติในการซึมผ่านจากผิวหน้าสู่การบ่มได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทุกระยะมีความลึกมีค่ามากกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา

ABSTRACT: In this paper, influence of low surface tension water curing (water containing AE-admixture) on surface absorption and degree of hydration were experimentally investigated. In a large-size specimen with a low water-cement ratio, both the mixing water and penetrative water of standard water curing are not sufficient to complete the hydration of the entire specimen. Therefore, low surface tension water curing was studied to improve the properties of the specimens at any distances from the surface during hydration process. From experimental method, cement paste cured with low surface tension water had higher permeability than cured with standard water, especially at older age. Furthermore, this provided better permeable property and higher degree of hydration at all depths than standard water curing.

คำหลัก: การบ่ม; น้ำแรงตึงผิวต่ำ; การแพร่ซึมของน้ำ; ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างโดยทั่วไป วิธีที่จะควบคุมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณภาพที่ดีวิธีหนึ่งคือ การบ่มคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตจะช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต และจะช่วยให้อุณหภูมิของคอนกรีตกับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้การพัฒนาองค์ประกอบของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้การบ่มจึงมีอิทธิพลมากต่อการก่อสร้างทั่วไป

ในระหว่างที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวอยู่นั้น คอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเพียงพอ หากน้ำไม่เพียงพอในระยะใด การปฏิกิริยาเคมีก็จะหยุดในระยะนั้น และถ้าอยู่ในระยะที่มีความแข็งตัวไม่พอที่ตำแหน่งการหดตัวอื่นเนื่องจากการระเหย ของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแล้ว อาจทำให้เกิดการร้าวร้าวขึ้น ในเนื้อคอนกรีตหรือความชื้นที่

แห้งก่อนนั้นได้ทุกเมื่อ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเก็บน้ำให้ชุ่มตลอดเวลา เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินอย่างค่อยเป็นค่อยไปมากที่สุด หรือจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากกำลังและความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการบ่ม ซึ่งการบ่มที่ดีนั้นจะทำให้การซึมผ่านของน้ำที่ซึมเข้าไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างอย่างทั่วถึง อันจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แต่โครงสร้างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ น้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ จึงเป็นสาเหตุให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวภายใน และผิวภายนอก

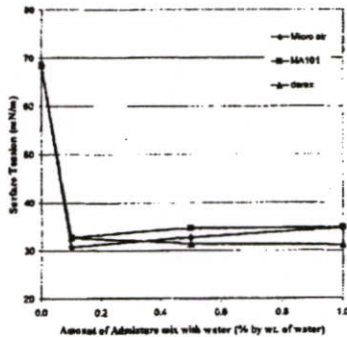
ของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกันเป็นผลให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง และอาจเกิดปัญหาการแตกร้าวต่างๆ ตามมา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีที่จะทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในชั้นส่วนโครงสร้างให้ได้มากที่สุด ซึ่งทำการศึกษาโดยผสมสารกักกระจายฟองอากาศชนิดต่างๆ ลงในน้ำเพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำที่ซึมบ่มคอนกรีตเพื่อให้สามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น โดยน้ำที่ซึมบ่มคอนกรีตได้ซึมผ่านเข้าไปภายในซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มปริมาณน้ำในช่องว่างภายในของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และน้ำที่ซึมบ่มนี้ยังช่วยปกป้องไม่ให้น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย ความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปของน้ำที่ซึมบ่มสามารถวัดได้จากความสามารถในการดูดซึมและปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ณ ระดับความลึกใดๆ ของชั้นส่วนตัวอย่าง

3. การทดลอง

3.1 การทดสอบหาแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศชนิดต่างๆ

การทดสอบหาแรงตึงผิวของน้ำที่ผสมสารกักกระจายฟองอากาศนั้นเป็นการทดสอบเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารกักกระจายฟองอากาศที่ผสมกับน้ำเพื่อให้ได้ค่าแรงตึงผิวที่ต่ำและมีค่าคงตัวเหมาะสมสำหรับใช้ในกาบ่มชั้นตัวอย่างต่อไป โดยใช้จุดอุปกรณ์ทดสอบแรงตึงผิว (Du Nouy surface-tension meter) โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 1 พบว่าสารกักกระจายฟองเมื่อผสมกับน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว เมื่อให้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1% ถึง 1% จะให้ค่าแรงตึงผิวที่ใกล้เคียงกันเท่ากับ 32 mN/m ทั้ง 3 สารกักกระจายฟองอากาศ ในการศึกษานี้เลือกความเข้มข้นที่ 1% เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 การทดลองสำหรับการหาความสามารถการดูดซึมของซีเมนต์พิเศษเชิงผิว ตามมาตรฐาน ASTM C 1585-04

ใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 5 เซนติเมตร ด้านหนึ่งเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์พิเศษด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 นำมาเทลงในแบบ ไล่ฟองอากาศ ปาดผิวหน้าทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เนื่องจากต้องการพิจารณาความสามารถในการดูดซึม ก่อนและหลังจากทำการบ่ม จึงเตรียมตัวอย่างโดยทดสอบก่อนทำการบ่ม (หลังจากถอดแบบ) และทดสอบหลังจากบ่มมาแล้ว เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน จากนั้นนำเข้าเตาอบ 50 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างและวัดขนาด ทำการทดสอบโดยวางในอากาศที่เตรียมมีน้ำและค่าที่ AE ความเข้มข้น 1% โดยวางให้ผิวตัวอย่างด้านหนึ่ง จมในน้ำ 2 ± 1 มิลลิเมตร ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นระยะจนครบ 7 วัน โดยคำนวณหาความสามารถการดูดซึม ได้สมการดังนี้

$$I = \frac{(\Delta mass / A)}{D} \dots (1)$$

- โดยที่ I = ระยะทางที่น้ำถูกดูดซึมเข้าไปในตัวอย่าง (มม.)
- $\Delta mass$ = ความแตกต่างของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปจากน้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)
- A = พื้นที่หน้าตัดของชั้นตัวอย่าง (มม.²)
- D = ความหนาแน่นของน้ำ (กรัม/มม.³)

3.3 การทดลองสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์พิเศษเชิงผิว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ

ใช้แบบทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 40 เซนติเมตร ด้านหนึ่งของหลอดทดสอบเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์พิเศษด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 โดยเทชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร และทำการกระทุ้ง จนถึงความสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- โดยทำการบ่มตัวอย่างต่างๆ ดังนี้
- น้ำบริสุทธิ์
- น้ำผสม MA 101 ความเข้มข้น 1%
- น้ำผสม Micro air ความเข้มข้น 1%
- น้ำผสม Darex ความเข้มข้น 1%
- ผึ่งในอากาศ

โดยเทน้ำบ่มที่ผิวบนของตัวอย่างในปริมาณที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการบ่ม เป็นเวลา 3, 5, 7, 14, และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดระยะเวลาการบ่ม นำตัวอย่างซีเมนต์พิเศษที่ออกมาตัดเป็น 6 ส่วน ขนาดเท่าๆ กัน สูงประมาณ 5 เซนติเมตร นำตัวอย่างทั้ง 6 ส่วน ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก (M_{105}^c) และนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก (M_{950}^c)

คำนวณหาค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สมการดังนี้

$$\text{Degree of Hydration} = \frac{M_{105^\circ\text{C}} - M_{950^\circ\text{C}}}{M_{950^\circ\text{C}}} \times \frac{100}{23} \quad \dots (2)$$

โดยที่ Degree of Hydration = ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (%)

$M_{105^\circ\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 105°C (กรัม)

$M_{950^\circ\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 950°C (กรัม)

23% = คือค่าปริมาณ non-evaporable water คำนวณจากของซีเมนต์ ที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์⁽¹⁾

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการหาความสามารถการดูดซึมน้ำในซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

การวัดค่าการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว เป็นการวัดน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ตัวอย่างได้สัมพัทธ์แล้ว ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเกิดจากมีน้ำหนักของน้ำที่ดูดซึมเข้าไป เมื่อทำการบ่มไปเป็นเวลานานๆ น้ำที่ดูดซึมจะมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ไม่สามารถดูดซึมได้อีก น้ำหนักของตัวอย่างก็จะคงที่

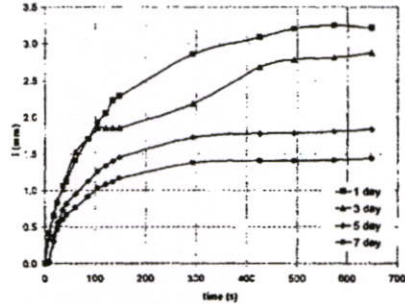
ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบให้น้ำบ่มสัมพัทธ์ของตัวอย่างเคียงด้านเดียว เพื่อให้เหมือนกับสภาพการบ่มจริงที่หน้างาน ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำที่ได้เป็นการคำนวณหาระยะที่น้ำบ่มถูกดูดซึมเข้าไปในตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1585-04 และน้ำบ่มที่ใช้ทดสอบคือ น้ำกับน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1% เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

สภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.3 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อแสดงให้เห็นค่าการดูดซึมน้ำได้อย่างชัดเจน และก่อนที่ตัวอย่างจะนำมาทดสอบ จะนำไปบ่มในน้ำปกติ เพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำเปรียบเทียบระหว่างน้ำและน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1% ว่าสารใดที่ยังสามารถดูดซึมเข้าไปในตัวอย่างได้มากกว่ากัน

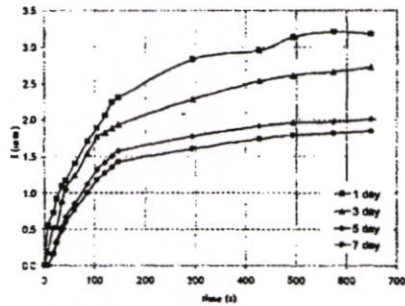
จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จะพบว่าอัตราการดูดซึมจะเพิ่มสูงในช่วงแรก และค่อยๆ คงที่เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งในตัวอย่างที่ทำการบ่มมาไม่นานจะมีอัตราการดูดซึมสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่ทำการบ่มมานานกว่า

จากรูปที่ 4 จะพบว่าการทดสอบโดยน้ำเมื่อทำการเปรียบเทียบ AE เมื่อตัวอย่างผ่านการบ่มมาแล้ว 7 วัน จะให้อัตราการดูดซึมน้ำที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1% มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นกว่าการทดสอบโดยน้ำอย่างเห็นได้ชัด การที่อัตราการดูดซึมน้ำมีมากขึ้นนั้น มีผลมาจากปริมาณซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา มีปริมาณมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 ที่ไม่ได้ทำการบ่มเลย จะมีอัตราการดูดซึมน้ำมาก เป็น 5 เท่าของอัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการบ่มมาแล้ว 1 วัน

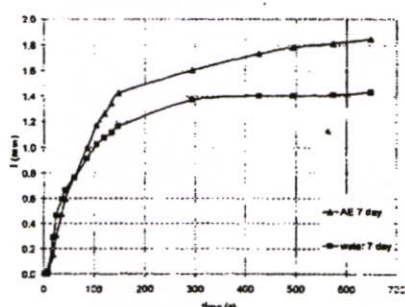
ตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำผสม AE เพิ่มขึ้น 1% นั้นมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำ เมื่อทำการบ่มมาก่อนเป็นเวลา 5-7 วัน เป็นผลมาจาก ช่องว่างเล็กๆ ที่อยู่ในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ เมื่อทำการบ่มไปเรื่อยๆ ช่องว่างเล็กๆ นั้น จะค่อยๆ เล็กลงจนน้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ นั้นได้ง่า แต่สารเติมแต่งที่มีคุณสมบัติซึมผ่านได้ดี จะสามารถที่จะซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ ในซีเมนต์เพสต์ได้



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาโดยทดสอบกับน้ำ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาโดยทดสอบกับ AE เพิ่มขึ้น 1%



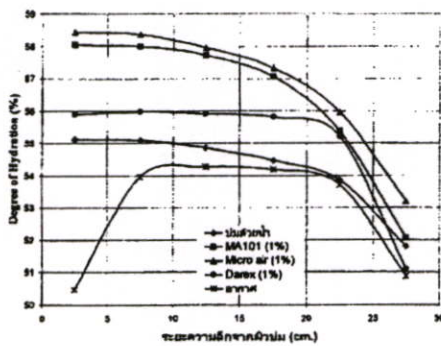
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาของการทดสอบที่ 7 วัน

4.2 ผลการทดลองปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความถี่ต่างๆ

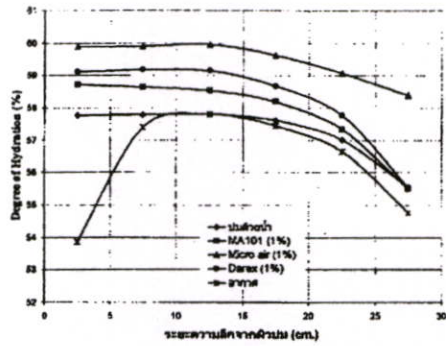
การวัดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความถี่ต่างๆ เป็นการวัดการซึมผ่านของน้ำบ่มลงไปในช่วงความถี่ต่างๆ ซึ่งการซึมผ่านของน้ำบ่มนั้นจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไป หากน้ำบ่มมีคุณสมบัติที่สามารถซึมผ่านได้ดีแล้วก็จะทำให้ชั้นตัวอย่างนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทั่วทั้งตัวอย่าง ในการทดสอบจะเป็นการหาน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างหลังจากผ่านการอบแห้ง ซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปจะนำไปคำนวณหาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในตัวอย่างนั้น โดยมีระยะเวลาในการบ่มที่ 3, 5, 7, 14, และ 28 วัน และวิธีที่ไร้บ่มทดสอบคือ น้ำ, สารลดแรงดึงผิว (น้ำผสมสารตักกระจ่ายฟองอากาศ) และแห้งในอากาศ เพื่อ

นำมาเปรียบเทียบกับสภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำคือซีเมนต์ 0.25 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์

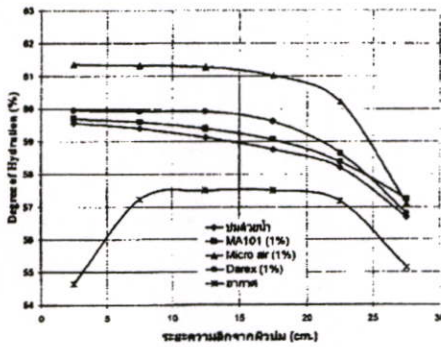
จากรูปที่ 5-6 จะพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำคือซีเมนต์ 0.25 เมื่อทำการบ่มจะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นมา และการบ่มด้วยน้ำบ่มต่างๆ ในช่วง 3-5 วันปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวบนจะมากกว่าที่ผิวล่างของตัวอย่าง ซึ่งสารลดแรงดึงผิวเกือบทั้งหมดจะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่าน้ำ และเมื่อตัวอย่างที่ทำการบ่มนานกว่านั้น การบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจะมีแนวโน้มให้ ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากตลอดทั้งความถี่ชั้นตัวอย่าง ขณะที่การบ่มด้วยน้ำจะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผิวบนที่ทำการบ่ม ดังรูปที่ 7-9



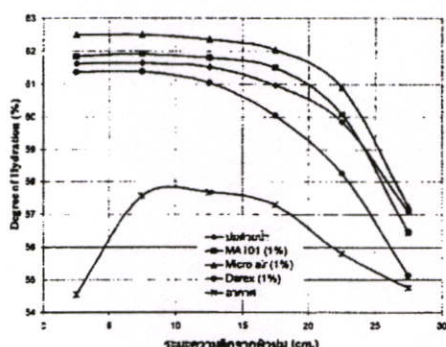
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความถี่ ตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน



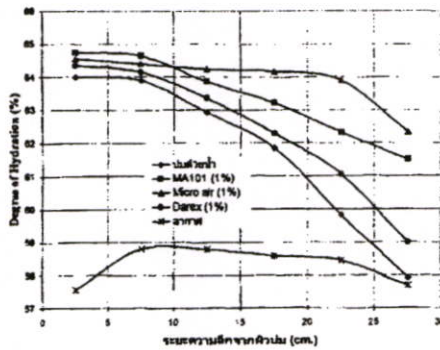
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความถี่ ตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 5 วัน



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความถี่ ตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความถี่ ตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับความลึก
ตัวอย่าง w/c 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

การบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % จะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่คิดว่าการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสารกักกระจายฟองอากาศที่ให้ผลดีที่สุด คือสาร Micro air เพราะช่วยให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากที่สุดที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 5, 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างที่บ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % จะให้ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เท่าๆกัน ที่ระยะความลึกจาก 0 - 12.5 เซนติเมตร วัดจากผิวบ่ม และเมื่อการบ่มด้วยน้ำผสม AE เข้มข้น 1 % เป็นเวลานานขึ้น ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะใกล้เคียงกับคลอดทั้งหมดตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่บ่มด้วยน้ำผสม Micro air ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (รูปที่ 9) จะให้ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันประมาณ 64.5 % คลอดระยะจาก 0-22.5 เซนติเมตร และจะค่อยๆ ลดลงที่ระยะ 22.5-27.5 เซนติเมตรจากผิวบ่ม

การบ่มด้วยน้ำนั้น ระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีลักษณะลดลงตามระยะความลึกจากผิวบ่มในทุกๆ ระยะเวลาการบ่ม เป็นเพราะน้ำจากการบ่มที่ผิวบ่มจะซึมเข้าไปในช่องว่างโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ได้บ้างมาก ซึ่งต้นนิมฐานได้ว่า น้ำจากผิวบ่มจะซึมผ่านซีเมนต์เพสต์ได้ยากเพราะน้ำมีแรงดึงผิวที่มากจึงซึมเข้าไปในช่องว่างโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ได้น้อยและใช้เวลานานสำหรับการบ่มด้วยอากาศหรือไม่ได้บ่ม จะมีระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าการบ่มด้วยวิธีอื่น แต่ถ้าไม่เปรียบเทียบวิธีอื่น พบว่าตรงกลางของตัวอย่าง มีแนวโน้มปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างมากเพราะที่ตรงส่วนนี้มีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนอื่น เนื่องจากผิวบ่มเป็นระบบเปิด น้ำที่ใช้ผสมซีเมนต์จะสูญเสียไปกับการระเหย ส่วนล่างของซีเมนต์ซึ่งมีความต่างจากระยะมาก จึงลดลงไปด้านล่าง จึงค้ำน้ำขึ้นมาตรงบริเวณตรงกลางของระยะชั้นตัวอย่าง

5. สรุปผลการทดลอง

การที่สารลดแรงดึงผิว AE สามารถดูดซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ได้ดีกว่าน้ำมาก ช่วยให้ระยะเวลาในการบ่มน้อยลงเพื่อให้ถึงค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต้องการได้ การคำนึงไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของตัวอย่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่ทดสอบด้วยสารลดแรงดึงผิว จะเพิ่มขึ้นเร็วในช่วง 1-7 วันแรก ซึ่งมากกว่าการทดสอบกับน้ำ ถึง 15 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น และจะให้ค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่คิดว่าการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสารกักกระจายฟองอากาศที่ให้ผลดีที่สุด คือสารกักกระจายฟองอากาศ Micro air โดยที่การบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจะสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ดีจากผิวบ่มที่ทำการบ่ม โดยมีระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่าๆกันตลอดถึงระยะ 12.5 เซนติเมตร เมื่อทำการบ่มจนครบ 3 วัน และสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ดีถึง 22.5 เซนติเมตร เมื่อทำการบ่มจนครบ 28 วัน

การบ่มด้วยน้ำ น้ำจะไม่สามารถเข้าไปในชั้นตัวอย่างที่ระยะไกลจากผิวบ่มที่ทำการบ่ม ที่จากระยะระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่ามากบริเวณผิวที่ได้รับการบ่มแล้วค่อยๆ ลดลงตามระยะห่างจากผิวบ่ม

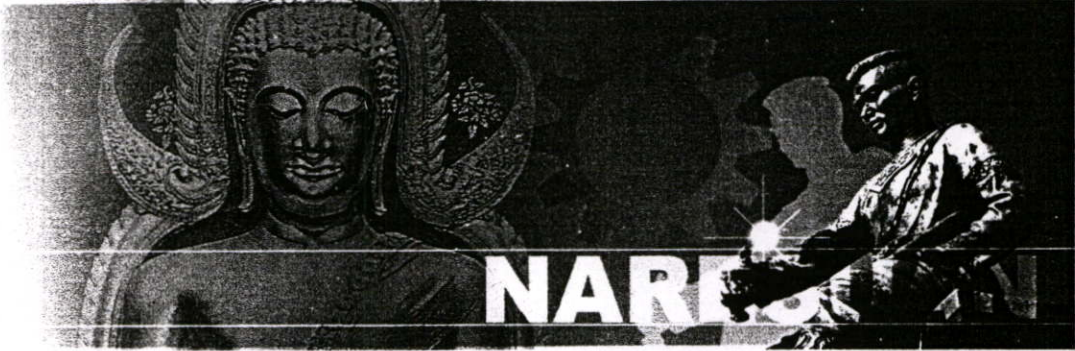
6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tazawa, E.: Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceeding of the International Workshop organized by JCI, pp.3-67, 1998.
- [2] Neville, A.M.: Properties of Concrete, pp. 5-53, 1963.
- [3] Taylor, H.F.W.: Cement chemistry 2nd edition, pp. 227-255, 1997.
- [4] Bentz, D.P.: Influence of Curing Conditions on Water Loss and Hydration in Cement Pastes with and without Fly Ash Substitution, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6886, July 2002.
- [5] Powers, T.C.: Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Paste, PCA Bulletin, No. 10, pp. 2-12, 1959.
- [6] Power, T.C.: Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27, pp. 790-794, 1935.
- [7] Malesee, K., Kasai, T.: Effect of Penetration of Curing Water on Self-desiccation and Strength of Cementitious Materials, Cement Science and Concrete Technology by JCA, Vol.55, pp. 109-115, 2001.
- [8] Malesee, K., Kasai, T.: Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Strength of Concrete, Proceeding of the first fib Congress 2002, Osaka, Japan, pp. 289-296, 2002.
- [9] Malesee, K., Panitkulpong, A., Kasai, T.: Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Properties of Hardened Cement Paste, Concrete Research and Technology by JCI, Vol.25, pp. 581-586, 2003.
- [10] Malesee, K. and Kasai, T.: Influences of Penetrative Curing on Properties of Cementitious Materials, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 767 / V-64, pp. 301-312, 2004

2. รุ่งโรจน์ หนูรัตน์ และดร.คมสัน มาลีสี, การศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิว ต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตในกรณีเงื่อนไขและวิธีการบ่มต่างๆ, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, หน้า NCCE12-Volume 5 (MAT)-Page 60 - NCCE12-Volume 5 (MAT)-Page 65, จ.พิษณุโลก, ประเทศไทย, พฤษภาคม 2-4, 2550.



**การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12**
The 12th National Convention on Civil Engineering



PROCEEDINGS

"ประเทศไทยก้าวไกลไปกับวิศวกรรมโยธา"
Thailand Advances with Civil Engineering

2-4 พฤษภาคม 2550

โรงแรมอมรินทร์ ลากูน

อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

ร่วมจัดโดย

- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตสารสนเทศพะเยา

โดยความร่วมมือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านวิศวกรรมโยธาและสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ



ปูนซีเมนต์นครหลวง
SIAM CITY CEMENT

**การศึกษาอิทธิพลของการบ่มโดยใช้สารลดแรงตึงผิวต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต
ในกรณีเงื่อนไขและวิธีการบ่มต่างๆ**
**A STUDY ON INFLUENCE OF LOW SURFACE TENSION WATER CURING IN ANY
CURING CONDITIONS ON PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIALS**

รุ่งโรจน์ หนูนุรัตน์ (Rungrote Noonurat)¹

ดร.กมลฉัตร นาคีดี (Dr. Komsan Maleesee)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท rungrote_bhur@hotmail.com

²อาจารย์ kmkomsan@jku.ac.th

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการบ่มในเงื่อนไขและสภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อลดการดูดน้ำทำให้น้ำที่ใช้บ่มมีแรงตึงผิวลดลง โดยพิจารณาถึงความหนาแน่นในการซึมผ่าน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการหดตัว โดยทั่วไปตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่มักมี W/C ต่ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตและน้ำที่ใช้ในการบ่มรวมกันแล้วยังไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตตัวอย่างให้ดีขึ้นโดยใช้ น้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าน้ำที่มีแรงตึงผิวต่ำมีคุณสมบัติในการซึมผ่านได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยเฉพาะที่อายุของซีเมนต์ เพทส์ที่มากขึ้น อีกทั้งมีคุณสมบัติในการซึมผ่านจากผิวออกที่ทำการบ่มได้ดีกว่าน้ำธรรมดา โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทุกระดับความลึก มีค่ามากกว่าการบ่มด้วยน้ำธรรมดา

ABSTRACT: In this paper, influence of low surface tension water curing in any curing conditions (water containing AE-admixture) on surface absorption, degree of hydration and autogenous shrinkage were experimentally investigated. In a large-size specimen with a low water-cement ratio, both the mixing water and penetrative water of standard water curing are not sufficient to complete the hydration of the entire specimen. Therefore, low surface tension water curing was studied to improve the properties of the specimen at any distances from the surface during hydration process. From experimental method, cement paste cured with low surface tension water had higher permeability then cured with standard water, especially at older age. Furthermore, this provided better permeable property and higher degree of hydration at all depths than standard water curing.

KEYWORDS: Curing, Low surface tension water, AE-admixture, Autogenous shrinkage, Degree of hydration

1. บทนำ

ในงานก่อสร้างโคททั่วไป วิธีที่จะควบคุมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้มีคุณภาพที่ดีวิธีหนึ่งคือ การบ่มคอนกรีต ซึ่งการบ่มคอนกรีตจะช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต และดึงให้น้ำจากภายนอกแพร่ซึมเข้าไปภายใน ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เป็นผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้การบ่มจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่องานก่อสร้างทั่วไปเป็นอย่างมาก

ระหว่างที่คอนกรีตกำลังแข็งตัวอยู่นั้น คอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาทางเคมีอย่างเพียงพอ หากน้ำไม่เพียงพอในระลอก การเกิดปฏิกิริยาเคมีก็จะหยุดในขณะนั้น และถ้าอยู่ในระยะที่มีความแข็งตัวไม่พอที่ค้ำทานการหดตัวอันเนื่องจากการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแล้ว อาจทำให้เกิดการร้าวแตกหรือร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีตหรือคานคองคั้งก่อนนั้นได้ทุกเมื่อ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการเก็บน้ำให้ชุ่มเคลือบผิว เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินอย่างต่อเนื่องให้มากที่สุด หรือจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากกำลังและความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการบ่ม ซึ่งการบ่มที่ดีนั้นจะทำให้การซึมผ่านของน้ำที่ไ้ซึมเข้าไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างอย่างทั่วถึง อันจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แต่โครงสร้างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ น้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ จึงเป็นสาเหตุให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผิวภายใน และผิวภายนอกของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกันเป็นผลให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง และอาจเกิดปัญหาการแตกร้าวต่างๆ ตามมา

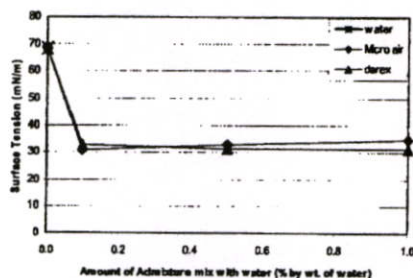
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีที่จะทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในชิ้นส่วนโครงสร้างให้ได้มากที่สุด ซึ่งทำการศึกษาโดยผสมสารกักกระจายฟองอากาศ Air-Entraining Admixtures (AE) ชนิดต่างๆ ลงในน้ำเพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำที่ไ้ซึมคอนกรีตเพื่อให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น โคน้ำที่ไ้ซึมผิวคอนกรีตได้ซึมผ่านเข้าไปภายในซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มปริมาณน้ำในช่องว่างภายในของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และน้ำที่ไ้ซึมนี้ยังช่วยปกป้องไม่ให้

ภายในคอนกรีตระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย ความสามารถในการซึมผ่านเข้าไปของน้ำที่ไ้ซึมสามารถวัดได้จากความสามารถในการดูดซึมและ ปฏิกิริยา ไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ณ ระดับความลึกใดๆ ของชิ้นส่วนตัวอย่าง

3. การทดลอง

3.1 การทดสอบหาแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศชนิดต่างๆ

การทดสอบหาแรงตึงผิวของน้ำที่ผสมสารกักกระจายฟองอากาศนั้นเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารกักกระจายฟองอากาศที่ผสมกับน้ำเพื่อให้ได้ค่าแรงตึงผิวที่ต่ำและมีค่าคงตัวเหมาะสำหรับใช้ในการบ่มชิ้นตัวอย่างต่อไป โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบแรงตึงผิว (Du Nouy surface-tension meter) โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารกักกระจายฟองอากาศในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 1 พบว่าสารกักกระจายฟองเมื่อผสมกับน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว เมื่อให้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1% ถึง 1% สารกักกระจายชนิด Micro air และ Durex จะให้ค่าแรงตึงผิวที่ใกล้เคียงกันเท่ากับ 32 mN/m ในการศึกษานี้เลือกความเข้มข้นที่ 1% เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 การทดสอบผู้หับการหาความสามารถการซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์แข็งตัว

ใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และสูง 5 เซนติเมตร ด้านหนึ่งเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์ 0.25 นำมาทดลองในแบบ ใส่ฟองอากาศปกติหนักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เตรียมตัวอย่างโดยทดสอบก่อนทำการบ่ม (หลังจากถอดแบบ) และทดสอบหลังจากบ่มมาแล้ว โดยทำการบ่มแบบ Wrapping บ่มด้วยน้ำ และปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ ทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดระยะเวลาของซีเมนต์แต่ละครัน 1, 3, 7, และ 14 วันแล้วจึงนำมาทดสอบ นำเข้าเตาอบ 50 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างและวัดขนาด ทำการทดสอบโดยวางในภาชนะที่เติมน้ำและอากาศที่มี AE ความเข้มข้น 1% ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นระยะจนครบ 7 วัน โดยคำนวณหาความสามารถการซึมผ่าน ได้สมการดังนี้

$$\text{Weight of Penetrated water} = \frac{(W_n - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ Weight of Penetrated water = เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ซึมผ่าน

W_n = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_0 = น้ำหนักตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ (กรัม)

3.3 การทดสอบสำหรับการหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพื่อที่เชิงตัว ในแต่ละระดับชั้นความลึกต่างๆ

ใช้แบบพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 และสูง 40 เซนติเมตร ด้านหนึ่งของหลอดพลาสติกเป็นระบบปิด ผสมซีเมนต์เพื่อที่เชิงตัวอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 โดยเทชั้นๆ ละ 5 เซนติเมตร และทำการกระทุ้ง จนถึงความสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยทำการบ่มตัวอย่างการบ่มด้วยน้ำบริสุทธิ์ ด้วยน้ำผสม AE ความเข้มข้น 1% โดยทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดระยะเวลาจนอายุครบ 28 วัน และทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงเทน้ำบ่มที่ผิวบนของตัวอย่าง ในปริมาณที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการบ่ม เมื่อครบกำหนด 28 วัน จึงนำตัวอย่างซีเมนต์เพื่อที่เชิงตัวออกมาตัดเป็น 6 ส่วน ขนาดเท่าๆ กัน สูงประมาณ 5 เซนติเมตร นำตัวอย่างทั้ง 6 ส่วน ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{105^{\circ}\text{C}}$) และนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก ($M_{950^{\circ}\text{C}}$) คำนวณหาระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สมการดังนี้

$$\text{Degree of Hydration} = \frac{M_{105^{\circ}\text{C}} - M_{950^{\circ}\text{C}}}{M_{950^{\circ}\text{C}}} \times \frac{100}{23} \quad (2)$$

โดยที่ Degree of Hydration = ค่าระดับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (%)

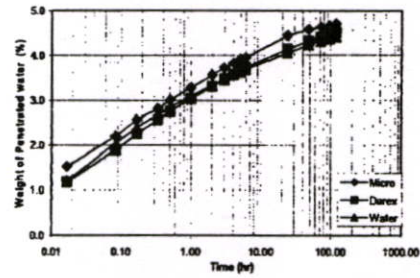
$M_{105^{\circ}\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 105°C (กรัม)

$M_{950^{\circ}\text{C}}$ = น้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังจากเข้าเตาอบที่ 950°C (กรัม)

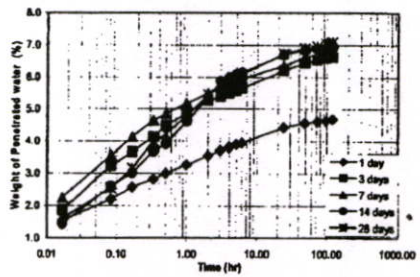
23% = ค่าปริมาณ non-evaporable water คือน้ำหนักของซีเมนต์ที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์^[1]

3.4 การทดสอบการยึดหดตัวในซีเมนต์เพื่อที่เชิงตัว ตามมาตรฐาน JIS A 1129

เตรียมแบบหล่อด้วยขนาดกว้าง 4 สูง 4 ฮาว 16 เซนติเมตร ติดตั้งเกจปลิกและวัดระยะบันทึค่า (L) ผสมซีเมนต์เพื่อที่เชิงตัวในอัตราส่วนซีเมนต์ 0.25 โดยแบ่งการเตรียมเพื่อที่เชิงตัวเข้าแบบ



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (หลังถอดแบบ)



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่ซึมผ่านกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดย Micro Air

เป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน แล้วทำการปาดหน้าซีเมนต์เพื่อทำให้เรียบ ทั้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วถอดแบบ หลังจากถอดแบบไว้ระยะเวลาของ ตัวอย่างคือเครื่องทดสอบบันทึกค่า (X_0) จากนั้นนำตัวอย่างมา ทำการบ่ม โดยทำการบ่มแบบค้อนเนื่องตลอดเวลา และทำการบ่ม แบบไม่ค้อนเนื่องทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วันแล้วจึงทำ การบ่มตัวอย่าง โดยวัดระยะของตัวอย่างทุกๆ วันจนอายุครบ กำหนดบันทึกค่า (X_1) คำนวณหาค่าการหดตัว ได้สมการดังนี้

$$\text{Autogenous Shrinkage} = \frac{(X_0 - X_1)}{L_0} \quad (3)$$

โดยที่ Autogenous Shrinkage = ค่าการหดตัว

X_0 = ระยะเริ่มต้นที่อายุ 1 วันหลังถอดแบบ (มิลลิเมตร)

X_1 = ระยะที่อายุ 2 วันถึงอายุ 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_0 = ระยะห่างของหัวกดบีบ (มิลลิเมตร)

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบการหาความสามารถการซึมผ่านใน ซีเมนต์ที่แห้งตัว

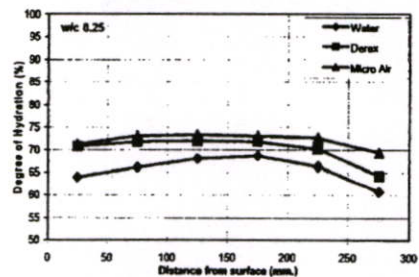
การวัดค่าการซึมผ่านของซีเมนต์ที่แห้งตัวแล้ว เป็นการ วัดน้ำหนักของซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากซึมตัวอย่างได้ สัมผัสน้ำแล้ว ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเกิดจากมีน้ำหนักของน้ำที่ ทดสอบซึมผ่านเข้าไป เมื่อทำการทดสอบไปเป็นเวลานานๆ น้ำ ซึมผ่านจะมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ไม่สามารถซึมผ่านได้อีก น้ำหนักของตัวอย่างก็จะคงที่ สภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ซึ่งมีปริมาณน้ำไม่ เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อแสดงให้เห็นค่าการซึม ผ่านได้อย่างชัดเจน และก่อนที่ตัวอย่างจะนำมาทดสอบ จะนำไป บ่มตัวอย่างด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาค่าการซึมผ่านเปรียบเทียบระหว่างน้ำและ น้ำผสม AE เข้มข้น 1% ว่าสารใดที่สามารถซึมผ่านเข้าไปใน ตัวอย่างได้มากกว่ากัน

จากรูปที่ 2 จะพบว่าการทดสอบตัวอย่างหลังการถอดแบบ ตัวอย่างเมื่อทำการเปรียบเทียบ AE ทั้ง 2 ชนิดจะให้อัตราการ ซึมผ่านที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่ทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1% มีอัตราการซึมผ่านที่สูงขึ้นกว่าการทดสอบด้วยน้ำ มีผลมา จากน้ำที่มีแรงดึงผิวลดลงทำให้สามารถจะซึมผ่านเข้าไปใน ตัวอย่างได้ดีกว่า

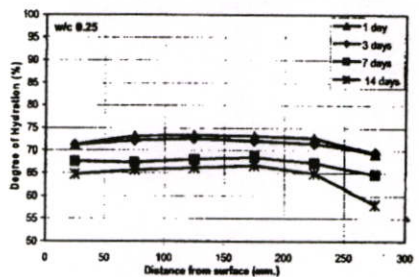
จากรูปที่ 3 จะพบว่าการทดสอบกับน้ำผสม AE เข้มข้น 1% มี อัตราการซึมผ่านที่สูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทิ้งไว้ในอากาศ นานขึ้น เนื่องจากน้ำในตัวอย่างระเหยออกไปและทำให้ ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ เป็นผลทำให้ช่องว่างเล็กๆ ที่อยู่ ในโครงสร้างซีเมนต์ที่แห้งตัวยังมีอยู่ในชั้นตัวอย่างทำให้การซึม ผ่านมีมากขึ้นตามมา

4.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ

การวัดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ความลึกต่างๆ เป็นการวัด การซึมผ่านของน้ำบ่มลงไปในพื้นที่ความลึกต่างๆ ซึ่งการซึมผ่าน ของน้ำบ่มนั้นจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินทั่วทั้ง ตัวอย่าง ในการทดสอบจะเป็นการหาน้ำหนักที่หายไปของ ตัวอย่างหลังจากผ่านการอบแล้ว ซึ่งค่าน้ำหนักที่หายไปจะนำไป คำนวณหาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน วิธีที่ใช้บ่มทดสอบคือ น้ำ และน้ำผสม AE เข้มข้น 1% ทั้งแบบค้อนเนื่องและไม่ค้อนเนื่อง



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความ ลึกของตัวอย่างที่บ่มด้วย น้ำ Durex และ Micro Air ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับระยะความ ลึกของตัวอย่างที่บ่มด้วย Micro Air

กัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสภาพของตัวอย่างจะเลือกใช้ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25, 0.30 และ 0.44 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ

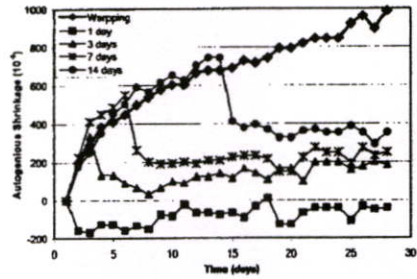
จากรูปที่ 4 จะพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ที่อายุ 28 วัน เมื่อทำการบ่มด้วยน้ำผสมสารลดแรงดึงผิวทั้ง 2 ชนิดจะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นสูงกว่าการบ่มด้วยน้ำ

จากรูปที่ 5 จะพบว่าจากการทดสอบโดยทิ้งตัวอย่างไว้ในห้องทดลอง 3, 7 และ 14 วัน แล้วทำการบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิว จนอายุซีเมนต์ครบ 28 พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าที่ลดลงตามวันของการบ่ม แต่จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 14 วันมีค่าใกล้เคียงกับการบ่มด้วยน้ำตลอดเวลา เป็นเพราะน้ำที่มีแรงดึงผิวต่ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างที่มีความหนาแน่นได้ดีกว่า น้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังมีค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาของตัวอย่าง

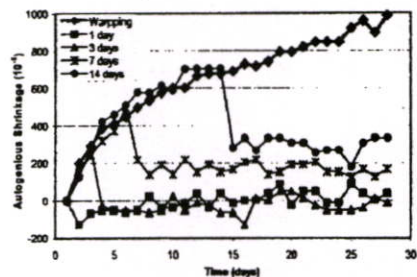
4.3 การทดสอบการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ ตามมาตรฐาน JIS A 1129

การวัดการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ (Autogenous shrinkage) เป็นการวัดการหดตัวภายนอกของซีเมนต์เพสต์ อันเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์เพสต์และเพอร์ เซปิมขนาดรวมของเหลว และของแข็ง เกิดปฏิกิริยามีปริมาณที่ลดลงหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว โดยทดสอบด้วยการบ่มแบบ Wrapping น้ำ และบ่มด้วยน้ำผสมสารลดแรงดึงผิวตามเงื่อนไข โจทย์ทำการบ่มแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและทำการบ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือทิ้งไว้ในห้องทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จนได้อายุที่ 1, 3, 7 และ 14 วัน แล้วจึงทำการบ่ม

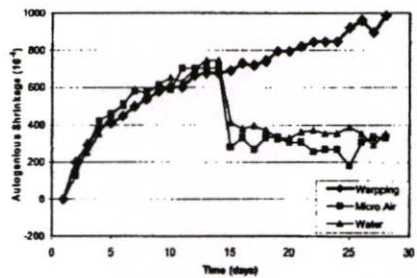
จากรูปที่ 6-7 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ทดสอบโดย Wrapping น้ำ และ AE พบว่าการบ่มแบบ Wrapping มีการหดตัวอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการทดสอบ และเมื่อทดสอบโดยการนำมาบ่มด้วยน้ำและน้ำผสม AE ตลอดเวลาจะมีการหดตัวเพียงเล็กน้อย ตลอดระยะเวลาในการทดสอบและเมื่อทดสอบโดยการนำมาบ่มด้วยน้ำและสารลดแรงดึงผิว AE เข้มข้น 1% ผสมกับน้ำแบบ ไม่ต่อเนื่องจะมีการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงแรกเพราะตัวอย่างสัมผัสอากาศโดยตรง และจะเกิดการขยายตัวเมื่อถึงวันที่ทำการบ่ม และจะมีการหดตัวเพียงเล็กน้อย ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วยน้ำ ที่ w/c 0.25



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ กับระยะเวลา ที่ทดสอบด้วย Micro air ที่ w/c 0.25



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในซีเมนต์เพสต์ กับระยะเวลา ที่เวลาการบ่ม 14 วัน ที่ w/c 0.25

จากรูปที่ 8 การยึดหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ทดสอบโดยการบ่มแบบ Wrapping ตลอดเวลากับการบ่มด้วยน้ำ และสารลดแรงดึงผิว AE เพิ่มขึ้น 1% ผสมกับน้ำ แบบไม่ค้ำเนื่องที่อายุซีเมนต์เพสต์ 14 วัน พบว่าช่วงแรกของการทดสอบแบบไม่ค้ำเนื่อง มีการยึดหดอย่างค้ำเนื่องและมีค้ำมากกว่าการทดสอบแบบ Wrapping เนื่องจากค้ำอย่างค้ำเนื่องสัมผัสกับอากาศโดยตรงเกิดการระเหยของน้ำหรือเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์แค้เมื่อครบกำหนดค้ำค้ำอย่างไปทำการบ่ม ค้ำอย่างจะเกิดการขยายค้ำอย่างรวดเร็ว แค้เมื่อเวลาผ่านไป ค้ำอย่างจะยึดหดค้ำเพื่อถึ้นย้อตลอดระยะเวลาในการทดสอบ

5 สรุปผลการทดลอง

1. น้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตมีค่าแรงดึงผิวประมาณ 69 mN/m เมื่อทำการผสมด้วยสารกักกระจ่ายฟองอากาศความเข้มข้น 1% จะมีค่าแรงดึงผิวลดลงเหลือประมาณ 32 mN/m ทำให้สามารถซึมผ่านเข้าไปในค้ำอย่างได้ค้ำกว่าน้ำ และยังสามารรถซึมผ่านเข้าไปในค้ำอย่างที่ทิ้งไว้ในอากาศที่เวลาต่างๆ กันหรือที่ไม่ได้รับการบ่มเลยได้ค้ำก้ำค้ำ

2. จากการทดสอบโดยทั้งค้ำอย่างไว้ในห้องทดลอง 3, 7 และ 14 วัน แล้วทำการบ่มด้วยสารลดแรงดึงผิวจนอายุซีเมนต์ครบ 28 วัน พบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค้ำที่ลดลงตามวันของการบ่มแค้จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 14 วันมีค้ำใกล้เคียงกับการบ่มค้ำอย่างตลอดเวลา

3. จากการทดสอบการยึดหดตัวของซีเมนต์เพสต์ พบว่าการบ่มค้ำอย่าง และ AE เพิ่มขึ้น 1% การยึดหดค้ำก้ำขึ้นต่างกันเพียงเล็กน้อย แค้เมื่อทำการบ่มแบบ Wrapping ค้ำอย่างมีการหดค้ำอย่างค้ำเนื่อง และมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยมิต้าสูงกว่าการบ่มค้ำอย่าง และ AE เพิ่มขึ้น 1% ประมาณ 600 μm ที่ 28 วัน

กิดคิกรวมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้อำเภอพัฒนาศึกษาทในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่งนใหม่" ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัยเพิ่มเติม นายดำรงเดช ตุนาธิธรรม นายธีรวัฒน์ พิทักษ์ และนายวิษพล ประทุมวรรณ นักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ร่วมงานวิจัย งานงานวิจัยด้านวัสดุค้ำค้ำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tazawa, F., 1998, Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceeding of the International Workshop organized by JCI : pp.3-67.
- [2] Neville, A.M., 1963, Properties of Concrete : pp. 5-53
- [3] Taylor, H.F.W., 1997, Cement chemistry 2nd edition : pp. 227-255
- [4] Beutz, D.P., July 2002, Influence of Curing Conditions on Water Loss and Hydration in Cement Pastes with and without Fly Ash Substitution, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6886
- [5] Powers, T.C., 1959, Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Paste, PCA Bulletin, No. 10: pp. 2-12.
- [6] Power, T.C., 1935, Absorption of water by Portland cement paste during the hardening process, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27: pp. 790-794
- [7] Malesee, K., Kasai, T., 2001, Effect of Penetration of Curing Water on Self-desiccation and Strength of Cementitious Materials, Cement Science and Concrete Technology by JCA, Vol.55: pp. 109-115
- [8] Malesee, K., Kasai, T., 2002, Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Strength of Concrete, Proceeding of the first fib Congress 2002, Osaka, Japan: pp. 289-296
- [9] Malesee, K., Panikulpong, A., Kasai, T., 2003, Effect of Penetrative Conditions of Water for Curing on Properties of Hardened Cement Paste, Concrete Research and Technology by JCI, Vol.25: pp. 581-586
- [10] Malesee, K. and Kasai, T., 2004, Influences of Penetrative Curing on Properties of Cementitious Materials, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 767 / V-64: pp. 301-312

เกี่ยวกับผู้เขียน



นาง รุ่งโรจน์ หนูบุญรัตน์
เกิดเมื่อ วันที่ 5 กรกฎาคม 2522
จบการศึกษาระดับ พ.บ. (โยธา) จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม พ.ศ. 2547
กำลังศึกษาระดับ พ.ม. (โยธา) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายรุ่งโรจน์ หนุณรงค์
วัน เดือน ปีเกิด 5 กรกฎาคม 2522 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี
ที่อยู่ 86/1 หมู่ 6 ตำบล สระแก้ว อำเภอ เมือง
จังหวัด สุพรรณบุรี 72230
ประวัติการศึกษา 2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
2548 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง