

การศึกษาคืออิทธิพลของ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่มีผลต่อการหดตัวของ
 Mortar ในขณะบ่มในสภาพอากาศร้อนชื้น

A STUDY INFLUENCE OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY EFFECT
 TO EARLY AGE SHRINKAGE OF MORTAR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ดำเนินการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2554

การศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่มีผลต่อการหดตัวของ
ซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงอายุเริ่มต้น

A STUDY INFLUENCE OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY EFFECT
TO EARLY AGE SHRINKAGE OF MORTAR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2554

A STUDY INFLUENCE OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY EFFECT
TO EARLY AGE SHRINKAGE OF MORTAR



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2011



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่มีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงอายุเริ่มต้น

A STUDY INFLUENCE OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY EFFECT TO EARLY AGE SHRINKAGE OF MORTAR

นักศึกษา นาย ธนาคม ดิวานนท์ รหัสประจำตัว 51010557

นาย ชีรพงศ์ รูปโอ รหัสประจำตัว 51010606

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

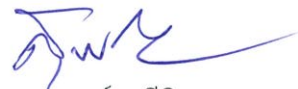
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี	มาลีสี	
ผศ. ศักดิ์ชัย สกานูพงษ์	สกานูพงษ์	
อ. ศิลป์ชัย งานสุวรรณ	งานสุวรรณ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 17 เมษายน 2555 เวลา 14.30 - 15.00

สถานที่สอบ ณ อาคาร CV ชั้น 2 (ห้อง CV-201)

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ. สุพจน์ ศรีนิล)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 17 เมษายน พ.ศ. 2555

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่มีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงอายุเริ่มต้น			
นักศึกษา	นาย ธนาคม	ติวานนท์	รหัสประจำตัว	51010557
	นาย อธิพงศ์	รูปโอ	รหัสประจำตัว	51010606
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี			
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต			
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์			
ปีการศึกษา	2554			

บทคัดย่อ

การหดตัวรวม (Total shrinkage) เกิดขึ้นจากผลรวมของสภาวะการหดตัวแบบอโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้ง ดังนั้นค่าของการหดตัวรวมจึงเป็นสิ่งสำคัญเมื่อมีการประเมินความเป็นไปได้ในการแตกร้าวของมอร์ตาร์ซึ่งมีการหดตัวตั้งแต่ในช่วงของอายุเริ่มต้น (Early age) ในการทดสอบนี้วัดค่าการหดตัวรวมในแนวราบของมอร์ตาร์ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากผสมโดยอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ จากผลการทดสอบจะสามารถประเมินโอกาสในการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวในช่วงของอายุเริ่มต้นของมอร์ตาร์ได้ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการหดตัวรวมที่สำคัญอยู่ในช่วงอายุเริ่มต้นโดยมอร์ตาร์ที่อยู่ในอุณหภูมิสูงอัตราการหดตัวจะมากและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในลำดับต่อมา ในทางกลับกันหากความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอัตราการหดตัวก็จะมากขึ้น ซึ่งอิทธิพลสองอย่างนี้ถือเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้มอร์ตาร์เกิดการหดตัวมากที่สุดในงานก่อสร้าง การวิจัยนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในด้านการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างต่อไป

Title	A STUDY INFLUENCE OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY EFFECT TO EARLY AGE SHRINKAGE OF MORTAR
Student	MR. THANAKOM THIWANONTH Student ID. 51010557 MR. THEERAPONG ROOP-O Student ID. 51010606
Degree	BACHELOR OF ENGINEERING
Program	CIVIL ENGINEERING
Year	2011
Advisor	ASST.DR. KOMSAN MALEESEE

ABSTRACT

The total shrinkage are plus of drying and autogenous conditions. When assessing the cracking potential of mortar it is critical to refer to the total shrinkage: both early age and long-term deformation. This test arrangement has been used to measure horizontal deformations of mortar for the first 24 hours after mixing by influence of temperature and relative humidity. From these measurements it is possible to assess the likelihood of cracking due to early age shrinkage. Results have shown that total shrinkage can be significant in certain early age scenarios. The mortar is in high temperature the rate of shrinkage will be high and result in cracking later on the other hand, if the humidity is low rate of shrinkage will increased this is two main parameters of the mortar due to contraction in the construction work. This research will provide information about the effects of temperature and relative humidity in the early age shrinkage, to be applied to construction work later.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจากอาจารย์ ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณ สารพล ตริสุวรรณ ในการช่วยเหลือชี้แนะแนวทางและตอบข้อสงสัยของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ พร้อมทั้งเอื้อเฟื้อชุดอุปกรณ์ในการทดสอบ และสละเวลามาชี้แจงดูแลโครงการพิเศษเรื่องนี้ จนจบโครงการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ พร้อมทั้งเป็นกำลังใจในยามท้อ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นาย ธนาคม ทิวานนท์

นาย ชีรพงศ์ รูปโอ

ผู้ประพันธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	V
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	VI
กิตติกรรมประกาศ.....	VII
สารบัญ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย.....	3
บทที่2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 ระยะของการหดตัว.....	4
2.1.1 ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early Age Shrinkage).....	5
2.1.2 ระยะการหดตัวสภาวะยาวนาน (Long Term Shrinkage).....	7
2.2 ประเภทของการหดตัว.....	10
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal dilation).....	10
2.2.2 คาร์บอนेशन.....	12
2.2.3 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage).....	12
2.2.4 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage).....	14
2.2.5 การหดตัวรวม (Total Shrinkage).....	17
2.3 การทดลองวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น.....	18
2.4 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานขั้นต้น.....	24
3.1.1 กำหนดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่จะเริ่มและหยุดทำการทดสอบ.....	24
3.1.2 เตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบ.....	24
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	26
3.2.1 ซีเมนต์.....	26
3.2.2 ทราย.....	27
3.3 วิธีการทดสอบและวิจัย.....	29
3.3.1 การทดสอบอัตราการไหล (Flow table) ASTM C230.....	29
3.3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) C807.....	30
3.3.3 การทดสอบหาอัตราการหดตัว (Total Shrinkage).....	31
บทที่4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....	33
4.1 อัตราการไหล (Flow Table) ASTM C230.....	33
4.2 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) ASTM C807.....	33
4.3 อัตราการหดตัว (Total Shrinkage).....	35
4.3.1 ผลการทดสอบอัตราการหดตัวที่มีผลมาจากอุณหภูมิ.....	35
4.3.2 ผลการทดสอบอัตราการหดตัวที่มีผลมาจากความชื้นสัมพัทธ์.....	41
บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก ก ผลการสอบเทียบเครื่องมือแอลวีดีที.....	51
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการหดตัวโดยอิทธิพลของอุณหภูมิ.....	54
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการหดตัวโดยอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของทราย.....	27
3.2 มาตรฐาน ASTM C 778 graded sand.....	28
4.1 ผลการทดสอบอัตราการไหล (Flow table) ASTM C230.....	33
4.2 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807.....	34



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงระยะและประเภทของการหดตัว [Holt 2001].....	4
2.2 ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น : สภาวะของเหลว,สภาวะกึ่งของแข็ง และสภาวะของแข็ง [Mehta & Monteiro1993].....	5
2.3 การก่อตัวที่ข้างล่างของคอนกรีตเมื่อผสมสาร melamine-based.....	6
2.4 จุดสิ้นสุดของการหดตัวที่ระยะเริ่มต้นเนื่องจากการแข็งตัวของคอนกรีตภายหลังการก่อตัวขั้นต้น.....	7
2.5 ผลกระทบของอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต.....	8
2.6 การเพิ่มขึ้นของการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นและสภาวะยาวนานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างของ การบ่ม.....	9
2.7 การเปลี่ยนแปลงการหดตัวในช่วงสภาวะยาวนานซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการบ่มในวันแรก....	10
2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้น [Hedlund1996, Byfors 1980].....	11
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง autogenous shrinkage กับ chemical shrinkage [E.tazawa 1999] C =unhydrated cement , W =unhydrated water, Hy =hydration products and V =voids generated by hydration.....	13
2.10 ส่วนประกอบของของแข็งและช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ [Mehta& Monteiro 1993].....	14
2.11 ตัวอย่างขนาดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์และขนาดปริมาตรของน้ำภายในช่องว่าง.....	15
2.12 แรงเค้นที่ดึงส่วนนูนของน้ำระหว่างช่องว่างของอนุภาคซีเมนต์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น และการพัฒนา capillary pressure [Radocea1992].....	16
2.13 อัตราส่วนของ drying shrinkage – autogenous shrinkage ที่ low w/c.....	17
2.14 รอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก.....	20
3.1 แสดงตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งเป็นตู้ระบบปิด.....	25
3.2 แสดงมาตรวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์.....	25
3.3 แสดงการติดตั้งแบบหล่อ,การติดตั้งอุปกรณ์ LVDTและเครื่องเก็บข้อมูล(Data logger).....	26
3.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	26
3.5 Gradation Curve ของทรายกับ ASTM C 778 graded sand.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การเตรียมทรายตามมาตรฐาน ASTM C 778 graded sand.....	28
3.7 แสดงการทดสอบอัตราการไหล (Flow table).....	29
3.8 แสดงการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (setting time).....	30
3.9 แสดงการทดสอบหาการหดตัวในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น.....	31
3.10 แสดงการทดลองหาอัตราการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age Total Shrinkage).....	32
4.1 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%.....	35
4.2 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%.....	36
4.3 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%.....	37
4.4 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%.....	38
4.5 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%.....	39
4.6 กราฟเปรียบเทียบอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	40
4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	40
4.8 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%-20%.....	41
4.9 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20%-40%.....	42
4.10 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%.....	43
4.11 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60%-80%.....	44
4.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นต่างๆ.....	45
4.13 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นต่างๆ.....	45
ก.1 แสดงการสอบเทียบเครื่องมือวัด LVDTs ที่ใช้ในการทดลองวัดการหดตัวในแนวราบ.....	52
ก.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด (LVDT) ที่ใช้ในการทดลองวัดการหดตัวในแนวราบ.....	52

บทที่ 1

บทนำ

กล่าวนำ

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทำให้มีการก่อสร้างของบ้านและอาคารเป็นจำนวนมาก ส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตนั้นมีข้อเสียคือเกิดการแตกร้าวง่ายโดยมีสาเหตุมาเนื่องจากอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ลม และรวมไปถึงอัตราส่วนปริมาณส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยการก่อสร้างบางครั้งก็อาจมีความจำเป็นที่จะต้องก่อสร้างในบริเวณที่มีอากาศร้อนจัด จะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว อันเป็นผลให้เกิดการแตกร้าวบริเวณที่ผิวของคอนกรีต โดยการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ นักศึกษาได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตในซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งมอร์ตาร์จะเป็นปูนที่จะใช้ฉาบผนังก่อ หรือฉาบตกแต่งเสาที่ถอดจากแบบหล่อ ซึ่งสาเหตุการหดตัวในซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นทำให้เกิดรอยแตกร้าวอย่างมากในบริเวณผนังซีเมนต์มอร์ตาร์ ทำให้เกิดปัญหาในงานตกแต่ง อาทิเช่น งานสี ซึ่งไม่สามารถทาสีให้ออกมาสวยงามได้ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อให้ผู้อยู่อาศัย ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่มั่นใจในความแข็งแรงในอาคารที่ตนเองอาศัยอยู่ แต่ที่จริงแล้วการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นไม่ได้มีผลต่อการรับแรงของโครงสร้างเลย อีกทั้งผนังซีเมนต์มอร์ตาร์ภายนอกอาคารนั้นต้องเจอสภาพภูมิอากาศที่หลากหลายมีการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอยู่ตลอดเวลา ในช่วงฤดูฝนจะทำให้ผนังซีเมนต์มอร์ตาร์ภายนอกนั้นมีความชื้นมากจากการโดนฝนซึ่งก็อาจทำให้น้ำจากภายนอกอาคารซึมเข้าไปสู่ภายในได้

ทั้งนี้ นักศึกษาได้สังเกตเห็นปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการวิจัยการทดลองนี้เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่าง ๆ กัน เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสภาพแวดล้อมของบ้านเราซึ่งเป็นประเทศเขตร้อน เพื่อหาทางแก้ปัญหาการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ตาร์ต่อไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้อดีของการวัดอัตราการหดตัวตามมาตรฐานทั่วไปจะเริ่มวัดค่าการหดตัวครั้งแรกเมื่อครบ 24 ชั่วโมง ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วการหดตัวเกิดขึ้นตั้งแต่สภาวะพลาสติกซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียด การวิจัยนี้ได้ใช้แอลวีดีที (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) คุณลักษณะที่สำคัญของแอลวีดีที คือ ความเป็นเชิงเส้น แอลวีดีที ที่มีคุณภาพดีจะสามารถทำให้ค่าความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วง $\pm 0.25\%$ จากตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้พร้อมกับมีความไวในการตรวจจับ กำหนดเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนต่อการเปลี่ยนแปลงระยะที่ตรวจจับ มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ต่อมิลลิเมตร (mV/mm) ซึ่งไม่มีการสัมผัสกันทางกายภาพระหว่างแกนเหล็กที่เคลื่อนที่และโครงสร้างของคอยล์จึงมีความผิดพลาดน้อย การที่ไม่เกิดความผิด และไม่สัมผัสกันระหว่างขดลวดและแกนเหล็กของแอลวีดีที ดังนั้นจึงเหมาะกับการทดสอบทำให้ได้ความน่าเชื่อถือทางกลสูง

และในการวัดการหดตัวตามมาตรฐานโดยทั่วไปที่มักจะไม่ให้ความสำคัญกับการหดตัวในระยะเริ่มต้น (24 ชั่วโมงแรกหลังจากที่ผสม) ASTM C827 “ Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures ” เป็นมาตรฐานเดียวที่ใช้วัดการหดตัวของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้น การทดสอบนี้สามารถวัดได้เฉพาะ vertical displacement ในรูปแบบของ settlement การหดตัวในแนวราบ (Horizontal) ไม่สามารถวัดได้ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วการหดตัวสูงสุดอาจเกิดขึ้นได้ในระยะนี้จึงมักจะเกิดปัญหาขึ้น โดยเฉพาะเกิดการแตกร้าวทำให้ต้องซ่อมแซมแก้ไขทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาโดยไม่จำเป็น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
2. เพื่อศึกษาช่วงอุณหภูมิที่และความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์
3. เพื่อศึกษาการแตกร้าวที่มีผลมาจากการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยมีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาพฤติกรรมการหัดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นโดยมุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยหาช่วงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้เกิดการหัดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์จากนั้นก็เพิ่มลดช่วงของค่าเหล่านี้เพื่อเปรียบเทียบดูแนวโน้มการหัดตัวในเวลา 24 ชั่วโมง ตั้งแต่หล่อลงแบบหล่อ แล้วนำมาวิเคราะห์กับสภาพแวดล้อมจริงในงานก่อสร้าง และนำข้อมูลจากการหัดตัวที่ได้มาศึกษาถึงผลกระทบในเรื่องของการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในลำดับต่อไป

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหัดตัวเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง
3. ทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลจากห้องทดลอง
4. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงสาเหตุและพฤติกรรมการหัดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น
2. ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการหัดตัว
3. สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างในเขตที่มีสภาพภูมิอากาศต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันการหัดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์
4. ได้ข้อมูลสำหรับพัฒนาวิธีในการวัดการหัดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น

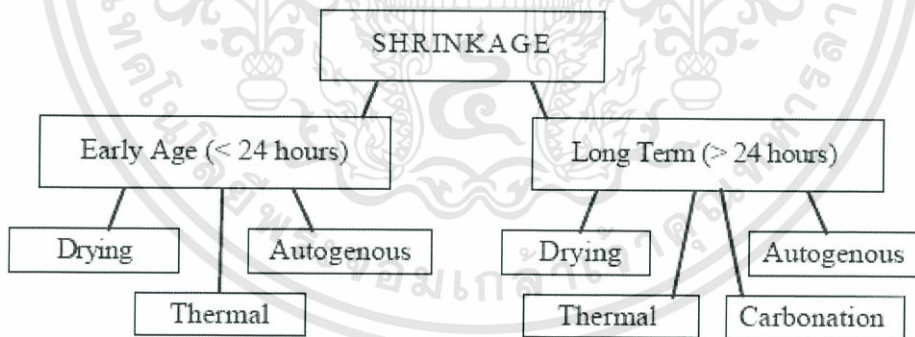
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

บทนี้จะกล่าวสรุปถึงการทบทวนวรรณกรรม, ตำรา, เอกสาร, วารสารและงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น

2.1 ระยะของการหดตัว

การหดตัวของมอร์ตาร์จะมีความสำคัญเมื่อเราให้ความสำคัญกับความคงทน, ความสวยงามโดยที่ผ่านมามักจะวัดค่าการหดตัวเมื่อตัวอย่างแข็งตัวในช่วงสภาวะยาวนาน (Long term) แม้ว่าจะมีการค้นพบการหดตัวในช่วงสภาวะเริ่มต้น (Early age) แต่เป็นการยากที่จะทำการวัดในสภาวะที่เป็นของเหลว ความยากในการทดลองทำให้ไม่สามารถเข้าใจต่อปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวในช่วงระยะเริ่มต้นได้หมด

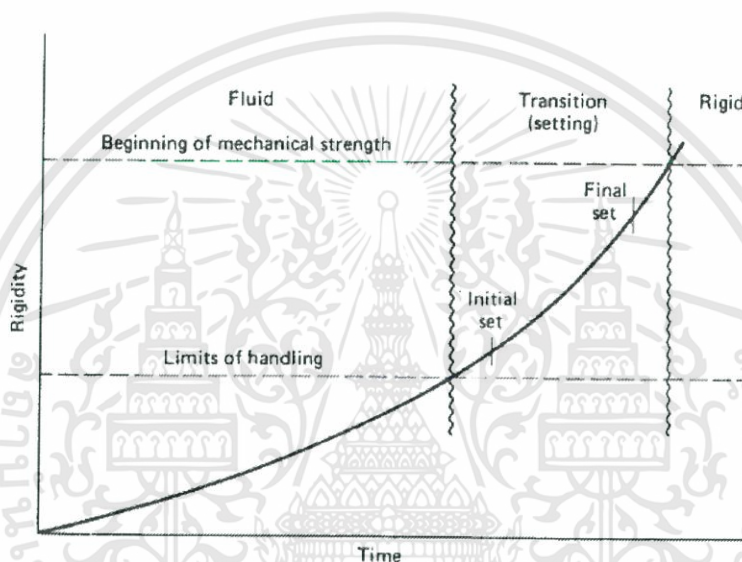


รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระยะและประเภทของการหดตัว [Holt 2001]

การหดตัวสามารถแบ่งเป็นระยะใหญ่ๆได้ 2 แบบ คือ

2.1.1 ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early Age Stage)

นิยามของคำว่า “Early Age” จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมและกรอบระยะเวลาที่ทำการทดลอง ในการทดลองนี้จะใช้นิยามการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นตั้งแต่การเทลงแบบเสร็จจนกระทั่งครบ 24 ชั่วโมง แบ่งได้เป็น 3 สภาวะ



รูปที่ 2.2 ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น : สภาวะของเหลว,สภาวะกึ่งของแข็ง และสภาวะของแข็ง [Mehta & Monteiro 1993]

1. สภาวะของเหลว (Liquid Phase)

เมื่อทำการผสมมอร์ตาร์จะอยู่ในสภาวะของเหลว สภาวะนี้มอร์ตาร์จะไม่มีโครงสร้างที่หนาแน่นพอที่จะคงรูปในแบบหล่อ การเคลื่อนที่จากความเค้นจะเกิดขึ้นโดยทันทีตัวอย่างคือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะจมลง และน้ำที่มากเกินไปจะเยิ้มขึ้นที่ผิวหน้า

2. สภาวะพัฒนาโครงสร้าง (Skeleton Formation Phase)

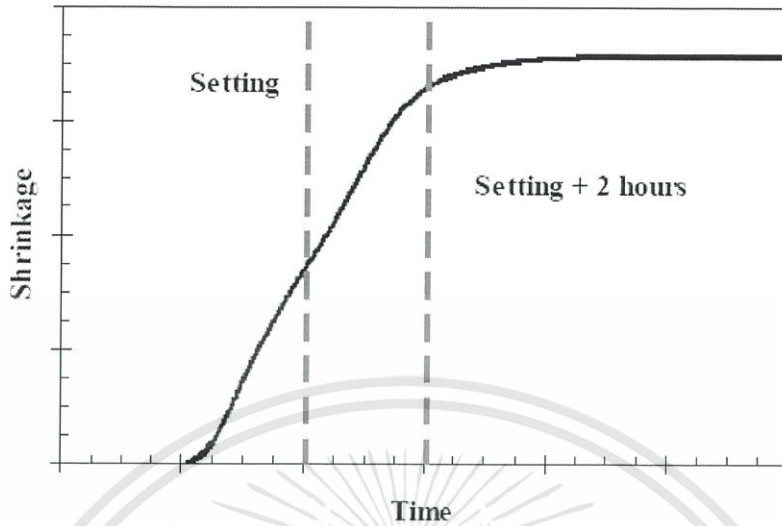
หลังจากที่ซีเมนต์และน้ำทำปฏิกิริยา โครงสร้างจะขึ้นเป็นรูปจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหลังจากที่ผสม จากจุดนี้เราสามารถที่จะวัดการหดตัวของตัวอย่างได้ ระยะเวลาการก่อตัวสามารถทำให้ช้าลงได้โดยสิ่งแฉดล้อมและการใส่สารผสมเพิ่มต่างๆ ที่ทำปฏิกิริยา เช่นการใส่สารผสมเพิ่ม shrinkage reducing admixture (SRA) ร่วมกับซิลิกาฟูมจะช่วยทำให้เวลาการก่อตัวล่าช้าลง

SP Dosage (%)	Setting Time (hr:min)	
	White Cement	Gray Cement
0	4:10	3:40
0.5	4:20	3:50
1.0	6:00	4:30
1.5	7:30	5:00

รูปที่ 2.3 การก่อตัวที่ช้าลงของคอนกรีตเมื่อผสมสาร melamine-based superplasticizer ที่ $w/c = 0.45$ [Holt&Leivo 1996]

3. สภาวะของแข็ง (Hardening Phase)

สภาวะนี้โครงสร้างของมอร์ตาร์สามารถต้านแรงเค้นที่เกิดขึ้น อัตราการสูญเสียน้ำ และอัตราการหดตัวแบบอโตจีเนียสจะลดลง โดยทั่วไปจากจุดนี้จะอยู่ที่ประมาณ 2 ชั่วโมงหลังจากระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ในบางกรณีถ้าไม่มีกำลังพอที่จะรับแรงจะเกิดรอยแตกร้าวขึ้น

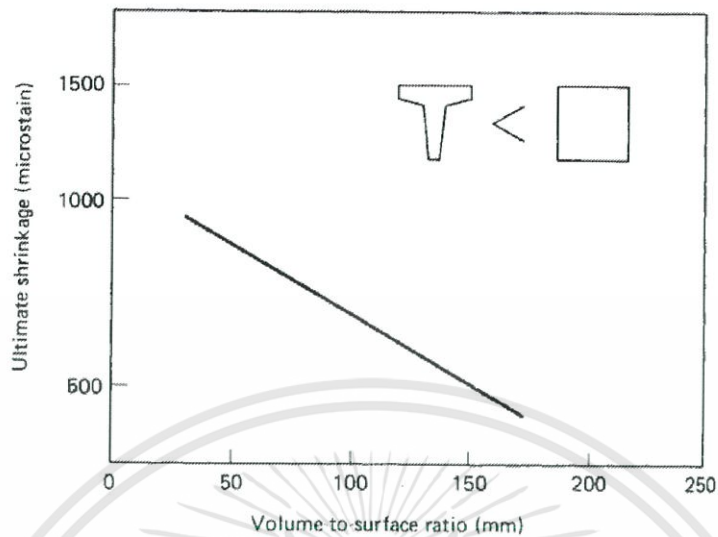


รูปที่ 2.4 จุดสิ้นสุดของการหดตัวที่ระยะเริ่มต้นเนื่องจากการแข็งตัวของคอนกรีต
 ภายหลังการก่อตัวระยะเริ่มต้น [Holt 2001]

2.1.2 ระยะการหดตัวสภาวะยาวนาน (Long Term Shrinkage)

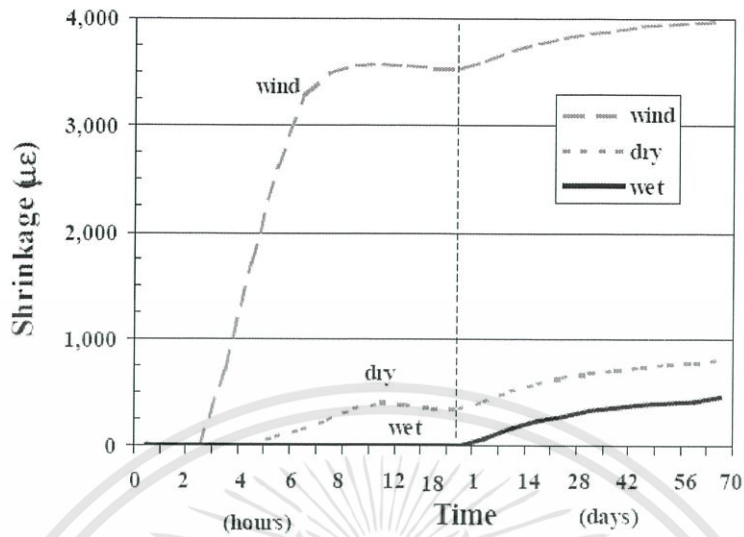
โดยทั่วไปการหดตัวในสภาวะยาวนานจะเริ่มวัดค่าที่ 24 ชั่วโมงหลังจากผสมหรือเทลงแบบ เมื่อทำการถอดแบบออกสามารถนำไปทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM C157 “ Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete ”

80% ของการหดลงในห้องทดลองจะวัดค่า ประมาณ 3 เดือนโดยให้ความสำคัญกับการควบคุมอัตราการสูญเสียความชื้น, ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างและส่วนผสมของคอนกรีต



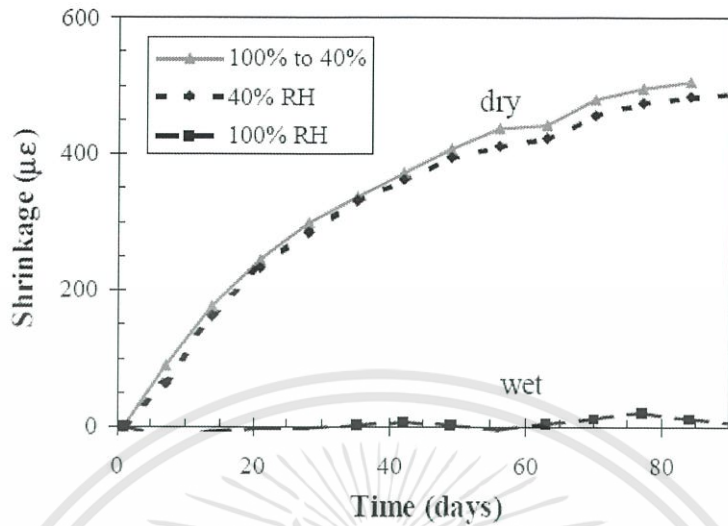
รูปที่ 2.5 ผลกระทบของอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต [Mindess & Young 1981]

ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการหดตัวแบบ early age และ long term การหดตัวที่เกิดขึ้นในระหว่าง 2 ระยะนี้ควรจะเรียกรวมกันว่า “ Total shrinkage ” ในบางกรณีของคอนกรีตที่มีการบ่มที่ไม่ดีจะเกิดการแห้งอย่างรวดเร็วการหดตัวในวันแรกอาจมากกว่าการวัดในระยะยาวนาน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 สำหรับสภาวะสภาพแวดล้อมที่ต่างกันในระหว่างวันแรกของอายุ การหดตัวในระยะยาวที่เกิดจากการแห้งจะเท่ากันในทุกกรณี ดังนั้นในวันแรกจะมีความสำคัญซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้



รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของการหดตัวในช่วง อายุเริ่มต้นและสภาวะยาวนานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างของการบ่ม , wind = 2 m/s , dry = 40% RH , wet = 100% RH [Holt 2001]

สภาวะของการบ่มในวันแรกที่ไม่ได้มีผลกระทบต่ออัตราการหดตัวในระยะยาวนานดังรูปที่ 2.7 เมื่อวันแรกทั้งการบ่มชื้นและแห้ง (การหดตัวแบบอโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้ง) หลังจากครบ 1 วันแล้วเปลี่ยนจากการบ่มชื้นเป็นการบ่มแห้ง แห้งตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนสภาวะยังคงมีการหดตัวเทียบเท่ากับการบ่มแบบแห้ง



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของการหดตัวในช่วงสภาวะยาวนานซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการบ่มในวันแรก ,dry = 40% RH , wet = 100% RH [Holt 2001]

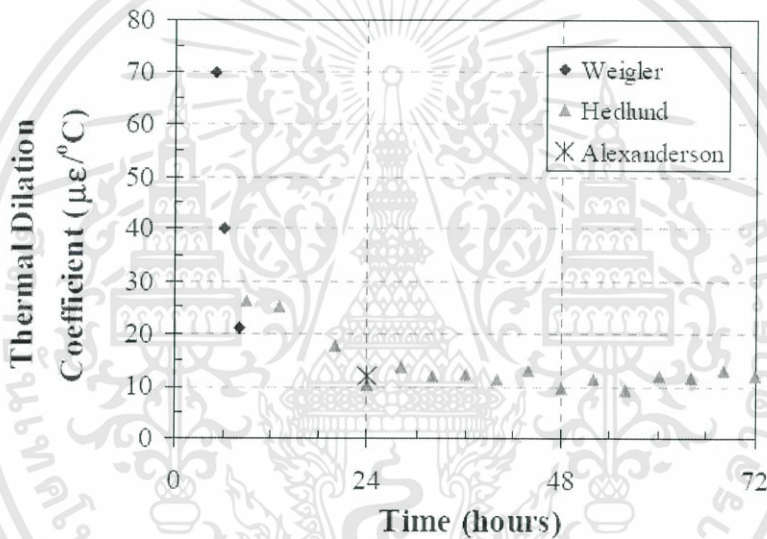
2.2 ประเภทของการหดตัว

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal dilation)

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิผันผวน มักจะอ้างอิงถึงการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion) จากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นหรือเย็นลงทั้งในระยะของ early age และ long term เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นคอนกรีตจะขยายตัว ตามด้วยการหดตัวจากการเย็นตัวลง Thermal Expansion จะเกิดปัญหาเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รุนแรงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดความร้อนที่ประมาณ 5-8 °C จากซีเมนต์ 45 kg. เมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อน [Kosmatka & Panarese 1988]

ในมอร์ตาร์จะเกิดความร้อนที่มากกว่าเนื่องจากมีส่วนผสมของซีเมนต์มากกว่าคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมักจะเกิดในช่วง 12 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเมื่อเย็นตัวลงจะแสดงผลในรูปแบบของการหดตัว ในช่วงอายุเริ่มต้นอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอจะเกิด thermal strain ขึ้นในคอนกรีต เช่นเดียวกับที่ผิวหน้าที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม) กับภายใน สิ่ง

นี้จะทำให้เกิดความเค้นขึ้นและมีความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวโดยเฉพาะคอนกรีตที่มีความหนามากกว่า 1 เมตร คอนกรีตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว “thermal dilation coefficient” ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ (เช่น มวลรวม และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์) ในระยะ early age ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาวะที่คอนกรีตสามารถรับกำลังได้ [Hedlund 1996] ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองของ Weigler, and Alexanderson [Byfors 1980]

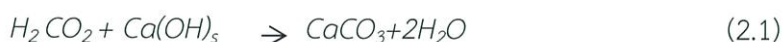


รูปที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้น

[Hedlund1996, Byfors 1980]

2.2.2 คาร์บอนเนชัน (Carbonation)

คาร์บอนเนชัน จะเกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวทำปฏิกิริยากับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ดังสมการ [Mehta & Monteiro 1993]



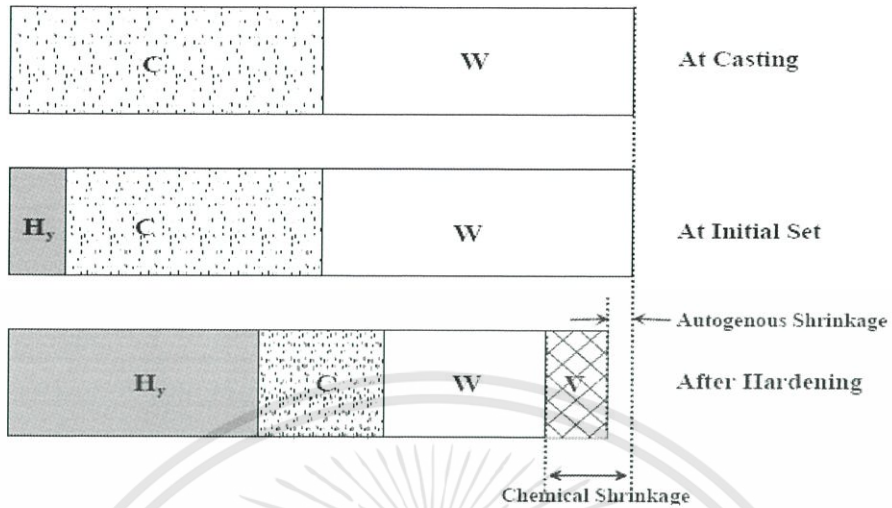
สมการนี้ยังไม่รวมผลของการหดตัวและค่า pH ที่ลดลงเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กในโครงสร้างซึ่งจะขยายตัวและทำให้คอนกรีตแตกร้าว [Kosmatka & Panarese 1988]

คาร์บอนเนชันจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและคุณภาพของคอนกรีตรวมถึงสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปจะมีผลที่ระยะประมาณ 2 cm. จากความลึกที่ผิวหน้า จะมีผลกับความคงทนของคอนกรีตแต่ใช้เวลานานหลายปีที่จะมีผลต่อโครงสร้างของคอนกรีต จึงจะไม่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้

2.2.3 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous shrinkage)

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีตคือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ไม่มีการถ่ายโอนความชื้นกับสภาพแวดล้อม

รูปด้านล่างแสดงคอนกรีตที่บ่มและเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แผนภูมิแห่งนี้แสดงว่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสเป็นส่วนหนึ่งของการหดตัวแบบ chemical shrinkage



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง autogenous shrinkage กับ chemical shrinkage [E.tazawa 1999] C=unhydrated cement , W=unhydrated water, Hy=hydration products and V=voids generated by hydration

The draft European Standard prEN 1992-1 [Eurocode 2001] ได้เสนอสูตรในการทำนายการหดตัวของคอนกรีตในระยะยาว (Long term Autogenous shrinkage) โดยมีพื้นฐานจากประเภทของซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตดังสมการ 2.2

$$\epsilon_{cs} = \beta_{cc}(t) \epsilon_{cs,\infty} \tag{2.2}$$

เมื่อ ϵ_{cs} = autogenous shrinkage strain

$$\epsilon_{cs,\infty} = 2.5(fc' - 10) \cdot 10^{-3}$$

fc' = characteristic compressive strength of concrete at 28 days.

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s[1 - (28/t)^{1/2}]\} \tag{2.3}$$

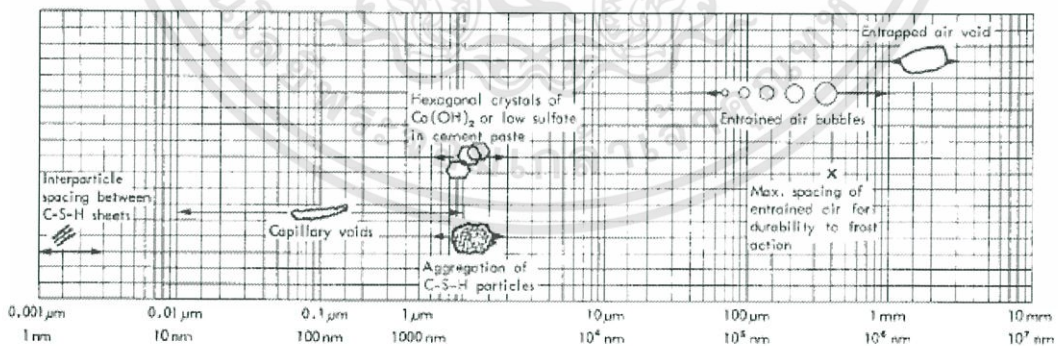
เมื่อ s = coefficient depending on the type of cement ($s = 0.20$ for rapid hardening high strength cements, 0.25 for normal and rapid hardening cements and 0.38 for slowly hardening cement)

t = age of concrete (days)

$t_1 = 1$ day

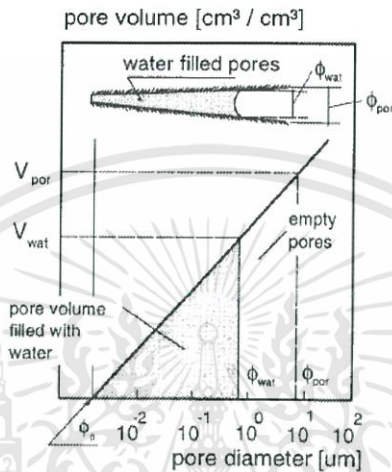
2.2.4 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้งจะเกี่ยวกับการลดลงของปริมาตรของคอนกรีตเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำ เมื่อสูญเสียน้ำคอนกรีตจะหดตัว เช่น จากการเย็บน้ำที่ผิวหน้า , การจมลงของมวลรวม การเย็บน้ำจะทำให้น้ำระเหย น้ำส่วนเกินจะถูกดึงออกมาจากภายในของก้อนคอนกรีต ผลของการที่เกิดการหดตัวแบบแห้งจะเกิดในรูปของการแตกร้าวที่ผิวหน้า กลไกของการหดตัวแบบแห้งจะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในของซีเมนต์เฟสแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งส่วนใหญ่ของ Capillary voids จะอยู่ในช่วง $0.01 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$.



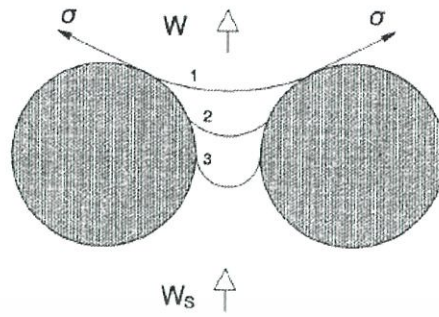
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของช่องแข็งและช่องว่างในซีเมนต์เฟส [Mehta & Monteiro 1993]

เมื่อคำนึงถึงการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตช่องว่างที่มีขนาดใหญ่จะสูญเสียน้ำภายในสัดส่วนของช่องว่างและปริมาตรของน้ำภายในแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างขนาดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์และขนาดปริมาตรของน้ำภายในช่องว่าง[Koenders1997]

กลไกความสัมพันธ์ของน้ำที่ผิวหน้าและอนุภาคของซีเมนต์ที่ผิวหน้าที่ขึ้นกับการแห้ง [Radocea 1992] ในกรณีนี้ทำให้เกิดการระเหยมากกว่าน้ำที่เยิ้มมาจากภายในของคอนกรีต ทำให้เกิดความเค้นและส่วนนูนจมลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ capillary pressure



รูปที่ 2.12 แรงดันที่ดึงส่วนบนของน้ำระหว่างช่องว่างของอนุภาคซีเมนต์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น และการพัฒนา capillary pressure [Radocea1992]

ผลรวมของ pore water pressure หรือ แรงดูดเกิดขึ้นมาเนื่องจาก capillary forces โดยเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีความโค้งส่วนบนระหว่างน้ำและอากาศ แรงดูดนี้แสดงโดยสมการลาปลาซ [Janz 2000]

$$s = (2\sigma)/r \quad (2.4)$$

เมื่อ s = suction pressure (Pa) ,

σ = surface tension of air-water interface (~ 0.074 N/m),

r = meniscus radius (m)

ค่าของการหดตัวแบบแห้งซึ่งวัดตามยาวจะอยู่ระหว่างช่วง $500 - 1000 \mu\epsilon$ ($0.5 - 1\text{mm/m}$) แต่สามารถเกินกว่า $5000 \mu\epsilon$ (5mm/m) ในบางกรณีที่แห้งอย่างรวดเร็วในช่วงอายุเริ่มต้น

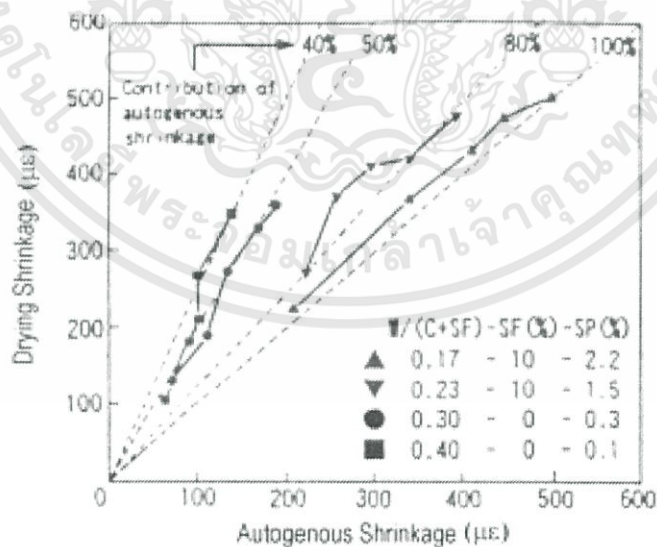
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การหดตัวรวม (Total Shrinkage)

Total shrinkage เป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจาก carbonation , thermal expansion ,drying และ autogenous ส่วนใหญ่ค่า thermal expansion จะเกิดการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับจึงมักไม่นับเป็นผลรวมของการหดตัวทั้งหมด (Total shrinkage) ในการทดลองมาตรฐานจะใช้ค่าการหดตัวสูงสุด เช่น long term drying shrinkage ซึ่งเป็นสิ่งไม่ถูกต้องในบางครั้งการหดตัวในระยะเริ่มต้นเท่ากับหรือมากกว่าการหดตัวในระยะยาวนาน ในคอนกรีตกำลังสูงที่ w/c ต่ำกว่าประมาณ 0.42 จะแสดงการหดตัวแบบออโตจีเนียสเหมือนการหดตัวสูงสุด

ในคอนกรีตทั่วไปที่ w/c สูงกว่า 0.42 การหดตัวแบบออโตจีเนียสไม่ต้องการตรวจสอบเนื่องจากคอนกรีตมีน้ำมากพอในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในบางกรณีการหดตัวแบบออโตจีเนียสไม่มีผลต่อการหดตัว [Radocea 1992]

การหดตัวทั้งหมด (Total shrinkage) จะมีเกิดจากการหดตัวแบบออโตจีเนียสมากกว่าการหดตัวแบบแห้งในกรณีที่ w/c ต่ำกว่า 0.42 ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 อัตราส่วนของ drying shrinkage – autogenous shrinkage ที่ low w/c [Tazawa & Miyazawa 1995]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหดตัวในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นเป็นสิ่งซึ่งไม่ได้ถูกให้ความสำคัญทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วการหดตัวทั้ง 2 ประเภทคือการหดตัวแบบบอโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้งในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นมีส่วนอย่างมากกับการหดตัวทั้งหมด ในการทดลองนี้จึงวัดการหดตัวแบบ total shrinkage

2.3 การทดลองวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น

ASTM C827 “Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures ”เป็นมาตรฐานเดียวที่ใช้วัดการหดตัวของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้นโดยการนำ steel ball ไปวางบนผิวหน้าของคอนกรีตและทำการวัด vertical displacement บันทึกราคาทุกๆ 5 นาที อ่านค่าความละเอียดถึง 2 มิลลิเมตร การทดสอบนี้สามารถวัดได้เฉพาะ vertical displacement ในรูปแบบของ settlement การหดตัวในแนวราบ(Horizontal)ไม่สามารถวัดได้

ยังไม่มีมาตรฐานใดที่จะวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ตาร์ ส่วนใหญ่จะวัดการหดตัวในช่วงของระยะยาวนาน(Long term)ตามมาตรฐาน ASTM C157

การวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นถูกพัฒนาขึ้นในหลายที่ เช่น VTT the technical research center of Finland [Kronlöf et al. 1995 ,Leivo & Holt 1997,] ในประเทศแถบสแกนดิเนเวีย [Radocea 1992, Mark et al. 1999, Hammer 1999] และประเทศญี่ปุ่น [E.Tazawa & Miyazawa 1995]

ในการทดลองนี้วัดการหดตัวในแนวราบ หลังจากที่ผสมและเทลงแบบประมาณ 30 นาที จนกระทั่งครบ 24 ชั่วโมง โดยใช้ LVDT ขนาด 10 มิลลิเมตรที่มีความละเอียดถึง 0.001มิลลิเมตรเป็นตัววัดการยืหดตัวของมอร์ตาร์ รายละเอียดดูได้ในบทที่ 3

2.4 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

วิทยานิพนธ์ผลกระทบของวัสดุอินทรีย์ผสมเพิ่มต่อการหดตัวของมอร์ตาร์สด , วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การหดตัว (Total Shrinkage) เกิดขึ้นจากผลรวมของสภาวะการหดตัวแบบบอโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้ง ดังนั้นค่าของการหดตัวรวมจึงเป็นสิ่งสำคัญเมื่อมีการประเมินความเป็นไปได้ในการแตกร้าวของมอร์ตาร์ซึ่งมีการหดตัวตั้งแต่ในช่วงของอายุเริ่มต้น (Early Age) จนถึงระยะยาว (Long Term) ในการทดสอบวัดค่าการหดตัวรวมในแนวราบของมอร์ตาร์ในช่วง 24 ชั่วโมงแรก หลังจากผสมและวัดการหดตัวระยะยาวจากตัวอย่างเดียวกันจนกระทั่งครบ 28 วันโดยควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ระหว่าง 105-115% จากผลการทดสอบจะสามารถประเมินโอกาสในการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวในช่วงของอายุเริ่มต้นของมอร์ตาร์ได้ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการหดตัวรวมที่สำคัญอยู่ในช่วงอายุเริ่มต้นโดย มอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุอินทรีย์ผสมเพิ่ม : แกลลวยแม่เมาะ, แกลลวยระยองและผงแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยลดการหดตัวรวมในช่วงอายุเริ่มต้น ในขณะที่ซิลิกาฟูมทำให้การหดตัวรวมในช่วงอายุเริ่มต้นเพิ่มขึ้น การวิจัยนี้จะทำให้ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของวัสดุอินทรีย์ผสมเพิ่มผสมเพิ่มแทนที่ซีเมนต์ในด้าน การหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นและความคลาดเคลื่อนของมาตรฐาน JIS A1129 ซึ่งเป็นไปได้ที่จะเกิดการแตกร้าวจากค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงอายุเริ่มต้น

วิทยานิพนธ์การศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เฟลสที่ผสมแกลลวย , วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการทดสอบเพื่อศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เฟลสที่ผสมแกลลวยตามอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้แกลลวย 2 ชนิด คือ แกลลวยจากแม่เมาะและแกลลวยจากระยองปริญญาวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการวัดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากมวลน้ำที่สูญเสียไปจากการอบซีเมนต์เฟลสที่อุณหภูมิ 105 °C และ 950 °C ซึ่งสามารถหาค่าปฏิกิริยาไฮเดรชันได้จากการวิเคราะห์กราฟ ส่วนที่สองคือการวัดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการหดตัวของน้ำที่สภาวะปกติภายในหลอดทดลองถือเป็นระบบปิด โดยปริมาณน้ำจะลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งจะบันทึกค่าทุกๆ ชั่วโมงไปจนครบ

24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะบันทึกค่าในแต่ละวันจนครบ 3 เดือน แล้วนำมาบันทึกในแผนภูมิเส้นเพื่อวิเคราะห์กราฟเช่นเดียวกับการทดลองในส่วนแรก จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองทั้งสองส่วนมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน

เทคนิคการกรีดแล้วทำไมแตกร้า , ดร. ปิณช์ ปานถาวร

การแตกร้าของคอนกรีตนั้นมักจะ เกิดขึ้นขณะที่คอนกรีตกำลังแข็งตัว หรือเป็นที่รู้จักกันในเชิงวิชาการคอนกรีตว่า การแตกร้าเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage Cracking) ซึ่งนอกจากมีโอกาสสูงที่จะเกิดกับงานถนนแล้ว ยังเกิดกับงานประเภทพื้นที่อยู่กลางแจ้งอื่นได้อีกด้วย อาทิ พื้นอาคาร, ดาดฟ้า และลานประเภทต่างๆ รวมถึงการก่อและฉาบผนังโครงสร้างต่างๆ เป็นต้น การแตกร้าในลักษณะนี้จะไม่มียูปร่างที่แน่นอน ต่างกับการแตกร้าเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งซึ่งจะเป็นเส้นค่อนข้างตรง และยาวที่มักจะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีการตัดรอยต่อที่ถูกต้อง

สาเหตุของการแตกร้าเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก การที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าแบบนี้มีสาเหตุมาจากคอนกรีตหดตัวอย่างเฉียบพลันในช่วงที่ยังอยู่ในสภาพยังไม่แข็งตัว (Pre-hardened Stage) ซึ่งคอนกรีตในช่วงนี้แทบจะไม่มีความสามารถในการรับแรงเค้นที่เกิดจากแรงดึง (Tensile Stress) ซึ่งแรงเค้นเกิดขึ้นขณะที่คอนกรีตมีการหดตัว เมื่อแรงเค้นนี้เกิดมากเกินไปที่คอนกรีตสามารถรับได้ ก็จะทำให้เกิดการแตกร้า



รูปที่ 2.14 รอยแตกร้าเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวแบบนี้มีอยู่ด้วยกันมากมาย แต่จะสรุปเป็นข้อได้ 6 ปัจจัยหลักดังนี้

1. อุณหภูมิอากาศ – เมื่อเข้าสู่ฤดูร้อนอุณหภูมิอากาศเริ่มสูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียน้ำที่ผิวหน้าอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้คอนกรีตที่ผิวหน้ามีการหดตัวอย่างเฉียบพลัน จึงเสี่ยงกับการแตกร้าว

2. น้ำยาผสมคอนกรีต – การใช้น้ำยาหน่วงที่มากเกินไป จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันชะลอตัวลง มากเกินไป ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตพัฒนากำลังดึง (Tensile Strength Development) ได้ไม่ทันกับการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวหน้า

3. ความชื้นสัมพัทธ์ – การมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่สูงในประเทศไทยช่วยให้คอนกรีตสูญเสียน้ำให้กับสิ่งแวดล้อมช้าลง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว แต่ในช่วงฤดูหนาวอากาศจะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า จึงทำให้คอนกรีตอาจสูญเสียน้ำให้กับสิ่งแวดล้อมเร็วขึ้น จึงเสี่ยงกับการแตกร้าวได้ง่าย

4. ลม – ลมเป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอีกอย่างหนึ่ง นอกเหนือจากอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ที่กล่าวมา สำหรับลมซึ่งมีความเร็วกว่า 8 กม./ชม. จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสูญเสียน้ำที่ผิวหน้าคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมกับอุณหภูมิอากาศที่ร้อนจัดหรือความชื้นสัมพัทธ์ ที่ต่ำ

5. ปริมาณปูนซีเมนต์ – ปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่มีมากเกินไป จะส่งผลกระทบต่อ การแตกร้าวของคอนกรีตได้สองลักษณะ โดยในลักษณะแรกจะทำให้คอนกรีตมีความร้อนสูงจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นผลให้น้ำที่อยู่ในคอนกรีตระเหยไปอย่างรวดเร็ว ในลักษณะที่สองอนุภาคของปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเล็กมาก สามารถสร้างความตึงตัวของคอนกรีตได้ค่อนข้างดี จะส่งผลให้น้ำที่อยู่ในส่วนข้างล่างของพื้นถนนขึ้นมาชดเชยน้ำที่เสียไปจาก ผิวหน้าได้ช้าจนอาจไม่ทันการณ์ หรืออัตราการระเหยของน้ำมากกว่าอัตราการชดเชย

6. ปริมาณน้ำ – ปริมาณน้ำในคอนกรีตเป็นตัวแปรที่สำคัญกับกำลังอัดและการหดตัวของคอนกรีต เมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมมีมากเกินไปก็จะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง และยังทำให้คอนกรีตมีการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) สูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันหากปริมาณน้ำในส่วนผสมมีน้อยจนเกินไป ก็ทำให้คอนกรีตมีน้ำไม่เพียงพอที่จะขึ้นมาชดเชยน้ำที่เสียไปจากผิวหน้า

7. ปริมาณเถ้าลอย – การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมีผลดีมากกว่าผลเสียหากเถ้าลอยที่ใช้มี คุณภาพดี ซึ่งทำให้การพัฒนากำลังอัดหลัง 50 วันเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำขึ้น และยังทำให้ความทนทานต่อซัลเฟตกับคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงจะทำให้หน่วงการก่อตัวของคอนกรีต ซึ่งเป็นเหตุให้ระยะเวลาของการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกยาวขึ้น กำลังอัดในระยะแรกต่ำลง และความทนทานต่อการขีดสีลดลง หากต้องการใช้เถ้าลอยในงานถนน ควรทำการบ่มคอนกรีตให้ถูกวิธี เพื่อช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำ โดยเฉพาะในระยะเวลาที่คอนกรีตยังไม่ก่อตัว

การป้องกันการแตกร้าวแบบ Plastic Shrinkage

การป้องกันปัญหาการแตกร้าวอาจแยกความรับผิดชอบได้เป็นสองส่วน ในส่วนของผู้ผลิตสามารถทำได้หลายแนวทาง ดังนี้

1. การกำหนดมาตรฐานการผลิตคอนกรีตสำหรับงานกลางแจ้งที่คอนกรีต มีโอกาสสูญเสียน้ำที่ผิวหน้าในปริมาณมากอย่างรวดเร็ว โดยใช้ปริมาณน้ำในการผสมที่พอเหมาะ คือมีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนักที่อยู่ระหว่าง 0.38 ถึง 0.45 และหลีกเลี่ยงการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (น้ำยาผสม Type D) และหากเป็นไปได้ไม่ควรใช้น้ำยาผสม Type G เพราะออกแบบปริมาณการใช้ให้เหมาะกับงานได้ยาก แต่หากมีความจำเป็นต้องรักษาความสามารถในการเทได้ ต้องออกแบบคอนกรีตให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่ไม่ยาวเกินไป โดยพิจารณาการสูญเสียค่ายุบตัวคอนกรีตให้สอดคล้องกับอัตราการเทคอนกรีต

2. วางแผนการจัดส่งคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการลดเวลาในการจัดส่งให้เหลือน้อยที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการขออนุญาตตั้งโรงงานผสมชั่วคราวภายในบริเวณโครงการก่อสร้าง หรือใกล้ที่หน้างาน หรือการขอความอนุเคราะห์จากลูกค้าให้ปรับปรุงเส้นทางสัญจรเพื่ออำนวยความสะดวก สะดวกแก่รถโม้ ซึ่งเป็นการลดเวลาที่ใช้ในการเดินทาง

3. ส่วนผสมที่ใช้ต้องเชื่อมั่นได้ว่าใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่น้อยที่สุด แต่ต้องมีคุณสมบัติครบถ้วนตามข้อกำหนด และสามารถทำงานได้ดีในขณะเท

4. หลีกเลี่ยงการใช้ทรายที่มีความละเอียดมาก ซึ่งทรายที่ละเอียดมากจะไปขัดขวางช่องทางเดินของน้ำ ทำให้น้ำที่อยู่ส่วนล่างของพื้นขึ้นมาชดเชยน้ำที่สูญเสียไปจากผิวหน้าได้ยาก ขึ้น

5. นำวัสดุหรือสารผสมเพิ่มเข้ามาช่วยโดยเฉพาะวัน ที่มีอากาศร้อนจัดมาก แต่วัสดุหรือสารผสมเพิ่มเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับส่วนผสมตัว หลัก อาทิ การใช้ Polypropylene Fiber เพื่อเพิ่ม

Tensile Strength ให้กับคอนกรีต โดยใช้ในอัตราส่วนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ หรือการใช้ Methylcellulose เพื่อเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของคอนกรีต โดยใช้ในอัตราส่วนร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ในส่วนของผู้บริโภคสามารถทำได้หลายแนวทาง ดังนี้

1. วางแผนงานให้มีประสิทธิภาพในการทำงานอย่างสูงสุด และใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพเพียงพอกับปริมาณและอัตราส่วนของการเทคอนกรีต รวมถึงการจ้างแรงงานที่มีความชำนาญในจำนวนที่พอเพียง เพื่อให้การเทคอนกรีตเป็นไปอย่างรวดเร็วและคอนกรีตยังคงอยู่ในสภาพสด
2. เอื้ออำนวยความสะดวกให้กับรถที่จัดส่งคอนกรีต เพื่อให้รถใช้เวลาในการรับส่งน้อยที่สุด หากเป็นโครงการขนาดใหญ่ที่มีความต้องการคอนกรีตในปริมาณที่สูงและภายใน โครงการมีเนื้อที่ว่างพอควรพิจารณาอนุญาตให้บริษัทฯ สามารถติดตั้งโรงงานผสมคอนกรีตภายในบริเวณ โครงการเป็นการชั่วคราว
3. ควบคุมการทำงานให้เป็นไปตาม มาตรฐานและข้อกำหนด เช่นอาจมีการใช้น้ำยาบ่มฉืดที่ผิวหน้าหากคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ รุนแรงนัก แต่หากคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เช่นลมที่พัดด้วยความเร็วเกิน 8 กม./ชม. การใช้น้ำยาบ่มอาจเป็นมาตรการป้องกันที่ไม่พอเพียง ควรใช้แผ่นพลาสติกคลุมปิดผิวคอนกรีตทันทีหลังการปาดหน้า หากไม่สามารถหาแผ่นพลาสติกได้ อาจใช้กระสอบป่านชั้นคลุมแทน หรือในกรณีที่เป็นผนังให้ทำการสลัดน้ำใส่ผิวปูนฉาบที่ผนังให้เกิดความชื้นอยู่ตลอดเวลา เพื่อไม่ให้สูญเสียน้ำเนื่องจากความร้อน
4. วางแผนงานให้ลดความรุนแรงที่มีผลกระทบมาจากสิ่งแวดล้อมได้ มากที่สุด ในกรณีของโครงการนี้ อาจมีการศึกษาพฤติกรรมของลมว่าพัดจากทิศใด ช่วงเวลาใดจะสงบที่สุดและอุณหภูมิอากาศที่ไม่สูงมาก และวางแผนการเทให้สอดคล้องกับช่วงเวลานั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการและขั้นตอนต่างๆ รวมถึงการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ในโครงการพิเศษเรื่องนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานขั้นต้น

3.1.1. กำหนดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่จะเริ่มและหยุดทำการทดสอบ โดยใช้อุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในงานคอนกรีต และอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดต่ำสุดในประเทศไทยซึ่งได้ค่าดังนี้

อุณหภูมิที่จะทำการทดสอบ: 20-40 องศาเซลเซียส โดยจะเริ่มทำการทดสอบที่ 40 องศาเซลเซียส และลดลงครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จนถึง 20 องศาเซลเซียส โดยจะควบคุมความชื้นให้อยู่ที่ประมาณ 50-60% ความชื้นสัมพัทธ์ที่จะทำการทดสอบ: 20-75% ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

3.1.2 เตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบ

3.1.2.1 เตรียมตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้ตู้ปลาขนาด 48”x72” โดยใช้ไฟจากหลอดไฟเป็นตัวให้ความร้อนและใช้น้ำใส่บีกเกอร์รอบตู้เพื่อเป็นตัวเพิ่มความชื้น แสดงดังภาพที่ 1 โดยในตู้จะมีมาตรวัดบอกปริมาณความชื้นและอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมเพื่อคอยปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและความชื้นให้ได้ตามค่าที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



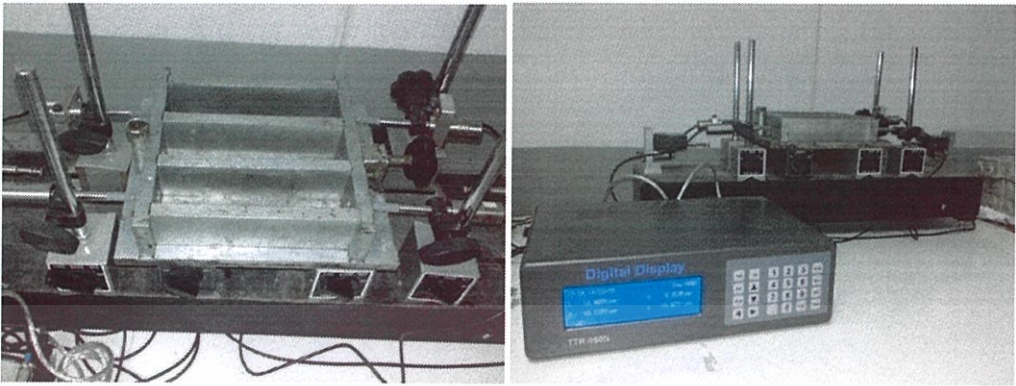
รูปที่ 3.1 แสดงตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งเป็นตู้ระบบปิด



รูปที่ 3.2 แสดงมาตรวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

3.1.2.2 เตรียมเกจวัดการหดตัว (LVDT) และเครื่องเก็บค่าการหดตัว (Data logger) ซึ่งจะมี 4 เกจวัด ได้ครั้งละ 2 ชั้นและจะต่อเข้ากับเครื่อง Data logger เพื่อทำการเก็บค่าการหดตัวที่เกจ LVDT วัดได้ทุกๆ 10 นาที แสดงดังภาพที่ 3 และต้องมีการลงโปรแกรมเพื่อทำการดึงค่าการหดตัวออกจากเครื่อง Data logger เพื่อนำมาดูและวิเคราะห์ค่าการหดตัวในคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งแบบหล่อ, การติดตั้งอุปกรณ์ LVDT และเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger)

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ซีเมนต์

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราอินทรีเพชร ผลิตโดยบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 3.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

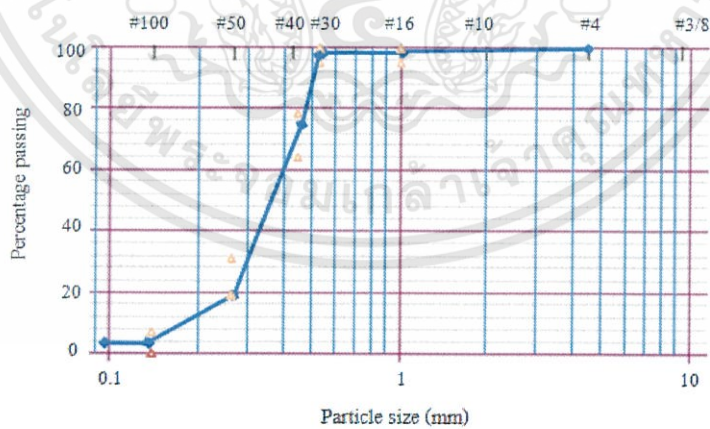
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ทราย

ใช้ทรายตามมาตรฐาน ASTM C 778 graded sand ใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยเป็นทรายที่อยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 – เบอร์ 100 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติพื้นฐานและขนาดคละดังตาราง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของทราย

Basic Property	ทราย
Bulk Specific Gravity(SSD)	2.60
Bulk Specific Gravity	2.58
Moisture Content , %	0.54
Fineness Modulus	2.05



รูปที่ 3.5 Gradation Curve ของทรายกับ ASTM C 778 graded sand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 มาตรฐาน ASTM C 778 graded sand

Sieve size		ASTM C 778
		Graded sand
		Percent Passing
1.18 mm.	No.16	100
850 μm .	No.20	100
600 μm .	No.30	96 - 100
425 μm .	No.40	65 - 75
300 μm .	No.50	20 - 30
150 μm .	No.100	0 - 4



รูปที่ 3.6 การเตรียมทรายตามมาตรฐาน ASTM C 778 graded sand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดสอบและวิจัย

3.3.1 การทดสอบ อัตราการไหล (Flow table) ASTM C230

นำแบบหล่อตัวอย่างวางให้อยู่ตรงกลางของแท่น ใส่มอร์ตาร์ประมาณ 1/2 ของแบบหล่อ กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 20 ครั้งเติมซีเมนต์มอร์ตาร์ให้เต็มจนล้นแบบหล่อขึ้นมา ทำการกระทุ้งอีก 20 ครั้ง เช่นเดียวกันกับครั้งแรก ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ ทำความสะอาดบริเวณรอบ ๆ แท่นทดสอบ ให้ ค่อย ๆ ยกแบบหล่อขึ้นจากซีเมนต์มอร์ตาร์ จึงทำการหมุนโต๊ะทดสอบให้ตกกระแทกในแนวตั้งสูง 12.7 มม. เป็นจำนวน 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที

การวัดการกระจาย วัดจากผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจาย โดยวัดเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางเดิมดังนี้

$$\text{อัตราการไหล} = (D_1 - D_0 / D_0) * 100\%$$

โดย D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่กระจายบนจาน
 D_0 = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบกรวยทองเหลือง



รูปที่ 3.7 แสดงการทดลองอัตราการไหล (Flow Table)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807

เพื่อหาเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย (initial and final setting time) ของมอร์ตาร์ โดยใช้อุปกรณ์ไวแคท นำมอร์ตาร์ที่ทดสอบอัตราการไหลมาตั้งค่าตัวชี้ที่เครื่องไปที่ค่าขีดศูนย์ที่ด้านบนของสเกล ซึ่งเป็นค่าตั้งต้น ปล่อยพริกเกอร์ลงมาภายในเวลา 30 วินาทีหลังจากที่ผสมเสร็จ เครื่องจะต้องไม่มีการสั่นในระหว่างที่ทำการทดสอบ บันทึกค่าพริกเกอร์ที่จมลงไปบนซีเมนต์เพสต์หลังจากที่ปล่อยให้จมลงไปเป็นระยะเวลา 30 วินาที เพสต์จะมีความชันเหลวปกติเมื่อพริกเกอร์จมลงไปเป็นระยะ 10 ± 1 มิลลิเมตร จากผิวด้านบน ภายในระยะเวลา 30 วินาทีหลังปล่อย

คำนวณระยะเวลาการก่อตัวเป็นนาที่ดังสมการ

$$\text{Time of Setting} = (((B-A)/(C-D))*(C-10))+A$$

โดย

A = เวลา เป็นนาที่เมื่อแท่งเหล็กจมมากกว่า 10 มม. เป็นครั้งสุดท้าย

B = เวลา เป็นนาที่เมื่อแท่งเหล็กจมน้อยกว่า 10 มม. เป็นครั้งแรก

C = ระยะเข็มจมที่ เวลา A

D = ระยะเข็มจมที่ เวลา B



รูปที่ 3.8 แสดงการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (setting time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบหาอัตราการหดตัว (Total Shrinkage) “Test method for linear measurement of Early Age shrinkage” (Norwegian method)

ทำการเก็บตัวอย่างในแบบหล่อขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร ในแต่ละกรณี ทั้งหมดกรณีละ 2 ตัวอย่าง มีการติดตั้ง LVDT 2 ตัวที่ด้านหัวและด้านท้ายของตัวอย่างเพื่อใช้เป็นจุดในการวัดการยืดหดตัว ทำการวัดขนาด 60 นาทีหลังจากเทมอร์ตาร์ลงแบบและเก็บค่าการยืด หดตัวทุกๆ 10 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง

ค่าอัตราการหดตัว (Total Shrinkage) ของซีเมนต์มอร์ตาร์หาได้จากสมการ

$$\Delta L_1 = \frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{L}$$

เมื่อ ΔL_1 = ความยาวที่เปลี่ยนไปก่อนที่จะถอดแบบ

L = ระยะห่างระหว่าง gauge plugs ด้านใน

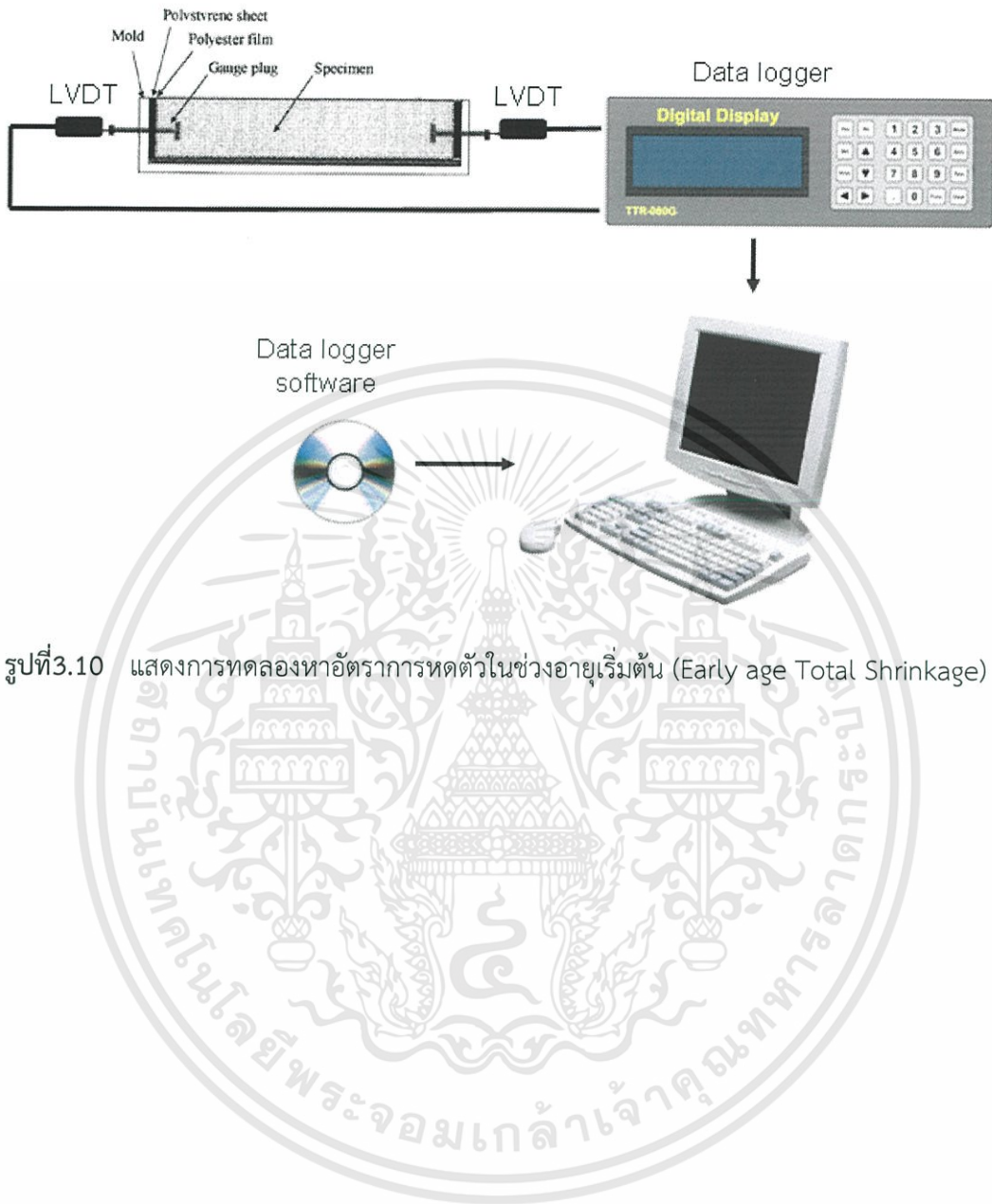
X_{0a}, X_{0b} = ระยะที่เริ่มต้นอ่าน

X_{ia}, X_{ib} = ระยะที่เปลี่ยนไป ณ เวลาที่อ่านค่า



รูปที่ 3.9 แสดงการทดสอบหาการหดตัวในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงการทดลองหาอัตราการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age Total Shrinkage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดสอบ ห้อตราการไหล ระยะการก่อตัวเริ่มต้น ตลอดจนผลการทดสอบหาค่าการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยมีอิทธิพลมาจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

4.1 อัตรการไหล (Flow table) ASTM C230

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ อัตรการไหล (Flow table) ASTM C230

SAMPLE NO.	WT. OF CEMENT (gm.)	VOL OF WATER (cc.)	D0 (cm.)	D1 (cm.)	PERCENT Flow table (%)
1	200	150	9.968	20.967	110.35

จากตารางคือค่าทดสอบที่เหมาะสมตรงตามมาตรฐาน ASTM C230 ซึ่งอัตรการกระจายที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 105% - 115% จากตารางได้ 110.35 % ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน และจะได้ water cement ratio เท่ากับ 0.75 ซึ่งจะนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการผสมมอร์ตาร์ที่จะใช้ในการทดสอบทุกครั้ง

4.2 ระยะเวลาก่อตัว (Setting Time) ASTM C807

ได้ทำการทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวเป็นสองครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกัน เพื่อป้องกันความผิดพลาด ซึ่งจะได้ค่ามาดังตารางด้านล่าง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807

TIME (minute)	PENETRATION (mm)	TIME (minute)	PENETRATION (mm)
30	40	30	40
45	40	45	40
60	40	60	40
75	40	75	40
90	40	90	40
105	40	105	37.5
120	39	120	37.5
135	35	135	27
150	27.5	150	22.5
165	22.5	165	17.5
180	5	180	3
195	0	195	0

จากตาราง นำไปแทนค่าในสูตร $Time\ of\ Setting = (((B-A)/(C-D))*(C-10))+A$

ตารางที่ 1 $(((180-165)/(22.5-5)) \times (22.5-10))+180 = 190.714$

ตารางที่ 2 $(((180-165)/(17.5-3)) \times (17.5-10))+180 = 187.758$

นำค่าจากทั้งสองตารางมาเฉลี่ย $(190.714+187.758)/2 = 189.236$

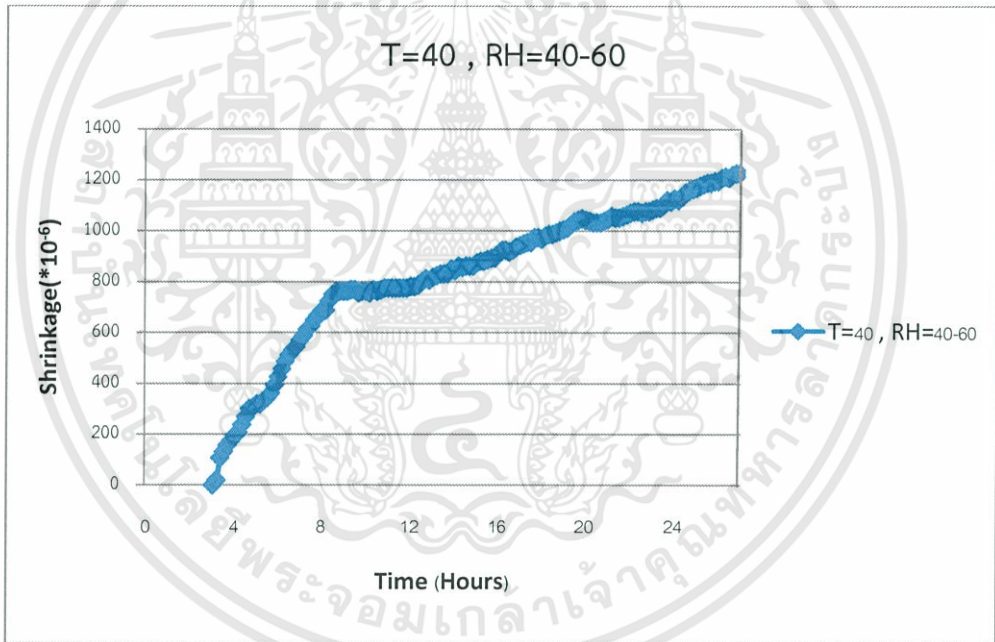
จากการแทนสูตรได้ค่าระยะเวลาการหดตัวที่เหมาะสมคือประมาณ 190 นาที หรือ 3 ชั่วโมง 10 นาที ซึ่งจะนำค่านี้มาใช้เป็นเวลาเริ่มต้นที่จะวัดการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ตลอดการทดสอบของโครงการพิเศษ

4.3 อัตราการหดตัว (Total Shrinkage) “Test method for linear measurement of Early Age shrinkage” (Norwegian method)

4.3.1 ผลการทดสอบอัตราการหดตัวที่มีผลมาจากอุณหภูมิ

โดยเป็นผลการทดสอบที่วัดอัตราการหดตัวโดยให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าคงที่ประมาณ 40%-60% และทดสอบหาอัตราการหดตัวตามค่าอุณหภูมิที่ 40,35,30,25,20 ตามลำดับ ได้ผลดังนี้

4.3.1.1 อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

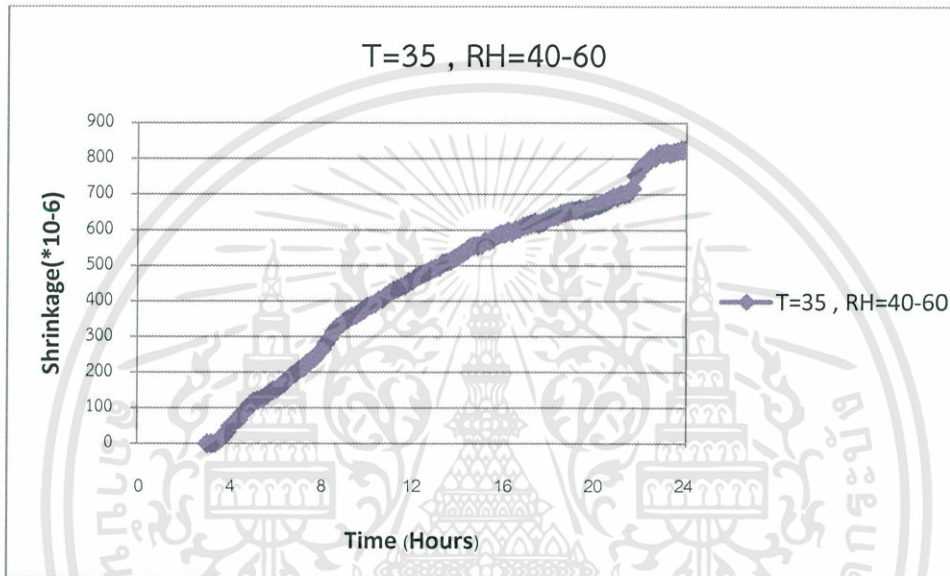


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%

จากกราฟอัตราการหดตัวจะเห็นได้ว่าในช่วงชั่วโมงที่ 3 ถึงชั่วโมงที่ 8 อัตราการหดตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งผลมาจากอุณหภูมิภายในของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำ หลังจากนั้นอัตราการ

หดตัวก็ยิ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งมีผลมาจากอุณหภูมิภายนอกที่มากถึง 40 องศาเซลเซียส เมื่อบันทึกค่าครบ 24 ชั่วโมง จะได้อัตราการหดตัวที่ 1225.43×10^{-6}

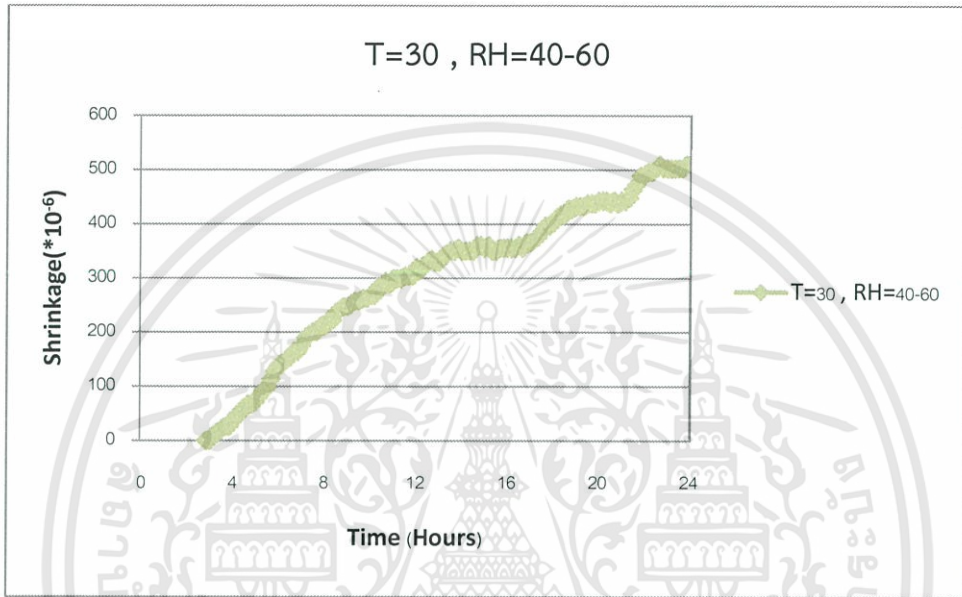
4.3.1.2 อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%

อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีลักษณะการหดตัวในลักษณะต่อเนื่องเกือบเป็นกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวภายในจากอุณหภูมิภายในจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและต่อด้วยอุณหภูมิภายนอกในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ทำให้มีค่าการหดตัว 24 ชั่วโมง ที่ 824.738×10^{-6}

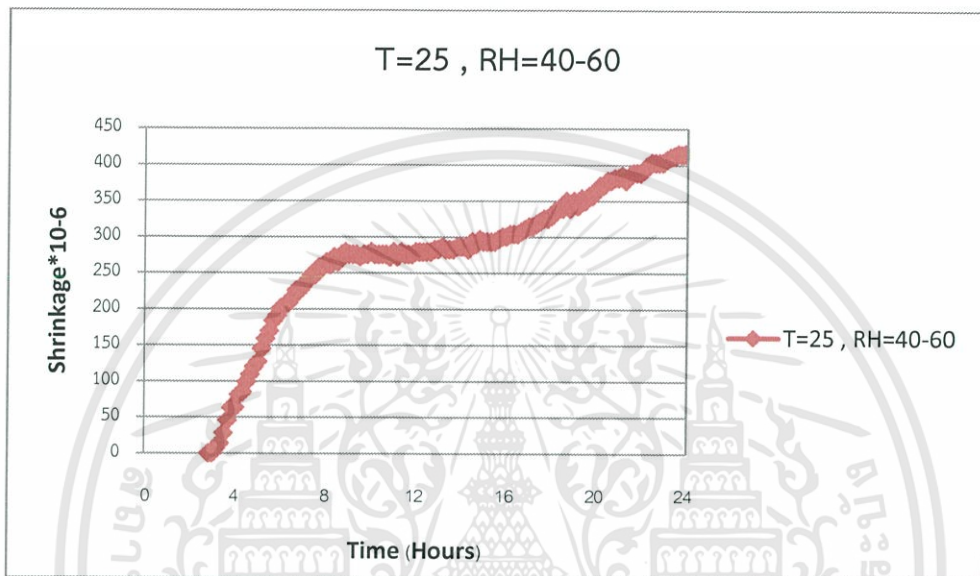
4.3.1.3 อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%

อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะของกราฟไปในทำนองเดียวกับที่อุณหภูมิ 40 และ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมีค่าการหดตัวที่ 24 ชั่วโมงเท่ากับ 509.542×10^{-6}

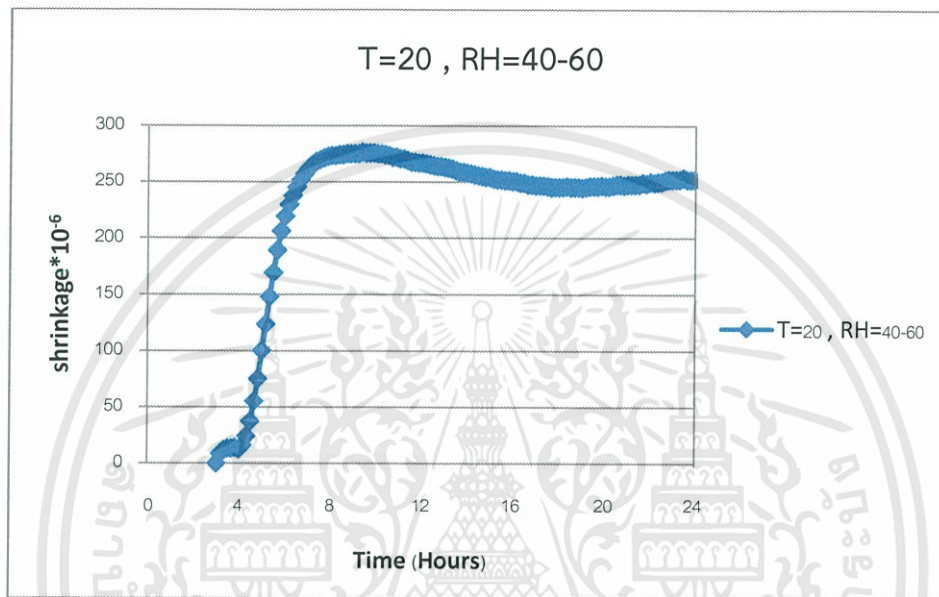
4.3.1.4 อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%

จากกราฟอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะพบว่าในช่วงที่เริ่มบันทึกค่าจนถึงชั่วโมงที่ 8 อัตราการหดตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งมีผลมาจากอุณหภูมิภายในของปฏิกิริยาไฮเดรชัน หลังจากชั่วโมงที่ 8 เป็นต้นไปอัตราการหดตัวจะค่อยๆคงที่และเพิ่มจากเดิมไม่มากนักเนื่องจากอุณหภูมิกว้างนอกที่ 25 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องปกติ จึงไม่มีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์มากนัก ซึ่งอัตราการหดตัวที่ 24 ชั่วโมงสามารถวัดค่าออกมาที่ 415.11×10^{-6}

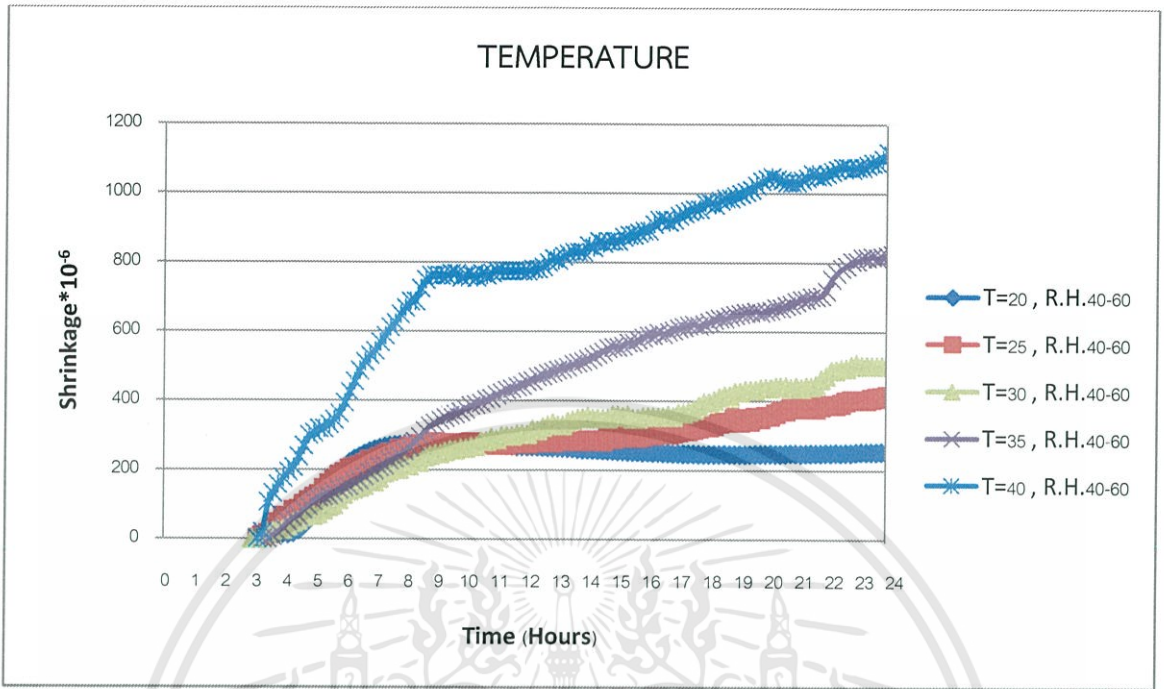
4.3.1.5 อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



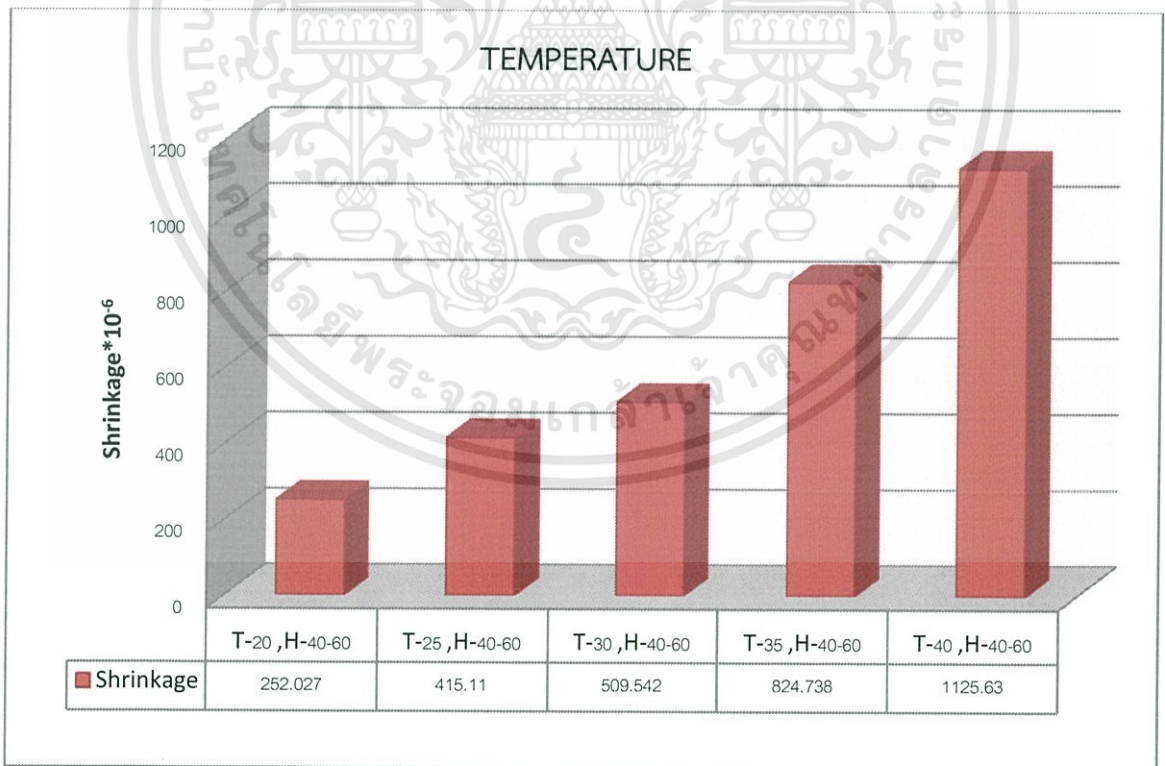
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%

จากกราฟอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกจะเป็นการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิภายในของปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้อัตราการหดตัวในช่วงแรกพุ่งสูงเพิ่มขึ้นเรื่อย แต่จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผ่านชั่วโมงที่ 8 ซึ่งจะไม่มีการหดตัวเพราะอุณหภูมิภายนอกเพราะอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งถือเป็นอุณหภูมิที่ต่ำมากจึงไม่มีผลต่อการหดตัว เมื่อวัดค่าอัตราการหดตัวที่ 24 ชั่วโมง ได้ค่าเท่ากับ 252.027×10^{-6}

เมื่อนำอัตราการหดตัวจากอุณหภูมิทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันจะสามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการหดตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

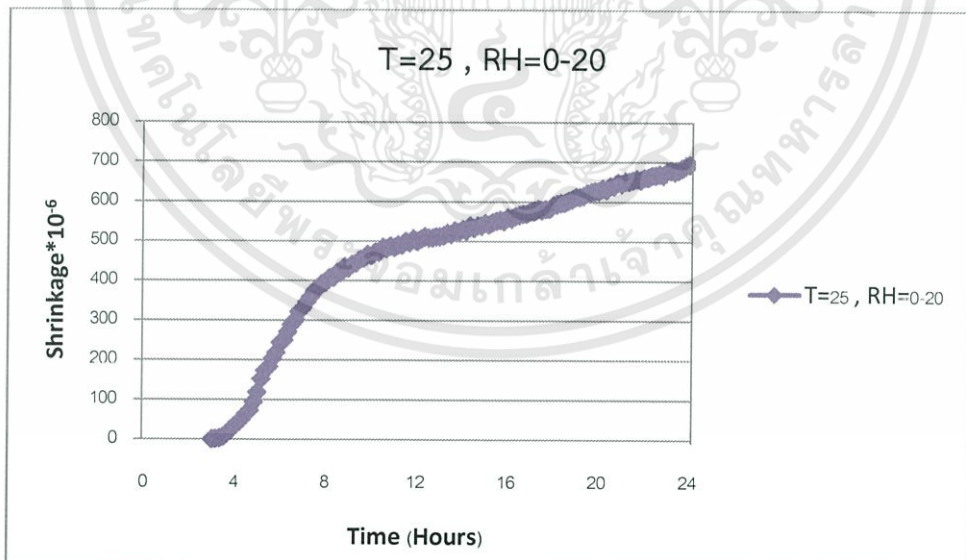
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการหดตัวจะสามารถเห็นอัตราการหดตัวที่แตกต่างกันแต่ละช่วง อุณหภูมิได้อย่างชัดเจน จากทฤษฎีการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์หากมีอัตราการหดตัวที่มากกว่า 1000×10^{-6} จะส่งผลให้มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าว ซึ่งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีอัตราการหดตัวมากกว่าค่าที่กำหนดส่งผลให้มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าวได้ ในขณะที่อัตราการหดตัวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด แต่ก็ยังเป็นอุณหภูมิที่เสี่ยงต่อการแตกร้าวเพราะค่าอัตราการหดตัวใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ส่วนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียสอัตราการหดตัวมีค่าไม่มากเกินไป จึงไม่มีผลต่อการแตกร้าวของมอร์ตาร์ ส่วนอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อัตราการหดตัวมีน้อยจึงไม่มีผล ต่อการแตกร้าวอย่างแน่นอนเพราะอุณหภูมิต่ำจะไม่มีผลต่อการแตกร้าวของมอร์ตาร์

4.3.2 ผลการทดสอบอัตราการหดตัวที่มีผลมาจากความชื้นสัมพัทธ์

ทำการทดสอบหาอัตราการหดตัวโดยให้มีอุณหภูมิคงที่ ที่ 25 องศาเซลเซียสและเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ครั้งละ 20% โดยเริ่มจาก 0% ถึง 80% ได้ผลการทดสอบดังนี้

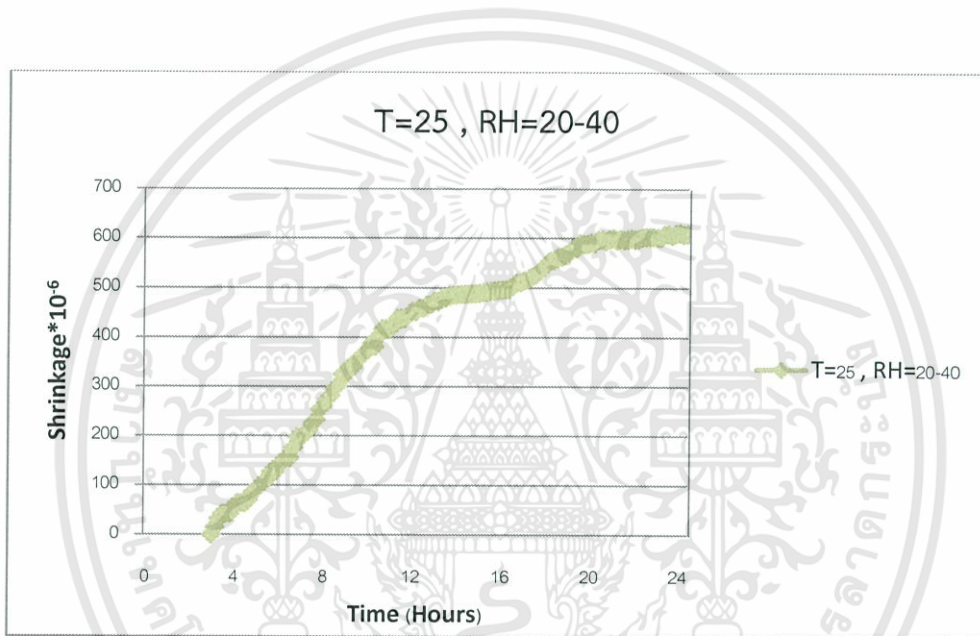
4.3.2.1 อัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%-20%



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%-20%

จากกราฟอัตราการหดตัวในช่วงความชื้น 0%-20% แสดงให้เห็นช่วงแรกที่มีการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิภายในของปฏิกิริยาไฮเดรชัน หลังจากนั้นก็จะมีการหดตัวต่อเนื่องอีกเนื่องจากอิทธิพลของความชื้นในระบบที่มีอยู่น้อยมากจึงดึงเอาความชื้นมาจากมอร์ตาร์เป็นผลให้มอร์ตาร์ สูญเสียความชื้นให้กับระบบจึงมีการหดตัวที่มากซึ่งมีอัตราการหดตัวอยู่ที่ 694.035×10^{-6}

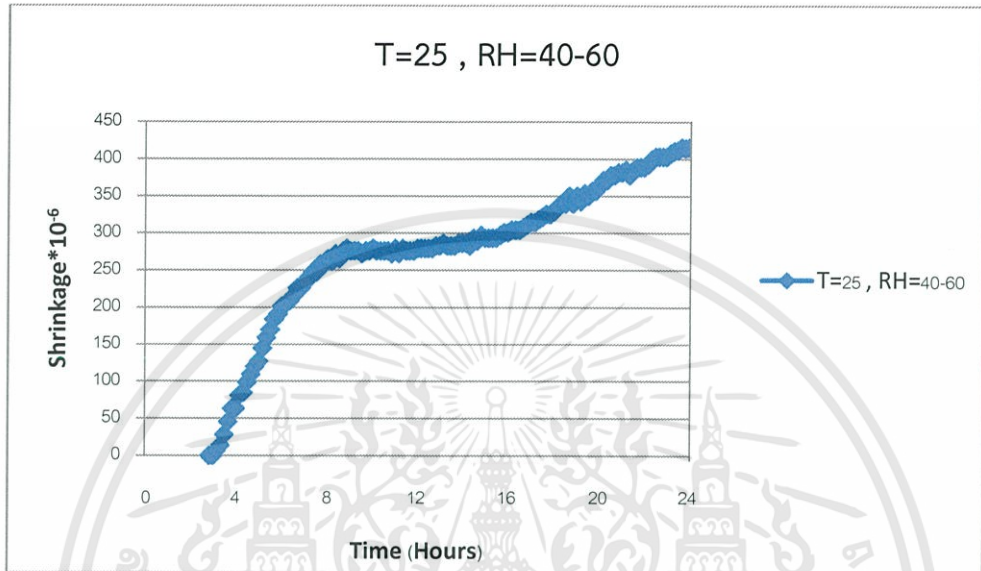
4.3.2.2 อัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20%-40%



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20%-40%

จากกราฟอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 20%-40% จะมีแนวโน้มการหดตัวคล้ายกับช่วงความชื้น 0%-20% แต่อัตราการหดตัวในช่วงที่อาศัยอิทธิพลของความชื้นในระบบจะคงที่สลับกับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความชื้นในระบบที่สูงขึ้นกว่าการทดสอบในตอนแรก ซึ่งเมื่อครบที่ 24 ชั่วโมง จะวัดอัตราการหดตัวได้ค่าเท่ากับ 612×10^{-6}

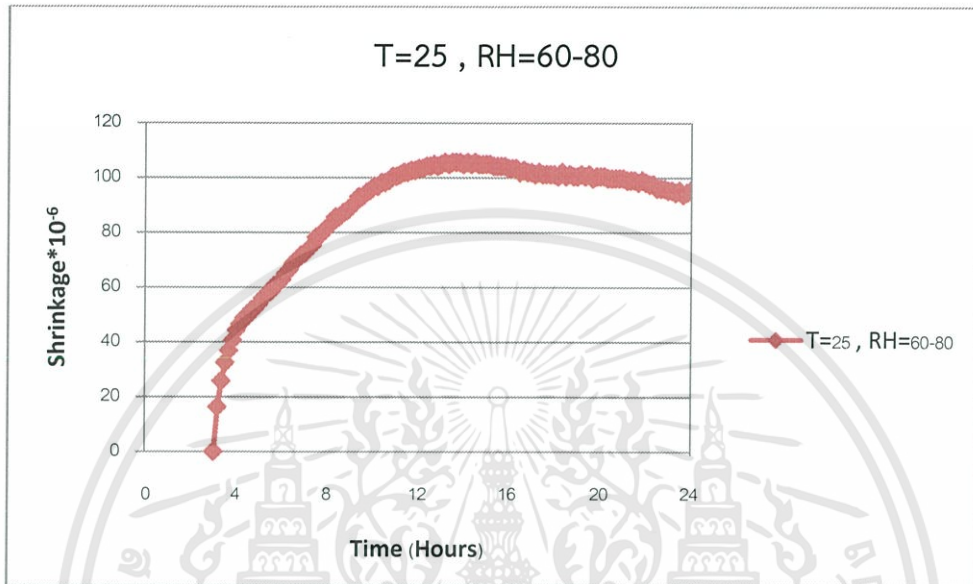
4.3.2.3 อัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60%

จากกราฟอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 40%-60% อัตราการหดตัวเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัดหากเปรียบเทียบกับช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ทดสอบก่อนหน้านี้เนื่องมาจากความชื้นในระบบเริ่มมีมากขึ้นและเพียงพอที่จะไม่ทำให้มอร์ตาร์สูญเสียความชื้นในระบบ ซึ่งเมื่อครบ 24 ชั่วโมง สามารถวัดอัตราการหดตัวได้ค่าเท่ากับ 415.111×10^{-6}

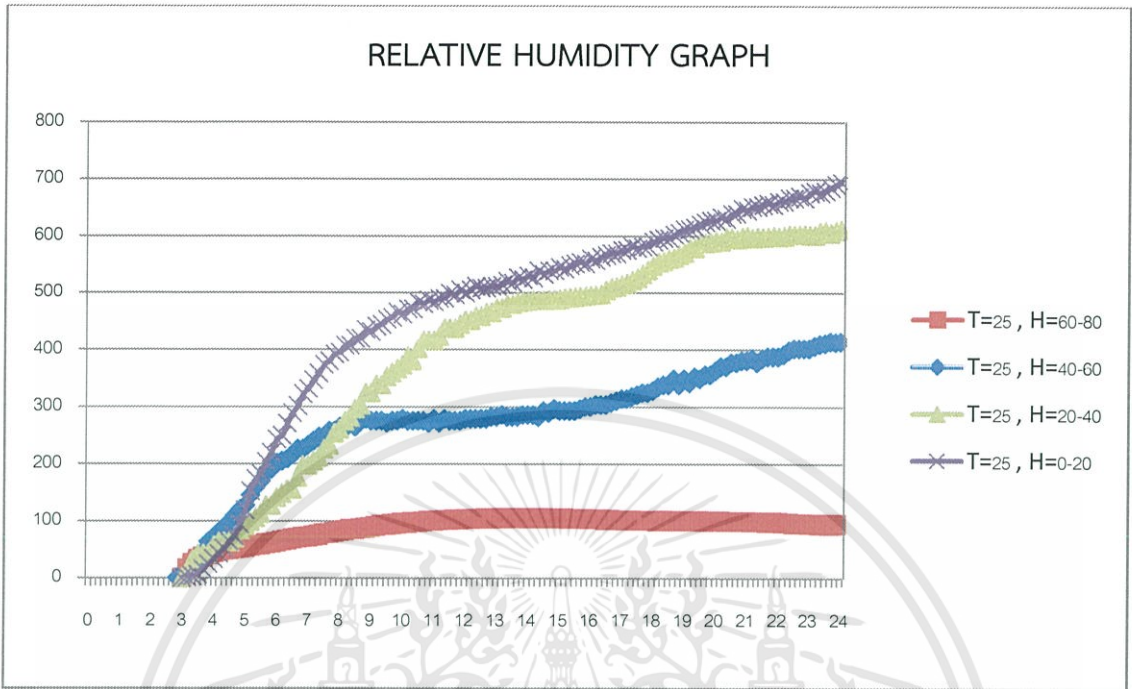
4.3.2.4 อัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60%-80%



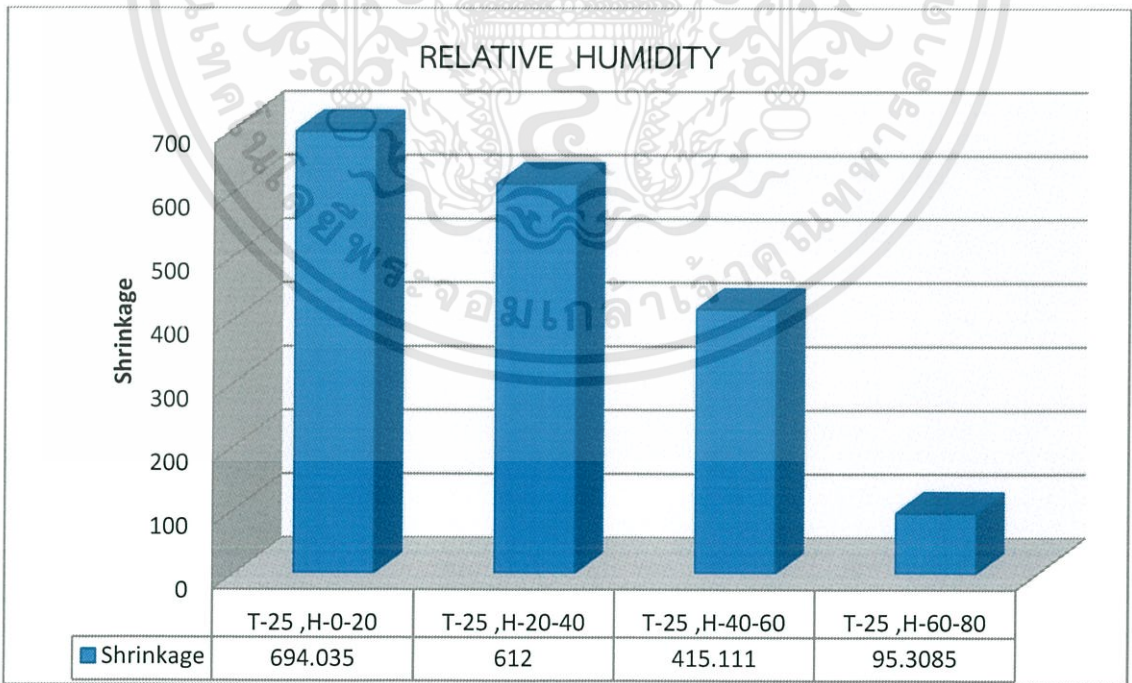
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอัตราการหดตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60%-80%

จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 60%-80% อัตราการหดตัวจะเกิดเฉพาะในช่วงแรกที่มีอิทธิพลจากอุณหภูมิภายในของมอร์ตาร์ และจะค่อยๆคงที่และลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากอิทธิพลของความชื้นในระบบที่มีอยู่มากจนไม่มีผลต่อการหดตัวในช่วงนี้เลย วัดอัตราการหดตัวที่ 24 ชั่วโมง ได้ค่าเท่ากับ 95.3085×10^{-6}

เมื่อนำอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นต่างๆมาเปรียบเทียบกันจะเห็นความอัตราการหดตัวที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่4.12 กราฟเปรียบเทียบอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นต่างๆ



รูปที่4.13 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการหดตัวในช่วงความชื้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภูมิอัตราการหดตัวโดยอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0%-20% จะมีอัตราการหดตัวเยอะที่สุดและอัตราการหดตัวจะลดลงตามความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น เนื่องจากในช่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันมอร์ตาร์ก็จะสูญเสียความชื้นให้กับระบบอยู่แล้ว ถ้าความชื้นในระบบยังมีค่าน้อย มอร์ตาร์ก็จะยิ่งสูญเสียความชื้นให้กับระบบเยอะกว่าปกติส่งผลให้เกิดการหดตัวที่มากขึ้นกว่าช่วงความชื้นปกติ ซึ่งหากปล่อยให้ความชื้นต่ำเป็นเวลานานการหดตัวก็อาจจะมากขึ้นเรื่อยๆส่งผลให้มอร์ตาร์หดตัวเกินค่าที่มาตรฐานกำหนดได้ซึ่งก็จะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของมอร์ตาร์ในลำดับต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบหาอัตราการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age Total Shrinkage) โดยอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งการทดสอบค่าการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นยังไม่มีมาตรฐานในการรองรับ ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดอย่างมากเนื่องมาจากปัญหาของการทดสอบที่ยากลำบากของซีเมนต์มอร์ตาร์สดที่ยังไม่แข็งตัวรวมถึงการวิจัยด้านนี้ในประเทศยังไม่แพร่หลาย

ในโครงการพิเศษฉบับนี้จึงแสดงให้เห็นถึงความสำคัญการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงอุณหภูมิ และความชื้นต่างๆ เพื่อนำไปปรับปรุงการดูแลรักษาซีเมนต์มอร์ตาร์หลังจากฉาบเสร็จเพื่อป้องกันการแตกร้าวในลำดับต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ในการทำงานซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีอุณหภูมิสูงอัตราการหดตัวก็จะสูงขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าวได้มาก โดยการแตกร้าวจะแปรผันกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในให้แก่อุณหภูมิภายนอกที่สูงขึ้น โดยปกติแล้วอุณหภูมิโดยทั่วไปของประเทศไทยจะอยู่ในช่วงระหว่าง 25-40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียสเป็นต้นไปอัตราการหดตัวจะสูงกว่าค่ามาตรฐานซึ่งจะมีผลต่อการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งในการทำงานจริงๆ แล้วควรหลีกเลี่ยงการทำงานที่จำเป็นต้องทำงานซีเมนต์มอร์ตาร์ในที่กลางแจ้ง หรือในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และในทางกลับกันในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำจะไม่ค่อยส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการหดตัวมากนัก เนื่องจากซีเมนต์มอร์ตาร์ไม่ได้สูญเสียน้ำภายในให้แก่สภาวะแวดล้อมมากนัก โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานซีเมนต์มอร์ตาร์จะอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

2. จากการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ อัตราการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์จะแปรผกผันกับความชื้นที่สูงขึ้น โดยที่ในช่วงฤดูหนาว จะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการสูญเสียน้ำภายในให้แก่สภาพแวดล้อมภายนอกมากส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการหดตัว แต่เนื่องจากการหดตัวโดยมีสาเหตุมาจากสภาวะความชื้นต่ำจะไม่ค่อยส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการหดตัวในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น (Early Age) แต่จะมีผลอย่างมากในสภาวะยาวนาน (Long Term) ซึ่งอาจจะเกิดควบคู่กับปัจจัยอื่นควบคู่ไปด้วย ทั้งนี้ ลมก็อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะพัดพามาให้ซีเมนต์มอร์ตาร์สูญเสียความชื้นยิ่งขึ้น และในทางกลับกัน ในสภาวะที่มีความชื้นสูงหรือในช่วงฤดูฝน หรือหลังฝนตก จะส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการหดตัวน้อย เนื่องจากน้ำภายในซีเมนต์มอร์ตาร์ไม่ได้สูญเสียไปให้แก่สภาพแวดล้อมภายนอกนัก ซึ่งในบางกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง อาจจะทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดการขยายตัวก็เป็นได้ โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการทำงานซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นจะอยู่ในช่วง 40%-60%

3. ในสภาพภูมิประเทศของประเทศไทย ความชื้นจะไม่ค่อยมีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นมากนัก เพราะประเทศไทยจัดเป็นสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น แต่อุณหภูมิจะมีผลมากเพราะอุณหภูมิของประเทศไทยโดยเฉลี่ยจะมากกว่า 30 องศาเซลเซียส และในช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิอาจจะสูงขึ้นไปถึง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ตาร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นพบว่าการใช้ LVDT ในการทดลองมีข้อผิดพลาดอยู่บ้างคือจะมีแรงดันจากเกจวัด LVDT ดันขึ้นแบบทดลอง ทำให้อาจเกิดการค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดซีเมนต์มอร์ตาร์ในสภาวะพลาสติกที่ไม่คงที่ แต่หลังจากระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นสามารถใช้ LVDT วัดค่าได้

2. ควรศึกษาพัฒนาเครื่องมือและวิธีการวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ไม่รบกวนตัวอย่าง รวมทั้งศึกษากลไกต่างๆที่เกิดขึ้นเช่น การวัดอุณหภูมิในแท่งตัวอย่าง การหดตัวในแนวตั้ง อัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] A.Hori , M.Morioka ,E.sakai and M.daimon (1992) “ Influence of Expansive Additives on Autogenous Shrinkage” ,Autogenous shrinkage of Concrete, pp.187-194.
- [2] ASTM Designation: C 230/230M-08, 2008, “Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement”, Annual Book of ASTM Standards,
- [3] ASTM Designation: C 807-08, 2008, “Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle1”, Annual Book of ASTM Standards.
- [4] ASTM Designation: C 778-06, 2006, “Standard Specification for Standard Sand”, Annual Book of ASTM Standards.
- [5] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม8 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ,สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15,2514
- [6] สารพล ตริ์สุวรรณ “ผลกระทบของวัสดุอินทรีย์ผสมเพิ่มต่อการหดตัวของมอร์ตาร์สด”วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2553.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

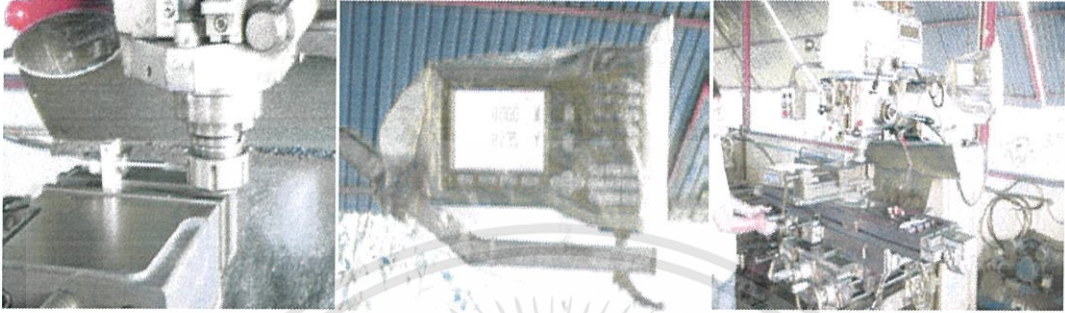


ภาคผนวก ก.

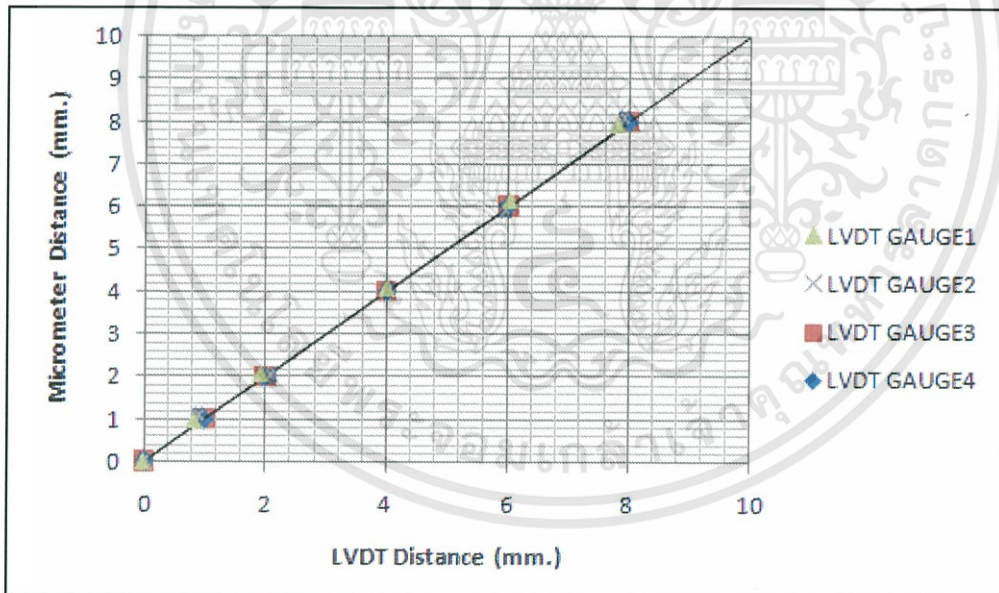
ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดแอลวีดีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดการหดตัวในแนวราบ(LVDT) โดยใช้
"Digimatic" micrometer ผลิตโดยบริษัท acu-rite บนเครื่อง milling machine รุ่น.mill 2-R



รูปที่ ก.1 แสดงการสอบเทียบเครื่องมือวัด LVDTs ที่ใช้ในการทดลองวัดการหดตัวใน
แนวราบ



รูปที่ ก.2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด (LVDT) ที่ใช้ในการทดลองวัดการหดตัว
ในแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ค่า R² ของ LVDT GAUGE

GAUGE	Line Equation	Coefficient.a=1/SLOP E	R ²
1	y=1.0003x+0.0019	0.999723	1
2	y=1.0003x+0.0041	0.999723	0.99
3	y=1.0000x-0.0021	0.999968	0.99
4	y=0.9971x+0.0063	1.002941	0.99

คำนวณค่าคลาดเคลื่อนจากการสอบเทียบเครื่องมือวัดโดยสมการทางสถิติพื้นฐานดังนี้

$$\text{Mean SD} = 0.002718$$

$$\text{ERROR}_{\text{distance}} = (0.001/8)*100 = 0.0125\%$$

$$\text{ERROR}_{\text{LVDT}} = 0.0027*1.65 = 0.0045\%$$

$$\text{ERROR}_{\text{TOTAL}} = \text{SQRT}(0.0125*0.0125)+(0.0045*0.0045) = 0.0133\%$$

$$\text{FINAL ACCURACY} = 0.0133*10\text{mm.} = 0.133 \mu\text{m.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบการหัดตัวโดยมีอิทธิพลจากอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 40°C

Temperature 40° Celcius		Relative Humidity 40-60%					
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	193.3726	8	686.161	12	779.7284
	0		205.8483		686.161		779.7284
	0		237.0374		723.588		785.9662
	0		268.2266		748.5393		798.4419
	0		299.4157		761.0149		810.9176
	0		305.6535		761.0149		804.6797
1	0	5	318.1292	9	761.0149	13	817.1554
	0		318.1292		761.0149		823.3932
	0		330.6048		767.2528		829.631
	0		343.0805		767.2528		829.631
	0		361.794		754.7771		829.631
	0		392.9831		761.0149		848.3445
2	0	6	424.1723	10	761.0149	14	842.1067
	0		455.3614		754.7771		860.8202
	0		486.5505		767.2528		854.5823
	0		511.5018		761.0149		860.8202
	0		530.2153		767.2528		860.8202
	0		542.691		773.4906		860.8202
3	0	7	567.6423	11	773.4906	15	873.2958
	18.71348		586.3558		773.4906		879.5337
	106.0431		611.3071		773.4906		879.5337
	130.9944		623.7827		773.4906		885.7715
	155.9457		648.734		773.4906		892.0093
	174.6592		667.4475		773.4906		892.0093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 40°C (ต่อ)

Temperature 40° Celcius			Relative Humidity 40-60%		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	910.7228	19	1004.29	22	1069.488
	923.1984		1010.528		1075.726
	923.1984		1023.004		1075.726
	916.9606		1035.479		1069.488
	923.1984		1041.717		1075.726
	935.6741		1047.955		1075.726
17	941.9119	20	1041.717	23	1081.964
	948.1498		1038.299		1088.201
	954.3876		1032.061		1088.201
	954.3876		1032.061		1100.677
	973.1011		1032.061		1119.391
	973.1011		1038.299		1113.153
18	966.8632	21	1044.537	24	1125.628
	979.3389		1057.012		
	985.5767		1050.774		
	985.5767		1050.774		
	991.8145		1057.012		
	998.0524		1063.25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 35°C

Temperature 35° Celcius			Relative Humidity 40-60%				
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	48.90875	8	263.6471	12	457.6044
	0		59.29931		280.9648		467.995
	0		66.22636		294.8188		471.4585
	0		83.54397		312.1365		478.3855
	0		93.93454		325.9905		481.8491
	0		107.7886		332.9176		488.7761
1	0	5	118.1792	9	343.3082	13	492.2396
	0		121.6427		350.2352		495.7031
	0		125.1062		357.1622		506.0937
	0		132.0333		360.6258		509.5572
	0		142.4239		367.5528		513.0208
	0		149.3509		374.4799		519.9478
2	0	6	152.8144	10	384.8704	14	526.8748
	0		163.205		388.3339		533.8019
	0		170.132		391.7975		540.7289
	0		180.5226		402.188		551.1195
	0		190.9132		405.6516		554.583
	0		197.8402		416.0421		554.583
3	0	7	208.2308	11	422.9692	15	558.0466
	0.122955		211.6943		429.8962		568.4371
	0.419433		225.5484		433.3597		568.4371
	7.346478		232.4754		440.2868		575.3642
	17.73704		239.4025		443.7503		582.2912
	31.59113		253.2566		454.1409		589.2183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 35°C (ต่อ)

Temperature 35° Celcius			Relative Humidity 40-60%		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	589.2183	19	655.0252	22	769.3214
	596.1453		655.0252		783.1755
	592.6818		658.4887		790.1026
	599.6088		655.0252		803.9566
	603.0723		658.4887		803.9566
	609.9994		661.9522		814.3472
17	613.4629	20	668.8793	23	814.3472
	616.9264		668.8793		817.8107
	620.39		675.8063		814.3472
	616.9264		679.2698		817.8107
	620.39		686.1969		821.2743
	627.317		693.1239		824.7378
18	634.244	21	693.1239	24	824.7378
	637.7076		700.051		
	637.7076		700.051		
	644.6346		703.5145		
	648.0981		717.3686		
	651.5617		752.0038		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 30°C

Temperature 30° Celcius			Relative Humidity 40-60%				
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	36.03245	8	211.0472	12	319.1445
	0		46.32743		221.3422		313.9971
	0		51.47493		221.3422		324.292
	0		61.76991		236.7847		329.4395
	0		66.9174		241.9322		334.587
	0		66.9174		247.0796		329.4395
1	0	5	72.0649	9	247.0796	13	329.4395
	0		82.35988		252.2271		339.7345
	0		92.65487		257.3746		344.882
	0		97.80236		257.3746		350.0295
	0		113.2448		262.5221		350.0295
	0		128.6873		262.5221		355.177
2	0	6	138.9823	10	267.6696	14	350.0295
	0		144.1298		267.6696		350.0295
	0		149.2773		283.1121		350.0295
	0		154.4248		283.1121		350.0295
	0		164.7198		293.4071		360.3245
	0		164.7198		288.2596		360.3245
3	0	7	175.0147	11	298.5546	15	355.177
	10.29499		190.4572		298.5546		360.3245
	15.44248		195.6047		298.5546		350.0295
	20.58997		200.7522		303.7021		350.0295
	25.73746		200.7522		303.7021		355.177
	25.73746		211.0472		303.7021		355.177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 30°C (ต่อ)

Temperature 30° Celcius			Relative Humidity 40-60%		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	355.177	19	432.3894	22	490.2752
	355.177		432.3894		495.58
	355.177		432.3894		495.58
	360.3245		437.5369		502.56
	355.177		437.5369		509.54
	365.472		437.5369		502.56
17	365.472	20	442.6844	23	502.56
	370.6195		442.6844		502.56
	375.767		442.6844		502.56
	386.0619		437.5369		502.56
	396.3569		442.6844		502.56
	396.3569		437.5369		509.54
18	401.5044	21	442.6844	24	509.542
	411.7994		442.6844		
	416.9469		447.8319		
	416.9469		463.2743		
	427.2419		473.5693		
	427.2419		489.0188		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 25°C

Temperature 25° Celcius		Relative Humidity 40-60%					
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	63.5963	8	264.9846	12	279.1171
	0		81.26194		261.4514		279.1171
	0		84.79506		272.0508		279.1171
	0		98.92757		264.9846		279.1171
	0		109.527		275.584		279.1171
	0		120.1263		279.1171		282.6502
1	0	5	127.1926	9	275.584	13	282.6502
	0		144.8582		275.584		286.1833
	0		158.9907		275.584		282.6502
	0		169.5901		272.0508		282.6502
	0		183.7226		275.584		282.6502
	0		190.7889		275.584		286.1833
2	0	6	201.3883	10	279.1171	14	286.1833
	0		204.9214		275.584		286.1833
	0		208.4545		275.584		282.6502
	0		215.5208		275.584		293.2496
	0		226.1202		275.584		289.7165
	0		226.1202		272.0508		296.7827
3	0	7	233.1864	11	279.1171	15	293.2496
	7.066255		240.2527		272.0508		293.2496
	14.13251		247.3189		279.1171		293.2496
	28.26502		247.3189		275.584		293.2496
	45.93066		257.9183		275.584		296.7827
	63.5963		257.9183		275.584		300.3159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 25°C (ต่อ)

Temperature 25° Celcius			Relative Humidity 40-60%		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	300.3159	19	349.7796	22	388.644
	303.849		342.7134		392.1772
	303.849		353.3128		399.2434
	303.849		349.7796		402.7766
	307.3821		356.8459		402.8452
	310.9152		356.8459		402.8596
17	314.4484	20	363.9121	23	402.8644
	314.4484		370.9784		407.1261
	317.9815		370.9784		410.3969
	321.5146		378.0447		411.7918
	325.0477		378.0447		415.1107
	325.0477		381.5778		414.0525
18	328.5809	21	381.5778	24	415.1107
	335.6471		385.1109		
	339.1803		378.0447		
	339.1803		385.1109		
	349.7796		388.644		
	339.1803		388.644		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 20°C

Temperature 20° Celcius		Relative Humidity 40-60%					
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	12.52763	8	273.3972	12	266.7649
	0		16.21223		273.3972		266.028
	0		24.31835		274.1341		265.2911
	0		37.5829		274.1341		264.5542
	0		55.26898		274.871		263.8172
	0		75.16581		274.871		263.8172
1	0	5	100.2211	9	274.871	13	263.0803
	0		123.8025		274.871		262.3434
	0		148.1209		276.3449		261.6065
	0		169.4915		275.608		260.1326
	0		189.3884		275.608		258.6588
	0		206.3375		275.608		258.6588
2	0	6	219.6021	10	274.871	14	257.9219
	0		229.9189		274.871		257.185
	0		238.0251		274.1341		256.448
	0		245.3943		273.3972		255.7111
	0		252.0265		271.9234		254.9742
	0		257.185		271.9234		254.2373
3	0	7	261.6065	11	270.4495	15	254.2373
	8.843036		265.2911		270.4495		252.7634
	11.79071		268.2388		268.9757		252.0265
	13.26455		269.7126		267.5018		252.0265
	13.26455		271.1864		267.5018		251.2896
	14.00147		272.6603		266.7649		251.2896

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่อุณหภูมิ 20°C (ต่อ)

Temperature 20° Celcius			Relative Humidity 40-60%		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	250.5527	19	244.6573	22	249.8158
	250.5527		245.3943		249.0789
	249.0789		246.1312		249.8158
	249.0789		246.1312		249.8158
	247.605		246.1312		251.2896
	247.605		246.8681		252.0265
17	246.8681	20	246.1312	23	252.0265
	246.8681		246.1312		252.0265
	246.8681		246.8681		252.0265
	246.1312		247.605		253.5004
	245.3943		247.605		252.0265
	245.3943		246.8681		252.0265
18	245.3943	21	247.605	24	252.0265
	245.3943		247.605		
	246.1312		247.605		
	245.3943		247.605		
	245.3943		249.0789		
	245.3943		248.3419		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 0-20%

Relative Humidity 0-20%			Temperature 25° Celcius				
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	33.48247	8	395.7019	12	499.1932
	0		42.61405		407.8774		505.2809
	0		51.74564		407.8774		511.3686
	0		63.92108		420.0528		508.3248
	0		73.05266		420.0528		508.3248
	0		94.35969		435.2721		511.3686
1	0	5	118.7106	9	432.2283	13	511.3686
	0		152.193		441.3598		514.4125
	0		173.5001		444.4037		520.5002
	0		182.6317		453.5353		517.4564
	0		203.9387		456.5791		526.5879
	0		219.158		465.7107		523.5441
2	0	6	243.5089	10	462.6669	14	529.6318
	0		249.5966		471.7984		526.5879
	0		270.9036		471.7984		538.7634
	0		289.1668		483.9739		532.6757
	0		301.3422		480.93		538.7634
	0		322.6493		487.0177		538.7634
3	0	7	331.7808	11	483.9739	15	544.8511
	0.83		347.0001		490.0616		541.8072
	2.905		359.1756		490.0616		547.895
	6.087722		374.3949		499.1932		550.9388
	15.2193		380.4826		496.1493		553.9827
	24.35089		392.6581		505.2809		550.9388

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 0-20% (ต่อ)

Relative Humidity 0-20%			Temperature 25° Celcius		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	560.0704	19	611.816	22	660.5178
	557.0266		611.816		660.5178
	563.1143		614.8599		666.6055
	566.1581		620.9476		666.6055
	569.202		623.9915		669.6494
	569.202		627.0354		666.6055
17	575.2897	20	627.0354	23	675.7371
	575.2897		633.1231		678.781
	581.3774		630.0792		675.7371
	578.3336		639.2108		678.781
	581.3774		639.2108		684.8687
	581.3774		648.3424		690.9564
18	590.509	21	645.2985	24	694.0003
	593.5529		651.3862		
	596.5967		651.3862		
	596.5967		654.4301		
	602.6845		657.474		
	605.7283		654.4301		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 20-40%

Relative Humidity 20-40%			Temperature 25° Celcius				
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	56.49667	8	261.2971	12	451.9734
	0		63.55876		275.4213		451.9734
	0		63.55876		282.4834		459.0355
	0		63.55876		296.6075		459.0355
	0		70.62084		303.6696		466.0976
	0		84.74501		324.8559		466.0976
1	0	5	91.8071	9	324.8559	13	473.1596
	0		98.86918		338.98		473.1596
	0		105.9313		338.98		480.2217
	0		112.9933		353.1042		480.2217
	0		127.1175		360.1663		484.3425
	0		127.1175		367.2284		485.6217
2	0	6	141.2417	10	374.2905	14	486.8435
	0		148.3038		388.4146		487.4724
	0		155.3659		381.3525		487.6825
	0		155.3659		402.5388		487.9841
	0		176.5521		416.663		488.6463
	0		197.7384		416.663		488.8512
3	0	7	197.7384	11	416.663	15	489.4031
	15.4872		204.8004		423.7251		491.8739
	32.5201		211.8625		437.8492		492.4002
	42.37251		225.9867		437.8492		493.691
	42.37251		233.0488		437.8492		494.3274
	42.37251		254.235		444.9113		495.7746

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 20-40% (ต่อ)

Relative Humidity 20-40%			Temperature 25° Celcius		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	496.9032	19	571.1568	22	598.6733
	497.3109		578.8992		599.8314
	498.4386		579.2566		602.803
	505.9034		589.9467		603.0161
	510.2392		588.008		603.1116
	511.5684		589.232		603.2072
17	515.9847	20	591.23	23	602.23
	517.192		590.8812		601.8812
	522.1846		597.6031		608.6031
	526.6716		598.0111		609.0111
	533.5512		594.7701		605.7701
	540.1671		598.9819		609.9819
18	548.091	21	600.6751	24	611.6751
	554.3075		596.7699		
	556.4306		598.8214		
	560.6434		597.8325		
	562.5812		598.6733		
	567.1666		599.9059		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 40-60%

Relative Humidity 40-60%			Temperature 25° Celcius				
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	63.5963	8	264.9846	12	279.1171
	0		81.26194		261.4514		279.1171
	0		84.79506		272.0508		279.1171
	0		98.92757		264.9846		279.1171
	0		109.527		275.584		279.1171
	0		120.1263		279.1171		282.6502
1	0	5	127.1926	9	275.584	13	282.6502
	0		144.8582		275.584		286.1833
	0		158.9907		275.584		282.6502
	0		169.5901		272.0508		282.6502
	0		183.7226		275.584		282.6502
	0		190.7889		275.584		286.1833
2	0	6	201.3883	10	279.1171	14	286.1833
	0		204.9214		275.584		286.1833
	0		208.4545		275.584		282.6502
	0		215.5208		275.584		293.2496
	0		226.1202		275.584		289.7165
	0		226.1202		272.0508		296.7827
3	0	7	233.1864	11	279.1171	15	293.2496
	7.066255		240.2527		272.0508		293.2496
	14.13251		247.3189		279.1171		293.2496
	28.26502		247.3189		275.584		293.2496
	45.93066		257.9183		275.584		296.7827
	63.5963		257.9183		275.584		300.3159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 40-60% (ต่อ)

Relative Humidity 40-60%			Temperature 25° Celcius		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	300.3159	19	349.7796	22	388.644
	303.849		342.7134		392.1772
	303.849		353.3128		399.2434
	303.849		349.7796		402.7766
	307.3821		356.8459		402.8452
	310.9152		356.8459		402.8596
17	314.4484	20	363.9121	23	402.8644
	314.4484		370.9784		407.1261
	317.9815		370.9784		410.3969
	321.5146		378.0447		411.7918
	325.0477		378.0447		415.1107
	325.0477		381.5778		414.0525
18	328.5809	21	381.5778	24	415.1107
	335.6471		385.1109		
	339.1803		378.0447		
	339.1803		385.1109		
	349.7796		388.644		
	339.1803		388.644		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 60-80%

Relative Humidity 60-80%			Temperature 25° Celcius				
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
0	0	4	44.32952	8	82.0096	12	103.4355
	0		46.54599		83.48726		103.4355
	0		48.76247		85.70373		104.1744
	0		49.50129		85.70373		104.1744
	0		51.71777		87.18138		104.9132
	0		52.45659		87.92021		104.1744
1	0	5	53.93424	9	89.39786	13	104.9132
	0		56.15072		90.87551		105.652
	0		57.62837		93.09198		104.9132
	0		58.3672		93.09198		105.652
	0		60.58367		94.56963		105.652
	0		61.3225		95.30846		105.652
2	0	6	62.80015	10	96.78611	14	104.9132
	0		65.01662		96.78611		105.652
	0		66.49427		98.26376		104.9132
	0		68.71075		98.26376		105.652
	0		70.1884		99.00259		104.9132
	0		71.66605		100.4802		104.9132
3	0	7	72.40488	11	100.4802	15	104.9132
	16.25416		73.88253		101.2191		104.9132
	25.85888		75.36018		101.9579		104.1744
	32.50831		78.31548		101.9579		104.1744
	36.94126		79.0543		102.6967		104.1744
	40.63539		80.53195		102.6967		104.1744

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่ความชื้น 60-80% (ต่อ)

Relative Humidity 60-80%			Temperature 25° Celcius		
Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage	Time(Hr)	Shrinkage
16	103.4355	19	100.4802	22	98.26376
	103.4355		101.2191		97.52494
	103.4355		100.4802		97.52494
	101.9579		101.2191		96.04728
	102.6967		99.74141		96.04728
	101.9579		100.4802		96.04728
17	101.9579	20	100.4802	23	95.30846
	101.2191		100.4802		95.30846
	101.9579		99.74141		94.56963
	101.2191		99.74141		95.30846
	101.2191		99.74141		93.83081
	101.2191		99.74141		94.56963
18	101.2191	21	99.74141	24	95.30846
	100.4802		99.00259		
	101.9579		99.00259		
	100.4802		99.00259		
	101.2191		98.26376		
	100.4802		99.00259		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้