ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่อการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ต้าร์

ENVIRONMENTAL EFFECTS ON PLASTIC SHRINKAGE OF MORTAR

นายชัยรัตน์ เย็นอก

นายชาญชัย ฉีทะ

นายชินาธิป ศุภประภาวมิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่อการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ต้าร์

ENVIRONMENTAL EFFECTS ON PLASTIC SHRINKAGE OF MORTAR

นายชัยรัตน์ เย็นอก

นายชาญชัย สีทะ

นายชินาธิป ศุภประภาวณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENVIRONMENTAL EFFECTS ON PLASTIC SHRINKAGE OF MORTAR

MR.CHAIRAT YENOK

MR.CHANCHAI SEETA

MR.CHINATIP SUPHAPRAPAWANICH

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่อการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ต้าร์	
	ENVIRONMENTAL EFFECTS ON PLASTIC SHRINKAGE	
	OF MORTAR	
นักศึกษา	นายชัยรัตน์ เย็นอก	รหัส 53010344
	นายชาญชัย สีทะ	รหัส 53010352
	นายชินาธิป ศุภประภาวณิชย์	รหัส 53010371
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี	

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. คมสัน	มาลีสี	
ผศ. ศักดิ์ชัย	สกานุพงษ์	
อ. ศิลป์ชัย	จานสุวรรณ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 มีนาคม 2557 เวลา 09.00 – 12.00

สถานที่สอบ ณ อาคาร CV ชั้น 2 CV-202

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.สุพจน์ ศรีนิล)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ผลกระทบของสภาวะแวดล้อมต่อการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ต้าร์		
นักศึกษา	นายชัยรัตน์	เย็นอก	รหัส 53010344
	นายชาญชัย	สีทะ	รหัส 53010352
	นายชินาธิป	ศุภประภาวณิชย์	รหัส 53010371
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี		
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและพื้นที่รอยแตกร้าวของมอร์ตาร์ในช่วงอายุเริ่มต้นรวมทั้งคุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการไหล , กำลังรับแรงอัด, ระยะเวลาการก่อตัว และ อัตราการเยิ้มน้ำ โดยเน้นในเรื่องของการหดตัวรวม (Early age Total Shrinkage) และพื้นที่รวมของการแตกร้าว (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น โดยจำลองสภาพแวดล้อมขึ้นจากลักษณะที่ใกล้เคียงกับลักษณะสภาพแวดล้อมในประเทศ รวมถึงสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงในภูมิภาคอื่นๆ ของโลกในหลายๆกรณี ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการหดตัวรวมที่สำคัญอยู่ในช่วงอายุเริ่มต้น โดยมอร์ต้าร์ที่อยู่ในอุณหภูมิสูง อัตราการหดตัวก็จะมาก และจะทำให้เกิดการแตกร้าวมากให้ลำดับต่อมา , ในกรณีที่ในพื้นที่มีความเร็วลมสูง มอร์ต้าร์ก็จะเกิดการหดตัวสูงและทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้ามาก ในทางกลับกันหากความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ก็จะหดตัวมากขึ้น ในทั้ง 3 ปัจจัยนี้ ลมจะส่งผลต่อการหดตัวรวมและการแตกร้าวในมอร์ต้าร์มากที่สุด งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ที่ส่งผลต่อการหดตัวและการแตกร้าวของมอร์ต้าร์ เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการวัดการหดตัวรวมถึงการวัดพื้นที่รอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น รวมทั้งทำให้ทราบถึงสภาพแวดล้อมที่ควรหลีกเลี่ยงในการก่อสร้างและหาวิธีป้องกันได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	ENVIRONMENTAL EFFECTS ON PLASTIC SHRINKAGE OF MORTAR		
Student	MR. CHAIRAT	YENOK	Student ID. 53010344
	MR.CHANCHAI	SEETA	Student ID. 53010352
	MR.CHINATIP	SUPHAPRAPAWANICH	Student ID. 53010371
Degree	BACHELOR OF ENGINEERING		
Program	CIVIL ENGINEERING		
Year	2013		
Advisor	ASST.DR. KOMSAN	MALEESEE	

ABSTRACT

This special project studies to find the relation between the total Shrinkage and the total area cracking including the relative properties of concrete such as flow table , compressive strength , setting time, and bleeding . This study focuses on the total shrinkage and the total area cracking at the early age. In this case, the environment which is similar to the real situations in the country has been set. Results have shown that total shrinkage can be significant in certain early age scenarios. If the mortar is in high temperature, the rate of shrinkage will be high and result in cracking later. In case of the area which has high wind velocity, the rate of shrinkage and the area of cracking will highly grow. On the other hand, if the humidity is low, rate of shrinkage will increase. In these three factors, wind is the most important factor that effect to total shrinkage and the total area cracking. This special project shows the important factors which effects to the total shrinkage and the total area cracking , to be applied to prevent construction work from these environment conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.คมสัน มาลีสี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทายานิพนธ์ ที่ท่านได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและให้แนวทางในการแก้ปัญหา ซึ่งถือได้ว่าเป็นสิ่งที่มีคุณค่าที่ผู้วิจัยได้รับมาตลอดการทำวิจัยนี้ ผู้วิจัยรู้สึกได้ถึงจิตวิญญาณความเป็นครูอาจารย์ที่ท่านมีให้กับศิษย์ โดยไม่หวังผลตอบแทนใดๆ นอกจากความรู้ทางวิชาการแล้วท่านยังให้ข้อแนะนำที่ดีในการทำงาน การใช้ชีวิตอีกด้วย

ขอขอบพระคุณเหล่าคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณสารพล ตรีสุวรรณ ในการช่วยเหลือชี้แนะแนวทางและตอบข้อสงสัยของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งเอื้อเฟื้อชุดอุปกรณ์, ค่าใช้จ่ายต่างๆ ในงานวิจัย และสละเวลามาช่วยดูแลโครงงานพิเศษเรื่องนี้จนจบโครงงาน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของผู้วิจัย ซึ่งช่วยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและให้การสนับสนุนด้านการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง

นายชัยรัตน์ เย็นอก
นายชาญชัย สีทะ
นายชินาธิป ศุภประภาวณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 ระยะของการหดตัว	4
2.1.1 ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early Age Stage)	4
2.1.2 ระยะการหดตัวสภาวะยาวนาน (Long Term Shrinkage)	6
2.2 ประเภทของการหดตัว	8
2.2.1 การการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal dilation)	8
2.2.2 คาร์บอเนชัน (Carbonation)	8
2.2.3 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous shrinkage)	9
2.2.4 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)	10
2.2.5 การหดรวม (Total Shrinkage)	13
2.2.6 การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานขั้นต้น	16
3.1.1 กำหนดค่าตัวแปรที่จะทำการศึกษา	16
3.1.2 เตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบ	17
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	18
3.2.1 ซีเมนต์	18
3.2.2 ทราย	19
3.3 วิธีการทดสอบและวิจัย	21
3.3.1 อัตราการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230	21
3.3.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ASTM C109	22
3.3.3 อัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding) JCI by Prof. Ei-ichi TAZAWA	23
3.3.4 ระยะเวลาในการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807	23
3.3.5 อัตราการหดตัว (Total Shrinkage) "Test method for linear measurement of Early Age shrinkage" (Norwegian method)	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 อัตราการไหล (Flow table) ASTM C230	27
4.2 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807	27
4.3 อัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding)	28
4.4 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)	28
4.5 อัตราการหดตัว (Total Shrinkage) "Test method for linear measurement of Early Age Shrinkage" (Norwegian method)	29
4.5.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิ (Temperature) ที่ส่งผลต่ออัตราการ หดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)	
4.5.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ (Huminity) ที่ส่งผลต่ออัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)	
4.5.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของความเร็วลม (Wind) ที่ส่งผลต่ออัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.6 สร้างกราฟการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นด้วยโปรแกรม Statistica 10	35
4.6.1 ผลการทดลองอัตราการหดตัวที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที	35
4.6.2 ผลการทดลองอัตราการหดตัวที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที	36
4.6.3 ผลการทดลองอัตราการหดตัวที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที	37
4.7 อัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้า	38
4.7.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิ (Temperature) ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)	38
4.7.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ (Huminity) ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)	40
4.7.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของความเร็วลม (Wind velocity) ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)	42
4.8 สร้างกราฟการแตกร้าวที่ผิวหน้าในช่วงอายุเริ่มต้นด้วยโปรแกรม Statistica 10	46
4.8.1 ผลการทดลองอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ระยะเวลา early age time ซึ่งเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที	46
4.8.2 ผลการทดลองอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ระยะเวลา early age time ซึ่งเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที	48
4.8.3 ผลการทดลองอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ระยะเวลา early age time ซึ่งเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที	49
4.9 เปรียบเทียบการแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น โดยใช้แบบทดสอบ ASTM C1579-06 และแบบทดลอง Modify ASTM C1579-06	50
4.10 เปรียบเทียบการแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้นและการหดตัว	51
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหดตัวและการแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการของเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวรวมโดยมีอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม	
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบการหดตัวโดยมีอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม	
ภาคผนวก ค. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างการหดตัวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม	
ภาคผนวก ง. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างของรอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆ กับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของทราย 19

3.2 มาตรฐาน ASTM C 778 graded sand 19

4.1 ผลการทดสอบอัตราการไหล 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพแสดงระยะและประเภทของการหดตัว	4
2.2	ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น : สภาวะของเหลว, สภาวะกึ่งของแข็ง และสภาวะของแข็ง	5
2.3	จุดสิ้นสุดของการหดตัวที่ระยะเริ่มต้นเนื่องจากการแข็งตัวของคอนกรีต ภายหลังการก่อตัวระยะเริ่มต้น	6
2.4	การเพิ่มขึ้นของการหดตัวในช่วง อายุเริ่มต้นและสภาวะยาวนานในสภาพแวดล้อม ที่แตกต่างของการบ่ม , wind = 2 m/s ,dry = 40% RH , wet = 100% RH	7
2.5	การเปลี่ยนแปลงของการหดตัวในช่วงสภาวะยาวนานซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม การบ่มในวันแรก ,dry = 40% RH , wet = 100% RH	7
2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง autogenous shrinkage กับ chemical shrinkage C=unhydrated cement , W=unhydrated water, Hy=hydration products and V=voids generated by hydration	9
2.7	ส่วนประกอบของของแข็งและช่องว่างในซีเมนต์เพส	11
2.8	ตัวอย่างขนาดช่องว่างในซีเมนต์เพสและขนาดปริมาตรของน้ำภายในช่องว่าง	11
2.9	แรงเค้นที่ดึงส่วนนูนของน้ำระหว่างช่องว่างของอนุภาคซีเมนต์เนื่องจากการ เปลี่ยนแปลงความชื้น และการพัฒนา capillary pressure	12
2.10	อัตราส่วนของ drying shrinkage – autogenous shrinkage ที่ low w/c	13
2.11	Monograph ประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำจากผิวหน้าของคอนกรีต	14
3.1	ตู้ควบคุมอุณหภูมิ,ความชื้นสัมพันธ์ และความเร็วลม	17
3.2	แสดงการติดตั้งกล้องพร้อมขาตั้ง, การเก็บข้อมูลภาพ และการคำนวณหาพื้นที่ การแตกร้าวที่ผิวหน้าในโปรแกรม AutoCAD	18
3.3	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	18
3.4	Gradation Curve ของทรายกับ ASTM C 778 graded sand	20
3.5	เครื่องเขย่าตะแกรง	20
3.6	ทดสอบอัตราการไหล (Flow Table)	21
3.7	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.8 แสดงการทดลองหาอัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding) 23

3.9 แสดงการทดลองหาระยะเวลาในการก่อตัว 24

3.10 แสดงการทดลองหาอัตราการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age Total Shrinkage) 26

3.11 เครื่องมือวัด Early age Shrinkage 26

4.2.1 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของมอร์ต้าร์ 27

4.3.1 แสดงผลการทดสอบอัตราการเยิ้มน้ำ 28

4.4.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในช่วงเวลา 28 วัน 28

4.5.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 25,40,55 องศาเซลเซียส 29

4.5.1.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการหดตัวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการหดตัวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours 30

4.5.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เป็น 20,40,60 เปอร์เซ็นต์ 31

4.5.2.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการหดตัวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการหดตัวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours 31

4.5.3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเป็น 0,2,4 เมตร/วินาที 32

4.5.3.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการหดตัวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการหดตัวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.5-ก กราฟแสดงการหดตัวรวม (Total Shrinkage) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ที่ความเร็วลม 4 m/s อุณหภูมิ 25,40,55°C และความชื้นสัมพัทธ์ 20,40,60 % 33

4.5–ข กราฟแสดงการหดตัวรวม (Total Shrinkage) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ที่ความเร็วลม 2 m/s อุณหภูมิ 25,40,55°C และความชื้นสัมพัทธ์ 20,40,60 % 34

4.5–ค กราฟแสดงการหดตัวรวม (Total Shrinkage) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ที่ความเร็วลม 0 m/s อุณหภูมิ 25,40,55°C และความชื้นสัมพัทธ์ 20,40,60 % 34

4.6.1.1 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.1) 35

4.6.1.2 ผลการคำนวณการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.1) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ 35

4.6.2.1 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ (4.2) 36

4.6.2.2 ผลการคำนวณการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ(4.2) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ 36

4.6.3.1 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที จากสมการ (4.3) 37

4.6.3.2 ผลการคำนวณการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที จากสมการ (4.3) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ 37

4.7.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 25,40,55 องศาเซลเซียส 38

4.7.1.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการแตกร้าวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกร้าวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เป็น 20,40,60 เปอร์เซ็นต์ 40

4.7.2.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการแตกร้าวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกร้าวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours 41

4.7.3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเป็น 0,2,4 เมตร/วินาที 42

4.7.3.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการแตกร้าวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกร้าวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours 43

4.7-ก แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 43

4.7-ข แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที 44

4.7-ค แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที 44

4.7-ง แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7-จ แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที 45

4.7-ฉ แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที 46

4.8.1.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 47

4.8.1.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.4) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ 47

4.8.2.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ (4.5) 48

4.8.2.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ (4.5) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ 48

4.8.3.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที จากสมการ (4.6) 49

4.8.3.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.5) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ 49

4.9.1 แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 50

4.9.2 แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 50

4.10.1 กราฟแสดงพื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้น ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.10.2 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที 51

4.11.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระว่างการหดตัวรวม (Total Shrinkage) และ พื้นที่ แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 52

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันงานก่อสร้างโดยทั่วไปในประเทศไทยได้ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่สำคัญสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างต่างๆ โดยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตนั้นมีข้อเสียคือการแตกร้าวง่ายโดยมีสาเหตุเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม อาทิเช่น ภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ลม และรวมไปถึงอัตราส่วนปริมาณส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยการก่อสร้างบางครั้งก็อาจมีความจำเป็นที่จะต้องก่อสร้างในบริเวณที่มีอากาศร้อนจัด ซึ่งอาจจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วอันเป็นผลให้เกิดการแตกร้าวที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต โดยการศึกษาวิจัยในครั้งนี้นักศึกษาได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการแตกร้าวของคอนกรีตในซีเมนต์มอร์ต้าร์ ซึ่งมอร์ต้าร์จะเป็นวัสดุที่ใช้ในการฉาบผนังก่อหรือฉาบตกแต่งเสาที่ถอดจากแบบหล่อ โดยสาเหตุของการหดตัวในซีเมนต์มอร์ต้าร์นั้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวอย่างมากในบริเวณผนังซีเมนต์มอร์ต้าร์ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาในการตกแต่งผิว อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อผู้อยู่อาศัย ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่มั่นใจในความแข็งแรงของอาคารที่ตนเองอาศัยอยู่ ซึ่งแท้ที่จริงแล้วการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ต้าร์นั้นไม่ได้มีผลต่อการรับแรงของโครงสร้างเลย อีกทั้งผนังซีเมนต์มอร์ต้าร์ภายนอกอาคารนั้นต้องเจอสภาพภูมิอากาศที่หลากหลายมีการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอยู่ตลอดเวลา อย่างเช่นในช่วงฤดูฝนนั้นผนังซีเมนต์มอร์ต้าร์ภายนอกจะได้รับความชื้นมาก เนื่องจากการโดนฝนซึ่งก็อาจทำให้น้ำจากภายนอกซึมเข้าไปสู่ภายในได้

ทั้งนี้นักศึกษาได้เล็งเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ประกอบกับมีการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้มีน้อยมาก จึงได้ทำการวิจัยการทดลองนี้ เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ในสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ได้จำลองขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 “Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete” แล้วถ่ายรูปการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์และนำเข้าโปรแกรม เพื่อที่จะหาปริมาณความแตกร้าวที่ผิวหน้า และนำข้อมูลที่ได้มาใช้วิเคราะห์หาผลการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์จากสภาวะแวดล้อมต่างๆ ในประเทศไทย โดยเฉพาะส่วนที่เกิดการแตกร้าวที่ทำให้ต้องซ่อมแซมแก้ไขส่งผลทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาโดยไม่จำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และแรงลม

2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาปริมาณการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีผลมาจากสภาวะ แวดล้อมต่างๆ

3. เพื่อศึกษาให้ทราบถึงผลกระทบการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์เนื่องจากสภาวะแวดล้อม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

คุณสมบัติที่ทำการศึกษา

- อัตราการไหล (Flow table)
- กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)
- อัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding)
- ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time)
- การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) ASTM C1579-06 " Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete "

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง

3. ทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลจากห้องทดลอง

4. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงสาเหตุและพฤติกรรมการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

2. ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์กับพฤติกรรมการหดตัวของซีเมนต์มอร์ต้าร์

3. ได้ข้อมูลจากการวิจัยไปวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์

4. สามารถนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างในเขตที่มีสภาพภูมิอากาศต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันการแตกร้าวที่ผิวหน้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

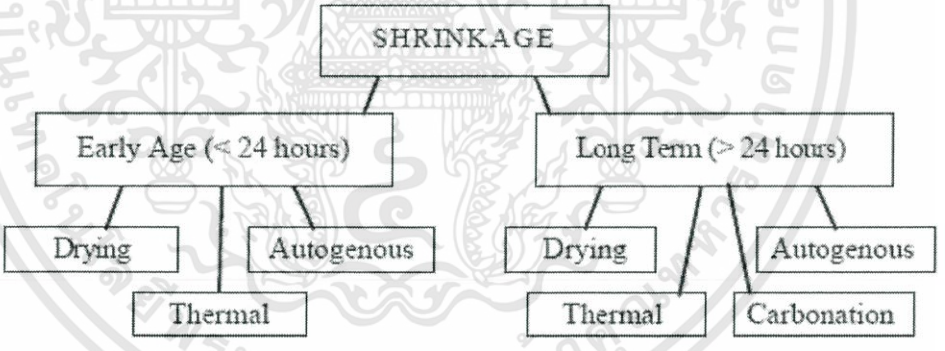
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

บทนี้จะกล่าวสรุปถึงการทบทวนวรรณกรรม, ตำรา, เอกสาร, วารสาร และงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

2.1 ระยะของการหดตัว

การหดตัวของมอร์ต้าร์จะมีความสำคัญเมื่อเราให้ความสำคัญกับความคงทน,ความสวยงาม โดยที่ผ่านมามักจะวัดค่าการหดตัวเมื่อตัวอย่างแข็งตัวในช่วงสภาวะยาวนาน (Long term) แม้ว่าจะมีการค้นพบการหดตัวในช่วงสภาวะเริ่มต้น (Early age) แต่เป็นการยากที่จะทำการวัดในสภาวะที่เป็นของเหลว ความยากในการทดลองทำให้ไม่สามารถเข้าใจต่อปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวในช่วงระยะเริ่มต้นได้หมด



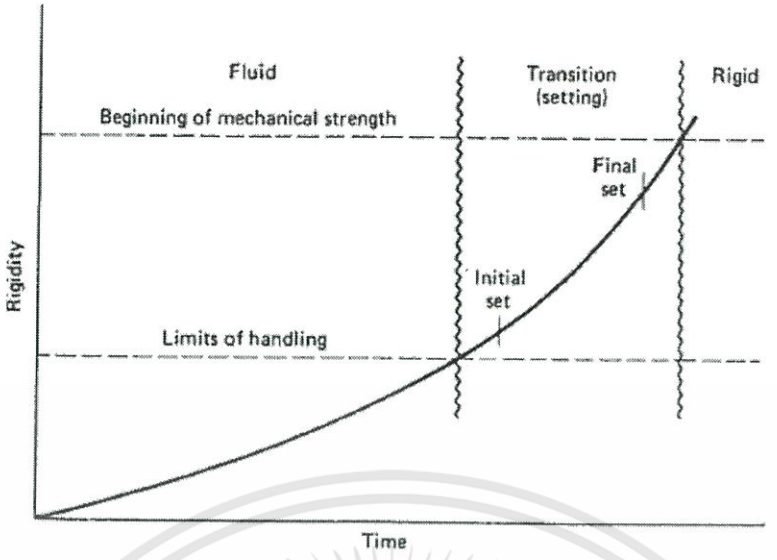
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระยะและประเภทของการหดตัว [Holt 2001]

การหดตัวสามารถแบ่งเป็นระยะใหญ่ๆได้ 2 แบบ คือ

2.1.1 ระยะการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early Age Stage)

นิยามของคำว่า “Early Age” คือ การหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นตั้งแต่การเทลงแบบเสร็จจนกระทั่งครบ 24 ชั่วโมง แบ่งได้เป็น 3 สภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

1. สภาวะของเหลว (Liquid Phase)

เมื่อทำการผสมมอร์ต้าร์จะอยู่ในสภาวะของเหลว สภาวะนี้มอร์ต้าร์จะไม่มีโครงสร้างที่หนาแน่นพอที่จะคงรูปในแบบหล่อ การเคลื่อนที่จากความเค้นจะเกิดขึ้นโดยทันทีตัวอย่างคือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะจมลง และน้ำที่มากเกินจะเยิ้มขึ้นที่ผิวหน้า

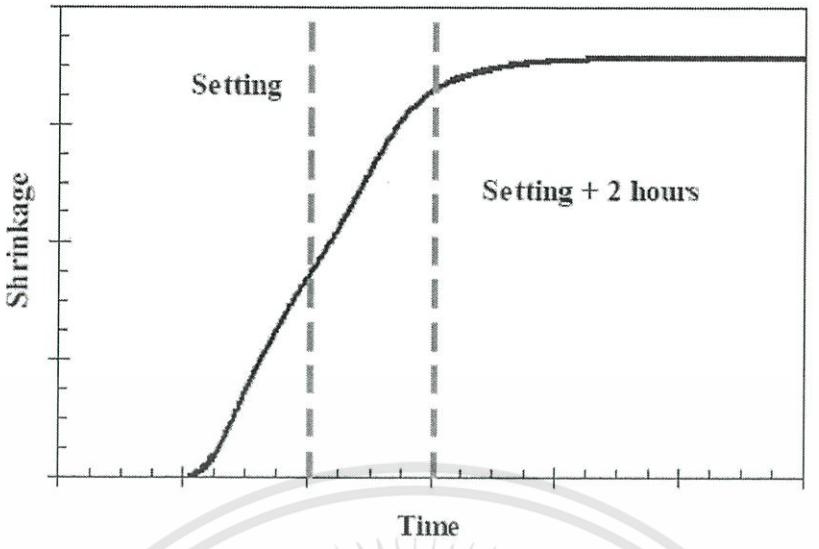
2. สภาวะพัฒนาโครงสร้าง (Skeleton Formation Phase)

หลังจากที่ซีเมนต์และน้ำทำปฏิกิริยา โครงสร้างจะขึ้นเป็นรูปจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหลังจากที่ผสม จากจุดนี้เราสามารถที่จะวัดการหดตัวของตัวอย่างได้

3. สภาวะของแข็ง (Hardening Phase)

สภาวะนี้โครงสร้างของมอร์ต้าร์สามารถต้านแรงเค้นที่เกิดขึ้น อัตราการสูญเสียน้ำ และอัตราการหดตัวแบบออโตจีเนียสจะลดลง โดยทั่วไปจากจุดนี้จะอยู่ที่ประมาณ 2 ชั่วโมงหลังจากระยะการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ในบางกรณีถ้าไม่มีกำลังพอที่จะรับแรงจะเกิดรอยแตกร้าวขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

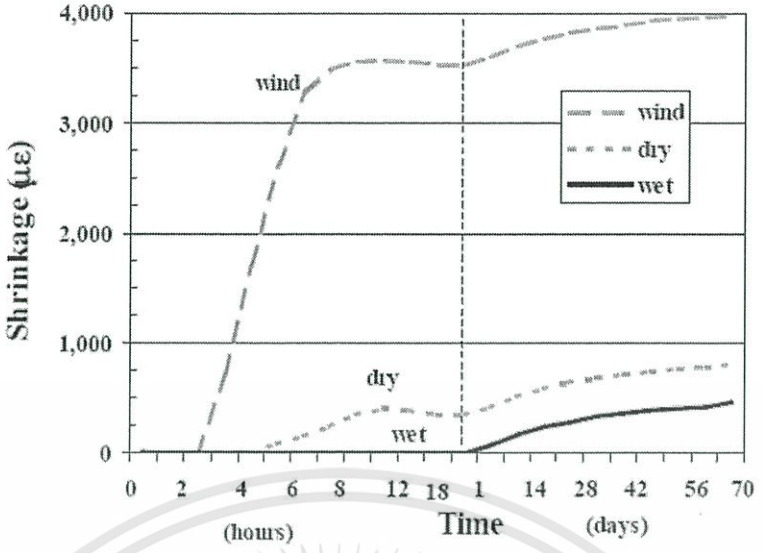


รูปที่ 2.3 จุดสิ้นสุดของการหดตัวที่ระยะเริ่มต้นเนื่องจากการแข็งตัวของคอนกรีตภายหลังการก่อตัวระยะเริ่มต้น [Holt 2001]

2.1.2 ระยะการหดตัวสภาวะยาวนาน (Long Term Shrinkage)

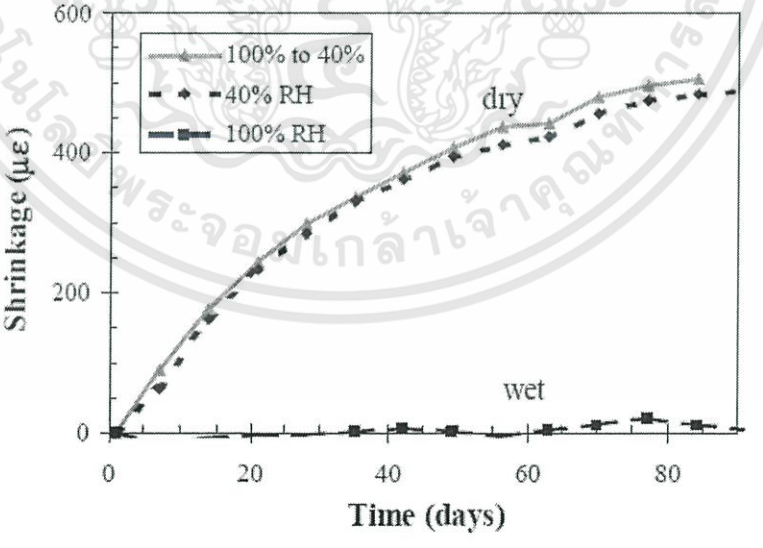
โดยทั่วไปการหดตัวในสภาวะยาวนานจะเริ่มวัดค่าที่ 24 ชั่วโมงหลังจากผสมหรือเทลงแบบ การหดตัวที่เกิดขึ้นในระหว่าง 2 ระยะนี้ (การหดตัวแบบ early age และ long term) ควรจะเรียกร่วมกันว่า " Total shrinkage" ในบางกรณีของคอนกรีตที่มีการบ่มที่ไม่ดีจะเกิดการแห้งอย่างรวดเร็วการหดตัวในวันแรกอาจมากกว่าการวัดในระยะยาวนาน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 สำหรับสภาวะสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในระหว่างวันแรกของอายุ การหดตัวในระยะยาวที่เกิดจากการแห้งจะเท่ากันในทุกกรณี ดังนั้นในวันแรกจะมีความสำคัญซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเพิ่มขึ้นของการหดตัวในช่วง อายุเริ่มต้นและสภาวะยาวนานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างของการบ่ม , wind = 2 m/s ,dry = 40% RH , wet = 100% RH

สภาวะของการบ่มในวันแรกที่ไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวในระยะยาวนานดังรูปที่ 2.5 เมื่อวันแรกทั้งการบ่มชื้นและแห้ง (การหดตัวแบบออโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้ง) หลังจากครบ 1 วันแล้วเปลี่ยนจากการบ่มชื้นเป็นการบ่มแห้ง แท่งตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนสภาวะยังคงมีการหดตัวเทียบเท่ากับการบ่มแบบแห้ง



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของการหดตัวในช่วงสภาวะยาวนานซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม การบ่มในวันแรก ,dry = 40% RH , wet = 100% RH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ประเภทของการหดตัว

2.2.1 การการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal dilation)

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิผันผวน มักจะอ้างอิงถึงการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion) จากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นหรือเย็นลงทั้งในระยะของ Early age และ long term เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นคอนกรีตจะขยายตัว ตามด้วยการหดตัวจากการเย็นตัวลง

Thermal Expansion จะเกิดปัญหาเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รุนแรงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยทั่วไปปฏิกิริยา ไฮเดรชันจะเกิดความร้อนที่ประมาณ 5-8 °C จากซีเมนต์ 45 kg. เมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อน [Kosmatka & Panarese 1988]

ในมอร์ต้าร์จะเกิดความร้อนที่มากกว่าเนื่องจากมีส่วนผสมของซีเมนต์มากกว่าคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมักจะเกิดในช่วง 12 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเมื่อเย็นตัวลงจะแสดงผลในรูปแบบของการหดตัว ในช่วงอายุเริ่มต้นอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอจะเกิด thermal strain ขึ้นในคอนกรีตเช่นเดียวกับที่ผิวหน้าที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม) กับภายใน สิ่งนี้จะทำให้เกิดความเค้นขึ้นและมีความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวโดยเฉพาะคอนกรีตที่มีความหนามากกว่า 1 เมตร คอนกรีตจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว “thermal dilation coefficient” ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ (เช่น มวลรวม และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์) ในระยะ Early age ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาวะที่คอนกรีตสามารถรับกำลังได้ [Hedlund 1996]

2.2.2 คาร์บอเนชัน (Carbonation)

คาร์บอเนชัน จะเกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวทำปฏิกิริยากับความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ดังสมการ

$$H_2CO_2 + Ca(OH)_s \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \qquad (2.1)$$

สมการนี้ยังไม่รวมผลของการหดตัวและค่า pH ที่ลดลงเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กในโครงสร้างซึ่งจะขยายตัวและทำให้คอนกรีตแตกร้าว [Kosmatka & Panarese 1988]

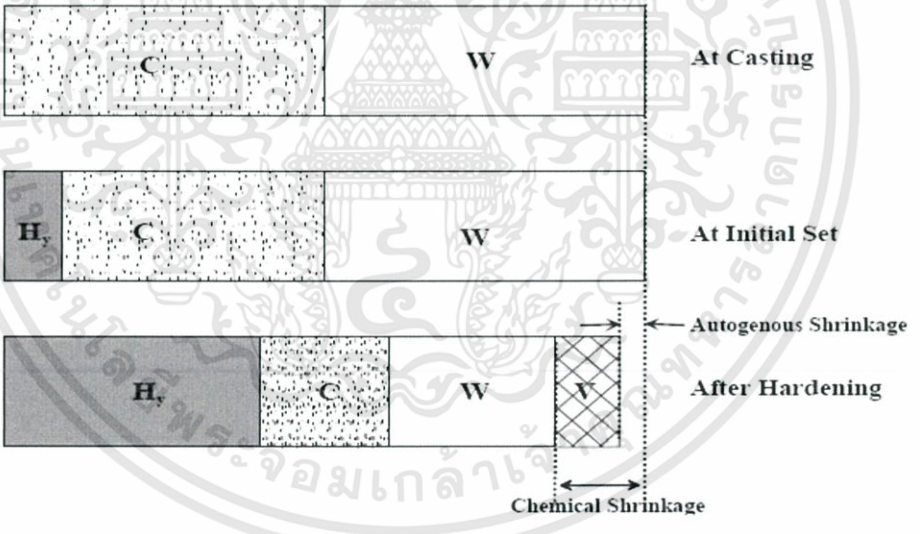
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอเนชันจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและคุณภาพของคอนกรีตรวมถึงสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปจะมีผลที่ระยะประมาณ 2 cm. จากความลึกที่ผิวหน้า จะมีผลกับความคงทนของคอนกรีต แต่ใช้ระยะเวลานานหลายปีที่จะมีผลต่อโครงสร้างของคอนกรีต จึงจะไม่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้

2.2.3 การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous shrinkage)

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีตคือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ไม่มีการถ่ายโอนความชื้นกับสภาพแวดล้อม

รูปด้านล่างแสดงคอนกรีตที่บ่มและเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แผนภูมิแท่งนี้แสดงว่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสเป็นส่วนหนึ่งของการหดตัวแบบ chemical shrinkage



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง autogenous shrinkage กับ chemical shrinkage [E.tazawa 1999] C=unhydrated cement , W=unhydrated water, Hy=hydration products and V=voids generated by hydration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The draft European Standard prEN 1992-1 [Eurocode 2001] ได้เสนอสูตรในการทำนายการหดตัวแบบออโตจีเนียส ในสภาวะยาวนาน (Long term Autogenous shrinkage) โดยมีพื้นฐานจากประเภทของซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตดังสมการ 2.2 และ 2.3

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

เมื่อ ε_{cs} = autogenous shrinkage strain

$\varepsilon_{CS,\infty}$ = $2.5(fc'-10)*10^{-3}$

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

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s\left[1-\left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{1/2}\right]\right\} \tag{2.3}$$

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)

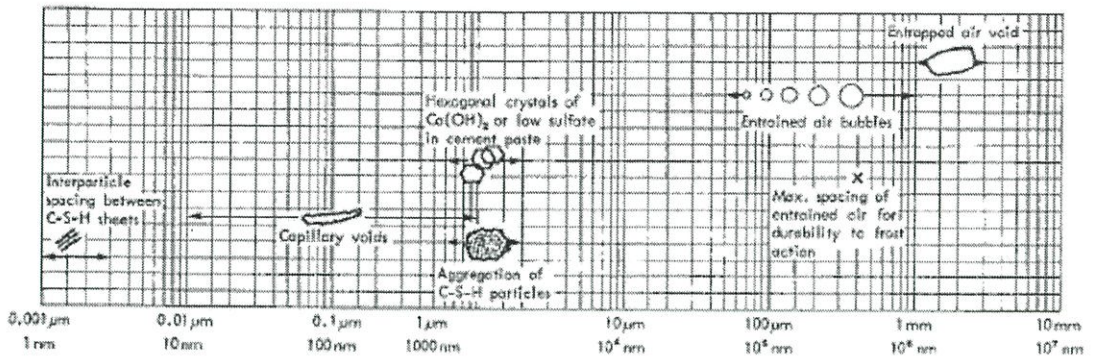
t = age of concrete (days)

t_1 = 1 day

2.2.4 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

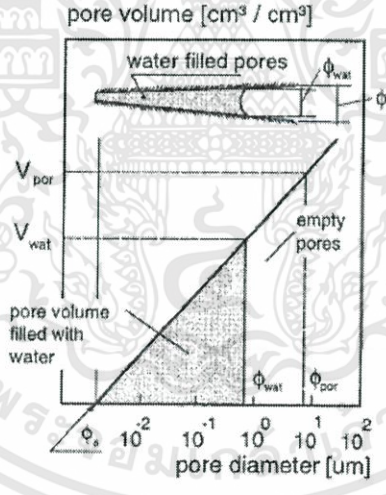
การหดตัวแบบแห้งจะเกี่ยวกับการลดลงของปริมาตรของคอนกรีตเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำ เมื่อสูญเสียน้ำคอนกรีตจะหดตัว เช่น จากการเยิ้มน้ำที่ผิวหน้า , การจมลงของมวลรวม การเยิ้มน้ำจะทำให้น้ำระเหย น้ำส่วนเกินจะถูกดึงออกมาจากภายในของก้อนคอนกรีต ผลของการที่เกิดการหดตัวแบบแห้งจะเกิดในรูปของการแตกร้าวที่ผิวหน้า กลไกของการหดตัวแบบแห้งจะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในของซีเมนต์เพสแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งส่วนใหญ่ของ Capillary voids จะอยู่ในช่วง 0.01 μm. - 1 μm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของของแข็งและช่องว่างในซีเมนต์เพส [Mehta& Monteiro 1993]

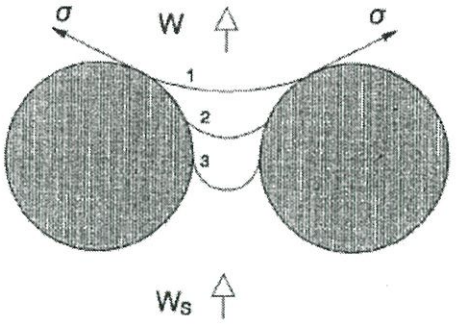
เมื่อคำนึงถึงการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตช่องว่างที่มีขนาดใหญ่จะสูญเสียน้ำภายในสัดส่วนของช่องว่างและปริมาตรของน้ำภายในแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างขนาดช่องว่างในซีเมนต์เพสและขนาดปริมาตรของน้ำภายในช่องว่าง [Koenders1997]

กลไกความสัมพันธ์ของน้ำที่ผิวหน้าและอนุภาคของซีเมนต์ที่ผิวหน้าที่ขึ้นกับการแห้ง [Radocea 1992] ในกรณีนี้น้ำเกิดการระเหยมากกว่าน้ำที่เยิ้มมาจากภายในของคอนกรีต ทำให้เกิดความเค้นและส่วนนูนจมลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ capillary pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แรงเค้นที่ดึงส่วนนูนของน้ำระหว่างช่องว่างของอนุภาคซีเมนต์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น และการพัฒนา capillary pressure [Radocea1992]

ผลรวมของ pore water pressure หรือ แรงดูดเกิดขึ้นมาเนื่องจาก capillary foces โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีความโค้งส่วนนูนระหว่างน้ำและอากาศ แรงดูดนี้แสดงโดยสมการลาปลาซ [Janz 2000]

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

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 -1mm/m) แต่สามารถเกินกว่า 5000 $\mu\epsilon$ (5mm/m) ในบางกรณีที่แห้งอย่างรวดเร็วในช่วงอายุเริ่มต้น

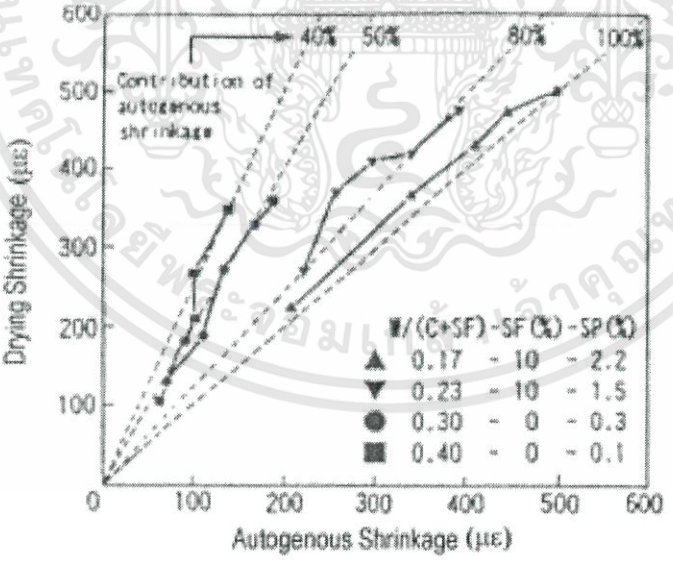
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การหดรวม (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 จะแสดงการหดตัวแบบออโตจีเนียสเสมือนการหดตัวสูงสุด

ในคอนกรีตทั่วไปที่ w/c สูงกว่า 0.42 การหดตัวแบบออโตจีเนียสไม่ต้องทำการตรวจสอบ เนื่องจากคอนกรีตมีน้ำมากพอในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในบางกรณีการหดตัวแบบออโตจีเนียสไม่มีผลต่อการหดตัว [Radocea 1992]

การหดตัวทั้งหมด (Total shrinkage) จะมีเกิดจากการหดตัวแบบออโตจีเนียสมากกว่าการหดตัวแบบแห้งในกรณีที่ w/c ต่ำกว่า 0.42 ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 อัตราส่วนของ drying shrinkage – autogenous shrinkage ที่ low w/c [Tazawa & Miyazawa 1995]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

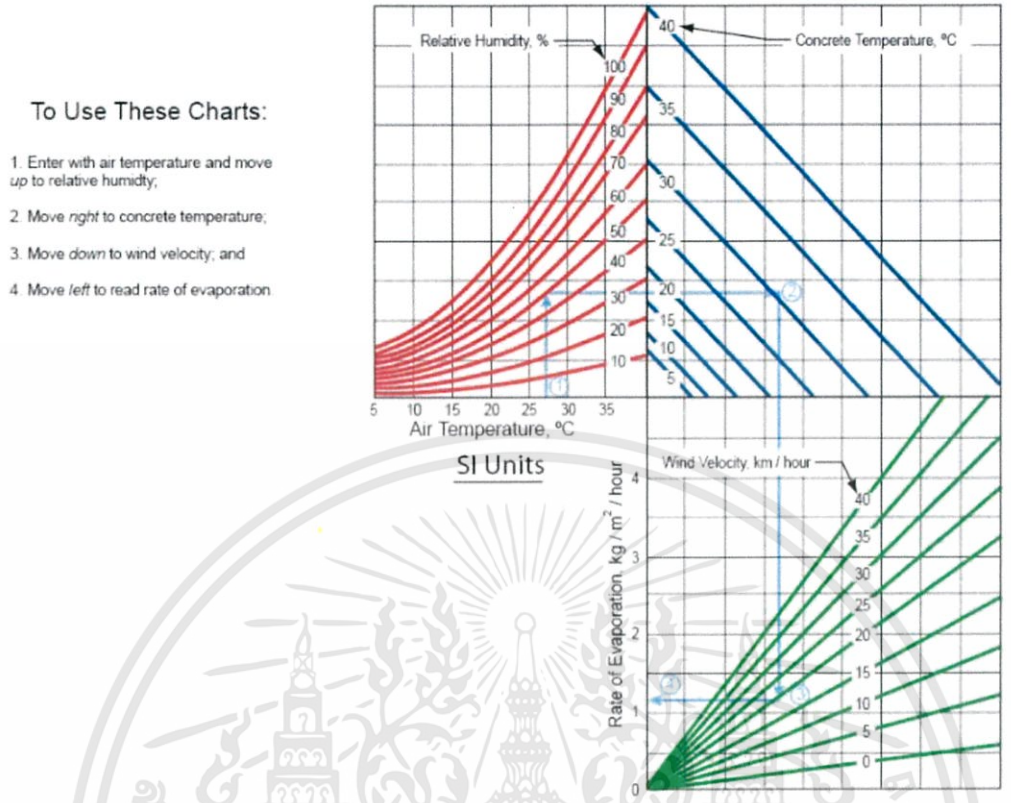
การหดตัวในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นเป็นสิ่งซึ่งไม่ได้ถูกให้ความสำคัญทั้งที่ในความเป็นจริงแล้ว การหดตัวทั้ง 2 ประเภทคือการหดตัวแบบออโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้งในช่วงระยะเริ่มต้นมีสัดส่วนอย่างมากกับการหดตัวทั้งหมด

2.2.6 การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage)

โดยทั่วไปการหดตัวแบบพลาสติกจะเกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของคอนกรีตสดในช่วงเวลาก่อนและระหว่างการก่อตัว ในงานสนามจะพบการแตกร้าวในช่วง 2 สภาวะของช่วงอายุ คือ:หลังจากเสร็จงานเทหรือหล่อแล้วเรียกว่า “สภาวะพลาสติก (Plastic phase)” และหลังจากหล่อแล้วเป็นชั่วโมงผ่านไป เรียกว่า “สภาวะแข็งตัวเริ่มต้น(early age hardening phase)” โดยที่สภาวะพลาสติก คือ ผลรวมของช่วง สภาวะของเหลว (liquid phase) กับสภาวะพัฒนาโครงสร้าง (semi-liquid phase ,Skeleton Formation Phase)[1]

อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าซึ่งแสดงผลการหดตัวแบบพลาสติกเกี่ยวข้องกับอัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding) กำหนดโดย ACI committee 305R [2] การหดตัวแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการระเหยมากกว่าอัตราการเยิ้มน้ำ โดยจะเกิดการหดตัวแบบพลาสติกแตกร้าวที่ผิวหน้าเมื่ออัตราการระเหยมากกว่า 0.2 $lb/ft^2/h$ (1 $kg./m^2/h$) สามารถประมาณค่าอัตราการระเหยโดยใช้กราฟดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 Monograph ประมาณค่าอัตราการระเหยของน้ำจากผิวหน้าของคอนกรีต [Courtesy of Portland Cement Association]

อัตราการระเหยเป็นส่วนสำคัญเกิดระบบส่วนนูน (Maniscus) จมลงที่ผิวหน้าเมื่ออัตราการระเหยมากกว่าอัตราการเยิ้มน้ำ แสดงผลในรูปของแรงดึงของโพรงคาพิลารี (Capillary Tension) ในช่องว่าง (Pore water) ดังที่กล่าวมาแล้ว

มีการวิจัยที่เสนอถึงปัจจัยอื่นๆที่มีผลกระทบต่อการเกิดหารหดตัวแบบพลาสติก เช่น ปริมาณของซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต,การฉาบ Settlement จากเหล็กเสริมหรือมวลรวมหยาบ [3], [4]

ในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง Microscopre กำลังขยาย 200-400 เท่า ถ่ายรูปของซีเมนต์มอร์ต้าร์เพื่อวัดหาปริมาณรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าเนื่องในสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ได้จำลองขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 “Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete และวิเคราะห์ภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการและขั้นตอนต่างๆ รวมถึงการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ในโครงงานพิเศษเรื่องนี้

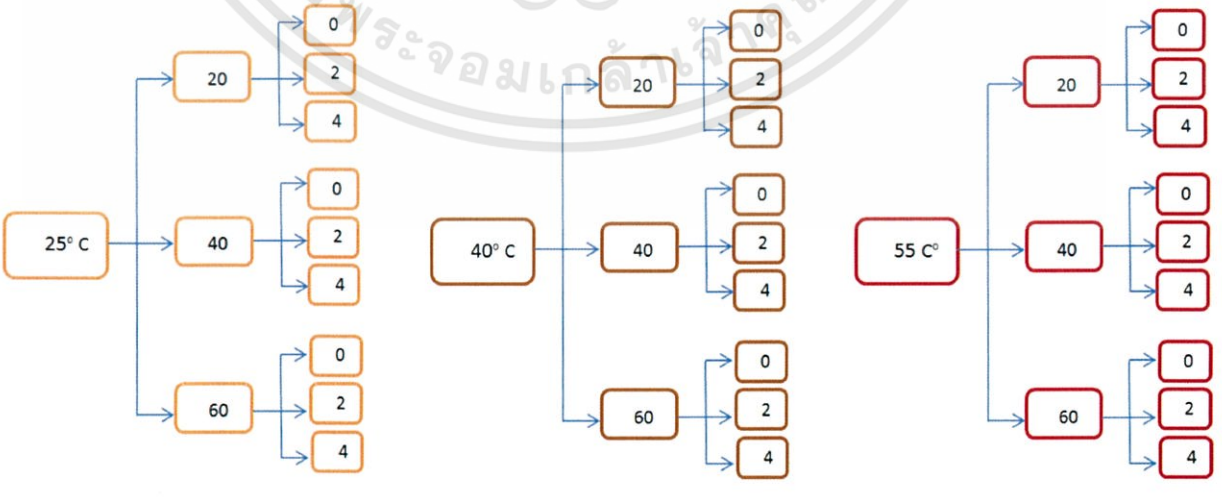
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานขั้นต้น

3.1.1 กำหนดค่าตัวแปรที่จะทำการศึกษา

3.1.1.1 กำหนดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ที่จะเริ่มหยุดและทำการทดสอบโดยใช้อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ตามสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ซึ่งมีค่าดังนี้

อุณหภูมิที่จะทำการทดสอบ : 25, 40 และ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเริ่มทำการทดสอบโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส และลดเป็น 40 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความชื้นสัมพัทธ์ที่จะทำการทดสอบ : 20%, 40% และ 60% และความเร็วลมที่จะทำการทดสอบ : 0, 2 และ 4 เมตรต่อวินาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

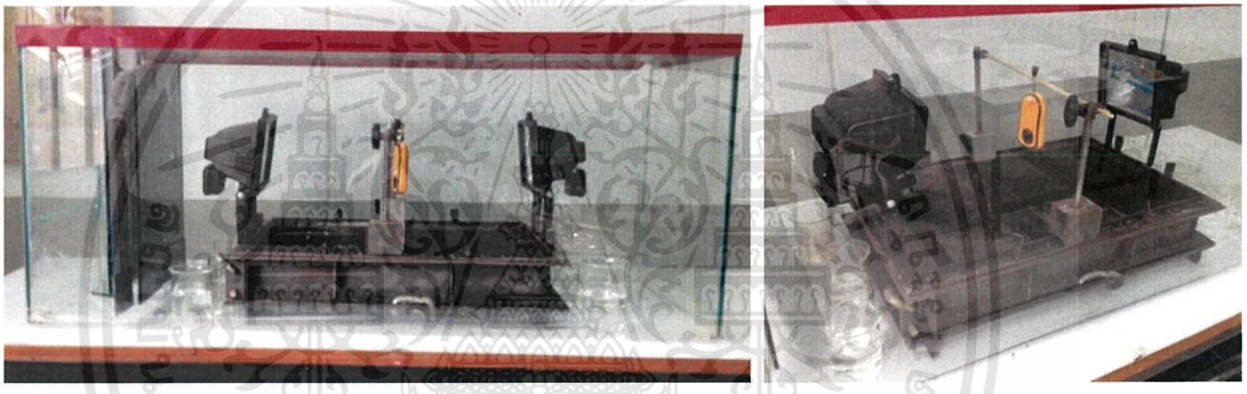
กรณีที่จะทำการศึกษาในสภาวะแวดล้อมทั้งหมด 28 กรณี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 เตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบ

3.1.2.1 เตรียมตู้ควบคุมอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เพื่อที่จะจำลองสภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยใช้ตู้ปลาขนาด 20"x48" จำนวน 2 ตู้ เพื่อทดลองเปรียบเทียบกับระหว่างมาตรฐานของ ASTM จากนั้นจะใช้ไฟจากหลอดไฟเป็นตัวให้ความร้อน , เพิ่มความชื้นโดยใช้บีกเกอร์ใส่น้ำแล้ววางไว้รอบตู้ และใช้ลมจากพัดลมตัวเล็ก โดยภายในตู้จะมีมาตรวัดบอกปริมาณความชื้นและอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมเพื่อคอยปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและความชื้นให้ได้ตามค่าที่ต้องการ ส่วนลมจะใช้เครื่องวัดความเร็วลมหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดลงในตู้ควบคุมแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.1

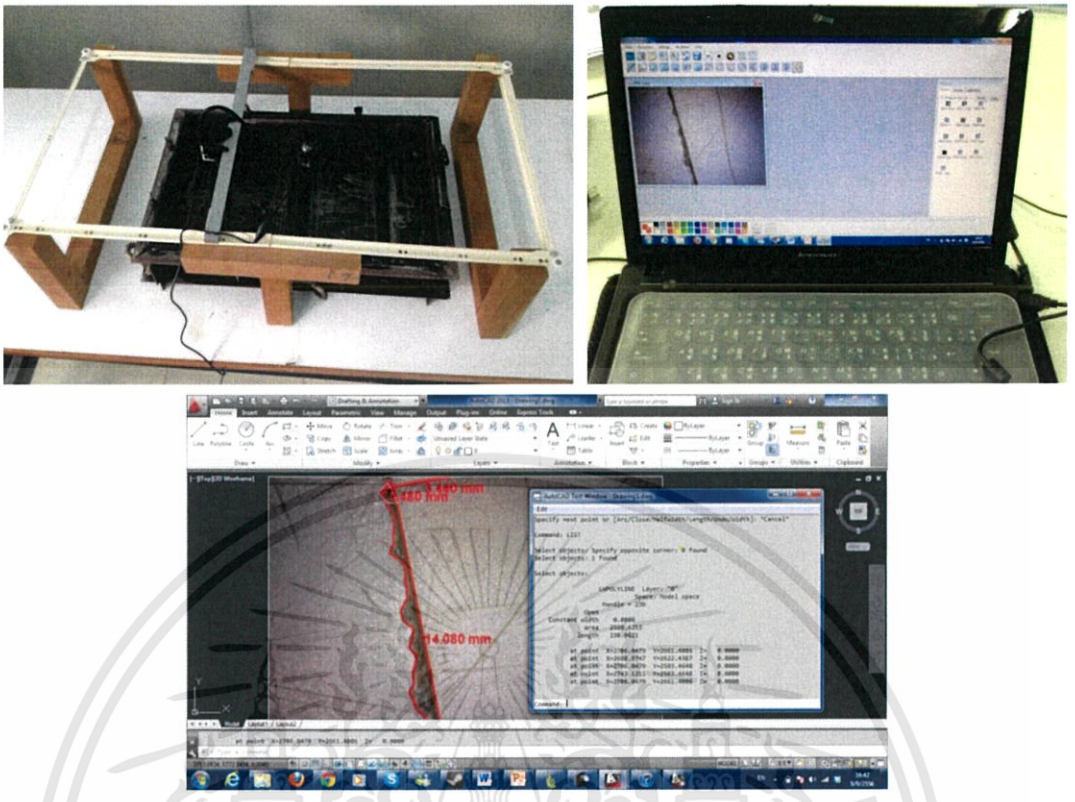


รูปที่ 3.1 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ,ความชื้นสัมพันธ์ และความเร็วลม

3.1.2.2 เตรียมเกจวัดการหดตัว (LVDT) และเครื่องเก็บค่าการหดตัว (Data logger) ซึ่งจะมี 4 เกจ วัดได้ครั้งละ 2 ชิ้น และจะต่อเข้ากับเครื่อง Data logger เพื่อทำการเก็บค่าการหดตัวที่เกจ LVDT วัดได้

3.1.2.3 เตรียมกล้องถ่ายภาพ Microscope 2.0 M พร้อมขาตั้งกล้องสำหรับถ่ายภาพการแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ ในช่วงระยะ Initial setting time และ Final setting time โดยต่อกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ ซึ่งรูปจะปรากฏในจอคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะทำการ Capture รูปทุกๆ 1 เซนติเมตรที่ตี Grid บนตัวอย่าง เพื่อทำการเก็บภาพรอยแตกร้าวอย่างละเอียด จากนั้นจะนำภาพมาต่อกันและหาปริมาณพื้นที่ของรอยแตกร้าวในโปรแกรม AutoCAD และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เทียบกับพื้นที่ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งกล้องพร้อมขาตั้ง, การเก็บข้อมูลภาพ และการคำนวณหาพื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าในโปรแกรม AutoCAD

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ผลิตโดย บริษัท เอซีจี ซีเมนต์

รูปที่ 3.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ทราย

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

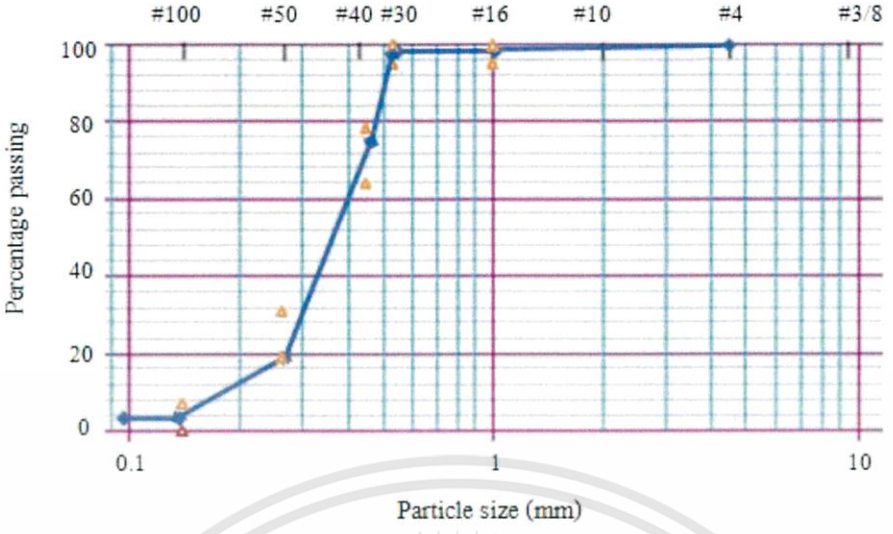
Basic Property	ทราย
Bulk Specific Gravity(SSD)	2.60
Bulk Specific Gravity	2.58
Moisture Content , %	0.54
Fineness Modulus	2.05

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของทราย

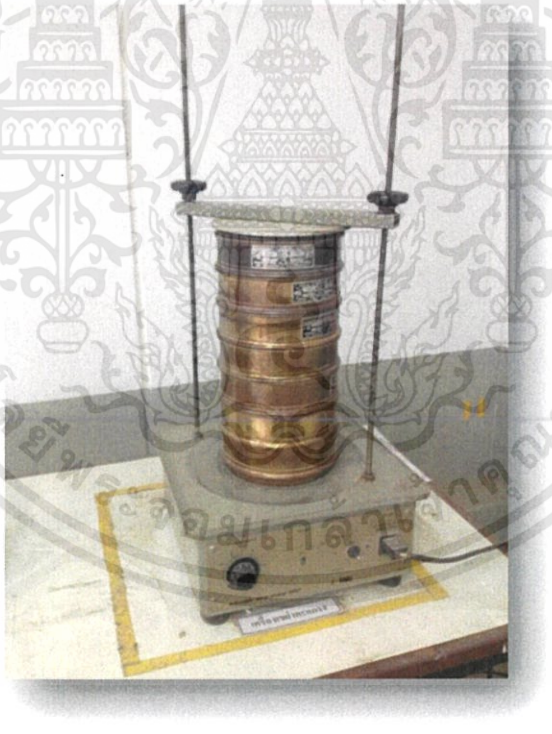
Sive size		ASTM C 778
		Graded sand
		Percent Passing
1.18 mm.	No.16	100
850 µm.	No.20	100
600 µm.	No.30	96 – 100
425 µm.	No.40	65 - 75
300 µm.	No.50	20 – 30
150 µm.	No.100	0 – 4

ตารางที่ 3.2 มาตรฐาน ASTM C 778 graded sand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Gradation Curve ของทรายกับ ASTM C 778 graded sand



รูปที่ 3.5 เครื่องเขย่าตะแกรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดสอบและวิจัย

3.3.1 อัตราการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230

นำแบบหล่อตัวอย่างวางให้อยู่ตรงกลางของแท่น ใส่มอร์ต้าร์ประมาณ 1/2 ของแบบหล่อ กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งมาตรฐาน 1"x2"x1/2" จำนวน 20 ครั้ง เติมซีเมนต์มอร์ต้าร์ให้เต็มจนล้นแบบหล่อขึ้นมา จากนั้นทำการกระทุ้งอีก 20 ครั้ง เช่นเดียวกันกับครั้งแรก ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ ทำความสะอาดบริเวณรอบๆ แท่นทดสอบให้สะอาด แล้วค่อยๆ ยกแบบหล่อขึ้นจากซีเมนต์มอร์ต้าร์ และทำการหนุนโต๊ะทดสอบให้ตกกระแทกในแนวดิ่งสูง 12.7 มม. เป็นจำนวน 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที

การวัดการกระจาย วัดจากผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ต้าร์ที่กระจาย โดยวัดเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางเดิมดังนี้

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

โดย D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่กระจายบนจาน

D_0 = เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบกรวยทองเหลือง

รูปที่ 3.6 ทดสอบอัตราการไหล (Flow Table)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ASTM C109

ทำการเก็บตัวอย่างในแบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 24 ชม , 3 วัน , 7 วัน และ 28 วัน ใช้วิธีการบ่มด้วยน้ำ เมื่อมีอายุครบตามกำหนดให้นำขึ้นมาคลุมด้วยผ้าหมาดแล้วเช็ดผิวตัวอย่างให้แห้งก่อนเวลาทดสอบประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วจึงทำการทดสอบ

ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์มอร์ต้าร์หาได้จากสมการ

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

โดย f_c = กำลังรับแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น กก/ตร.ซม. หรือ ปอนด์/ตร.นิ้ว

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น กก. หรือ ปอนด์

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ตร.ซม. หรือ ตร.นิ้ว โดยให้คิดจากขนาดเดิมคือ 5x5 ซม. แต่หากหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบจริง คลาดเคลื่อนเกินกว่า 1.5% ให้ใช้พื้นที่หน้าตัดของแท่งทดสอบ

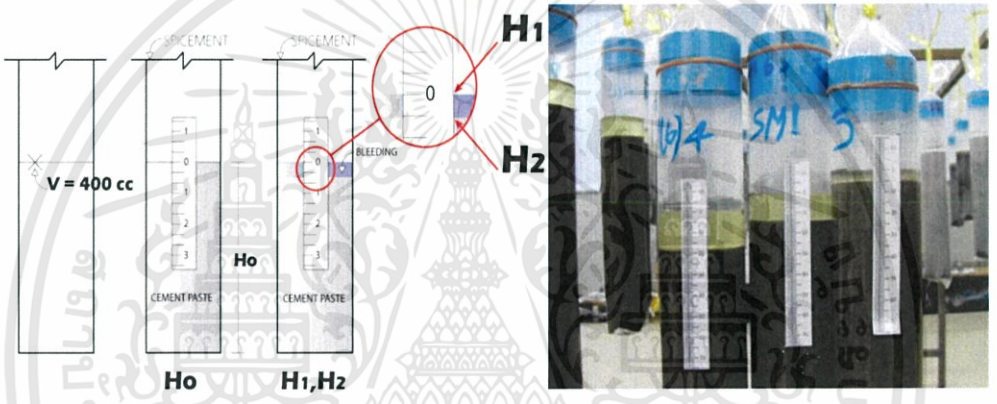
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 อัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding) JCI by Prof. Ei-ichi TAZAWA

นำมอร์ต้าร์ที่ผสมแล้วมาเทลงในหลอดทดลองที่ปริมาตร 400 cc. หรือความสูง H_0 ประมาณ 20 เซนติเมตร นำสเกลที่มีความละเอียดถึง 1 มิลลิเมตรมาติด เป็นตำแหน่ง H_1 จดค่าน้ำที่เยิ้มทุกๆ 30 นาทีทำ 3 ตัวอย่างทุกกรณี อัตราการเยิ้มน้ำหาได้จากสมการ

$$\text{อัตราการเยิ้มน้ำ} = (H_1 - H_2)/H_0 * 100\%$$



รูปที่ 3.8 แสดงการทดลองหาอัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding)

3.3.4 ระยะเวลาในการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807

เพื่อหาเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย (Initial and final setting time) ของมอร์ต้าร์ โดยใช้อุปกรณ์ไวแคท นำมอร์ต้าร์ที่ทดสอบอัตราการไหลมาตั้งค่าตัวชี้ที่เครื่องไปที่ค่าขีดศูนย์ที่ด้านบนของสเกล ซึ่งเป็นค่าตั้งต้น ปล่อยพลั๊กเกอร์ลงมาภายในเวลา 30 วินาทีหลังจากที่ผสมเสร็จ เครื่องจะต้องไม่มีการสั่นในระหว่างที่ทำการทดสอบ บันทึกค่าพลั๊กเกอร์ที่จมลงไปในซีเมนต์เพสต์หลังจากที่ปล่อยให้จมลงไปเป็นระยะเวลา 30 วินาที เพสต์จะมีความข้นเหลวปกติเมื่อพลั๊กเกอร์จมลงไปเป็นระยะ 10 ± 1 มิลลิเมตร จากผิวด้านบน ภายในระยะเวลา 30 วินาทีหลังปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณระยะเวลาการก่อตัวเป็นนาทีดังสมการ

$$Time\ of\ Setting = \left(\left(\frac{(B - A)}{(C - D)} \right) \times (C - 10) \right) + A$$

โดย A = เวลา เป็นนาทีเมื่อแท่งเหล็กจมมากกว่า 10 มม.เป็นครั้งสุดท้าย

B = เวลา เป็นนาทีเมื่อแท่งเหล็กจมน้อยกว่า 10 มม.เป็นครั้งแรก

C = ระยะเข็มจมที่ เวลา A

D = ระยะเข็มจมที่ เวลา B

รูปที่ 3.9 แสดงการทดลองหาระยะเวลาในการก่อตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ทำการเก็บตัวอย่างในแบบหล่อขนาด 4 x 4 x 16 เซนติเมตร ในแต่ละกรณี ทั้งหมด กรณีละ 2 ตัวอย่าง มีการติดตั้ง LVDT 2 ตัว ที่ด้านหัวและด้านท้ายของตัวอย่างเพื่อใช้เป็นจุดในการวัดการยืดหดตัว ทำการวัดขนาด 60 นาทีหลังจากเทมอร์ต้าร์ลงแบบและเก็บค่าการยืด หดตัวทุกๆ 10 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง

ค่าอัตราการหดตัว (Total Shrinkage) ของซีเมนต์มอร์ต้าร์หาได้จากสมการ

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

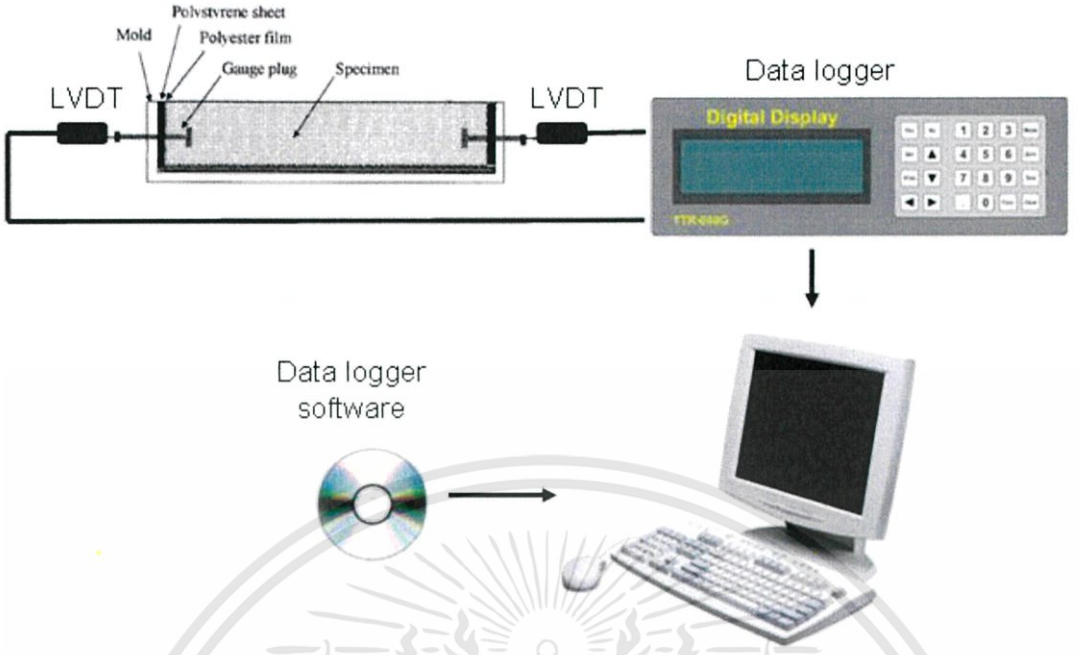
เมื่อ ΔL_1 = ความยาวที่เปลี่ยนไปก่อนที่จะถอดแบบ

L = ระยะห่างระหว่าง gauge plugs ด้านใน

X_{0a}, X_{0b} = ระยะที่เริ่มต้นอ่าน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงการทดลองหาอัตราการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age Total Shrinkage)

รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัด Early age Shrinkage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ทำการทดสอบ หาอัตราการไหล ระยะการก่อตัวเริ่มต้น ตลอดจนผลการทดสอบหาค่าการหดตัวของซีเมนต์มอร์ต้าร์ และหาพื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าแบบพลาสติกของมอร์ต้าร์ ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน

4.1 อัตราการไหล (Flow table) ASTM C230

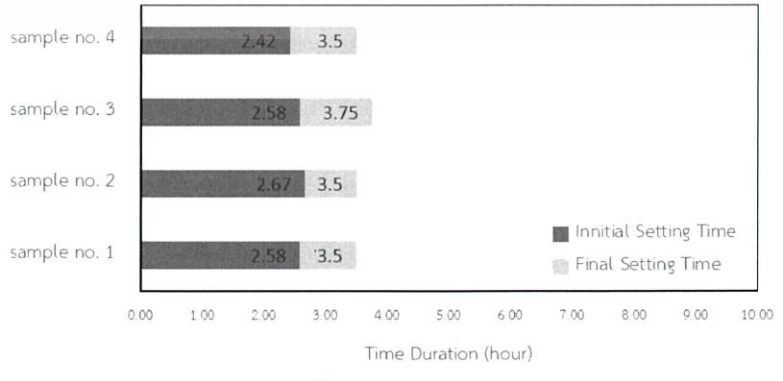
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอัตราการไหล

SAMPLE NO.	WT. OFCEMENT (gm.)	VOL OF WATER (cc.)	D0 (cm.)	D1 (cm.)	PERCENT FLOW TABLE (%)
1	200	126	10.000	20.813	108.13

จากตารางคือค่าทดสอบที่เหมาะสมตรงตามมาตรฐาน ASTM C230 ซึ่งอัตราการกระจายที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 105%-115% จากตารางได้ 108.13 % ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานและได้ค่า water cement ratio เท่ากับ 0.63 ซึ่งจะนำไปใช้เป็นอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบทุกครั้ง

4.2 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ASTM C807

ได้ทำการทดลองหาระยะเวลาการก่อตัวสี่ครั้ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง ได้ค่าการทดลองดังรูปที่ 4.2.1

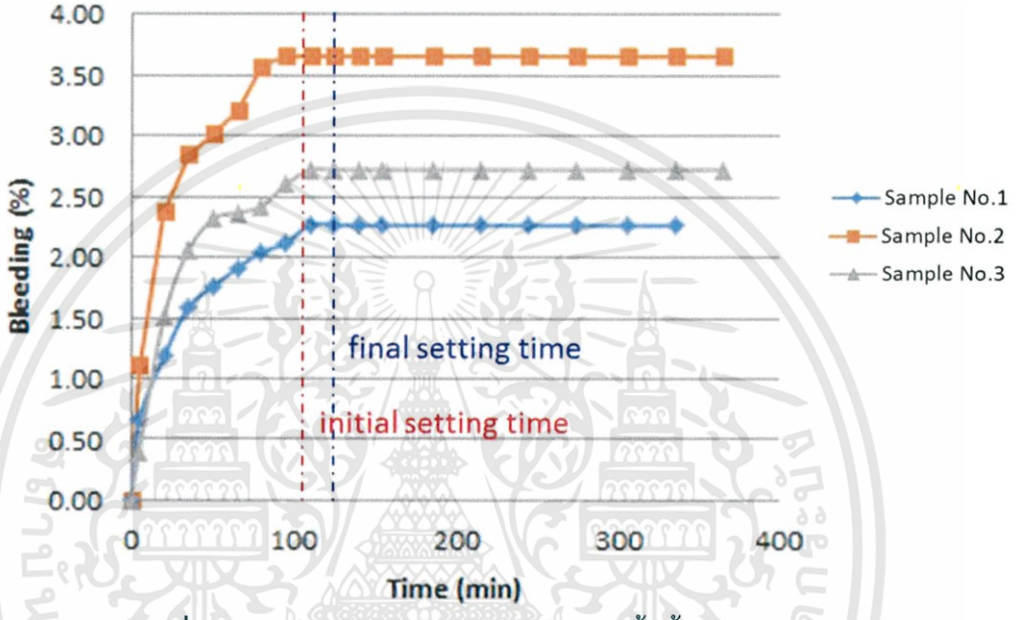


รูปที่ 4.2.1 กราฟแสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของมอร์ต้าร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

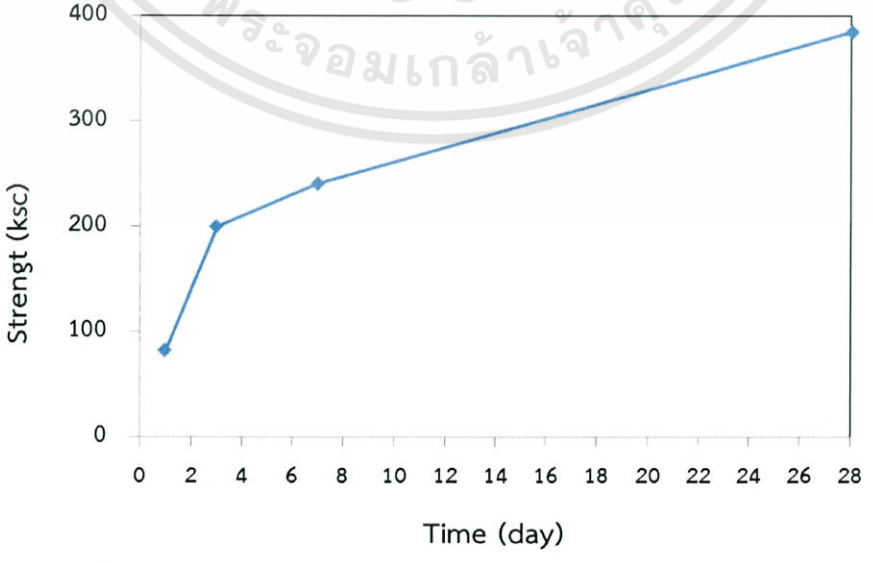
จากรูปที่ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ของมอร์ตาร์ใช้เวลาเท่ากับ 2.58 ชั่วโมงหรือ 2 ชั่วโมง 35 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) เท่ากับ 3.5 ชั่วโมงหรือ 3 ชั่วโมง 30 นาที

4.3 อัตราการเยิ้มน้ำ (Bleeding)



รูปที่ 4.3.1 แสดงผลการทดสอบอัตราการเยิ้มน้ำ

4.4 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)



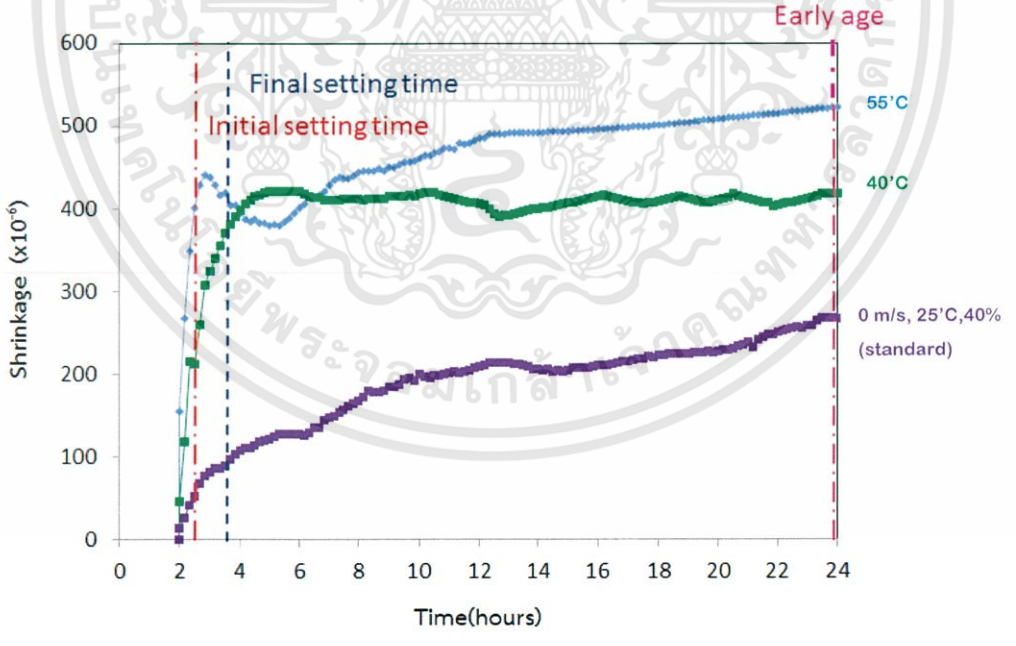
รูปที่ 4.4.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในช่วงเวลา 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

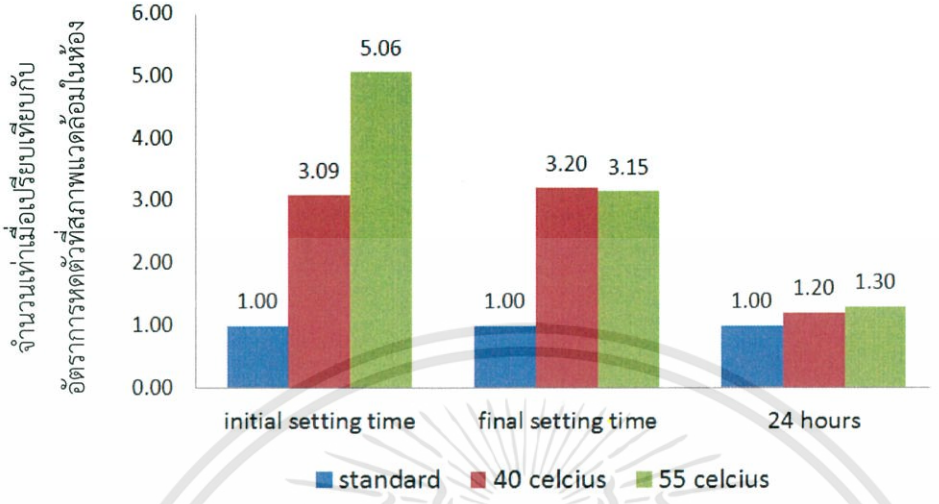
4.5.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิ (Temperature) ที่ส่งผลต่ออัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)

จากรูปที่ 4.5.1.1 - 4.5.1.2 ทำให้เห็นว่าอัตราการหดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นซึ่งมีค่าประมาณ 3-5 เท่าของการหดตัวที่สภาวะแวดล้อมห้องและมีการเพิ่มขึ้นจนถึงระยะสุดท้ายของการก่อตัว (Final setting time) หลังจากนั้นอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์จะมีค่าค่อนข้างคงทีหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยความสัมพันธ์ของอุณหภูมินั้นแปรผันโดยตรงกับอัตราการหดตัวรวม (total shrinkage) และจากรูปเมื่อนำค่าอัตราการหดตัวรวมสูงสุดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับค่าอัตราการหดตัวรวมที่สภาพแวดล้อมในห้องจะได้ว่าค่าอัตราการหดตัวรวมสูงสุดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าเป็น 1-1.5 เท่าของค่าอัตราการหดตัวรวมที่สภาพแวดล้อมในห้องที่ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 25,40,55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

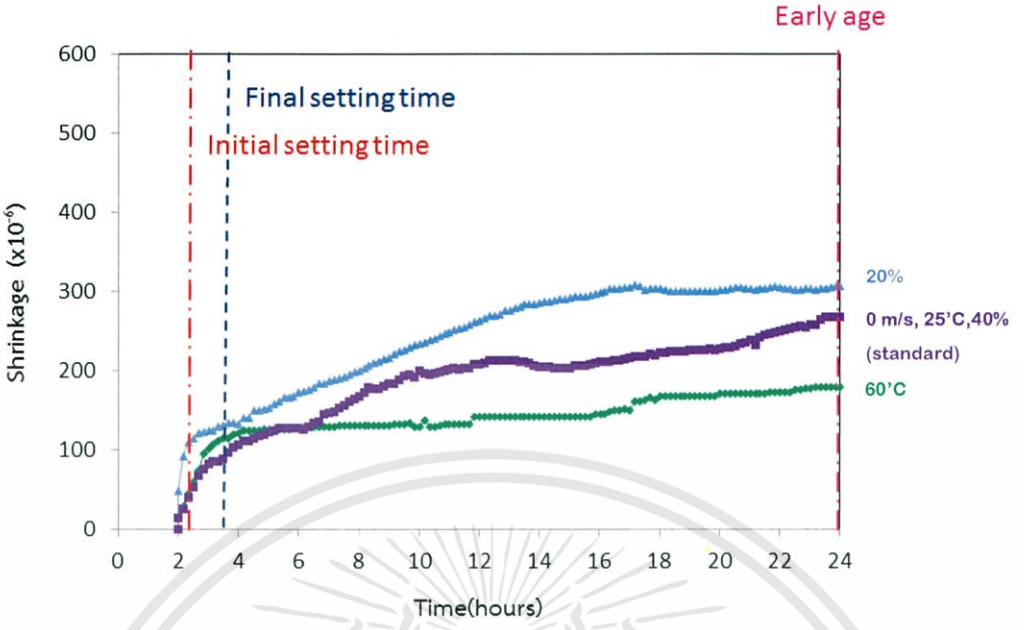


รูปที่ 4.5.1.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการหดตัวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการหดตัวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours

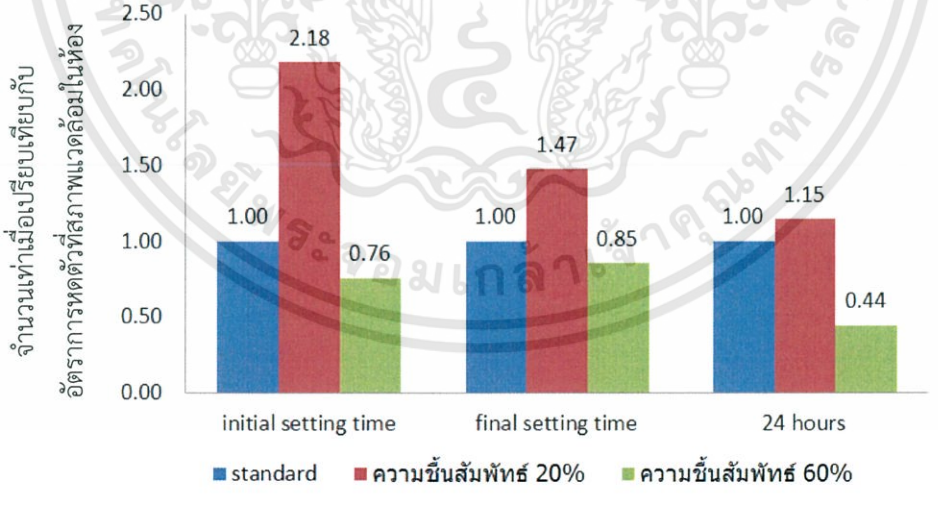
4.5.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ (Huminity) ที่ส่งผลต่ออัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)

จากรูปที่ 4.5.2.1 - 4.5.2.2 ทำให้เราทราบว่าอัตราการหดตัวรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดความชื้นสัมพัทธ์และเมื่อทำการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการหดตัวรวม (total shrinkage)จะลดลง นั้นหมายความว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์แปรผกผันกับอัตราการหดตัวรวม (total shrinkage) และจากรูปเมื่อนำค่าอัตราการหดตัวรวมสูงสุดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์เทียบกับค่าอัตราการหดตัวรวมที่สภาพแวดล้อมในห้องจะได้ว่าค่าอัตราการหดตัวรวมสูงสุดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเป็น 0.4 - 1.2 เท่าของอัตราการหดตัวรวมที่สภาพแวดล้อมในห้องที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เป็น 20,40,60 เปอร์เซ็นต์

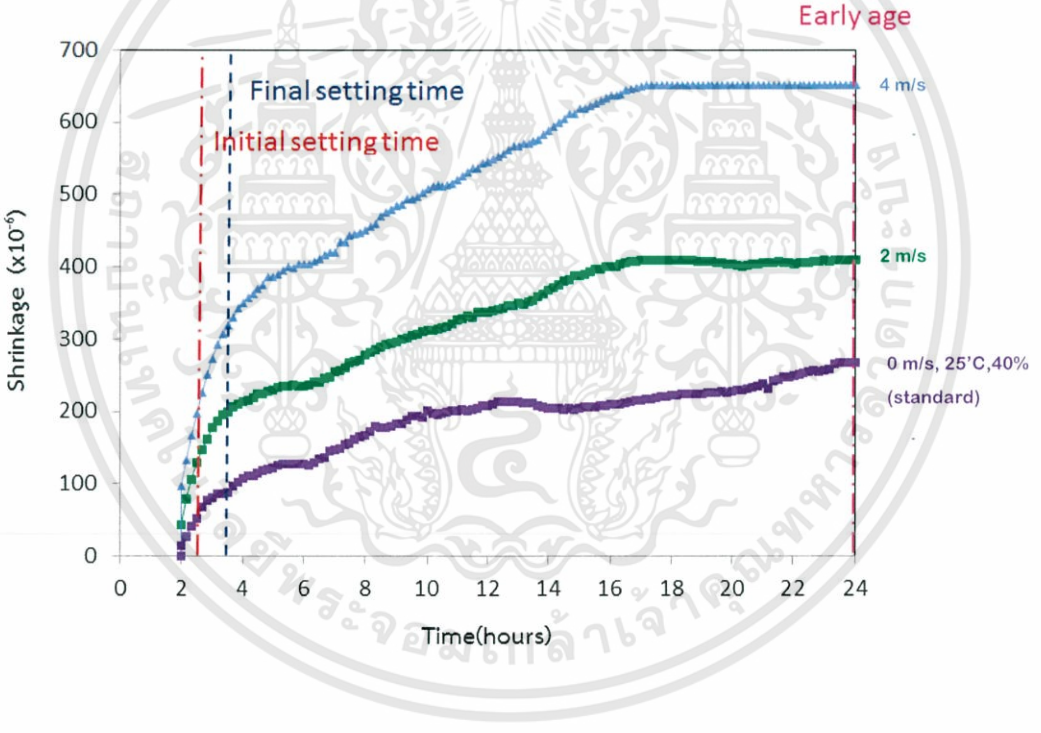


รูปที่ 4.5.2.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการหดตัวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการหดตัวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

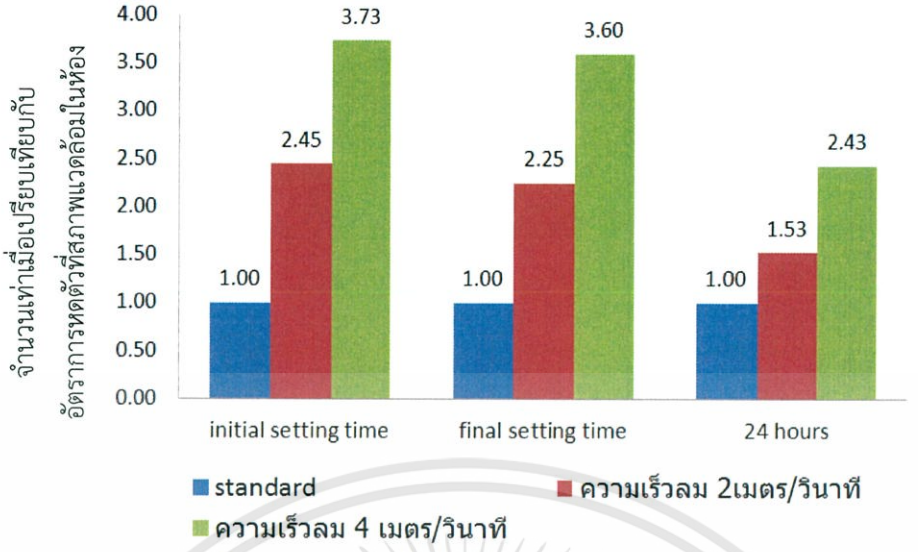
4.5.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของความเร็วลม (Wind) ที่ส่งผลต่ออัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)

จากรูปที่ 4.5.3.1 จะทำให้เราทราบว่าเมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการหดตัวรวม (total shrinkage) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยนั้นหมายความว่าความเร็วลมแปรผันตรงกับอัตราการหดตัวรวม (total shrinkage) และจากรูปเมื่อนำค่าอัตราการหดตัวรวมสูงสุดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเทียบกับค่าอัตราการหดตัวรวมที่สภาพแวดล้อมในห้องจะได้ว่าค่าอัตราการหดตัวรวมสูงสุดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมมีค่าเป็น 1.5 – 2.5 เท่าของอัตราการหดตัวรวมที่สภาพแวดล้อมในห้องที่ความเร็วลม 0 เมตรต่อวินาที

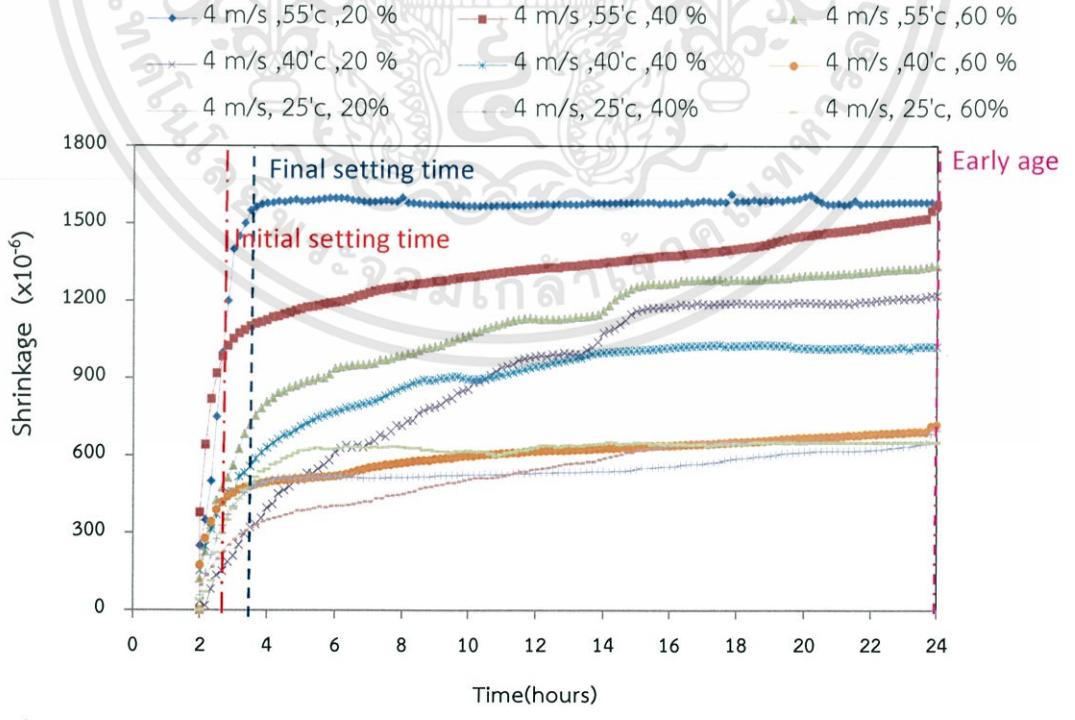


รูปที่ 4.5.3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับอัตราการหดตัวของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเป็น 0,2,4 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

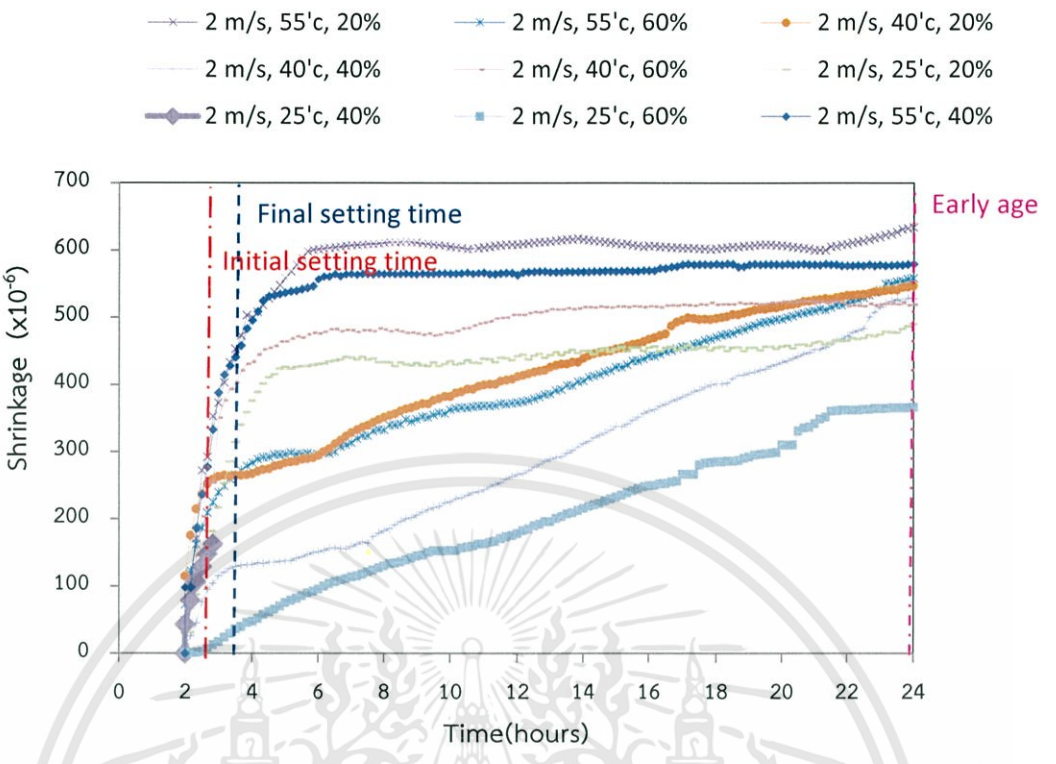


รูปที่ 4.5.3.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการหดตัวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการหดตัวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours

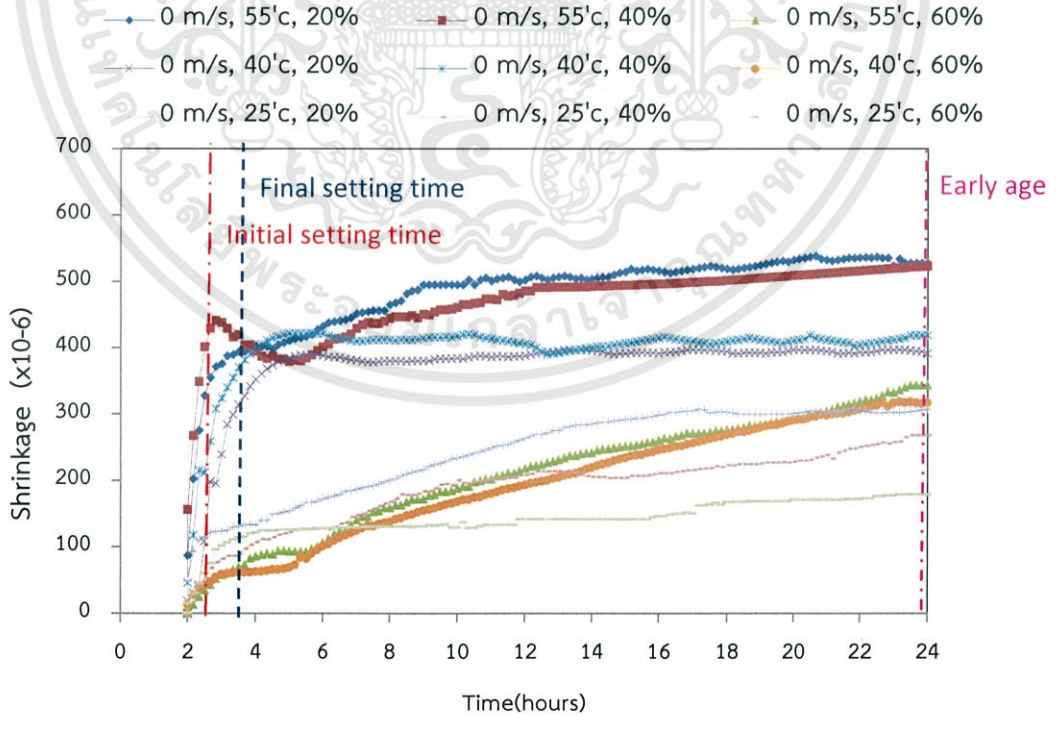


รูปที่ 4.5-ก กราฟแสดงการหดตัวรวม (Total Shrinkage) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ที่ความเร็วลม 4 m/s อุณหภูมิ 25,40,55˚C และความชื้นสัมพัทธ์ 20,40,60 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5-ข กราฟแสดงการหดตัวรวม (Total Shrinkage) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ที่ความเร็วลม 2 m/s อุณหภูมิ 25,40,55˚C และความชื้นสัมพัทธ์ 20,40,60 %



รูปที่ 4.5-ค กราฟแสดงการหดตัวรวม (Total Shrinkage) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ที่ความเร็วลม 0 m/s อุณหภูมิ 25,40,55˚C และความชื้นสัมพัทธ์ 20,40,60 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

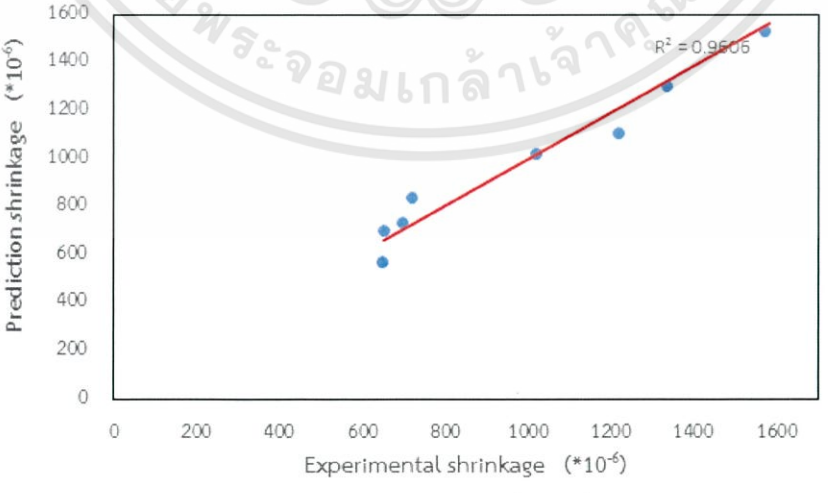
4.6 สร้างกราฟการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นด้วยโปรแกรม Statistica 10

สร้างกราฟการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นด้วยโปรแกรม Statistica 10 โดยใช้การวิเคราะห์สมการแบบ Quadratic ดังสมการที่ 4.1-4.3

4.6.1 ผลการทดลองอัตราการหดตัวที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

$$\text{Early age total shrinkage}(*10^{-6}) = 388.0835+0.8178(\text{Temperature})+9.6328(\text{Huminity}) +0.4196(\text{Temperature})^2-0.1668(\text{Temperature})(\text{Huminity}) -0.12(\text{Huminity})^2 \quad (4.1)$$

รูปที่ 4.6.1.1 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.1)

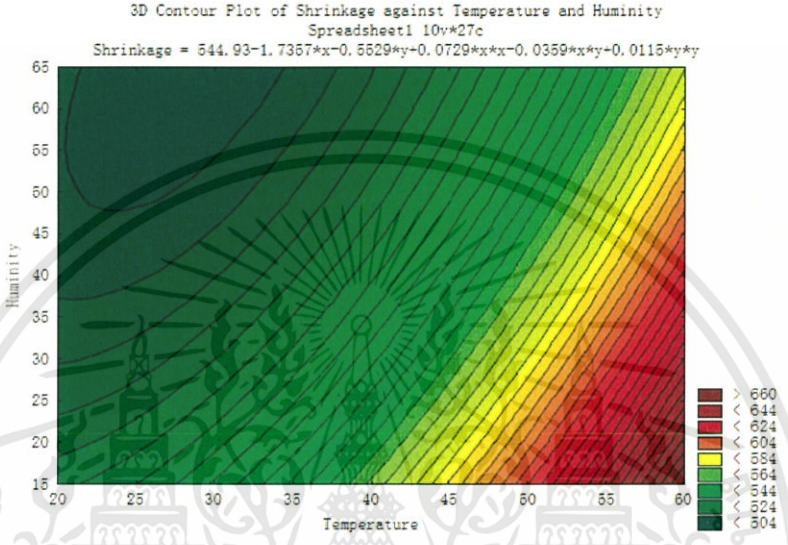


รูปที่ 4.6.1.2 ผลการคำนวณการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ(4.1) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

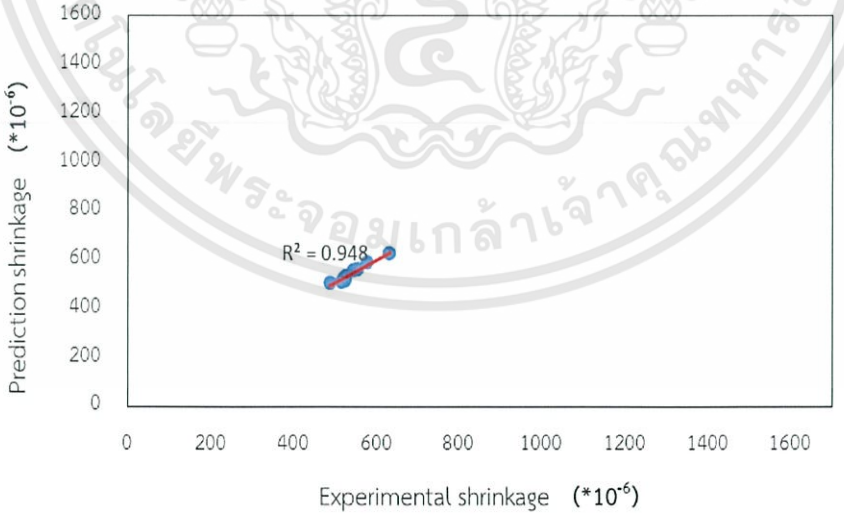
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ผลการทดลองอัตราการหดตัวที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที

Early age total shrinkage(*10-6) = 544.93-1.7357(Temperature)-0.5529 (Huminity)
+0.0729(Temperature)2-0.0359(Temperature)
(Huminity)+0.0115(Huminity)2 **(4.2)**



รูปที่ 4.6.2.1 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ (4.2)

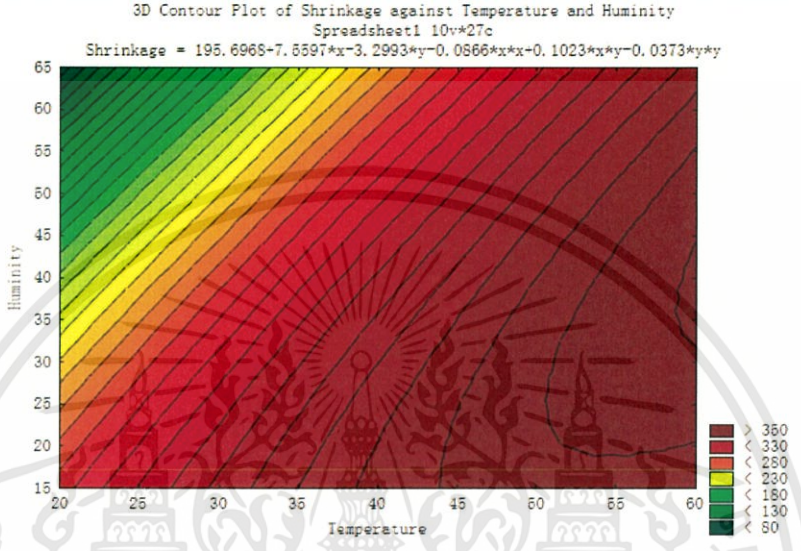


รูปที่ 4.6.2.2 ผลการคำนวณการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ(4.2) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

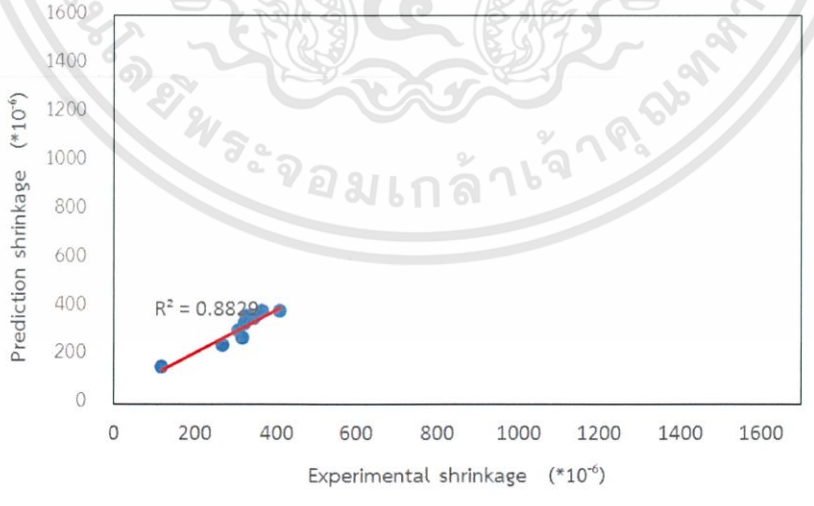
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลการทดลองอัตราการหดตัวที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที

$$\text{Early age total shrinkage}(*10^{-6}) = 195.6968+7.5597(\text{Temperature})-3.2993\ (\text{Huminity}) -0.0866(\text{Temperature})^2+0.1023(\text{Temperature})(\text{Huminity}) -0.0373\ (\text{Huminity})^2 \quad \textbf{(4.3)}$$



รูปที่ 4.6.3.1 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที จากสมการ (4.3)



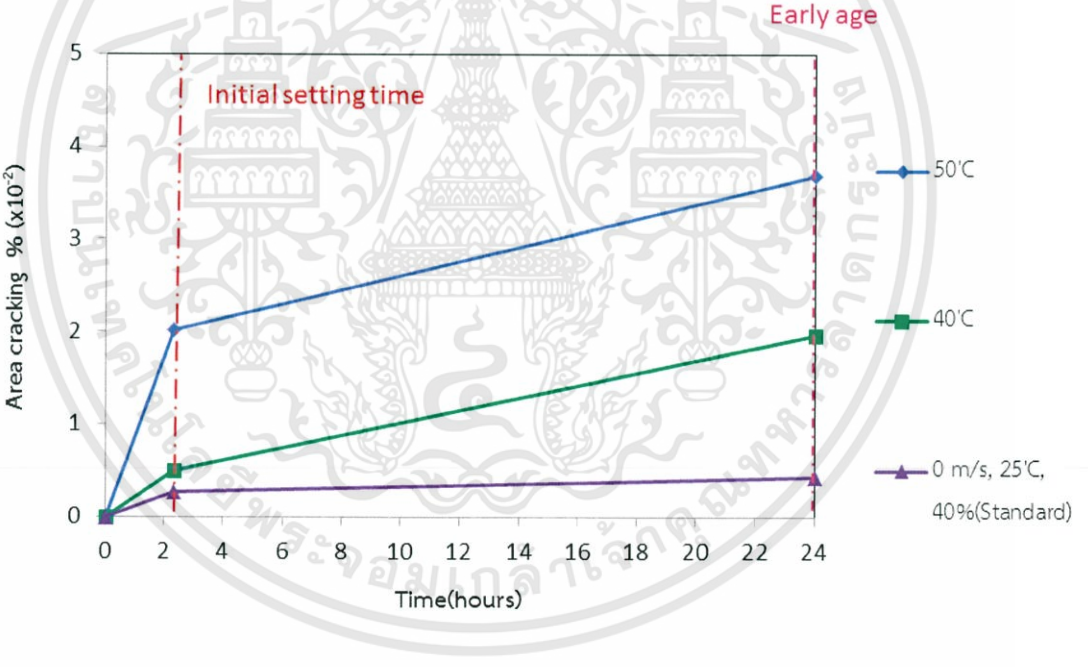
รูปที่ 4.6.3.2 ผลการคำนวณการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที จากสมการ (4.3) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 อัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้า

4.7.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิ (Temperature) ที่ส่งผลต่อเปอร์เซนต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)

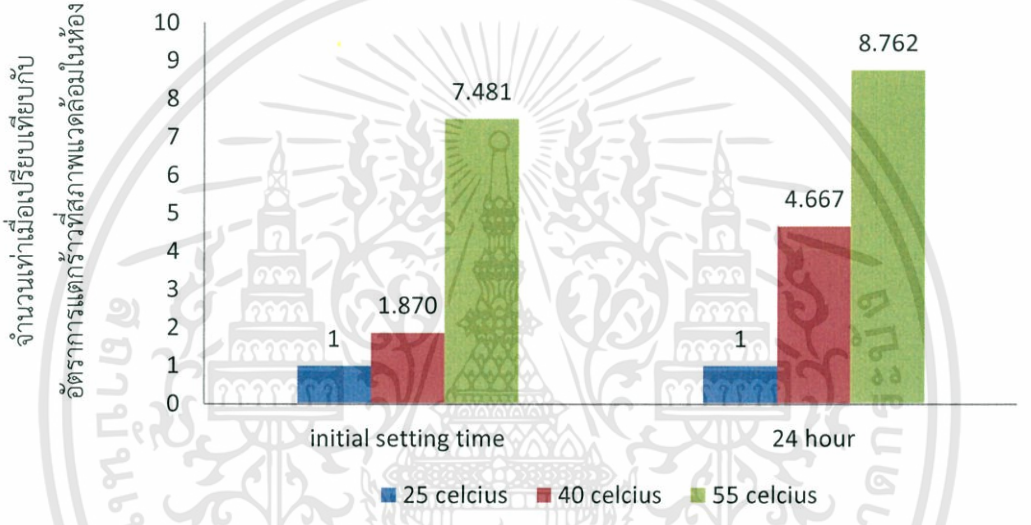
จากรูปที่ 4.7.1.1 แสดงว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบให้เกิดการแตกร้าวในช่วงระยะ Initial setting time เท่ากับ ช่วงหลังระยะ Initial setting time แต่อัตราเร็วของการเกิดการแตกร้าวในช่วงระยะเวลา Initial setting time มีค่ามากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 40 และ 50 องศาเซลเซียสพบว่าอัตราการเกิดการแตกร้าวในช่วงหลังระยะ Initial setting time มีค่าเท่ากันสังเกตได้จากการขนานกันของเส้นกราฟ หลังระยะ Initial setting time



รูปที่ 4.7.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาทีความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 25,40,55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7.1.2 แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 40 องศาเซลเซียส การแตกร้าวในช่วงเวลา Initial setting time มีการแตกร้าวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการแตกร้าวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งคิดเป็นประมาณ 1.87 เท่า แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสระยะ Initial setting time มีการแตกร้าวค่อนข้างมากกว่า คิดเป็น 4.667 เท่า และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 55 องศาเซลเซียส พบว่าจะมีการแตกร้าวที่ผิวของมอร์ต้าร์ 4.5 – 9 เท่า ของการแตกร้าวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

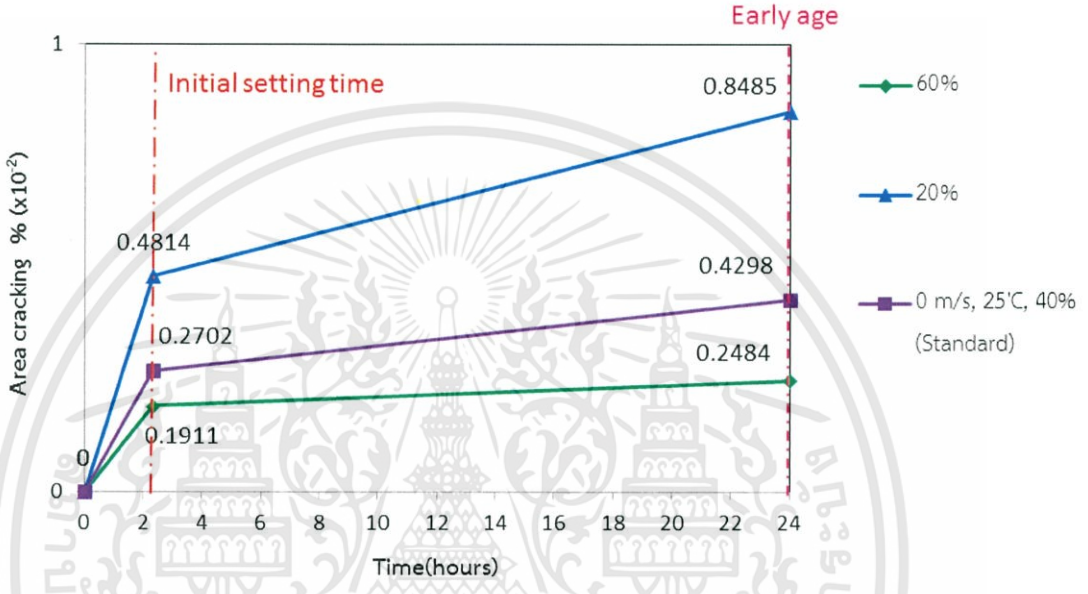


รูปที่ 4.7.1.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการแตกร้าวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกร้าวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ (Huminity) ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)

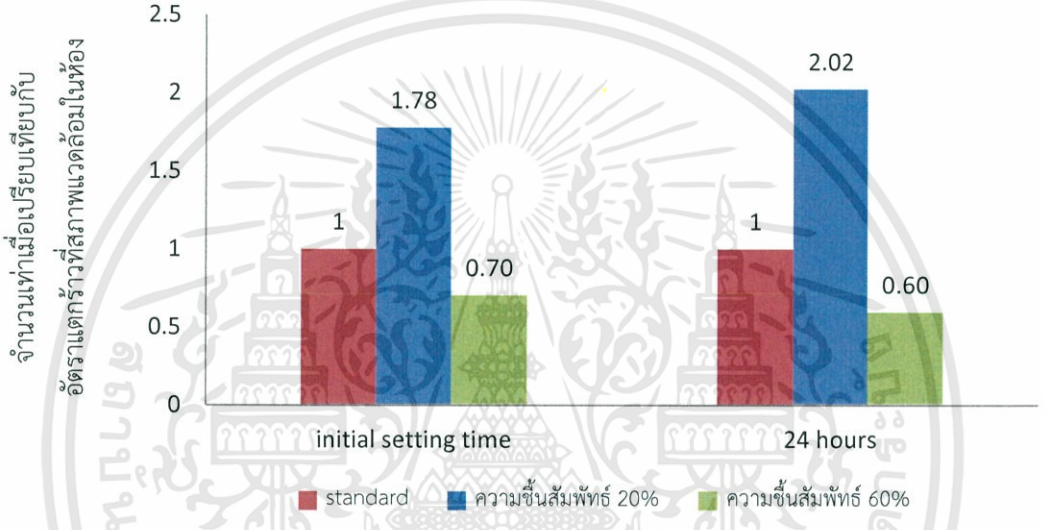
จากรูปที่ 4.7.2.1 แสดงว่าการแตกร้าวเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงระยะ Initial setting time ความชื้นส่งผลกระทบต่อการแตกร้าวค่อนข้างน้อยมาก



รูปที่ 4.7.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เป็น 20,40,60 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7.2.2 แสดงว่า การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวน้อยลงแต่เป็นการลดลงของการแตกร้าวที่น้อยมาก ส่วนการลดความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลให้การแตกร้าวมากขึ้น โดยการลดความชื้นสัมพัทธ์จะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในช่วงหลัง Initial setting time ค่อนข้างมาก ซึ่งคิดเป็นประมาณ 2 เท่าของการแตกร้าวที่ความชื้นสัมพัทธ์ห้องที 40 % และมีการแตกร้าวเพิ่มขึ้นจากระยะ Initial setting time ประมาณ 2 เท่าด้วย

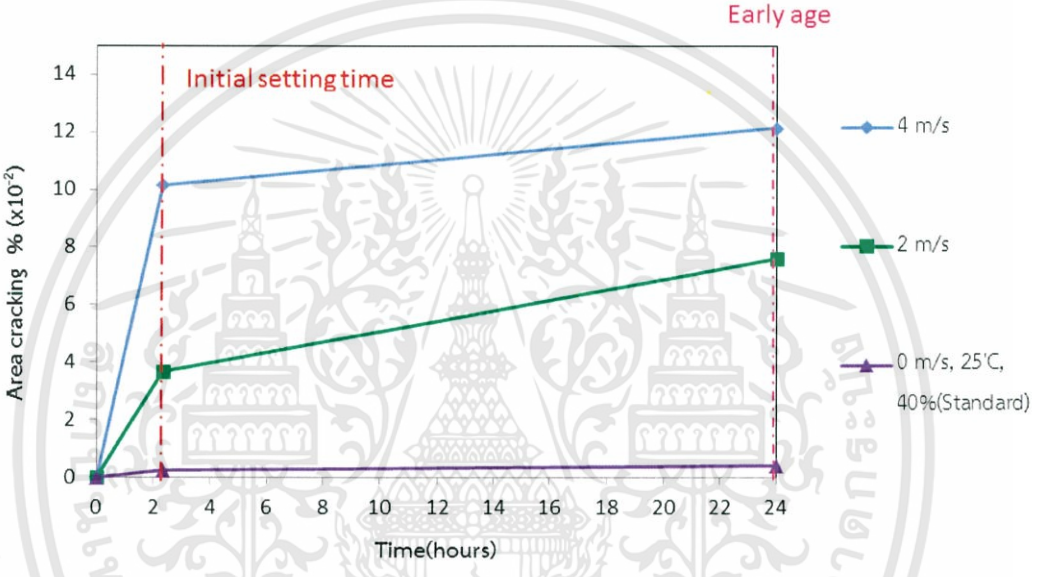


รูปที่ 4.7.2.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการแตกร้าวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกร้าวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3 ผลการทดสอบอิทธิพลของความเร็วลม (Wind velocity) ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age)

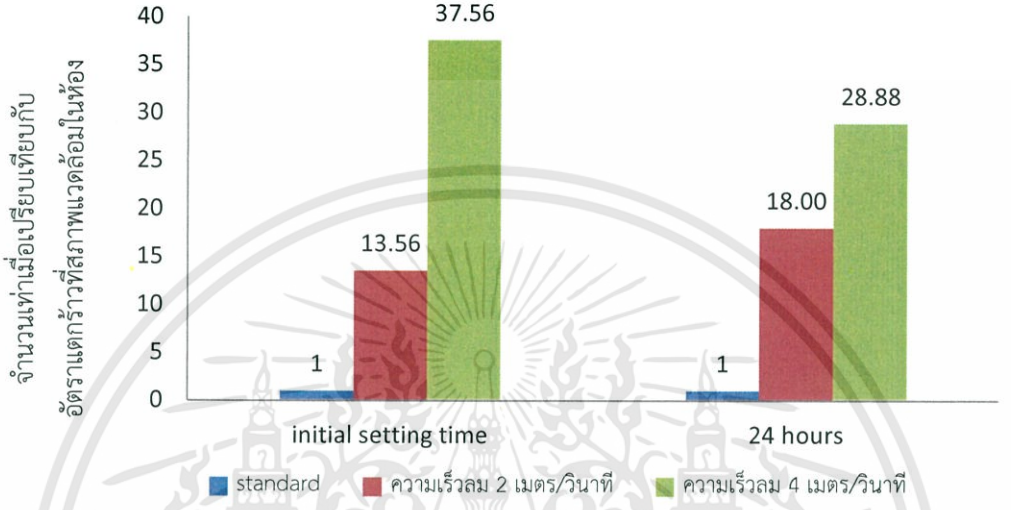
จากรูปที่ 4.7.3.1 แสดงว่าการแตกร้าวในช่วงระยะ Initial setting time มีมากขึ้นเมื่อมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น แต่เพื่อผ่านระยะ Initial setting time ไปแล้วความเร็วลมมีผลต่อการแตกร้าวค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะ Initial setting time



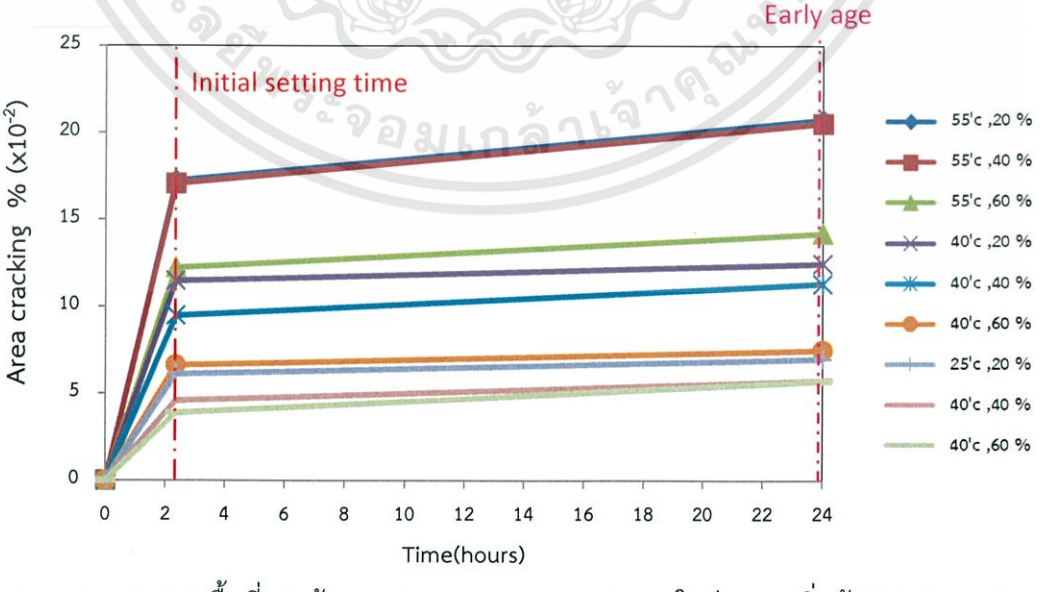
รูปที่ 4.7.3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเร็วลม 0 เมตร/วินาที ความชื้นสัมพัทธ์ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมเป็น 0,2,4 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7.3.2 แสดงว่าลมส่งผลกระทบในช่วง Initial setting time มากถึง 13-18 เท่าของการแตกร้าวในขณะที่ไม่มีลมและลมยังส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในระยะ 24 ชั่วโมงหลังจากเทแบบเสร็จมากถึง 28-40 เท่าของการแตกร้าวในที่ซึ่งที่ไม่มีลมด้วย โดยเฉพาะความเร็วลมทีมากกว่า 2 เมตรต่อวินาทีจะสงผลกระทบอย่างมากต่อการแตกร้าวในช่วงระยะ Initial setting time

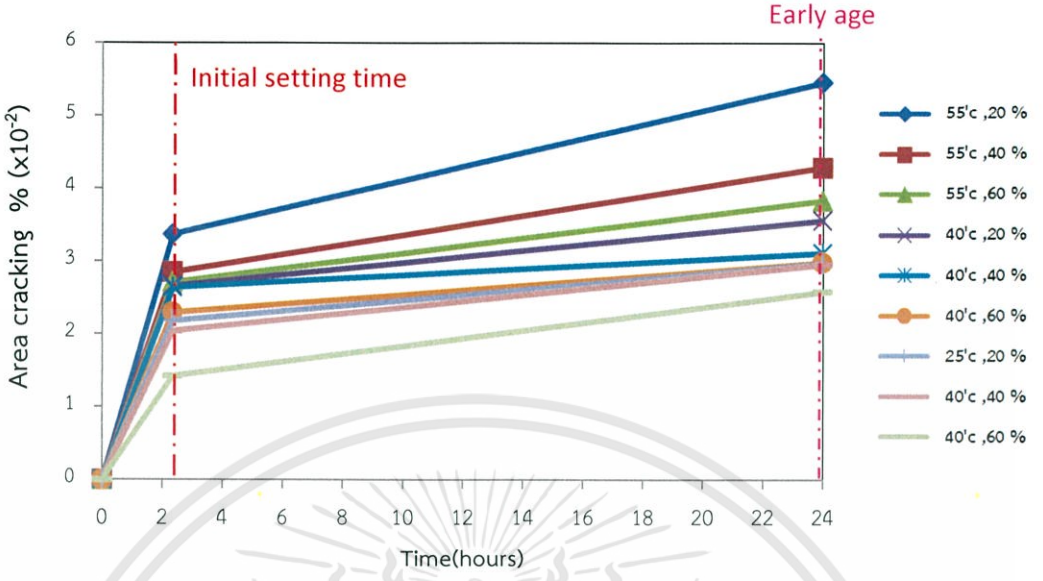


รูปที่ 4.7.3.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราการแตกร้าวเป็นจำนวนเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแตกร้าวที่สภาพแวดล้อมในห้อง หรือ 25'C ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และความเร็วลม 0 m/s (standard) ที่ระยะเวลา Initial setting time ,Final setting time และ 24 hours

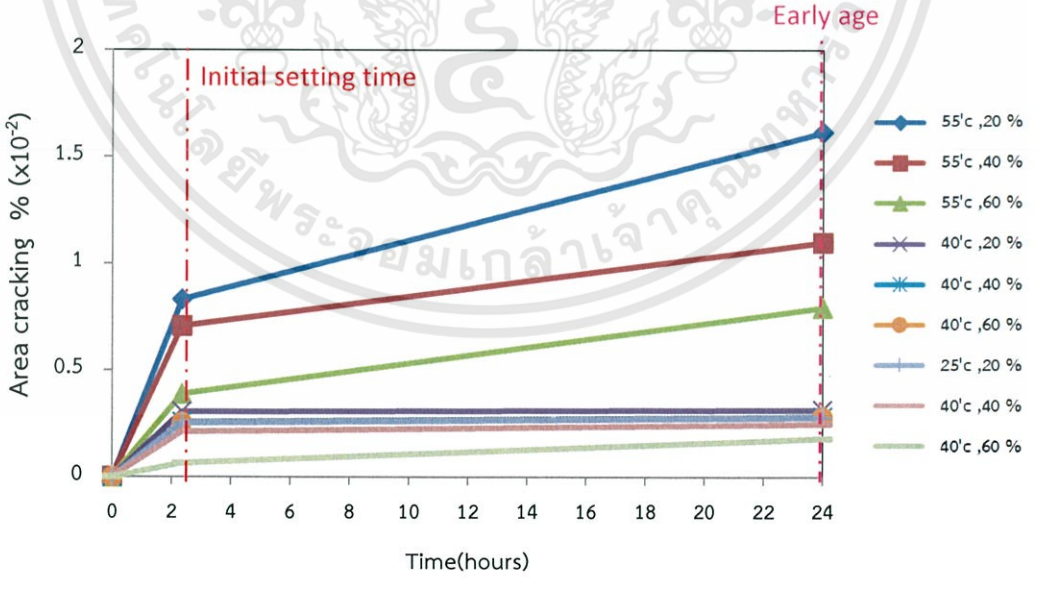


รูปที่ 4.7-ก แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

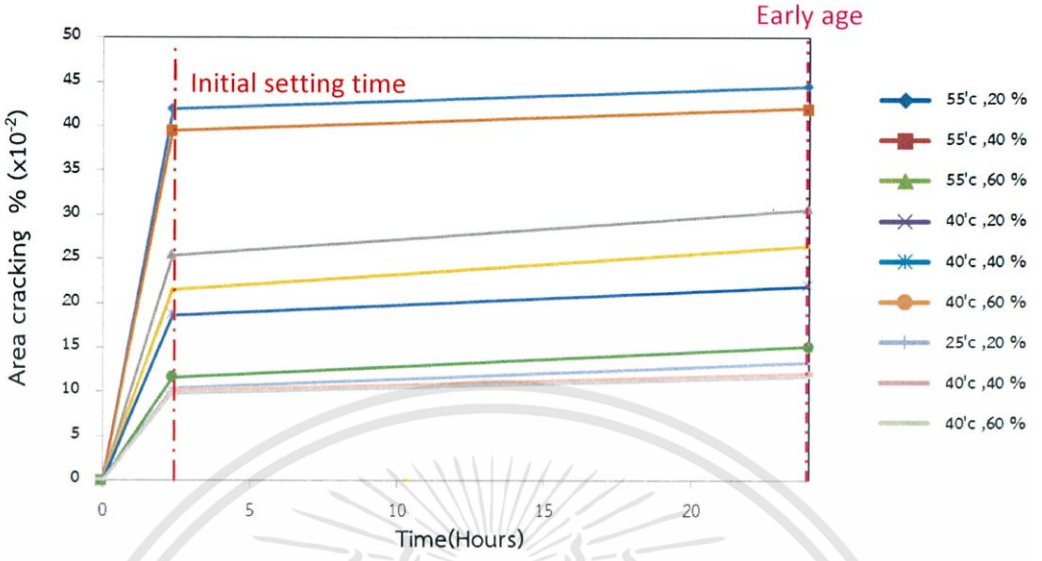


รูปที่ 4.7-ข แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที

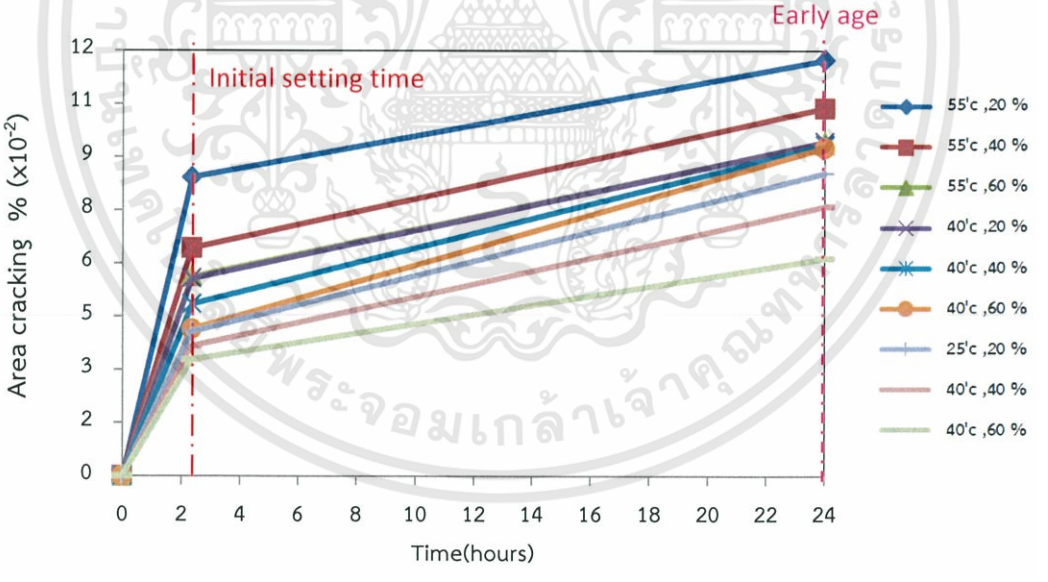


รูปที่ 4.7-ค แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

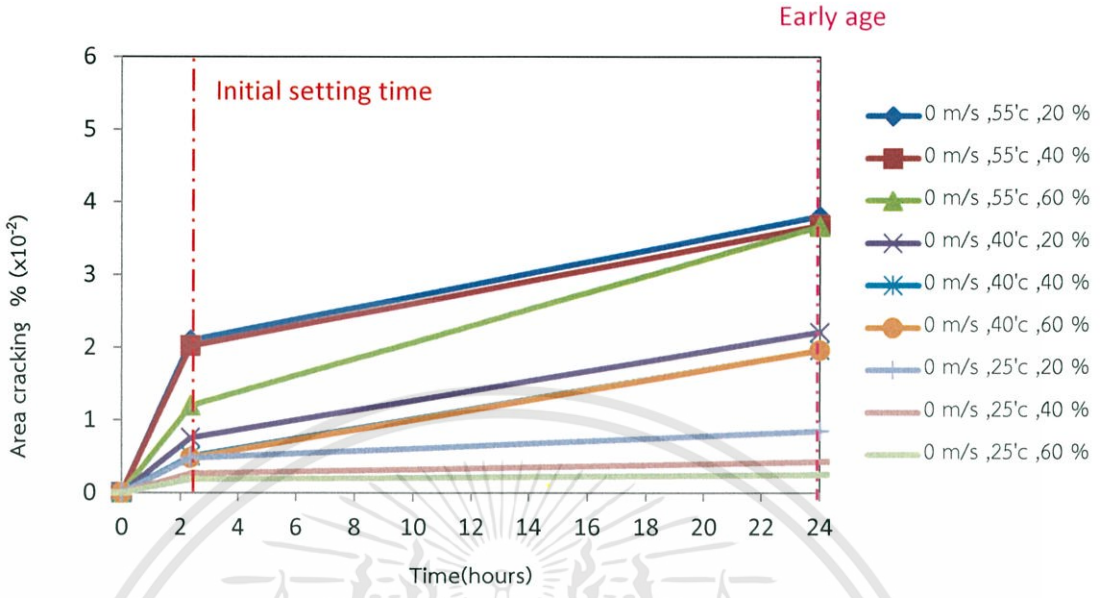


รูปที่ 4.7-ง แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที



รูปที่ 4.7-จ แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7-ฉ แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที

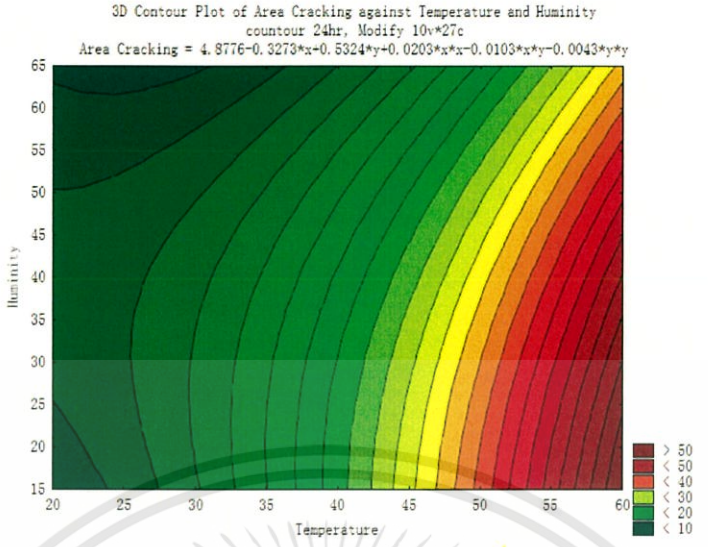
4.8 สร้างกราฟการแตกร้าวที่ผิวหน้าในช่วงอายุเริ่มต้นด้วยโปรแกรม Statistica 10

สร้างกราฟการแตกร้าวที่ผิวหน้าในช่วงอายุเริ่มต้นด้วยโปรแกรม Statistica 10 โดยใช้การวิเคราะห์สมการแบบ Quadratic ดังสมการที่ 4.4-4.6

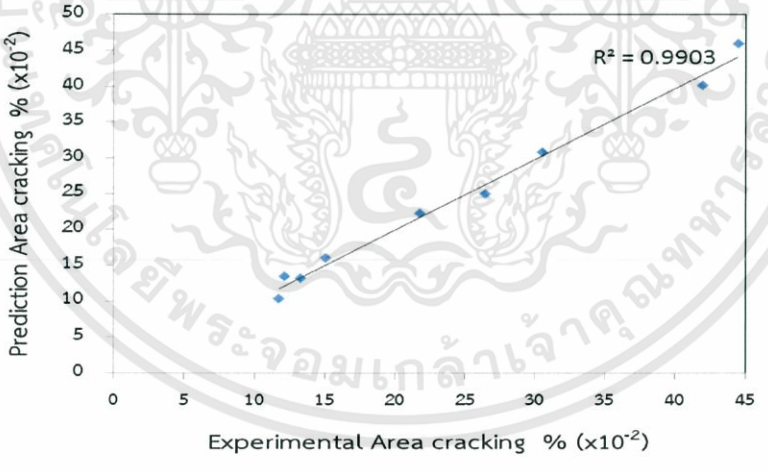
4.8.1 ผลการทดลองอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ระยะเวลา early age time ซึ่งเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

$$\text{Early age total Cracking \%}(*10^{-2}) = 4.8776-0.3273(\text{Temperature})+0.5324\ (\text{Huminity}) +0.0203(\text{Temperature})^2-0.0103(\text{Temperature})(\text{Huminity})-0.0043\ (\text{Huminity})^2 \quad \textbf{(4.4)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8.1.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

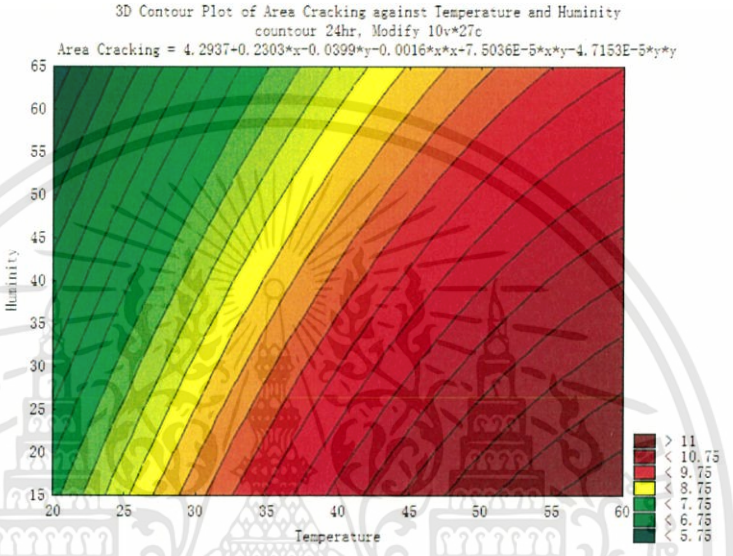


รูปที่ 4.8.1.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.4) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

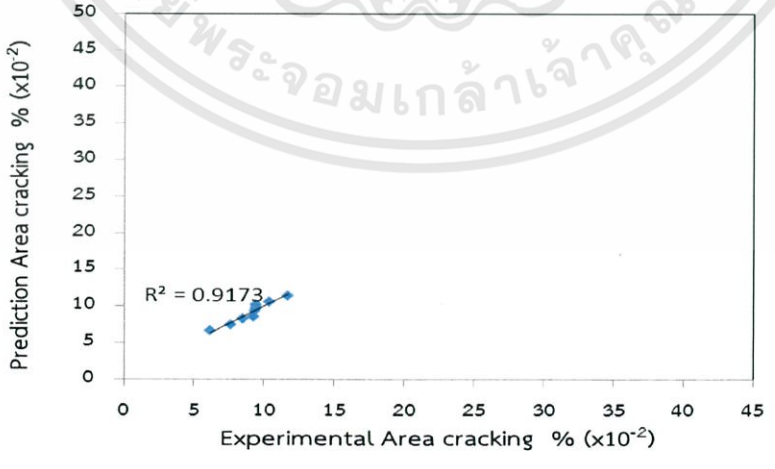
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.2 ผลการทดลองอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ระยะเวลา early age time ซึ่งเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที

$$\text{Early age total Cracking \%}(*10^{-2}) = 4.2937-0.2303(\text{Temperature})-0.0399(\text{Huminity}) -0.0016(\text{Temperature})^2+7.5036E\text{-}5(\text{Temperature})(\text{Huminity})-4.7153E\text{-}5(\text{Huminity})^2 \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.8.2.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ต้าร์ โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ (4.5)

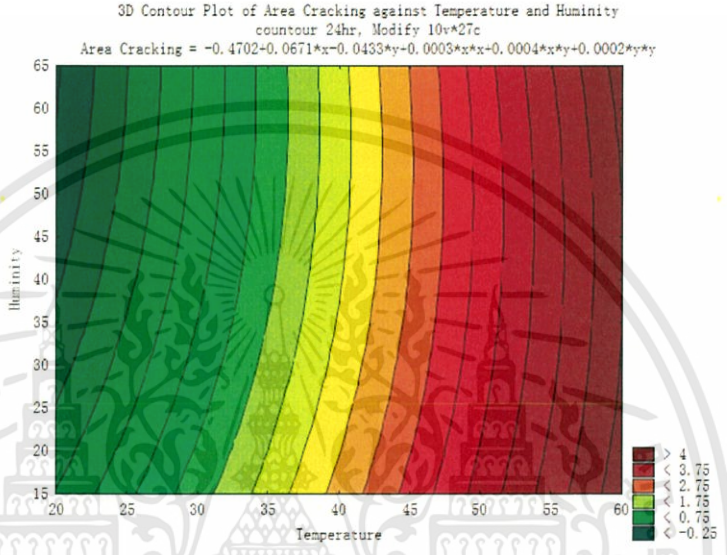


รูปที่ 4.8.2.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที จากสมการ (4.5) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

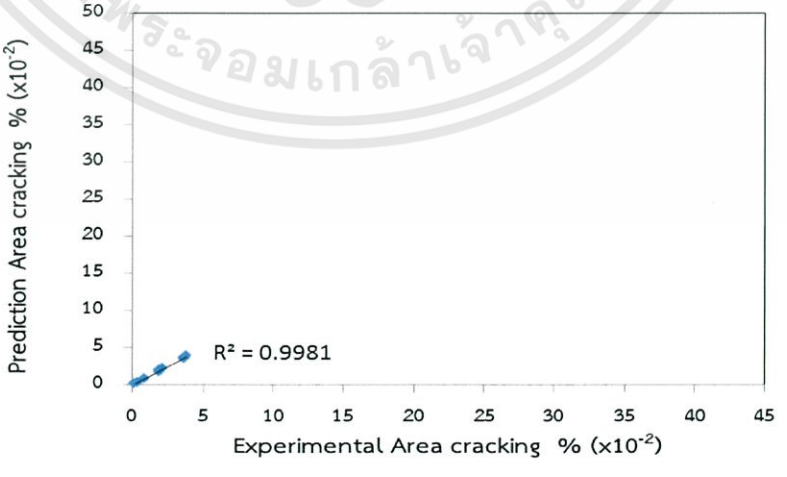
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.3 ผลการทดลองอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ระยะเวลา early age time ซึ่งเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที

$$\text{Early age total Cracking \%}(*10^{-2}) = -0.4702+0.0671(\text{Temperature})-0.0433(\text{Huminity}) +0.0003(\text{Temperature})^2+0.0004\ (\text{Temperature})(\text{Huminity})+0.0002(\text{Huminity})^2 \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.8.3.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้นของมอร์ต้าร์ โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที จากสมการ (4.6)

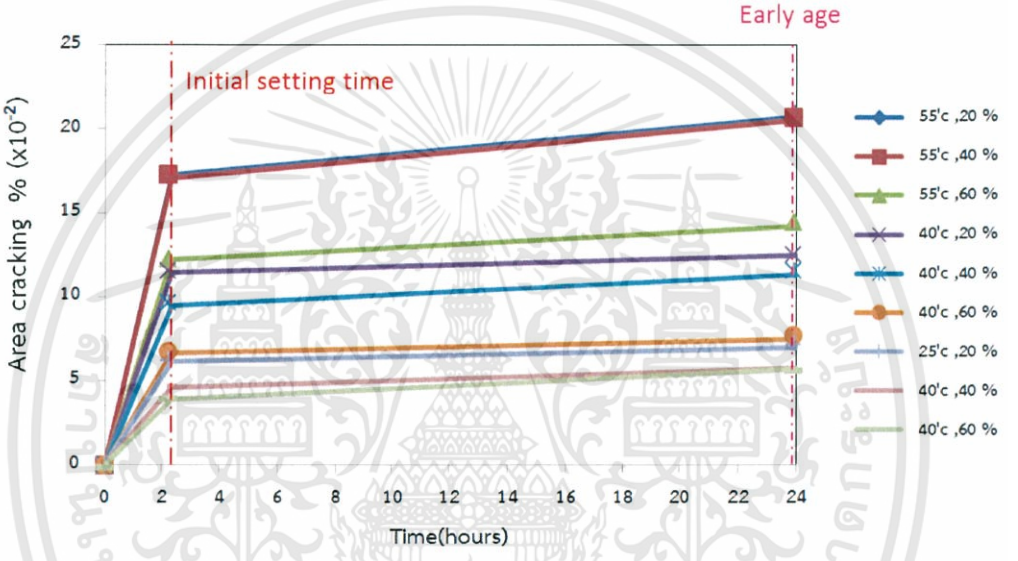


รูปที่ 4.8.3.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์พื้นที่รอยแตกในช่วงอายุเริ่มต้นที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที จากสมการ (4.5) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

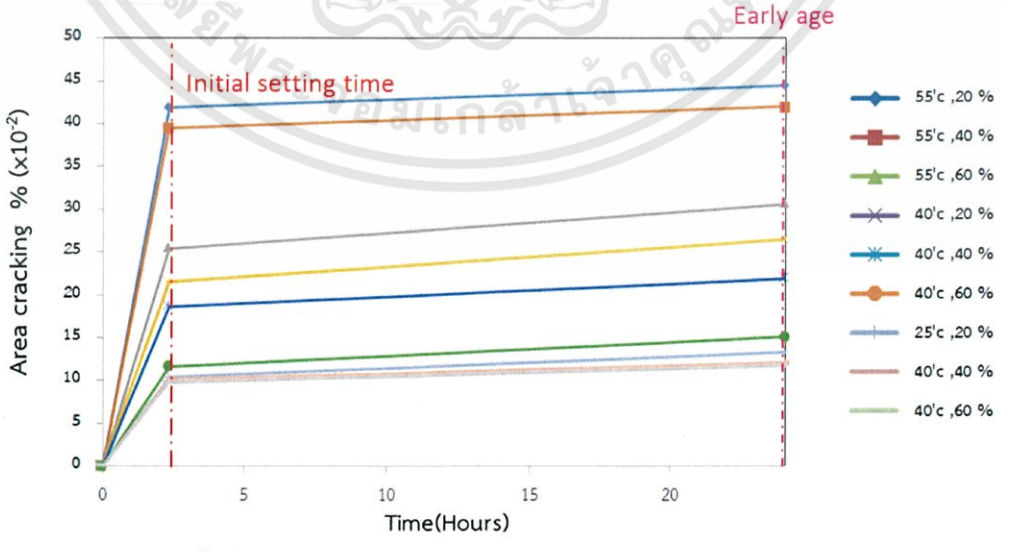
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 เปรียบเทียบการแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น โดยใช้แบบทดสอบ ASTM C1579-06 และแบบทดลอง Modify ASTM C1579-06

จากรูปที่ 4.9.1 - 4.9.2 แสดงว่าการแตกร้าวที่ผิวหน้าของการทดลอง Modify ASTM C1579-06 เป็น 2 เท่าของการแตกร้าวที่ผิวหน้าของแบบทดลอง ASTM C1579-06 ดังนั้นถ้าหากทำการทดลองโดยใช้แบบชนิดใดชนิดหนึ่งแล้วสามารถหาการแตกร้าวโดยใช้แบบทดลองอีกแบบหนึ่งได้ แต่การแตกร้าวโดยใช้ Modify ASTM C1579-06จะค่อยข้างเห็นรอยแตกได้ชัดเจนมากซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาพื้นที่รอยแตกร้าวได้



รูปที่ 4.9.1 แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลองตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

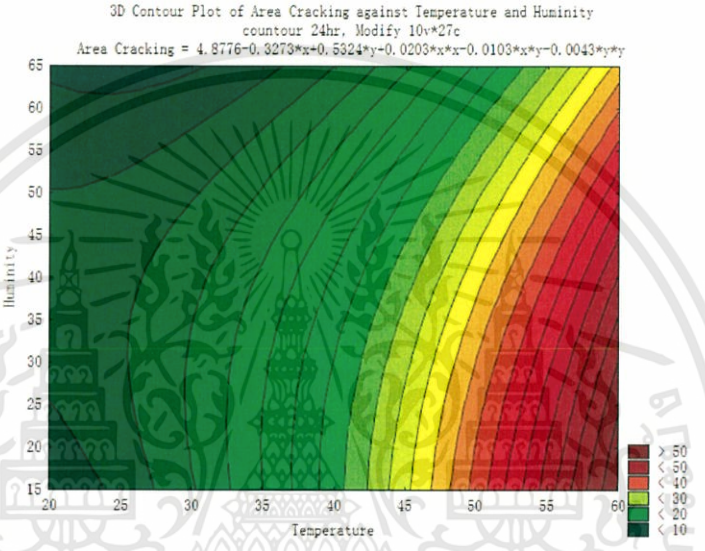


รูปที่ 4.9.2 แสดงผลของพื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

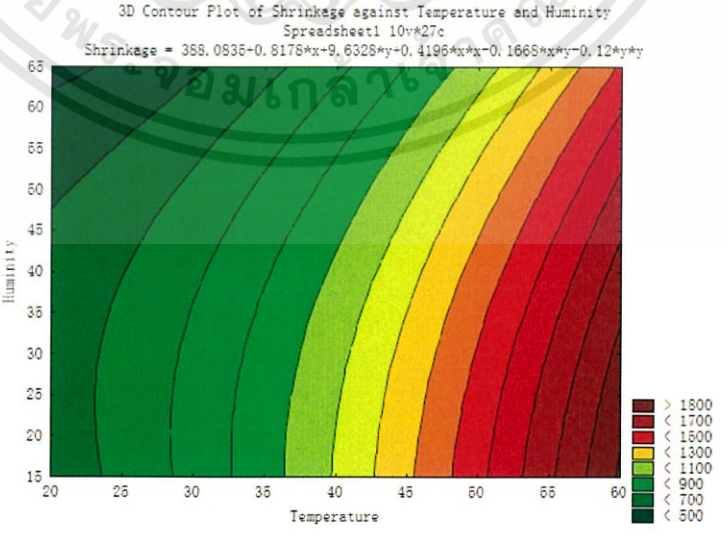
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 เปรียบเทียบอัตราการแตกร้าวที่ผิวหน้าและการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น

จากรูปที่ 4.10.1 - 4.10.2 แสดงให้เห็นว่าอัตราการแตกร้าวและการหดตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือ อัตราการหดตัวและการแตกร้าวมีค่ามากขึ้นจากอุณหภูมิต่ำ,ความชื้นสัมพัทธ์สูง ไปหาอุณหภูมิสูง,ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ



รูปที่ 4.10.1 กราฟแสดงพื้นที่การแตกร้าวในช่วงอายุเริ่มต้น ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที



รูปที่ 4.10.2 กราฟแสดงการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น ที่ความเร็วลม 4 เมตร/วินาที

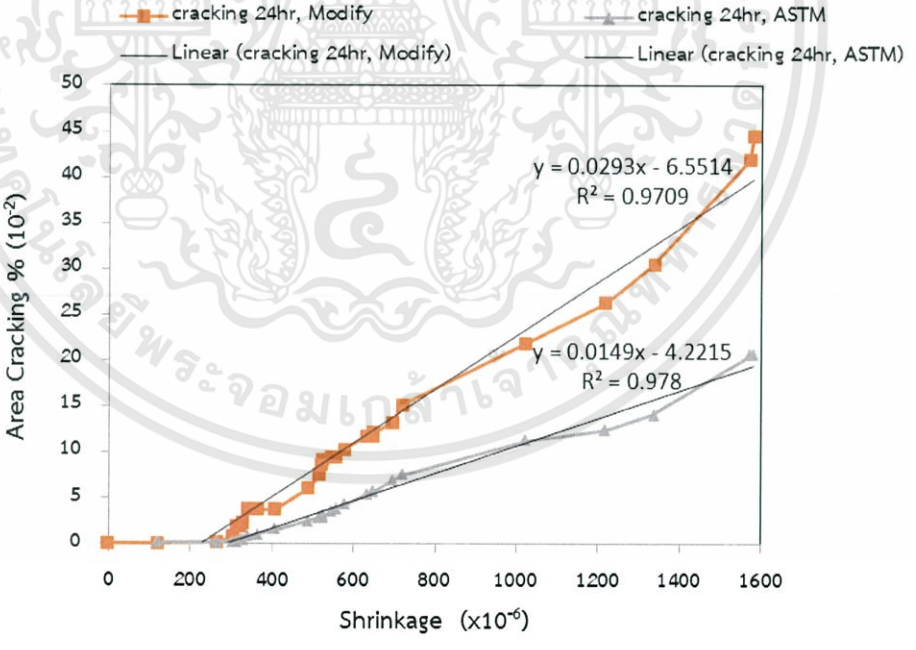
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหดตัวและการแตกร้าวที่ผิวหน้าของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น

รูปที่ 4.11.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระว่างการหดตัวรวม (Total Shrinkage) และ พื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking)ของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 พบว่าเมื่ออัตราการหดตัวรวมมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่แตกร้าวรวมมีค่าสูงขึ้นด้วยซึ่งส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมดังนี้

$$\text{Velocity } \alpha \text{ Temperature } \alpha \frac{1}{Huminity} \alpha \text{ Total Shrinkage } \alpha \text{ Total area Cracking} \quad (4.7)$$

และลำดับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการหดตัวรวมและพื้นที่รอยแตกร้าวรวม Velocity > Temperature > Huminity จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อการหดตัวรวมเท่ากันพื้นที่รวมของการแตกร้าวสำหรับการทดลองโดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06 จะมีค่า 1.5- 2 เท่าของการทดลองโดยใช้แบบทดลอง ASTM C1579-06



รูปที่ 4.11.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระว่างการหดตัวรวม (Total Shrinkage) และ พื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) โดยใช้แบบทดลอง Modify ASTM C1579-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและพื้นที่รอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้นรวมทั้งคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องได้แก่ อัตราการไหล , กำลังรับแรงอัด, ระยะเวลาการก่อตัว และ อัตราการเยิ้มน้ำ โดยเน้นในเรื่องของการหดตัวรวม (Early age Total Shrinkage) และพื้นที่รวมของการแตกร้าว (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมที่จำลองขึ้นที่แตกต่างกันโดยจำลองให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับลักษณะสภาพแวดล้อมในประเทศ รวมถึงสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงในภูมิภาคอื่นๆของโลกบ้างเป็นบางกรณี การทดสอบหาค่าการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นยังไม่มีมาตรฐานทำให้เกิดความผิดพลาดอย่างมาก ซึ่งอาจเป็นเพราะการทดสอบที่ยากของมอร์ต้าร์ที่ยังไม่แข็งตัวรวมถึงการวิจัยด้านนี้ในประเทศยังมีไม่มาก

งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการหดตัวในสภาวะแวดล้อมต่างๆที่มีความสัมพันธ์กับการแตกร้าว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการวัดการหดตัวรวมถึงการวัดพื้นที่รอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น รวมทั้งการเลือกสภาวะแวดล้อมในการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการทดลองถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้น (Early age) จะสูงขึ้น และเกิดการแตกร้าวที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น

2. จากการทดลองถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการหดตัวและการแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ต้าร์อัตราการหดตัวและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวของซีเมนต์มอร์ต้าร์จะลดลงโดยแปรผกผันกับความชื้นที่สูงขึ้น

3. จากการทดลองความเร็วลมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการหดตัวและการแตกร้าวเป็นอย่างมากโดยความเร็วลมที่ 4 เมตร/วินาที จะมีผลทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าความเร็วลมที่ 2 เมตร/วินาที ประมาณ 1.5-2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นและการแตกร้าวที่ผิวหน้า จากมากไปน้อย คือ ความเร็วลม > อุณหภูมิ > ความชื้นสัมพัทธ์

5. จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นแปรผันตรงกับการแตกร้าวที่ผิวหน้าและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นค่อนข้างสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นพบว่าการใช้ LVDT ในการทดลองมีข้อผิดพลาดอยู่บ้างคือจะมีแรงดันทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนในการวัดมอร์ต้าร์ในสภาวะพลาสติกไม่คงที่แต่หลังจากระยะการก่อตัวเริ่มต้นสามารถใช้ LVDT วัดค่าได้

2. พัฒนาวิธีการวัดการหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ไม่รบกวนตัวอย่างรวมทั้งศึกษาคุณสมบัติ เช่น การวัดอุณหภูมิในแท่งตัวอย่าง การหดตัวในแนวดิ่ง อัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Hammer ,T.A. " *Deformations strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases*" Phd. Thesis 2007

[2] ACI 305R-99 "*Hot Weather Concrete*" , American Concrete Institute, Farmington Hills ,Ml , 2006

[3] Sheales , C.A. ; and Hover ,K.C ," *Influence of Mix Proportions and construction Operating on Plastic shrinkage cracking in Thin Slabs*" ACI Materials Journal,V.85 No.6 ,Nov-Dec. 1988, pp. 495-504.

[4] Neville, A.M . Properties of Concrete, 3rd Edition London 1981.
ASTM C1579-06 (06 " Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete ")

[5] *เอกสารประกอบการเรียน คอนกรีตเทคโนโลยี (CONCRETE TECHNOLOGY).*กรุงเทพฯ : สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวะกรรมศาสตร์ สจล.

[6] รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ ไชยชนะ.(2542).*ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี.*กรุงเทพฯ:บริษัท เอส. เอส.บุ๊คเฮ้าส์ จำกัด.

[7] รศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ,รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล(2549).*ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคนกรีต.*ครั้งที่ 3.กรุงเทพฯ:ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างข้อมูลพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[8] นายสารพล ตรีสุวรรณ.(2553).*ผลกระทบของวัสดุอนินทรีย์ผสมเพิ่มต่อการหดตัวของมอร์ต้าร์สด* วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[9] นายธนาคม ติวานนท์,นายธีรพงศ์ รูปโอ.(2553).*การศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่มีผลต่อการหดตัวของซีเมนต์มอร์ต้าร์ในช่วงอายุเริ่มต้น.*วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบของเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวรวมโดยมีอิทธิพลจาก สภาพแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 เปอร์เซ็นต์พื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Earlyage) ของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง ASTM C1579-06

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ			%พื้นที่รอยแตก ($x10^{-2}$)	
ความเร็วลม	อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	2hr	24hr
4	55	20	17.2475	20.7393
4	55	40	17.0750	20.5320
4	55	60	12.2376	14.1968
4	40	20	11.4826	12.4636
4	40	40	9.4797	11.3096
4	40	60	6.6372	7.4903
4	25	20	6.1232	6.9764
4	25	40	4.5968	5.7517
4	25	60	3.8891	5.7050
2	55	20	3.3691	5.4569
2	55	40	2.8529	4.2920
2	55	60	2.7102	3.8321
2	40	20	2.6626	3.5614
2	40	40	2.6412	3.1131
2	40	60	2.2972	2.9836
2	25	20	2.1823	2.9687
2	25	40	2.0445	2.9553
2	25	60	1.4219	2.5789
0	55	20	0.8315	1.6137
0	55	40	0.7065	1.0984
0	55	60	0.3889	0.7925
0	40	20	0.3055	0.3146
0	40	40	0.2576	0.2827
0	40	60	0.2538	0.2799
0	25	20	0.2525	0.2783
0	25	40	0.2121	0.2484
0	25	60	0.0652	0.1800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 เปอร์เซ็นต์พื้นที่แตกร้าวรวม (Total area Cracking) ในช่วงอายุเริ่มต้น (Earlyage)ที่สภาพแวดล้อมต่างๆของมอร์ต้าร์โดยใช้แบบทดลอง ASTM C1579-06

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ			%พื้นที่รอยแตก ($x10^{-2}$)	
ความเร็วลม	อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	2hr	24hr
4	55	20	41.9513	44.4919
4	55	40	39.5140	41.9983
4	55	60	25.4365	30.5822
4	40	20	21.5598	26.4132
4	40	40	18.6192	21.8539
4	40	60	11.6700	15.1298
4	25	20	10.4350	13.2998
4	25	40	10.1386	12.1321
4	25	60	9.8224	11.7399
2	55	20	8.4308	11.7330
2	55	40	6.4309	10.3773
2	55	60	5.6262	9.4216
2	40	20	5.5720	9.4201
2	40	40	4.8508	9.3304
2	40	60	4.1470	9.2521
2	25	20	4.0769	8.5373
2	25	40	3.6692	7.5989
2	25	60	3.2895	6.1358
0	55	20	2.1001	3.8027
0	55	40	2.0216	3.6801
0	55	60	1.2015	3.6635
0	40	20	0.7599	2.2090
0	40	40	0.5049	1.9605
0	40	60	0.4822	1.9605
0	25	20	0.4814	0.8485
0	25	40	0.2702	0.4298
0	25	60	0.1911	0.2484

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบการหดตัวโดยมีอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบการหดตัวที่สภาพแวดล้อมต่างๆ

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ			ระยะการหดตัว ($x10^{-6}$)
ความเร็วลม	อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	
4	55	20	1582.526
4	55	40	1572.318
4	55	60	1335.503
4	40	20	1220.501
4	40	40	1021.443
4	40	60	718.0233
4	25	20	695.9654
4	25	40	651.0116
4	25	60	649.0593
2	55	20	634.0058
2	55	40	578.9675
2	55	60	557.8871
2	40	20	546.5937
2	40	40	527.8783
2	40	60	527.6163
2	25	20	522.9468
2	25	40	518.8133
2	25	60	489.9388
0	55	20	409.0778
0	55	40	366.0532
0	55	60	343.9768
0	40	20	326.3623
0	40	40	321.9724
0	40	60	316.6667
0	25	20	307.0538
0	25	40	267.8442
0	25	60	119.0822

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างการหดตัวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างการหดตัวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

ความเร็วลมสูง(เมตร/วินาที)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (°c)	ผลต่าง/ณ ห้องควบคุม (%)
4	60	55	3.35
		40	1.34
		25	1.11
	40	55	4.12
		40	2.33
		25	1.12
	20	55	4.15
		40	2.98
		25	1.27
2	60	55	0.82
		40	0.72
		25	0.6
	40	55	0.89
		40	0.72
		25	0.69
	20	55	1.07
		40	0.78
		25	0.7
0	60	55	0.12
		40	0.03
		25	น้อยกว่า 0.610
	40	55	0.19
		40	0.049
		25	น้อยกว่า 0.13
	20	55	0.33
		40	0.06
		25	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างการหดตัวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

ความเร็วลม (เมตร/วินาที)	อุณหภูมิ (๐c)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ผลต่าง/ณ ห้องควบคุม (%)
4	55	60	3.35
		40	4.12
		20	4.15
	40	60	1.34
		40	2.33
		20	2.98
	25	60	1.11
		40	1.12
		20	1.27
2	55	60	0.82
		40	0.89
		20	1.07
	40	60	0.72
		40	0.72
		20	0.78
	25	60	0.6
		40	0.72
		20	0.78
0	55	60	0.12
		40	0.19
		20	0.33
	40	60	0.03
		40	0.05
		20	0.06
	25	60	น้อยกว่า 0.61
		40	น้อยกว่า 0.12
		20	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 อิทธิพลของความเร็วลมที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างการหดตัวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

อุณหภูมิ(°c)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลมสูง(เมตร/วินาที)	ผลต่าง/ณ ห้องควบคุม (%)
55	60	4	3.35
		2	0.82
		0	0.12
	40	4	4.12
		2	0.89
		0	0.19
	20	4	4.15
		2	1.07
		0	0.33
40	60	4	1.34
		2	0.72
		0	0.031
	40	4	2.33
		2	0.72
		0	0.14
	20	4	2.98
		2	0.28
		0	0.06
25	60	4	1.11
		2	0.6
		0	น้อยกว่า 0.61
	40	4	1.12
		2	0.69
		0	น้อยกว่า 0.13
	20	4	1.27
		2	0.7
		0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างของรอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆ กับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างของรอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

ความเร็วลมสูง(เมตร/วินาที)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (°c)	ผลต่าง/ณ ห้องควบคุม (%)
4	60	55	73
		40	44
		25	24
	40	55	73
		40	40
		25	19
	20	55	50
		40	26
		25	19
2	60	55	19
		40	12
		25	9
	40	55	14
		40	10
		25	9
	20	55	13
		40	10
		25	8
0	60	55	5
		40	0.13
		25	0
	40	55	3
		40	0.02
		25	0.1
	20	55	2
		40	0.005
		25	0.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างของรอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

ความเร็วลม(เมตร/วินาที)	อุณหภูมิ(°c)	ความชื้นสัมพัทธ์(%)	ผลต่าง/ณ ห้องควบคุม (%)
4	55	20	73.51
		40	72.76
		60	50.00
	40	20	43.78
		40	39.63
		60	25.91
	25	20	24.06
		40	19.66
		60	19.50
2	55	20	18.60
		40	14.42
		60	12.77
	40	20	11.80
		40	10.18
		60	9.72
	25	20	9.67
		40	9.62
		60	8.27
0	55	20	4.80
		40	2.95
		60	1.85
	40	20	0.13
		40	0.02
		60	0.01
	25	20	0.00
		40	0.11
		60	0.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 อิทธิพลของความเร็วลมที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความแตกต่างของรอยแตกร้าวของมอร์ต้าร์ระหว่างที่สภาพแวดล้อมต่างๆกับสภาพแวดล้อม ณ ห้องควบคุม

อุณหภูมิ(°c)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลมสูง(เมตร/วินาที)	ผลต่าง/ณ ห้องควบคุม (%)
55	60	4	50.00
		2	12.77
		0	1.85
	40	4	72.76
		2	14.42
		0	2.95
	20	4	73.51
		2	18.60
		0	4.80
40	60	4	25.91
		2	9.72
		0	0.01
	40	4	39.63
		2	10.18
		0	0.02
	20	4	43.78
		2	11.80
		0	0.13
25	60	4	19.50
		2	8.27
		0	0.35
	40	4	19.66
		2	9.62
		0	0.11
	20	4	24.06
		2	9.67
		0	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้