



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการหดตัวแบบ  
ออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

โดย ดร.สนธยา ทองอรุณศรี

มิถุนายน 2557

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายการหดตัวแบบออโตจีนัสและ  
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต  
(Development of a model for predicting the autogenous shrinkage and  
drying shrinkage of concrete)

ผู้วิจัย

ดร.สนธยา ทองอรุณศรี    มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยครั้งนี้ภายใต้ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยจนโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ในขณะที่ดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เป็นผู้ร่วมโครงการของโครงการวิจัยเรื่อง การจัดทำมาตรฐานสำหรับการป้องกันการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งสนับสนุนทุนวิจัยโดย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งมีส่วนหนึ่งของการวิจัยเป็นการทดสอบเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีต ดังนั้นเมื่อรวบรวมผลการวิจัยจากทั้งสองโครงการวิจัย จึงทำให้โครงการวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการก่อสร้างของประเทศ ไทย และช่วยลดปัญหาด้านการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของคอนกรีตลงได้

ดร.สนธยา ทองอรุณศรี

## บทคัดย่อ

การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าส่วนหนึ่งเกิดจากการหดตัวของคอนกรีต เพื่อแก้ไขปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวนี้ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างที่คำนึงถึงการหดตัวของคอนกรีต ดังนั้นการทราบค่าการหดตัวของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ค่าการหดตัวนอกจากจะใช้ในการคำนวณระยะห่างของรอยต่อในโครงสร้าง เพื่อควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวที่จะเกิดขึ้น ยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถประเมินโอกาสเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวในคอนกรีตได้ แม้ว่าปัจจุบันมีแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตจากต่างประเทศจำนวนมาก แต่จากผลการวิจัยนี้พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองของต่างประเทศกับผลการทดลองการหดตัวในประเทศไทย พบว่าแบบจำลองของต่างประเทศมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง เมื่อนำมาใช้กับคอนกรีตที่ใช้วัสดุและอยู่ในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ส่วนแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้หลักการ Water to Binder Ratio Base สามารถคำนวณการหดตัวแบบบอโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตแยกกัน แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม แบบจำลองนี้ครอบคลุมปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อายุของคอนกรีต ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณเพสต์ อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตร ขนาดโตสุดของมวลรวม ชนิดของวัสดุประสาน ปริมาณของเถ้าลอยและผงหินปูน ปริมาณซิลเฟอร์ออกไซด์ในเถ้าลอย อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว สภาพแวดล้อม และสภาพการบ่ม การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำโดยการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบ จากการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณการหดตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศ และมีความถูกต้องมากกว่าการใช้แบบจำลองจากต่างประเทศ นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้คำนวณการหดตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงหินปูนได้

**คำสำคัญ :** การแตกร้าว, การหดตัวแบบบอโตจีนิส, การหดตัวแบบแห้ง, เถ้าลอย, ผงหินปูน

## **Abstract**

Cracking in reinforced concrete structures sometime is caused by shrinkage of concrete. In order to solve the shrinkage cracking problem, it is necessary to consider shrinkage of concrete in design stage. So, the calculation of shrinkage strain of concrete is very important to control shrinkage cracking in concrete structures. The shrinkage strain is necessary for calculation of joint spacing for structures in order to control the shrinkage cracking. Moreover, the estimation of shrinkage strain will enable the designer to estimate the possibility of shrinkage cracking in reinforced concrete structures. Many standard codes proposed models for shrinkage prediction but the accuracy of those models is not good especially with materials and environment in Thailand. This research proposed a shrinkage model using water to binder ratio base concept. The proposed model can be used to estimate autogenous shrinkage and drying shrinkage separately, and then the summation of the two shrinkages is the total shrinkage. The parameters taken into account in this model are concrete age, type of cement, water-binder ratio, paste volume, aggregate content, type of binding materials, fly ash and limestone powder content,  $\text{SO}_3$  content in fly ash, volume to exposed surface area ratio, conditions of environment and curing conditions. The validity of the proposed models was verified by experimental data. The verification indicated that the proposed shrinkage model was satisfactory for predicting shrinkage with higher accuracy than many shrinkage models from other standard codes when used to predict test results of shrinkage in Thailand. Moreover, the proposed model can be used to predict shrinkage of fly ash concrete and limestone powder concrete.

**Key word:** Cracking, Autogenous shrinkage, Drying shrinkage, Fly ash, Limestone powder

## สารบัญ

|                                                                 | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ                                                 | ii   |
| บทคัดย่อ                                                        | iii  |
| Abstract                                                        | iv   |
| สารบัญ                                                          | v    |
| สารบัญรูป                                                       | vii  |
| สารบัญตาราง                                                     | xv   |
| สัญลักษณ์และคำย่อ                                               | xvii |
| <br>                                                            |      |
| บทที่ 1 บทนำ                                                    |      |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ                                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ                                      | 5    |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ                                            | 5    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                   | 6    |
| <br>                                                            |      |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                           |      |
| 2.1 การแตกראวและกลไกการเกิดการแตกראวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต | 8    |
| 2.2 การหดตัวของคอนกรีต                                          | 10   |
| 2.3 การทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง                      | 14   |
| 2.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลองทำนายการหดตัว    | 29   |
| <br>                                                            |      |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย                                      |      |
| 3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย                                  | 34   |
| 3.2 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต            | 34   |
| 3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย                             | 41   |
| 3.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย                                  | 51   |
| 3.5 วิธีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต                              | 57   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                             | หน้า |
|-------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัย                                          |      |
| 4.1 คุณสมบัติของวัสดุประสาน                                 | 69   |
| 4.2 การยู่บตัวของคอนกรีต                                    | 79   |
| 4.3 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต                                | 85   |
| 4.4 การหดตัวของคอนกรีต                                      | 91   |
| บทที่ 5 แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต                     |      |
| 5.1 ประเด็นที่พิจารณาในการสร้างแบบจำลอง                     | 127  |
| 5.2 หลักการในการสร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต        | 129  |
| 5.3 แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต              | 130  |
| 5.4 แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต                  | 132  |
| 5.5 แบบจำลองทำนายการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต                   | 136  |
| 5.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต | 138  |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย                                      |      |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย                                          | 157  |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ                                              | 158  |
| บรรณานุกรม                                                  | 159  |

## สารบัญรูป

|                                                                                                      | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 1.1 การแตกร้าวของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต                           | 2    |
| รูปที่ 1.2 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต                           | 3    |
| รูปที่ 1.3 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต                               | 3    |
| รูปที่ 1.4 การแตกร้าวของปูนฉาบ เนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง                                              | 4    |
| รูปที่ 1.5 ตัวอย่างแผนผังแสดงการศึกษาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต                           | 5    |
| รูปที่ 2.1 การเกิดหน่วยแรงดึง เนื่องจากการยึดรั้งภายใน                                               | 9    |
| รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของกำแพงคอนกรีต เนื่องจากการยึดรั้งภายนอก                                       | 9    |
| รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง ACI 209                                          | 31   |
| รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง CEB-FIP 90                                       | 31   |
| รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง Bazant B3                                        | 32   |
| รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง Gardner-Lockman                                  | 32   |
| รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง JSCE 2002                                        | 33   |
| รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง Eurocode 2                                       | 33   |
| รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตงานวิจัย                                               | 37   |
| รูปที่ 3.2 ปัจจัยบางส่วนที่ศึกษาการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% | 38   |
| รูปที่ 3.3 ปัจจัยบางส่วนที่ศึกษาการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% | 39   |
| รูปที่ 3.4 ปัจจัยบางส่วนที่ศึกษาการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% | 40   |
| รูปที่ 3.5 แก้วลอย                                                                                   | 42   |
| รูปที่ 3.6 ผงหินปูน                                                                                  | 42   |
| รูปที่ 3.7 เครื่องวัดการยึดหดตัวของคอนกรีต                                                           | 47   |
| รูปที่ 3.8 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.                                                       | 48   |
| รูปที่ 3.9 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x40.0 ซม.                                                       | 48   |
| รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีตแบบราบขนาด 56 ลิตร                                                      | 49   |
| รูปที่ 3.11 ชุดทดสอบปริมาณอากาศในคอนกรีตสด                                                           | 49   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต                                                  | 50   |
| รูปที่ 3.13 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวราบ (LVDT)                                         | 50   |
| รูปที่ 3.14 เครื่องบันทึกและแปลงสัญญาณ (Data Logger)                                               | 51   |
| รูปที่ 3.15 กระบวนการเตรียมตัวอย่างของการวัดค่าการหดตัวแบบอัตโนมัติ<br>และการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต | 59   |
| รูปที่ 3.16 การเตรียมถุงพลาสติก                                                                    | 61   |
| รูปที่ 3.17 การใส่ถุงพลาสติกในแบบหล่อ                                                              | 61   |
| รูปที่ 3.18 การติดตั้งน็อต                                                                         | 62   |
| รูปที่ 3.19 การวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต                                                             | 63   |
| รูปที่ 3.20 ถอดแบบหล่อการหดตัว                                                                     | 63   |
| รูปที่ 3.21 การวัดการหดตัวช่วงอายุต้นของคอนกรีต                                                    | 64   |
| รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทดสอบการหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรก                                            | 65   |
| รูปที่ 3.23 การห่อหุ้มก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบอัตโนมัติ                                              | 66   |
| รูปที่ 3.24 การวัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบอัตโนมัติ                                                  | 67   |
| รูปที่ 3.25 ชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียความชื้นของก้อนตัวอย่าง                                      | 67   |
| รูปที่ 3.26 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวแบบอัตโนมัติ                                | 68   |
| รูปที่ 3.27 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวแบบอัตโนมัติ                                | 68   |
| รูปที่ 4.1 ภาพกำลังขยายสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)                                 | 72   |
| รูปที่ 4.2 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย ชนิด FAH                                                      | 73   |
| รูปที่ 4.3 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย ชนิด FAB                                                      | 74   |
| รูปที่ 4.4 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย ชนิด FAHM                                                     | 75   |
| รูปที่ 4.5 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย ชนิด FABM                                                     | 76   |
| รูปที่ 4.6 ภาพกำลังขยายสูงของเถ้าลอย ชนิด FAMM                                                     | 77   |
| รูปที่ 4.7 ภาพกำลังขยายสูงของผงหินปูน (LP)                                                         | 78   |
| รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                | 80   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )                             | 81 |
| รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ และ $w/b = 0.55$ )                                                | 82 |
| รูปที่ 4.11 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิดต่างๆ ต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ $w/b = 0.55$ และ $FA = 30\%$ )         | 83 |
| รูปที่ 4.12 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิดต่างๆ ต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ $w/b = 0.55$ และ $FA = 50\%$ )         | 83 |
| รูปที่ 4.13 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.55$ และ $LP = 10\%$ )                | 84 |
| รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                            | 86 |
| รูปที่ 4.15 ผลของสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.2$ และ $w/b = 0.35$ )                     | 87 |
| รูปที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )                    | 88 |
| รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย CaO สูง ต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ และ $w/b = 0.55$ )        | 89 |
| รูปที่ 4.18 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิดต่างๆ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ $w/b = 0.55$ และ $FA = 30\%$ ) | 89 |
| รูปที่ 4.19 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.35$ และ $LP = 10\%$ )        | 90 |
| รูปที่ 4.20 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                         | 92 |
| รูปที่ 4.21 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน ( $\gamma = 1.4$ )      | 92 |
| รูปที่ 4.22 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                               | 93 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                                                                                  | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.23 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับการหดตัวโดยรวม<br>ของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน ( $\gamma = 1.4$ )                 | 94   |
| รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                                             | 94   |
| รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                                         | 95   |
| รูปที่ 4.26 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.1$ และ $w/b = 0.55$ )                       | 96   |
| รูปที่ 4.27 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.2$ และ $w/b = 0.35$ )                       | 96   |
| รูปที่ 4.28 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.1$ และ $w/b = 0.55$ )                             | 97   |
| รูปที่ 4.29 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.2$ และ $w/b = 0.35$ )                             | 98   |
| รูปที่ 4.30 ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการหดตัวแบบ<br>ออโตจีเนสของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )                            | 99   |
| รูปที่ 4.31 ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการหดตัวแบบ<br>ออโตจีเนสของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ และ แก้วลอยแม่เมาะร้อยละ 30) | 100  |
| รูปที่ 4.32 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวม<br>กับการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน          | 100  |
| รูปที่ 4.33 ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นต่อการหดตัว<br>โดยรวมของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )                        | 101  |
| รูปที่ 4.34 ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการหดตัวโดยรวม<br>ของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ และ แก้วลอยร้อยละ 30)              | 102  |
| รูปที่ 4.35 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวม<br>กับการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน                | 102  |
| รูปที่ 4.36 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วลอยที่มี CaO สูง ต่อการหดตัวแบบ<br>ออโตจีเนสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ และ $w/b = 0.55$ )     | 104  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                                                                            | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.37 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง<br>กับการหดตัวแบบบอโตจีนิกของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน | 104  |
| รูปที่ 4.38 การหดตัวแบบบอโตจีนิกของคอนกรีตที่ในช่วงอายุ 14 วันแรก                                                                          | 105  |
| รูปที่ 4.39 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง ต่อการหดตัวโดยรวม<br>ของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ และ $w/b = 0.55$ )     | 106  |
| รูปที่ 4.40 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง<br>กับการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน       | 106  |
| รูปที่ 4.41 การขยายตัวของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มในน้ำ 7 วัน                                                                               | 107  |
| รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ และ $w/b = 0.55$ )                                   | 107  |
| รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ และ $w/b = 0.55$ )                               | 108  |
| รูปที่ 4.44 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิกของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.35$ และ $FA = 30\%$ )      | 109  |
| รูปที่ 4.45 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิกของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.35$ และ $FA = 50\%$ )      | 110  |
| รูปที่ 4.46 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิกของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.55$ และ $FA = 30\%$ )      | 110  |
| รูปที่ 4.47 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิกของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.55$ และ $FA = 50\%$ )      | 111  |
| รูปที่ 4.48 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.35$ และ $FA = 30\%$ )            | 112  |
| รูปที่ 4.49 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.35$ และ $FA = 50\%$ )            | 112  |
| รูปที่ 4.50 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.55$ และ $FA = 30\%$ )            | 113  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| รูปที่ 4.51 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.55$ และ $FA = 50\%$ )                               | 113 |
| รูปที่ 4.52 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.35$ และ $LP (5 \mu) = 10\%$ )                 | 114 |
| รูปที่ 4.53 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต<br>( $\gamma = 1.4$ , $w/b = 0.55$ และ $LP(5\mu) = 10\%$ $28^{\circ}C$ $50\%RH$ ) | 115 |
| รูปที่ 4.54 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต                                                                                   | 116 |
| รูปที่ 4.55 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                                                               | 117 |
| รูปที่ 4.56 ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                                                                  | 118 |
| รูปที่ 4.57 ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )                                                                                       | 119 |
| รูปที่ 4.58 ผลของอุณหภูมิการหดโดยรวมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ( $\gamma = 1.4$ )                                                                                   | 120 |
| รูปที่ 4.59 ผลของขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบต่อการหดแบบอโตจีนิสของคอนกรีต                                                                                          | 121 |
| รูปที่ 4.60 ผลของขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบต่อการหดโดยรวมของคอนกรีต                                                                                               | 122 |
| รูปที่ 4.61 ผลของขนาดก้อนตัวอย่างต่อการหดโดยรวมของคอนกรีต                                                                                                     | 123 |
| รูปที่ 4.62 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสในช่วง<br>48 ชั่วโมงแรก (อุณหภูมิ $28^{\circ}C$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50\%$ $\gamma = 1.4$ )  | 124 |
| รูปที่ 4.63 ผลของเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก<br>(อุณหภูมิ $28^{\circ}C$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50\%$ $\gamma = 1.4$ , $w/b=0.35$ )        | 125 |
| รูปที่ 4.64 ผลของเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก<br>(อุณหภูมิ $28^{\circ}C$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50\%$ $\gamma = 1.4$ , $w/b=0.55$ )        | 125 |
| รูปที่ 4.65 ผลของหินปูนต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก<br>(อุณหภูมิ $28^{\circ}C$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50\%$ $\gamma = 1.4$ , $w/b=0.55$ )         | 126 |
| รูปที่ 5.1 ลักษณะการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำหรือกระสอบที่เปียกตลอดเวลา<br>และมีระยะเวลาการบ่ม $t_0$                                                 | 137 |
| รูปที่ 5.2 ลักษณะการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่บ่มด้วยพลาสติก และมีระยะเวลาการบ่ม $t_0$                                                                          | 138 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                                                                 | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 5.3 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) แตกต่างกัน                 | 139  |
| รูปที่ 5.4 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ( $n_a$ ) แตกต่างกัน     | 140  |
| รูปที่ 5.5 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม                                         | 140  |
| รูปที่ 5.6 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม                                         | 141  |
| รูปที่ 5.7 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ $\%SO_3$ แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 | 141  |
| รูปที่ 5.8 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ $\%SO_3$ แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 | 142  |
| รูปที่ 5.9 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน                        | 142  |
| รูปที่ 5.10 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนเป็นส่วนผสม                                       | 143  |
| รูปที่ 5.11 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตปูนซีเมนต์ต่างชนิด                                              | 143  |
| รูปที่ 5.12 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบจาก Lim and Wee, 2000                                                  | 144  |
| รูปที่ 5.13 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบจาก Termkhajonkit et al., 2000                                         | 145  |
| รูปที่ 5.14 การหัดตัวแบบบอโตจีนิสจากแบบจำลองและผลการทดสอบจาก Lee, 2000                                                          | 146  |
| รูปที่ 5.16 การหัดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.75 – 0.80                     | 148  |
| รูปที่ 5.17 การหัดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ( $n_a$ ) แตกต่างกัน          | 148  |
| รูปที่ 5.18 การหัดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม (w/b=0.35)                                   | 149  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|                                                                                                                                | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 5.19 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม (w/b=0.55)                                   | 149  |
| รูปที่ 5.20 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม (w/b=0.55)                                   | 150  |
| รูปที่ 5.21 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ $\text{SO}_3$ แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 | 151  |
| รูปที่ 5.22 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ $\text{SO}_3$ แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 | 152  |
| รูปที่ 5.23 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน                             | 153  |
| รูปที่ 5.24 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ขนาดโตสุดของมวลรวม (MAS) แตกต่างกัน                             | 154  |
| รูปที่ 5.25 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนเป็นส่วนผสม                                             | 154  |
| รูปที่ 5.26 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Al-Saleh and Al-Zaid, 2006                                               | 155  |
| รูปที่ 5.27 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Bissonnette and Pigeon, 1995                                             | 155  |
| รูปที่ 5.28 การหัตถ์โดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Bissonnette et al., 1999                                                 | 156  |

## สารบัญตาราง

หน้า

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 2.1 แหล่งที่มาของข้อมูล                                                                                                            | 7  |
| ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับระยะเวลาการบ่มด้วยความชื้นของ ACI 209                                                                 | 17 |
| ตารางที่ 2.3 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ ACI 209                                                                                    | 18 |
| ตารางที่ 2.4 สมการสำหรับผลของปริมาณมวลรวมละเอียดของ ACI 209                                                                                 | 18 |
| ตารางที่ 2.5 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ ของ CEB-FIP 90                                                                                | 19 |
| ตารางที่ 2.6 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ของ CEB-FIP 90                                                                              | 19 |
| ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ของ Bazant B3 Model                                                                         | 21 |
| ตารางที่ 2.8 สัมประสิทธิ์สำหรับเงื่อนไขการบ่มของ Bazant B3 Model                                                                            | 21 |
| ตารางที่ 2.9 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ Bazant B3 Model                                                                            | 21 |
| ตารางที่ 2.10 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ Gardner-Lockman Model                                                                     | 22 |
| ตารางที่ 2.11 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ Gardner-Lockman Model                                                                     | 22 |
| ตารางที่ 2.12 ค่าตัวคูณ a และ b สำหรับใช้ในสมการที่ (2.34)                                                                                  | 26 |
| ตารางที่ 2.13 สัมประสิทธิ์สำหรับขนาดของโครงสร้าง ( $h_0$ ) ของ Eurocode 2                                                                   | 28 |
| ตารางที่ 2.14 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ ของ Eurocode 2                                                                            | 28 |
| ตารางที่ 2.15 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการหดตัวจากแบบจำลองต่างๆ                                                                                | 30 |
| ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน                                                                                                | 43 |
| ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน                                                                                               | 44 |
| ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม                                                                                                    | 44 |
| ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารลดน้ำพิเศษ ชนิด RHEOBUILD 1000                                                                  | 45 |
| ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต<br>โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% | 53 |
| ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต<br>โดยการควบคุมอุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% | 54 |
| ตารางที่ 3.7 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต<br>โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% | 54 |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

|                                                                                                                                                         | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 3.8 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต<br>โดยใช้เถ้าลอยต่างชนิด                                         | 55   |
| ตารางที่ 3.9 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต<br>โดยใช้เถ้าลอยต่างชนิด                                         | 56   |
| ตารางที่ 3.10 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาการหดตัวของคอนกรีตในช่วง 48 ชั่วโมง<br>โดยการควบคุมอุณหภูมิ $28^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 50% | 57   |
| ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5                                                                               | 71   |
| ตารางที่ 4.2 การใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของ<br>คอนกรีตที่อายุ 217 วัน                                                | 98   |
| ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์                                                                                                        | 131  |
| ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ ( $K_c$ และ $P$ )                                                                                      | 135  |
| ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดและระยะเวลาการบ่ม                                                                                                    | 135  |

## สัญลักษณ์และคำย่อ

|                       |                                                                             |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_{sh}(t)$ | คือค่าการหดตัวอิสระของคอนกรีตที่อายุ $t$ (ไมครอน)                           |
| $\varepsilon_{shu}$   | คือ ค่าการหดตัวสูงสุด (ไมครอน)                                              |
| $t$                   | คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)                                       |
| $t_c$                 | คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)                              |
| $\gamma_{cp}$         | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับระยะเวลาการบ่มด้วยความชื้น (ดูตารางที่ 2.2)    |
| $\gamma_{RH}$         | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (ดูตารางที่ 2.3)              |
| $\gamma_{vs}$         | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับขนาดของชิ้นส่วน                                |
| $\gamma_s$            | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับค่าการยุบตัว                                   |
| $\gamma_{\psi}$       | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปริมาณมวลรวมละเอียด (ดูตารางที่ 2.4)           |
| $\gamma_c$            | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์                               |
| $\gamma_{\alpha}$     | คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปริมาณอากาศ                                    |
| $\frac{V}{S}$         | คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว (มม.)                                     |
| $s$                   | คือ ค่าการยุบตัว (มม.)                                                      |
| $C$                   | คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. <sup>3</sup> )                                 |
| $\alpha$              | คือ ปริมาณอากาศ (%)                                                         |
| $\beta_{RH}$          | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (ดูตารางที่ 2.5)                     |
| $\beta_{sc}$          | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.6)                    |
| $\varepsilon_s$       | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับกำลังของคอนกรีต                                       |
| $f'_c$                | คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต (MPa)                                 |
| $RH$                  | คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)                                                    |
| $RH_0$                | = 100%                                                                      |
| $h$                   | = $2 \times (\text{พื้นที่หน้าตัด/เส้นรอบรูปของชิ้นส่วนที่สัมผัสกับอากาศ})$ |
| $h_0$                 | = 100 มม.                                                                   |
| $k_s$                 | คือ สัมประสิทธิ์รูปร่างของหน้าตัด (สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า, $k_s=1$ ) |
| $w$                   | คือ ปริมาณน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )                                        |
| $\beta(h)$            | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (ดูตารางที่ 2.10)                    |
| $K$                   | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.11)                   |

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                             |                                                                                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon'_{sh}$         | คือ ค่าการหดตัวสุดท้าย (ไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$ )                                                  |
| $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$ | คือ ค่าการหดตัวของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ (ไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$ )                      |
| $W$                         | คือ ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)                                                      |
| $t_0$                       | คือ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มเผชิญกับการแห้ง ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C (วัน)          |
| $\Delta t_i$                | คือ จำนวนวันที่มีอุณหภูมิเท่ากับ $T_i$ (วัน)                                                            |
| $T_i$                       | คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลา $\Delta t_i$ (°C)                                                  |
| $T_0$                       | มีค่าเท่ากับ 1°C                                                                                        |
| $\varepsilon'_{as}(t)$      | คือ ค่าการหดตัวแบบบอโตจินัสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ $t$ (ไมครอน หรือ $\times 10^{-6}$ )    |
| $t_s$                       | คือ ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (ปกติ ระหว่าง 0 ถึง 1 วัน) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C (วัน) |
| $a, b$                      | คือ ตัวคูณซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวแบบบอโตจินัส ใช้ค่าตามตารางที่ 2.12                       |
| $k_h$                       | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับขนาดของโครงสร้าง ( $h_0$ ) (ดูตารางที่ 2.12)                                      |
| $h_0$                       | คือ ความหนาของโครงสร้าง (มม.)                                                                           |
| $t_s$                       | คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)                                                          |
| $A_c$                       | คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต (มม. <sup>2</sup> )                                                        |
| $u$                         | คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดที่สัมผัสกับอากาศ (มม.)                                                         |
| $f_{cm}$                    | คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)                                                              |
| $f_{cm0}$                   | คือ 10 MPa                                                                                              |
| $\alpha_{ds1}$              | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.14)                                               |
| $\alpha_{ds2}$              | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.14)                                               |
| $\varepsilon_{as}(t, t_0)$  | คือ ค่าการหดตัวแบบบอโตจินัสของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ ( $\times 10^{-6}$ )                     |
| $\varepsilon_{asm}$         | คือ ค่าการหดตัวแบบบอโตจินัสสูงสุดของคอนกรีต ( $\times 10^{-6}$ )                                        |
| $t$                         | คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)                                                                   |
| $t_0$                       | คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มเกิดการแห้ง, หรือระยะเวลาการบ่ม (วัน)                                         |
| $w/b$                       | คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน                                                                          |

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|             |                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| $n_a$       | คือ อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม                |
| $r_{fa}$    | คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย                        |
| $r_{LP}$    | คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูน                       |
| $\%SO_{3f}$ | คือ ปริมาณร้อยละของ $SO_3$ ในเถ้าลอย (%)                 |
| $G_{max}$   | คือ ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ (มม.)                         |
| $\gamma_c$  | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 5.1) |
| $T$         | คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )               |
| FA          | คือ เถ้าลอย                                              |
| LP          | คือ ผงหินปูน                                             |

## บทที่ 1

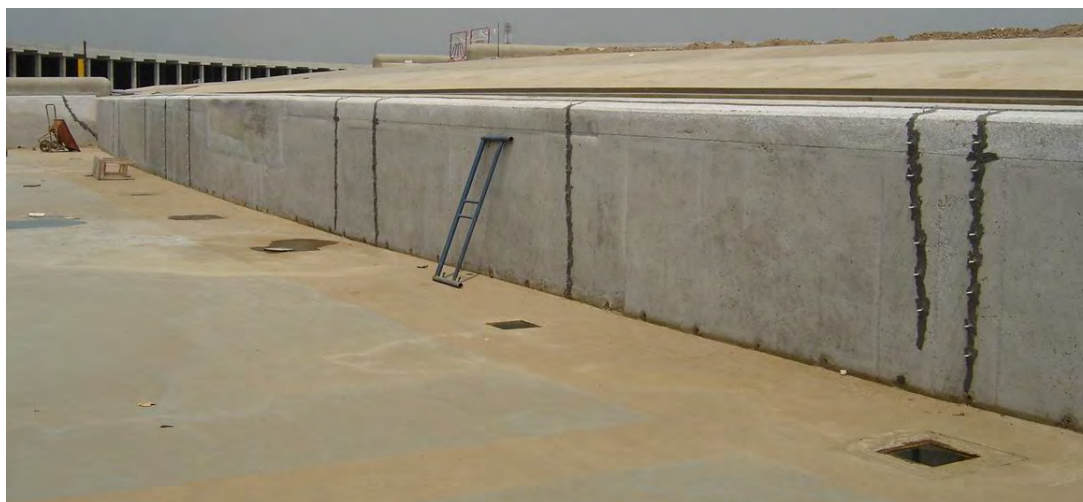
### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

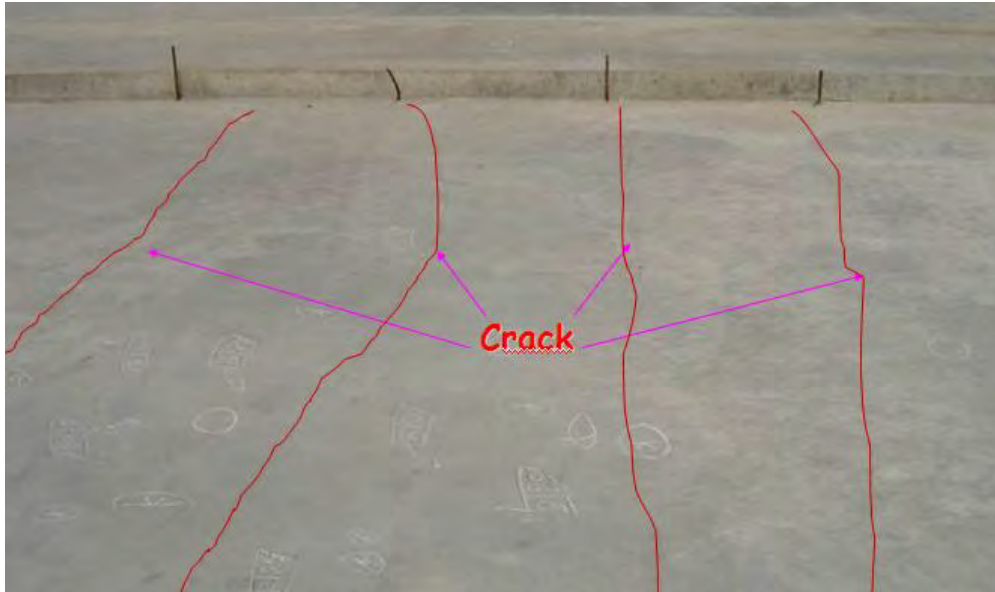
ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าการหดตัวของคอนกรีต เป็นปัญหาที่นำไปสู่การแตกร้าวที่เป็นผลมาจากการหดตัวที่ถูกยั้งไว้ของคอนกรีต การแตกร้าวที่เกิดขึ้นนอกจากอาจจะส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างแล้ว ยังส่งผลต่อปัญหาด้านความคงทน (Durability Problems) ของโครงสร้าง เนื่องจากการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นในช่วงการก่อสร้างหรือหลังจากก่อสร้างเสร็จแล้ว เป็นตัวการสำคัญที่เร่งให้ปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าว น้ำ อากาศ หรือสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริมสามารถแทรกผ่านรอยแตกเหล่านั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้เร็วขึ้น การแตกร้าวเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุที่พบบ่อยมากในโครงสร้างต่างๆ คือ การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว ตัวอย่างการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแสดงดังรูปที่ 1.1 ถึง รูปที่ 1.4 ในปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตกำลังสูงในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ จึงนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มมากขึ้น และจากสภาพภูมิอากาศของโลกที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นในแต่ละปี อันเป็นผลมาจากภาวะโลกร้อน ทำให้พบปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวแบบแห้งเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุนี้วิศวกรผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องทราบค่าการหดตัวของคอนกรีตตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง เพื่อป้องกันและออกแบบควบคุมการแตกร้าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นมาตรฐานการออกแบบต่างๆ จึงมีการนำเสนอสมการที่ใช้ในการทำนายการหดตัวของคอนกรีต เช่น ACI-209 และ CEB-FIP-70, 78, 90 อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านี้ยังมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก คือประมาณ 40% (Eguchi และ Teranishi, 2005) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาใช้กับประเทศในเขตร้อนอย่างประเทศไทย เนื่องจากสมการเหล่านี้ถูกพัฒนาขึ้นจากประเทศในเขตอากาศหนาว ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุและสภาพอากาศที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการใช้วัสดุผสมเพิ่ม (Mineral Admixtures) ในงานคอนกรีตกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เถ้าลอย (Fly Ash) และ ผงหินปูน ซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย แต่สมการทำนายการหดตัวที่มีอยู่ยังไม่สามารถใช้ทำนายการหดตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูนได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นหากต้องการออกแบบโครงสร้างสำหรับป้องกันการแตกร้าวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาสมการ

ทำนายการหดตัวของคอนกรีตให้มีความแม่นยำสูงและครอบคลุมถึงคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มเป็นส่วนผสม

ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อควบคุมการแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีต จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การหดตัวแบบอิสระ อัตราการหดตัว การคืบตัว โมดูลัสยืดหยุ่น ลักษณะการยัดtring ความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว (Tensile strain capacity) และกำลังอัดของคอนกรีต (Tongaroonsri and Tangtermsirikul, 2009) ซึ่งพบว่ามีปัจจัยที่ต้องทำการศึกษามากมาย ตัวอย่างแผนผังการศึกษาเกี่ยวกับการทำนายการแตกร้าวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 1.5 ซึ่งจะเห็นว่ามีความซับซ้อนอย่างมากและสมการสำหรับทำนายการหดตัวของคอนกรีตก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก แต่ในประเทศไทยยังมีการวิจัยเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตน้อยมาก และแบบจำลองทำนายการหดตัวที่ใช้ในปัจจุบัน เป็นแบบจำลองที่พัฒนาจากต่างประเทศ ซึ่งมีวัสดุและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากในประเทศไทยอย่างมาก ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตให้มีความแม่นยำสูงและเหมาะสมกับวัสดุในประเทศ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างในประเทศต่อไป ผู้วิจัยจึงดำเนินการวิจัยเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการคำนวณการหดตัว รวมถึงรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวและการแตกร้าวของคอนกรีตไว้ในรายงานการวิจัยฉบับนี้



รูปที่ 1.1 การแตกร้าวของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 1.2 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต

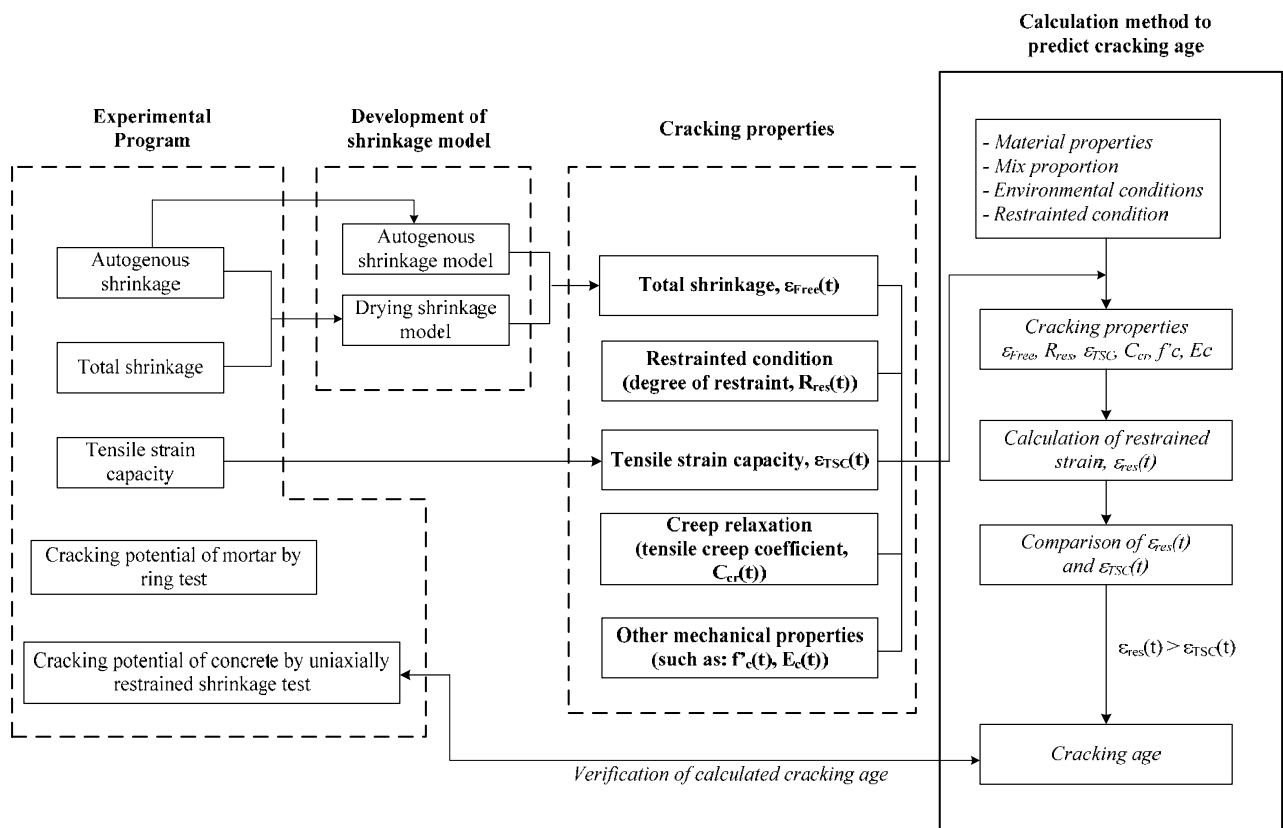


รูปที่ 1.3 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต

(ที่มา : หนังสือ “คอนกรีตเทคโนโลยี” ของ บริษัท ทีพีไอ คอนกรีต จำกัด)



รูปที่ 1.4 การแตกร้าวของปูนฉาบ เนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง



รูปที่ 1.5 ตัวอย่างแผนผังแสดงการศึกษการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต  
(Tongaroonsri, 2008)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดแห้งของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่างๆ
- 2) เพื่อศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ เถ้าลอยและผงหินฝุ่น เป็นส่วนผสม
- 3) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดแห้งของคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการวิจัยนี้เป็นการนำเสนอสมการสำหรับใช้ทำนายการหดตัวของคอนกรีต โดยสมการที่พัฒนาขึ้นใช้สำหรับทำนายการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในการสร้างสมการมีดังนี้

- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) (0.35 – 0.80)
- อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) (1.1 - 1.5)

|                                                              |                                           |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| - ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                              | (Type I, Type III และ Type V)             |
| - การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)  | (0% - 60%)                                |
| - ประเภทของเถ้าลอย                                           | (CaO สูง และ CaO ต่ำ)                     |
| - ปริมาณ SO <sub>3</sub> ในเถ้าลอย                           | (0.1% – 3.03%)                            |
| - การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) | (0% -20%)                                 |
| - ความละเอียดของผงหินปูน                                     | (2 – 13 micron)                           |
| - อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (โดยน้ำหนักของมวลรวม)               | (0.42-0.44)                               |
| - ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ                                   |                                           |
| - ระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต                                   | (0 - 14 วัน)                              |
| - ชนิดของการบ่ม                                              | (ไม่บ่ม บ่มน้ำ บ่มกระสอบ ห่อพลาสติก)      |
| - อุณหภูมิคงที่                                              | (28 <sup>0</sup> C และ 35 <sup>0</sup> C) |
| - ความชื้นสัมพัทธ์                                           | (50% และ 75%)                             |
| - ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ                                     | (3/8", 3/4" และ 1")                       |

#### 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดแห้งของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะได้ข้อมูลการหดตัวของคอนกรีตที่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมของประเทศไทยโดยตรง

2) ได้แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดแห้งของคอนกรีต สำหรับใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต มีกลไกการเกิดที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น ค่าการหดตัวแบบอิสระ อัตราการหดตัว การคืบตัว โมดูลัสยืดหยุ่น ลักษณะการยัดรัง และความสามารถต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งในงานวิจัยนี้เน้นศึกษาการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีต ทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง จากการรวบรวมข้อมูลการหดตัวจากแหล่งต่างๆ พบว่าในประเทศไทยยังมีผลทดสอบการหดตัวของคอนกรีตไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบในมอร์ต้า และเป็นการทดสอบในช่วงที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว นอกจากนี้ส่วนใหญ่เป็นการทดลองในสภาพแวดล้อมเปิด คือไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในขณะทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นมีราคาแพง ในประเทศไทยจึงมีห้องปฏิบัติการด้านคอนกรีตเพียงไม่กี่แห่งเท่านั้นที่มีห้องดังกล่าว จากการสืบค้นข้อมูลและองค์ความรู้เกี่ยวกับการหดตัว และการแตกร้าวของคอนกรีต จากบทความวิชาการ บทความวิจัย วิทยานิพนธ์ มาตรฐานการออกแบบ ทั้งในและต่างประเทศ โดยจากการสืบค้นข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ.1995 ถึง 2012 สามารถสรุปแหล่งที่มาของข้อมูลได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอข้อมูลและองค์ความรู้ที่รวบรวมจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ เหล่านี้ที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวและการหดตัวของคอนกรีตเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 แหล่งที่มาของข้อมูล

| ประเภทของแหล่งข้อมูล                       | จำนวน | หน่วย   | หมายเหตุ                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------|-------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| บทความในประเทศไทย                          | 36    | บทความ  | - จำนวนบทความที่แสดงเป็นเพียงบางส่วนที่รวบรวมได้เท่านั้น<br>- บทความเกี่ยวกับการแตกร้าวจะเป็นส่วนหนึ่งรวมอยู่ในบทความเหล่านี้ไม่ได้จำแนก |
| บทความจากต่างประเทศ                        |       | บทความ  |                                                                                                                                          |
| - Model of shrinkage                       | 13    |         |                                                                                                                                          |
| - Autogenous shrinkage                     | 57    |         |                                                                                                                                          |
| - Drying shrinkage                         | 104   |         |                                                                                                                                          |
| - Autogenous and Drying shrinkage          | 14    |         |                                                                                                                                          |
| วิทยานิพนธ์ในประเทศ                        | 6     | เรื่อง  |                                                                                                                                          |
| วิทยานิพนธ์จากต่างประเทศ                   | 8     | เรื่อง  |                                                                                                                                          |
| มาตรฐานเกี่ยวกับการคำนวณการหดตัวของคอนกรีต | 5     | มาตรฐาน |                                                                                                                                          |

## 2.1 การแตกร้าวและกลไกการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

การแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นจากสาเหตุหลายประการ เช่น เกิดจากการคำนวณออกแบบหรือขั้นตอนการก่อสร้างหรือการใช้งานที่ไม่ถูกต้องหรือสาเหตุอื่นๆ เช่น การแตกร้าวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานมากกว่าค่าที่ได้ออกแบบไว้ การหดตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้าง การเสริมเหล็กไม่เพียงพอ หรือการจัดวางเหล็กเสริมผิดตำแหน่ง การเทและบ่มคอนกรีตอย่างไม่ถูกต้อง หรือการออกแบบที่ไม่ได้คำนึงถึงการหดตัวในระยะยาวของคอนกรีต เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันได้โดยการใช้หลักการออกแบบที่ถูกต้อง และการควบคุมการก่อสร้างอย่างเคร่งครัดให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ สาเหตุอีกประการที่เป็นปัญหามากคือ การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต เช่น การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เป็นต้น การแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีต สามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ในช่วงที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัว ไปจนถึงตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นสำคัญการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก เกิดขึ้นในช่วงที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวจึงสามารถแก้ไขได้ง่าย ในขณะที่การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง เกิดขึ้นหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว การแก้ไขจึงทำได้ยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง การทราบถึงสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีตเช่น การหดตัว การคืบตัว โมดูลัสยืดหยุ่น และความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องใช้ในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัว ร่วมกับการควบคุมการก่อสร้างให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ จึงจะเป็นหนทางที่จะแก้ไขปัญหาการแตกร้าวนี้ได้ ในงานวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตเท่านั้น โดยจะศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเป็นหลัก

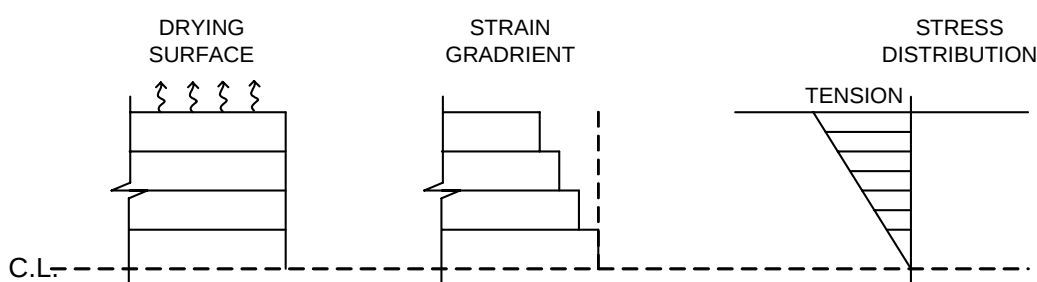
การหดตัวของคอนกรีตจะไม่ทำให้เกิดการแตกร้าว หากคอนกรีตสามารถหดตัวได้อย่างอิสระ แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างต่างๆ ล้วนถูกยึดรั้งแทบทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็นการยึดรั้งภายในหรือการยึดรั้งภายนอก จึงทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ การยึดรั้งของโครงสร้างคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่การยึดรั้งภายใน (Internal Restraint) และการยึดรั้งภายนอก (External Restraint)

การยึดรั้งภายใน ได้แก่ การยึดรั้งที่เกิดจากมวลรวมและการยึดรั้งที่เกิดจากตัวคอนกรีตเอง (Self-restraint) การหดตัวจะเกิดขึ้นในส่วนของเพสต์ ในขณะที่มวลรวมจะยึดรั้งการหดตัวนี้ทำให้การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตลดลง ส่วนการยึดรั้งที่เกิดจากตัวคอนกรีตเอง เกิดขึ้นเนื่องจากที่ผิวของคอนกรีตซึ่งสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกมีการระเหยของน้ำมากกว่าคอนกรีตส่วนที่อยู่ด้านใน ทำให้ที่ผิวมีการหดตัวมากกว่า การหดตัวที่แตกต่างกันระหว่างที่ผิวและด้านในของคอนกรีตทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นที่ผิว เมื่อหน่วยแรงดึงนี้มากกว่ากำลังดึงของคอนกรีต ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตได้ รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวของคอนกรีต เมื่อการหดตัวที่ผิวและด้านในของคอนกรีตมีค่าไม่เท่ากัน

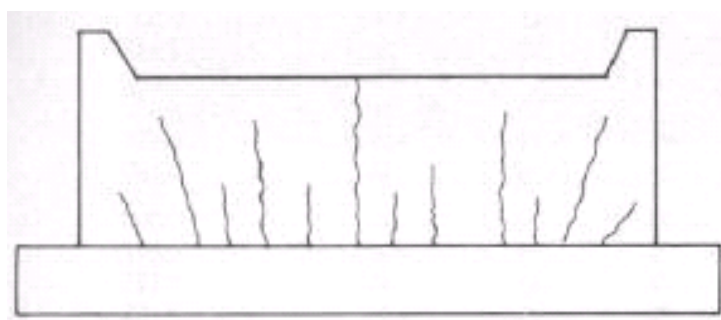
การยึดรั้งภายนอก ได้แก่ การที่คอนกรีตถูกยึดรั้งจากวัสดุรอบข้าง เช่น แบบหล่อ ดินที่อยู่ด้านล่างหรือด้านข้าง (ในกรณีของคอนกรีตสัมผัสกับดิน) โครงสร้างคอนกรีตข้างเคียงที่ยึดติดกัน หรือ

แม้แต่เหล็กเสริมในคอนกรีต รูปที่ 2.2 แสดงการแตกร้าวของกำแพงคอนกรีต เนื่องจากกำแพงถูกยึดรั้งจากฐานซึ่งเป็นคอนกรีตเก่าและมีการหดตัวไม่เท่ากันกับการหดตัวของกำแพง ซึ่งสร้างภายหลัง

เมื่อคอนกรีตเกิดการหดตัวและถูกยึดรั้งจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึง หรือหากพิจารณาในด้านของความเครียดจะทำให้เกิด ความเครียดยึดรั้ง (Restrained Strain) หากความเครียดยึดรั้งมีค่ามากกว่าความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต คอนกรีตก็จะเกิดการแตกร้าว ดังนั้นหากสามารถคำนวณการหดตัวที่จะเกิดขึ้นตามเวลาได้ พร้อมทั้งทราบปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของคอนกรีตก็จะสามารถประเมินโอกาสการเกิดการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตได้ โดยใช้แนวทางการคำนวณดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 2.1 การเกิดหน่วยแรงดึง เนื่องจากการยึดรั้งภายใน



รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของกำแพงคอนกรีต เนื่องจากการยึดรั้งภายนอก

## 2.2 การหดตัวของคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีตที่ไม่ได้มีสาเหตุมาจากแรงภายนอก สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Shrinkage) และการหดตัวที่สัมพันธ์กับความชื้น (Moisture Related Shrinkage) โดยงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการหดตัวที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียความชื้นเท่านั้น

การหดตัวของคอนกรีต คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต เนื่องจากการสูญเสียน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อม หรือการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การสูญเสียน้ำเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมคอนกรีตเสร็จใหม่ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพคอนกรีตสดจนกระทั่งเสร็จสิ้นอายุการใช้งานของคอนกรีต การหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ซึ่งการหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ และเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปการหดตัวของคอนกรีตมีอยู่ 5 ประเภท แต่การหดตัวของคอนกรีตที่พบส่วนใหญ่และมีความสำคัญต่อความคงทนของคอนกรีตมาก ณ ปัจจุบัน มี 2 ประเภท คือ การหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต การหดตัวของคอนกรีตทั่วไป 5 ประเภท ได้แก่

- การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Shrinkage)
- การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage)
- การหดตัวแบบออโตจีนิส (Autogenous Shrinkage)
- การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
- การหดตัวแบบคาร์บอเนชัน (Carbonation Shrinkage)

โดยมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.2.1 การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Shrinkage) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การหดตัวทางเคมี (Chemical Shrinkage) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydrated Product) มีปริมาตรน้อยกว่าปริมาตรตั้งต้นของปูนซีเมนต์และน้ำก่อนทำปฏิกิริยา การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงก่อนการก่อตัว มักไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากการหดตัวนี้เกิดมากในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดหน่วยแรง และลักษณะของการหดตัวจะเป็นการสร้างช่องว่างในเจล (Gel Pores) จึงไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรของคอนกรีตโดยรวม ดังนั้นการหดตัวประเภทนี้ในช่วงก่อนการก่อตัวจึงไม่ได้รับความสนใจมากนัก แต่ส่วนที่หดตัวหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวสุดท้ายแล้ว จะเป็นปัญหาและจะคิดรวมอยู่ในการหดตัวแบบออโตจีนิส

## 2.2.2 การหดตัวแบบพลาสติก

การหดตัวแบบพลาสติก คือ การหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำจากผิวหน้าของคอนกรีตไปสู่สภาพแวดล้อมเนื่องจากการระเหย ในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวหรืออยู่ในสภาวะพลาสติกหรือเกิดจากการดูดซับน้ำของวัสดุบริเวณผิว ออกจากคอนกรีต เช่น ไม้แบบ และพื้นดินที่แห้งใต้คอนกรีต เป็นต้น หากอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าของคอนกรีตมีค่ามากกว่าอัตราการเยิ้ม (Bleeding) คอนกรีตจะเกิดการหดตัวแบบพลาสติก แต่หากอัตราการเยิ้มมากกว่าอัตราการระเหยการหดตัวชนิดนี้จะไม่เกิดขึ้นหากเกิดการหดตัวแบบพลาสติกจนทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวคอนกรีตมากกว่าความสามารถในการต้านทานการแตกร้าว คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก โดยทั่วไปถือว่าการหดตัวแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการระเหยของน้ำมากกว่า 1 กิโลกรัม/ตารางเมตร/ชั่วโมง (Plastic Shrinkage Cracking) ที่ผ่านมาวิศวกรควบคุมงาน ผู้รับเหมาก่อสร้างรวมถึงเจ้าของงานจำนวนมาก มีความเข้าใจว่าการหดตัวแบบพลาสติกไม่มีผลเสียต่อคอนกรีต เนื่องจากเมื่อรอยร้าวจากการหดตัวแบบพลาสติกเกิดขึ้น สามารถทำให้หายไปได้โดยการปาดผิวหน้าของคอนกรีต อย่างไรก็ตามมีนักวิจัยในต่างประเทศพบว่า แม้ไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวในสภาวะพลาสติก แต่การหดตัวที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการแยกตัว ซึ่งเกิดเป็นจุดอ่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone) จนทำให้เกิดการแตกร้าวเมื่อมีการหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นในภายหลัง [Holt and Levieo, 1998] การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกสามารถป้องกันได้ โดยการลดการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าคอนกรีตไม่ให้เกิน 0.05 กิโลกรัม/ตารางเมตร/ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าอัตราการเยิ้มของน้ำขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีตการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกจะรุนแรงในสภาวะอุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูง ความชื้นสภาพแวดล้อมต่ำ ลมแรง และการเยิ้มน้ำต่ำ เป็นต้น ซึ่งสภาพแวดล้อมเหล่านี้จะทำให้การสูญเสียน้ำบริเวณผิวหน้ามาก จึงเกิดการหดตัวขึ้น ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก

## 2.2.3 การหดตัวแบบออโตจีนิส

การหดตัวแบบออโตจีนิสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดหลังจากการก่อตัวขึ้นสุดท้ายของคอนกรีตรวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคัปิลลารี (Capillary Pores) เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำทำให้เกิด Capillary Suction ขึ้นในช่องว่างคัปิลลารีมีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง Capillary Suction นี้ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Self-desiccation” การหดตัวแบบออโตจีนิสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อมแต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเองการหดตัวแบบออโตจีนิสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จแต่ในทางปฏิบัติจะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้วเนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเทและจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

ในอดีตการหดตัวแบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนักเนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันในอดีตมักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงคอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคัปิลลารีมากมีขนาดใหญ่และต่อเนื่องดังนั้นความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งและน้ำจากการบ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ทำให้การหดตัวแบบบอโตจีเนสในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบแต่ในทางตรงกันข้ามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาหลายชนิดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีปริมาณเพสต์มากเช่นคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า (Self-Compacting Concrete) เป็นต้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้วคอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคัปิลลารีที่น้อยกว่ามีขนาดเล็กกว่าและความต่อเนื่องของช่องว่างคัปิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่งมีค่าความชื้นน้ำต่ำมากดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคัปิลลารีถูกใช้ไปในปฏิกิริยาจึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่นหรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได้จึงทำให้การหดตัวแบบบอโตจีเนสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลยได้ในการออกแบบ [คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543]

#### 2.2.4 การหดตัวแบบแห้ง

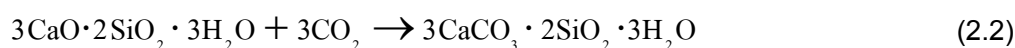
การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้นบางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง เกิดขึ้นในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคัปิลลารีมาก การสูญเสียน้ำอิสระไปสู่อากาศด้วยการระเหยทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคัปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ การหดตัวแบบแห้งแตกต่างจากการหดตัวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิดการหดตัวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

### 2.2.5 การหดตัวของคาร์บอนเนชั่น

คาร์บอนเนชั่นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนผลผลิตบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนตโดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลไกการเกิดคาร์บอนเนชั่นสามารถอธิบายได้โดย คาร์บอนเนชั่นเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตตามสมการของปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



หรือ



ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.1) มากกว่า (2.2) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาดังนี้ เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาพของสารละลายเป็นส่วนใหญ่ คอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี โดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนเนชั่นจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่างของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น การหดตัวเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้หน่วยแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งหรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

## 2.3 การทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีต มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ และส่วนใหญ่ทำการศึกษาในสภาวะแวดล้อมของประเทศหรือภูมิภาคนั้นๆ จึงทำให้งานวิจัยที่ยังไม่ครอบคลุมสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยหรือบางงานวิจัยมีการควบคุมสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับค่าในประเทศไทย แต่ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะนำมาสร้างสมการทำนายการหดตัวที่เหมาะสมกับประเทศไทย ผู้วิจัยได้สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้เป็นจำนวนมาก แต่นำมาแสดงเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยนำเสนอเป็นสองส่วน คือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีตและสมการสำหรับทำนายการหดตัวของคอนกรีต

### 2.3.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต Tazawa and Miyazawa (1993) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิสของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และอัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีผลต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิส โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $C_3A$  และ  $C_4AF$  เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิสอย่างมาก Mak และคณะ (1998) พบว่าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดและปริมาณ  $C_3S$  สูง จะทำให้การหดตัวของคอนกรีตในช่วงต้น (Early-Age Shrinkage) มีค่าสูง นอกจากนี้การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่เกิดจากผลของปฏิกิริยาของ  $C_3A$  มีค่ามากกว่าผลที่เกิดจาก  $C_3S$  ประมาณ 5 เท่า Tangtermsirikul (1998) ศึกษาผลของเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน รวมถึงขนาดของอนุภาคและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ ต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิสของเพสต์ จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณ  $SO_3$  สูง การหดตัวจะต่ำ เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม มีการหดตัวสูงกว่าเพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย ในทางตรงกันข้าม เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม มีการหดตัวต่ำกว่าเพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย จากผลการทดลองสรุปได้ว่านอกจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่มีผลต่อการหดตัวของเพสต์แล้ว ขนาดของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างของช่องว่าง (Pore Structure) ก็ยังส่งผลต่อการหดตัวเช่นกัน ดังนั้นโครงสร้างของช่องว่างจึงจำเป็นต้องการสร้างสมการทำนายการหดตัวแบบบอโตจีนิสของเพสต์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม Bissonnette และคณะ (1999) รายงานว่า การหดตัวของเพสต์มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ จากขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ( $50 \times 50 \times 400$  มม. และ  $4 \times 8 \times 32$  มม.) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อค่าการหดตัวสูงสุดของตัวอย่าง จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงที่ใช้ทดสอบ (0.35-0.50) พบว่ามีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับการหดตัว ในขณะที่ปริมาณเพสต์ มีผลอย่างมากต่อการหดตัว Chindaprasit และคณะ (2004) พบว่า เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นจะมีค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน การใช้เถ้าลอยช่วยลดค่าการหดตัวแบบแห้ง โดยเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงช่วยลดการหดตัวได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำกว่า เถ้าลอยช่วยลดการขยายตัวจากผลของซัลเฟต Al-Saleh และ Al-Zaid (2006) ศึกษาผลของสภาพแวดล้อม ขนาดของตัวอย่างและสารผสมเพิ่มต่อการหดตัวของคอนกรีต สภาพแวดล้อมที่ใช้แบ่งได้ 2 กรณีคือ สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความชื้น

สัมพัทธ์ 5% และสภาพไม่รุนแรง มีอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จากการทดสอบพบว่า ปริมาณน้ำและซีเมนต์มีผลอย่างมากต่อการหดตัว ขนาดของตัวอย่างจะมีผลอย่างชัดเจนเมื่ออยู่ในสภาวะรุนแรง แต่ในสภาวะไม่รุนแรงขนาดของตัวอย่างมีผลไม่มากนัก

### 2.3.2 แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต

แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีตได้ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิจัยหลายท่าน เช่น Chanmeka (1999); Tatong (2001); JSCE (2002) และ Eurocode 2 (2004) แบบจำลองเหล่านี้เหมาะสำหรับทำนายการหดตัวสำหรับคอนกรีตกำลังสูงเท่านั้น เนื่องจากแบบจำลองนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากสมมติฐานที่ว่า หากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สูงกว่า 0.42 การหดตัวแบบอโตจีนิสจะมีค่าต่ำมาก แต่จากการศึกษาของ Tongaroonsri (2008) พบว่าในกรณีที่ส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์เพสต์สูง การหดตัวแบบอโตจีนิสจะมีค่าสูง แม้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีค่ามากกว่า 0.42 ก็ตาม ซึ่งการศึกษานี้สัมพันธ์กับการศึกษาของ Bissonnette และคณะ (1999) ซึ่งพบว่า จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงที่ใช้ทดสอบ (0.35-0.50) พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับการหดตัว ในขณะที่ปริมาณเพสต์ มีผลอย่างมากต่อการหดตัว แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในอดีตแบบจำลองส่วนใหญ่จะเป็นการทำนายค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ไม่มีการแยกระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิสและแบบแห้ง เนื่องจากถือว่าการหดตัวส่วนใหญ่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้ได้แก่ ACI-209, Bazant B3 model, Gardner-Lockman model และ CEB-FIP-70, 78, 90 ในปัจจุบันแบบจำลองบางส่วนได้ถูกพัฒนาให้สามารถทำนายการหดตัวแบบอโตจีนิสแยกออกจากการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้ได้แก่ JSCE 2002 model และ Eurocode 2 model อย่างไรก็ตามนักวิจัยหลายท่าน เช่น Eguchi และ Teranishi (2005) พบว่าแบบจำลองที่มีอยู่ (ACI-209 และ CEB-FIP-70, 78, 90) ยังมีความแม่นยำต่ำมีความคลาดเคลื่อนถึง 40% Videla และคณะ (2004) รายงานว่าเมื่อนำแบบจำลองการหดตัวเหล่านี้ไปทำนายการหดตัวของคอนกรีตพบว่าส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง Asamoto (2008) รายงานว่าเมื่อเร็วๆ นี้ มีการพบปัญหาการแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงของงานสะพานในญี่ปุ่น ซึ่งสาเหตุเกิดจากการทำนายการหดตัวของคอนกรีตในขั้นตอนการออกแบบมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่ได้รับการยอมรับและมีการใช้อย่างแพร่หลายมี 6 แบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

#### 2.3.2.1 แบบจำลองทำนายการหดตัวของ ACI 209 Code

สมการทำนายการหดตัวของ ACI 209 เป็นการคำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งกำหนดให้ค่าการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตมีค่าคงที่เท่ากับ 789 ไมครอน สำหรับคอนกรีตทุกชนิดและทุกสภาวะการบ่ม แล้วคูณด้วยสัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปัจจัยต่างๆ แล้วจึงนำค่าการหดตัวสูงสุดนี้คูณกับฟังก์ชันของเวลา (Time Function) เพื่อคำนวณเป็นการหดตัว ณ เวลาใดๆ ที่ต้องการ

ซึ่งการกำหนดค่าการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตให้มีค่าคงที่นี้ทำให้สมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง สมการทำนายการหดตัวของ ACI 209 แสดงดังสมการที่ (2.3) ถึง (2.9)

$$\varepsilon_{sh}(t) = \left[ \frac{(t - t_c)}{35 + (t - t_c)} \right] \cdot \varepsilon_{shu} \quad (\text{สำหรับการบ่มด้วยความชื้น}) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{sh}(t) = \left[ \frac{(t - t_c)}{55 + (t - t_c)} \right] \cdot \varepsilon_{shu} \quad (\text{สำหรับการบ่มด้วยไอน้ำ}) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6} \cdot \gamma_{cp} \cdot \gamma_{RH} \cdot \gamma_{vs} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\psi} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{\alpha} \quad (2.5)$$

โดย

$\varepsilon_{sh}(t)$  คือ ค่าการหดตัวอิสระของคอนกรีตที่อายุ  $t$  (ไมครอน)

$\varepsilon_{shu}$  คือ ค่าการหดตัวสูงสุด (ไมครอน)

$t$  คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)

$t_c$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)

$\gamma_{cp}$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับระยะเวลาการบ่มด้วยความชื้น (ดูตารางที่ 2.2)

$\gamma_{RH}$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (ดูตารางที่ 2.3)

$\gamma_{vs}$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับขนาดของชิ้นส่วน

$\gamma_s$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับค่าการยุบตัว

$\gamma_{\psi}$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปริมาณมวลรวมละเอียด (ดูตารางที่ 2.4)

$\gamma_c$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์

$\gamma_{\alpha}$  คือ สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับปริมาณอากาศ

$$\gamma_{vs} = 1.2 \exp\left(-0.00472\left(\frac{V}{S}\right)\right) \quad (2.6)$$

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161s \quad (2.7)$$

$$\gamma_c = 0.75 + 0.0006C \quad (2.8)$$

$$\gamma_\alpha = 0.95 + 0.008\alpha \quad (2.9)$$

โดย

$\frac{V}{S}$  คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว (มม.)

s คือ ค่าการยุบตัว (มม.)

C คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม.<sup>3</sup>)

$\alpha$  คือ ปริมาณอากาศ (%)

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์ปรับแก้สำหรับระยะเวลาการปมด้วยความชื้นของ ACI 209

| Moist curing period (days) | $\gamma_{cp}$ |
|----------------------------|---------------|
| 1                          | 1.2           |
| 3                          | 1.1           |
| 7                          | 1.0           |
| 14                         | 0.93          |
| 28                         | 0.86          |
| 90                         | 0.75          |

ตารางที่ 2.3 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ ACI 209

| RH          | Humidity function ( $\gamma_{RH}$ ) |
|-------------|-------------------------------------|
| 40%<RH<80%  | 1.40-0.01RH                         |
| 80%<RH<100% | 3.00-0.03RH                         |

ตารางที่ 2.4 สมการสำหรับผลของปริมาณมวลรวมละเอียดของ ACI 209

| Fine aggregate to total aggregate ratio<br>by weight ( $\psi$ ) | $\gamma_{\psi}$   |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\psi \leq 50\%$                                                | 0.30+0.014 $\psi$ |
| $\psi > 50\%$                                                   | 0.90+0.002 $\psi$ |

### 2.3.2.2 แบบจำลองทำนายการหดตัวของ CEB-FIP 90 Code

สมการทำนายการหดตัวของ CEB-FIP 90 เป็นการคำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยสมการทำนายการหดตัวของ CEB-FIP 90 แสดงดังสมการที่ (2.10) ถึง (2.14)

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{shu} \times \beta_s(t - t_c) \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{shu} = \varepsilon_s \times \beta_{RH} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_s = \left[ 160 + 10 \times \beta_{sc} \left( 9 - \frac{f'_c}{10} \right) \right] \times 10^{-6} \quad (2.12)$$

โดย

$\varepsilon_{shu}$  คือ ค่าการหดตัวสูงสุด

$\beta_{RH}$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (ดูตารางที่ 2.5)

$\beta_{sc}$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.6)

$\varepsilon_s$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับกำลังของคอนกรีต

$f'_c$  คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต (MPa)

$t$  คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)

$t_c$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)

ตารางที่ 2.5 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ CEB-FIP 90

| RH                               | $\beta_{RH}$               |
|----------------------------------|----------------------------|
| 40% < RH < 99%, stored in air    | $-1.55 \times \beta_{sRH}$ |
| RH $\geq$ 99%, immersed in water | 0.25                       |

$$\beta_{sRH} = 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (2.13)$$

โดย

$RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

$RH_0 = 100\%$

ตารางที่ 2.6 สมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ของ CEB-FIP 90

| Cement type         | $\beta_{sc}$ |
|---------------------|--------------|
| Type II and Type V  | 4            |
| Type I and Type III | 5            |

$$\beta_s(t - t_c) = \sqrt{\frac{(t - t_c)}{\left[ 350 \times \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 + (t - t_c) \right]}} \quad (2.14)$$

โดย

$h = 2x$  (พื้นที่หน้าตัด/เส้นรอบรูปของชิ้นส่วนที่สัมผัสกับอากาศ)

$h_0 = 100$  มม.

### 2.3.2.3 แบบจำลองทำนายการหดตัวของ **Bazant B3 Model**

สมการทำนายการหดตัวของ Bazant B3 Model เป็นการคำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยสมการทำนายการหดตัวของ Bazant B3 Model แสดงดังสมการที่ (2.15) ถึง (2.20) อนึ่งปัจจุบันสมการ B3 มีการพัฒนาปรับปรุงให้มีความสามารถในการคำนวณการหดตัวได้ดีขึ้น แต่เนื่องจากยังไม่เห็นที่แพร่หลายในรายงานฉบับนี้จึงขอเสนอเพียง B3 Model เท่านั้น

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{shu} \times k_h \times S(t) \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_{shu} = \alpha_1 \alpha_2 [0.019(w)^{2.1} (f'_c)^{-0.28} + 270] \times 10^{-6} \quad (2.16)$$

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_c}{\tau_{sh}}} \quad (2.17)$$

$$\tau_{sh} = k_t (k_s \times D)^2 \quad (2.18)$$

$$k_t = 0.085(t_c)^{-0.08} (f'_c)^{-0.25} \quad (2.19)$$

$$D = 2 \frac{V}{S} \quad (2.20)$$

โดย

|               |                                                                             |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\frac{V}{S}$ | คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว (มม.)                                     |
| $k_s$         | คือ สัมประสิทธิ์รูปร่างของหน้าตัด (สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า, $k_s=1$ ) |
| $w$           | คือ ปริมาณน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )                                        |
| $f'_c$        | คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)                                  |
| $t$           | คือ เวลาที่ต้องการหาการหดตัว (วัน)                                          |
| $t_c$         | คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)                              |

ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ของ Bazant B3 Model

| Cement type | $\alpha_1$ |
|-------------|------------|
| Type I      | 1.00       |
| Type II     | 0.85       |
| Type III    | 1.10       |

ตารางที่ 2.8 สัมประสิทธิ์สำหรับเงื่อนไขการบ่มของ Bazant B3 Model

| Curing condition       | $\alpha_2$ |
|------------------------|------------|
| Steam cured concretes  | 0.75       |
| Water cured or RH 100% | 1.00       |
| Sealed specimens       | 1.20       |

ตารางที่ 2.9 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ Bazant B3 Model

| Relative humidity  | $k_h$                                       |
|--------------------|---------------------------------------------|
| for $h \leq 0.98$  | $1-h^3$                                     |
| for $h = 1$        | -0.2                                        |
| for $0.98 < h < 1$ | Use linear interpolation:<br>$12.74-12.94h$ |

#### 2.3.2.4 แบบจำลองทำนายการหดตัวของ Gardner-Lockman Model

สมการทำนายการหดตัวของ Gardner-Lockman Model ถูกพัฒนาขึ้นใน ค.ศ. 2001 (Gardner และ Lockman, 2001). เป็นการคำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยสมการทำนายการหดตัวของ Gardner-Lockman Model แสดงดังสมการที่ (2.21) ถึง (2.23)

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{shu} \times \beta(h) \times \beta(t) \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{shu} = 1000 \times K \times \sqrt{\frac{30}{f'_c}} \times 10^{-6} \quad (2.22)$$

$$\beta(t) = \sqrt{\frac{t - t_c}{(t - t_c) + 0.15(V/S)^2}} \times 10^{-6} \quad (2.23)$$

โดย

$\mathcal{E}_{shu}$  คือ ค่าการหดตัวสูงสุด

$\beta(h)$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ (ดูตารางที่ 2.10)

$h$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในรูปของเลขทศนิยม

$K$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.11)

$\frac{V}{S}$  คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว (มม.)

$t$  คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)

$t_c$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)

$f'_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

ตารางที่ 2.10 สมการสำหรับผลของความชื้นสัมพัทธ์ของ Gardner-Lockman Model

| Relative humidity | $\beta(h)$    |
|-------------------|---------------|
| for $h < 96\%$    | $1 - 1.18h^4$ |
| for $h \geq 96\%$ | 0.0           |

ตารางที่ 2.11 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ Gardner-Lockman Model

| Cement type | K    |
|-------------|------|
| Type I      | 1.00 |
| Type II     | 0.70 |
| Type III    | 1.15 |

### 2.3.2.5 แบบจำลองทำนายการหดตัวของ JSCE 2002

สมการทำนายการหดตัวของคอนกรีตของ JSCE 2002 แบ่งสมการออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดปกติ คือ มีกำลังอัดไม่เกิน 55 MPa ซึ่งในกรณีนี้ค่าที่ได้จะเป็นการคำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ส่วนกรณีที่ 2 สำหรับคอนกรีตกำลังอัดสูง คือ มีกำลังอัดระหว่าง 55 - 80 MPa จะคำนวณการหดตัวโดยรวม จากผลรวมของการหดตัวออตจินัสและการหดตัวแบบแห้ง

#### กรณีที่ 1 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัด ไม่เกิน 55 MPa

สำหรับคอนกรีตปกติที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน มีกำลังอัดไม่เกิน 55 MPa (หรือไม่เกิน 70 MPa หากใช้การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในการเพิ่มกำลังอัด) สามารถคำนวณค่าการหดตัวโดยรวม ได้จากสมการที่ (2.24) ถึง (2.26)

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[ 1 - \exp \left\{ -0.108(t - t_0)^{0.56} \right\} \right] \cdot \epsilon'_{sh} \quad (2.24)$$

$$\text{โดยที่ } \epsilon'_{sh} = -500 + 780 \left[ 1 - \exp \left( \frac{RH}{100} \right) \right] + 380 \log_e W - 50 \left[ \log_e \left( \frac{V/S}{10} \right) \right]^2 \quad (2.25)$$

$\epsilon'_{sh}$  คือ ค่าการหดตัวสุดท้าย (ไมครอน หรือ  $\times 10^{-6}$ )

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$  คือ ค่าการหดตัวของคอนกรีตระหว่างอายุ  $t_0$  ถึง  $t$  (ไมครอน หรือ  $\times 10^{-6}$ )

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%) ( $45\% \leq RH \leq 80\%$ )

W คือ ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)

$\frac{V}{S}$  คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต (มม.)

$t_0$  คือ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มเผชิญกับการแห้ง ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C (วัน)

$t$  คือ อายุของคอนกรีตที่ต้องการคำนวณค่าการหดตัว ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C (วัน)

## หมายเหตุ

สมการ (2.24) ถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของผลการทดลองที่อุณหภูมิ 20 °C หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ค่าการหดตัวมักจะมีค่าสูงขึ้น ค่าการหดตัวแบบแห้งที่อุณหภูมิต่างจาก 20 °C สามารถคำนวณได้โดยการปรับแก้  $t_0$  และ  $t$  ที่ใช้ในสมการ (2.24) เนื่องจากผลของอุณหภูมิ

การปรับแก้อายุของคอนกรีตเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ใช้สมการ (2.26)

$$t_0 \text{ และ } t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \quad (2.26)$$

โดย  $\Delta t_i$  คือ จำนวนวันที่มีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_i$  (วัน)

$T_i$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลา  $\Delta t_i$  (°C)

$T_0$  มีค่าเท่ากับ 1°C

## กรณีที่ 2 สำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่มีกำลังอัด ระหว่าง 55 - 80MPa

กรณีคอนกรีตกำลังสูง จะมีการคำนวณค่าการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งแยกกัน แล้วจึงนำค่าการหดตัวทั้งสองมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวมที่นำไปใช้งานต่อไป โดยให้เลือกใช้ค่าที่สูงกว่าระหว่างสมการที่ (2.24) และ สมการที่ (2.27) สำหรับคอนกรีตกำลังสูงสามารถคำนวณค่าการหดตัวได้จากสมการที่ (2.27) ถึง (2.35)

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = \varepsilon'_{ds}(t, t_0) + \varepsilon'_{as}(t, t_0) \quad (2.27)$$

โดย  $\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$  คือ ค่าการหดตัวของคอนกรีตระหว่างอายุ  $t_0$  ถึง  $t$  (ไมครอน หรือ  $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$  คือ ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ  $t_0$  ถึง  $t$  (ไมครอน หรือ  $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon'_{as}(t, t_0)$  คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีตระหว่างอายุ  $t_0$  ถึง  $t$  (ไมครอน หรือ  $\times 10^{-6}$ )

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (2.28)$$

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (2.29)$$

$$\varepsilon'_{ds\infty} = \frac{\varepsilon'_{dsp}}{1 + \eta \cdot t_0} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon'_{dsp} = \frac{\alpha(1 - RH/100)W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} \quad (2.31)$$

$$\eta = 10^{-4} \left\{ 15 \exp(0.007f'_c(28)) + 0.25W \right\} \quad (2.32)$$

$W$  คือปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)

$\frac{V}{S}$  คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศ (มม.)

$RH$  คือความชื้นสัมพัทธ์ (%) ( $40\% \leq RH \leq 90\%$ )

$f'_c(28)$  คือกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

$\alpha$  คือตัวแปรซึ่งแสดงประเภทปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือ ปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำ ( $\alpha = 11$ )

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ( $\alpha = 15$ )

ในการคำนวณ  $\varepsilon'_{as}(t, t_0)$  เป็นฟังก์ชันของเวลา ให้ใช้สมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.34) เพื่อคำนวณค่าการหดตัวแบบอโตจีนัส

$$\varepsilon'_{as}(t, t_0) = \varepsilon'_{as}(t) - \varepsilon'_{as}(t_0) \quad (2.33)$$

$$\varepsilon'_{as}(t) = \gamma \varepsilon'_{as\infty} \left[ 1 - \exp \left\{ -a(t - t_s)^b \right\} \right] \quad (2.34)$$

$$\varepsilon'_{as\infty} = 3070 \exp \{ -7.2(W/C) \} \quad (2.35)$$

$\varepsilon'_{as}(t)$  คือค่าการหดตัวแบบบอโตจินัสของคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนถึงอายุ  $t$  (ไมครอน หรือ  $\times 10^{-6}$ )

$\gamma$  คือตัวแปรซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของชนิดปูนซีเมนต์และวัสดุประสาน  
( $\gamma$  มีค่าเท่ากับ 1 กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน)

$W/C$  คืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

$t_s$  คือระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (ปกติ ระหว่าง 0 ถึง 1 วัน) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิมาตรฐาน 20°C (วัน)

$a, b$  คือ ตัวคูณซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าการหดตัวแบบบอโตจินัส ใช้ค่าตามตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ค่าตัวคูณ  $a$  และ  $b$  สำหรับใช้ในสมการที่ (2.34)

| <b>W/C</b> | <b>a</b> | <b>b</b> |
|------------|----------|----------|
| 0.20       | 1.2      | 0.4      |
| 0.23       | 1.5      | 0.4      |
| 0.30       | 0.6      | 0.5      |
| 0.40       | 0.1      | 0.7      |
| >0.50      | 0.03     | 0.8      |

### 2.3.2.6 แบบจำลองทำนายการหดตัวของ Eurocode 2

สมการทำนายการหดตัวของคอนกรีตของ Eurocode 2 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สมการทำนายการหดตัวแบบบอโตจินัสและสมการทำนายการหดตัวแห้ง แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต สมการทำนายการหดตัวของคอนกรีตของ Eurocode 2 คำนวณได้จากสมการที่ (2.36) ถึง (2.41)

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cd}(t) + \varepsilon_{ca}(t) \quad (2.36)$$

โดย

$\varepsilon_{cs}(t)$  คือค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่อายุ  $t$  ( $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon_{cd}(t)$  คือค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่อายุ  $t$  ( $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon_{ca}(t)$  คือค่าการหดตัวแบบบอโตจินัสของคอนกรีตที่อายุ  $t$  ( $\times 10^{-6}$ )

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (2.37)$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \sqrt{h_0^3}} \quad (2.38)$$

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} \quad (2.39)$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[ (220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left( -\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (2.40)$$

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (2.41)$$

โดย

$k_h$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับขนาดของโครงสร้าง ( $h_0$ ) (ดูตารางที่ 2.12)

$h_0$  คือ ความหนาของโครงสร้าง (มม.)

- $t$  คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)
- $t_s$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)
- $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต (มม.<sup>2</sup>)
- $u$  คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดที่สัมผัสกับอากาศ (มม.)
- $f_{cm}$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)
- $f_{cm0}$  คือ 10 MPa
- $\alpha_{ds1}$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.14)
- $\alpha_{ds2}$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 2.14)
- $RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
- $RH_0$  คือ 100%

ตารางที่ 2.13 สัมประสิทธิ์สำหรับขนาดของโครงสร้าง ( $h_0$ ) ของ Eurocode 2

| $h_0$      | $k_h$ |
|------------|-------|
| 100        | 1.00  |
| 200        | 0.85  |
| 300        | 0.75  |
| $\geq 500$ | 0.70  |

ตารางที่ 2.14 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ ของ Eurocode 2

| Class of Cement | $\alpha_{ds1}$ | $\alpha_{ds2}$ |
|-----------------|----------------|----------------|
| Cement class S  | 3              | 0.13           |
| Cement class N  | 4              | 0.12           |
| Cement class R  | 6              | 0.11           |

## 2.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลองทำนายการหดตัว

แบบจำลองทั้ง 6 แบบจำลองนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่ 1 เป็นแบบจำลองที่ใช้คำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งได้แก่ ACI-209, Bazant B3 model, Gardner-Lockman model และ CEB-FIP 90 ส่วนประเภทที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีสมการคำนวณการหดตัวแยกกันระหว่างคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง แบบจำลองในประเภทนี้ได้แก่ JSCE 2002 และ Eurocode 2 ในกรณีของคอนกรีตกำลังอัดปกติ จะมีสมการสำหรับคำนวณการหดตัวโดยรวมเท่านั้น แต่สำหรับคอนกรีตกำลังสูงการคำนวณจะแยกระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม ซึ่งแบบจำลองในลักษณะนี้เหมาะกับคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง เนื่องจากมีค่าการหดตัวแบบอโตจีนัสสูง จึงไม่เหมาะที่จะคำนวณโดยใช้สมการคำนวณการหดตัวโดยรวมเพียงสมการเดียว อย่างไรก็ตามแบบจำลองทั้ง 6 นี้มีหลักการคล้ายคลึงกันคือ ต้องคำนวณค่าการหดตัวสูงสุดก่อน แล้วจึงคูณด้วยฟังก์ชันของเวลา เพื่อหาค่าการหดตัวที่อายุต่างๆ ตามต้องการ นอกจากนี้หากแบ่งแบบจำลองออกตามปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณค่าการหดตัวสามารถแบ่งแบบจำลองได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้กำลังเป็นปัจจัยหลักในการคำนวณค่าการหดตัว (Strength Base) แบบจำลองในกลุ่มนี้ได้แก่ Bazant B3 model, Gardner-Lockman model, CEB-FIP 90 และ Eurocode 2 ประเภทที่ 2 ได้แก่ ประเภทที่ใช้ปริมาณน้ำ และปริมาณปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักในการคำนวณค่าการหดตัว (Cement-water Base) แบบจำลองในกลุ่มนี้ได้แก่ ACI-209 และ JSCE 2002 ปัจจัยที่ใช้ในแต่ละแบบจำลองแสดงตารางที่ 2.15 เมื่อนำแบบจำลองต่างๆ เหล่านี้มาคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม เท่ากับ 0.44 โดยปริมาตร ขนาดโตสุดของหิน 19 มม. ระยะเวลาการบ่มด้วยน้ำ 7 วัน คอนกรีตมีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศเท่ากับ 16.56 มม. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 0.55 และ 0.65 และทดสอบที่อุณหภูมิ 28°C ได้ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 2.3 ถึง 2.8 จากรูปพบว่าแบบจำลองส่วนใหญ่มีค่าการหดตัวต่ำกว่าผลการทดลอง โดยแบบจำลองที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองได้แก่ JSCE 2002 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงสำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง แต่สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ค่าจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองอย่างชัดเจน ในขณะที่แบบจำลอง Eurocode 2 มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกับผลการทดลองในช่วงอายุน้อย แต่ในระยะยาวค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด

จากผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง รวมถึงจากการวิเคราะห์เอกสารทางวิชาการต่างๆ งานวิจัยนี้ได้เลือกสร้างแบบจำลองที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สมการสำหรับคำนวณการหดตัวแบบอโตจีนัส และสมการสำหรับคำนวณการหดตัวแบบแห้ง แล้วจึงนำมารวมกันภายหลัง เพื่อให้แบบจำลองที่ได้สามารถคำนวณการหดตัวได้ทั้งคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำและกำลังอัดสูง นอกจากนี้งานวิจัยนี้เลือกใช้การสร้างแบบจำลองแบบ Water to Binder Ratio Base เนื่องจากจะสอดคล้องกับมาตรฐาน มยผ.1332-55 “มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้

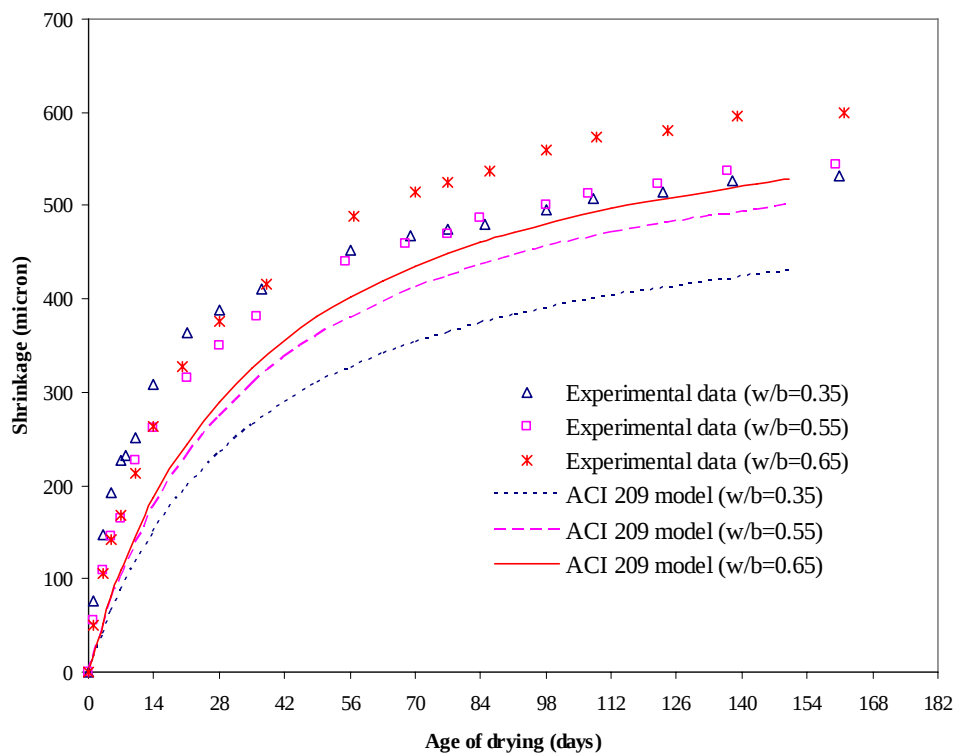
งาน” ซึ่งมีการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้โครงสร้างมีความคงทน ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสาน เป็นปัจจัยหนึ่งที่ถูกกำหนดในมาตรฐานดังกล่าว

ตารางที่ 2.15 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการหดตัวจากแบบจำลองต่างๆ

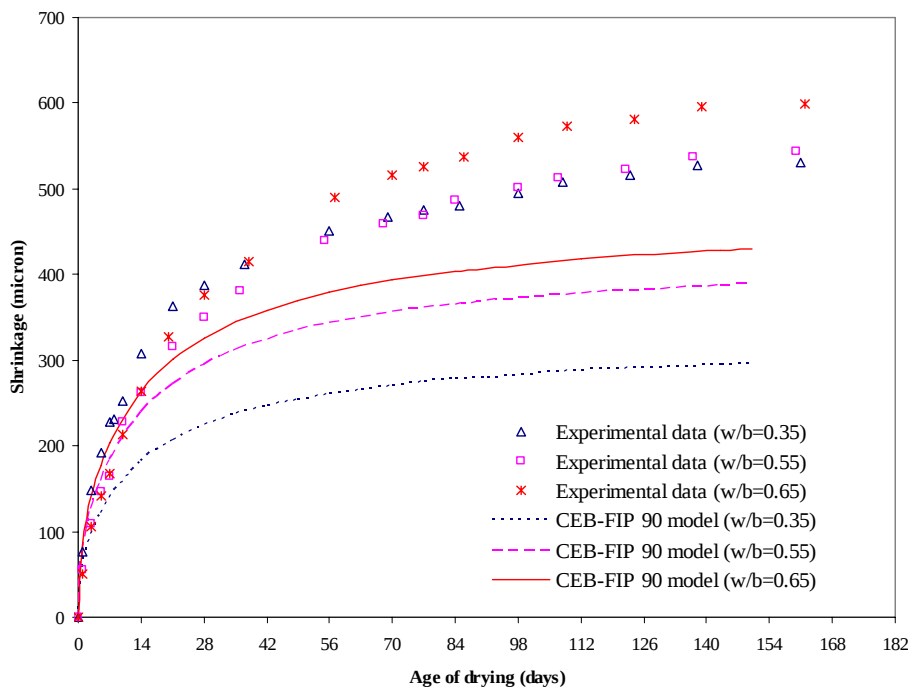
| No. | Parameters                                | JSCE<br>2002 | Euro<br>code2 | ACI<br>209 | Gardner<br>2000 | Bazant<br>B3 | Proposed<br>model |
|-----|-------------------------------------------|--------------|---------------|------------|-----------------|--------------|-------------------|
| 1   | Concrete strength                         | ○            | ●             | ○          | ●               | ●            | ●                 |
| 2   | Type of cement                            | ●            | ●             | ●          | ●               | ●            | ●                 |
| 3   | Type of curing                            |              |               | ●          |                 | ●            | ●                 |
| 4   | Relative humidity                         | ●            | ●             | ●          | ●               | ●            | ●                 |
| 5   | Temperature                               | ●            | ●             | ●          |                 |              | ●                 |
| 6   | Age of concrete at curing<br>duration     | ●            | ●             | ●          | ●               | ●            | ●                 |
| 7   | Volume-surface ratio or<br>section effect | ●            | ●             | ●          | ●               | ●            | ●                 |
| 8   | Cement content                            | ○            |               | ●          |                 | ○            |                   |
| 9   | Water content                             | ●            |               |            |                 | ●            |                   |
| 10  | Water-binder ratio                        | ●            |               |            |                 | ○            | ●                 |
| 11  | Slump                                     |              |               | ●          |                 |              |                   |
| 12  | Aggregates content                        |              |               | ●          |                 |              | ●                 |
| 13  | Air content                               |              |               | ●          |                 |              |                   |
| 14  | Size of aggregate                         |              |               |            |                 |              | ●                 |
| 15  | Type of binder                            |              |               |            |                 |              | ●                 |

● Direct parameter

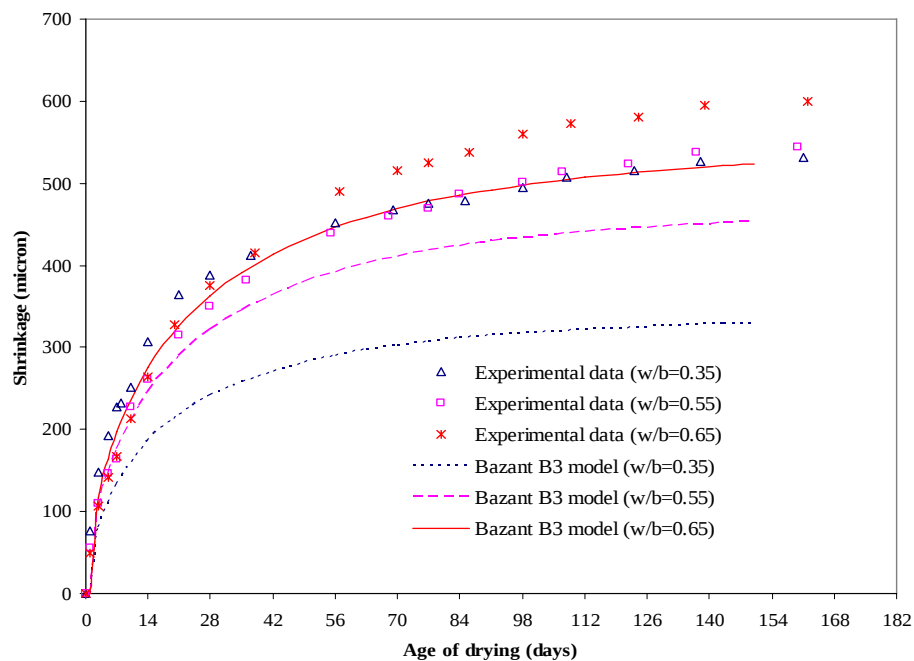
○ Indirect parameter



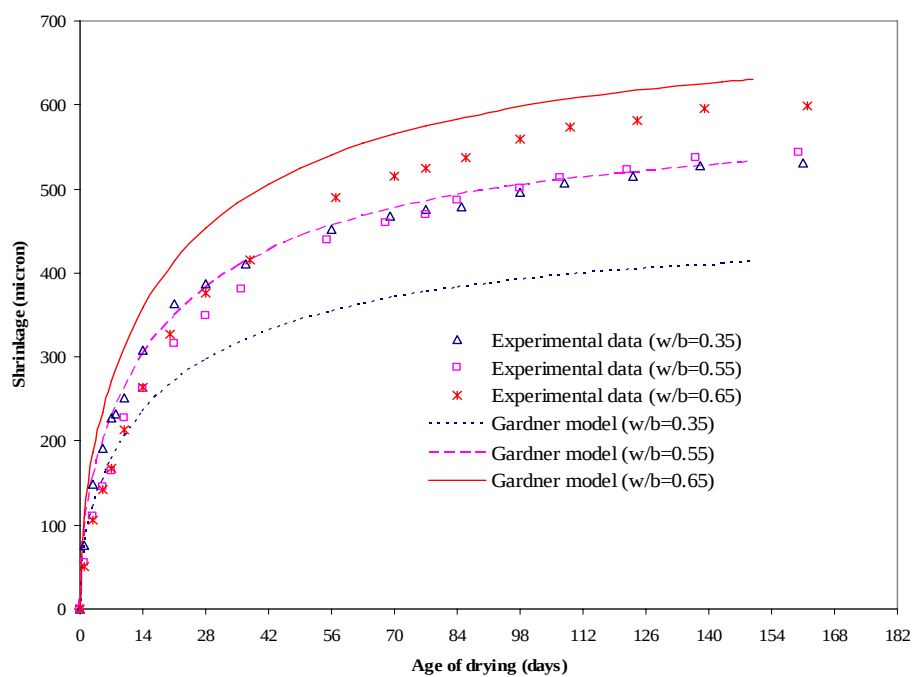
รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง ACI 209



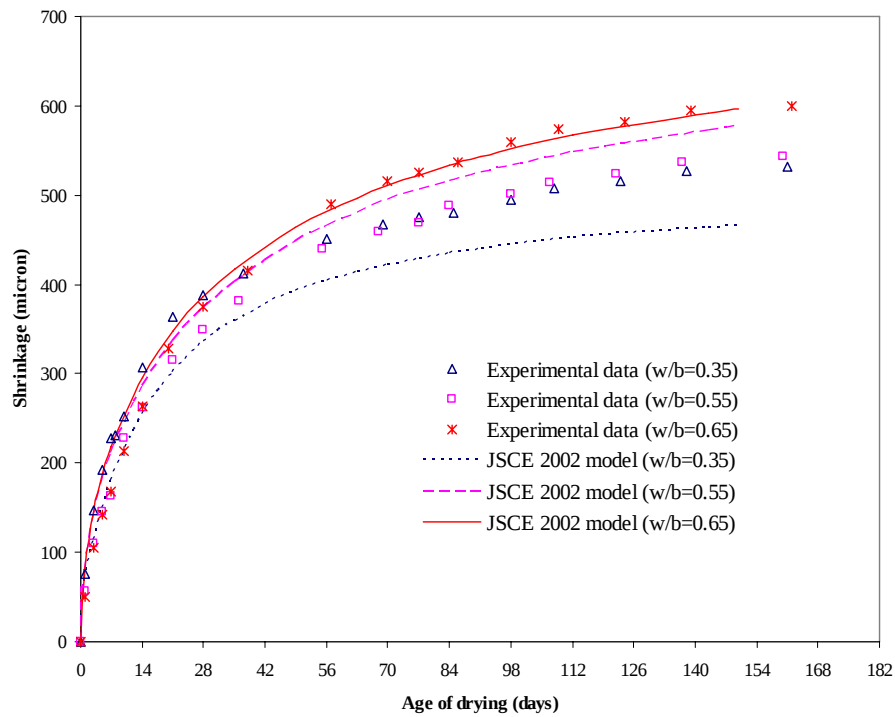
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง CEB-FIP 90



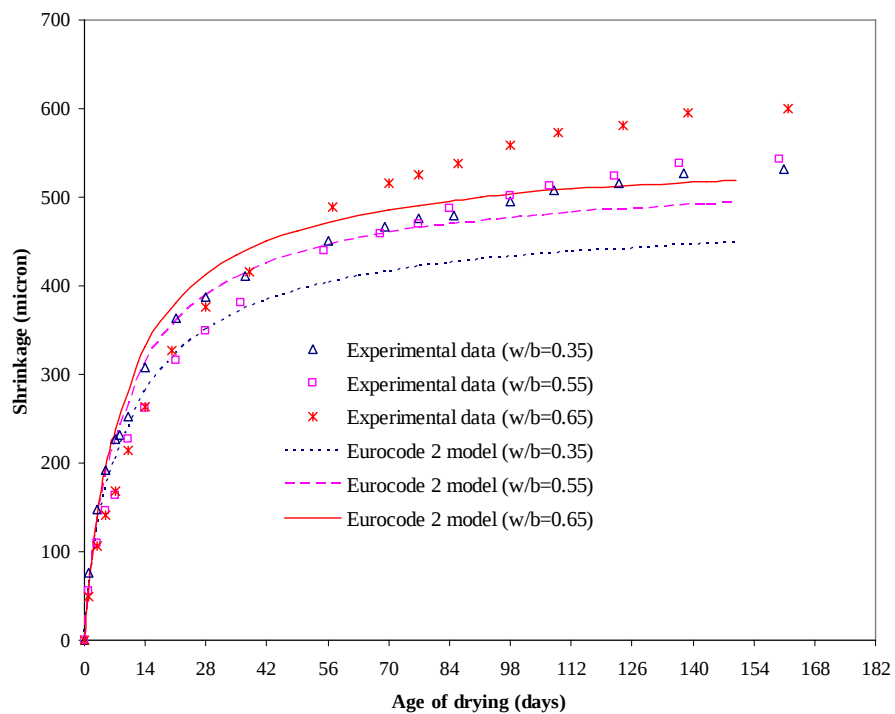
รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง Bazant B3



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง Gardner-Lockman



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง JSCE 2002



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบผลการทดสอบการหดตัวกับแบบจำลอง Eurocode 2

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำสมการสำหรับคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งต้องมีการรวบรวมข้อมูลผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีตทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมถึงดำเนินการทดลองเพื่อรวบรวมข้อมูลการหดตัวตามปัจจัยต่างๆ ที่ต้องการเพิ่มเติม แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการทำนายการหดตัวของคอนกรีตสำหรับประเทศไทย แผนการดำเนินงานของโครงการสามารถสรุปได้โดยสังเขปดังนี้

- 1) ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหดตัว และรวบรวมข้อมูลการหดตัวของคอนกรีตทั้งในประเทศและต่างประเทศรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต
- 2) ทำการทดลองหาค่าการหดตัวของคอนกรีตในกรณีที่ยังขาดข้อมูลการศึกษาปัจจัยที่จำเป็น
- 3) สร้างสมการทำนายการหดตัวของคอนกรีต ทั้งคอนกรีตที่มีและไม่มีเถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสมพร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้
- 4) สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

จากการรวบรวมข้อมูลการหดตัวจากแหล่งต่างๆ พบว่าในประเทศไทยยังมีข้อมูลการหดตัวในคอนกรีตไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบในมอร์ต้า และเป็นการทดสอบหลังจากถอดแบบ เมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว จึงขาดข้อมูลการหดตัวในช่วงอายุต้นก่อน 1 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่คอนกรีตเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสในปริมาณมาก นอกจากนี้ข้อมูลการหดตัวส่วนใหญ่เป็นการทดลองในสภาพแวดล้อมเปิด คือไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในขณะทดสอบ จึงทำให้ขาดข้อมูลที่มีความจำเป็นในหลายปัจจัย ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มเติมจำนวนมาก เพื่อให้สมการทำนายการหดตัวที่ได้ครอบคลุมสภาพแวดล้อมและปัจจัยที่จำเป็นในประเทศไทยในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับวิธีการทดสอบค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ทำการเพิ่มเติมเป็นหลัก

#### 3.2 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต

จากการสืบค้นข้อมูลทำให้ทราบว่าปัจจุบันยังขาดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต ทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง นอกจากนี้ในบทความต่างๆ ที่มีผลทดสอบการหดตัวของคอนกรีต ยังขาดข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญทั้งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ศึกษาและคุณสมบัติของคอนกรีตขณะเป็นคอนกรีตสด เช่น ค่าการยุบตัว และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องดำเนินการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มเติมในปัจจัยต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 7 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วน

ปริมาณของเพสต์ต่อปริมาณของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผสมเพิ่ม สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ และขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต จากปัจจัยเหล่านี้สามารถกระจายเป็นปัจจัยย่อยๆ ได้ดังนี้

|                                                                               |                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)                                            | (0.35 – 0.80)                             |
| - อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) | (1.1 - 1.5)                               |
| - การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)                   | (0% - 60%)                                |
| - ประเภทของเถ้าลอย                                                            | (CaO สูง และ CaO ต่ำ)                     |
| - ปริมาณ SO <sub>3</sub> ในเถ้าลอย                                            | (0.1% – 3.03%)                            |
| - การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)                  | (0% -20%)                                 |
| - ความละเอียดของผงหินปูน                                                      | (2– 13 micron)                            |
| - อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (โดยน้ำหนักของมวลรวม)                                | (0.42-0.44)                               |
| - ระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต                                                    | (0 - 14 วัน)                              |
| - ชนิดของการบ่ม                                                               | (ไม่บ่ม บ่มน้ำ บ่มกระสอบ ห่อพลาสติก)      |
| - อุณหภูมิ                                                                    | (28 <sup>o</sup> C และ 35 <sup>o</sup> C) |
| - ความชื้นสัมพัทธ์                                                            | (50% และ 75%)                             |
| - ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ                                                      | (3/8", 3/4" และ 1")                       |

แผนผังการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.4 หนึ่งในบางปัจจัยจะเป็นการนำข้อมูลการทดสอบมาจากการงานวิจัยอื่นๆ ที่สืบค้นได้ ดังนั้นส่วนผสมที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้จะไม่ถูกแสดงในตารางสัดส่วนผสมในหัวข้อ 3.4 นอกจากนี้ในส่วนของผลของสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ มีการศึกษาในเบื้องต้นเท่านั้นแต่ยังไม่นำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากสารเคมีผสมคอนกรีตมีหลายชนิดและหลายประเภท ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเป็นกรณีพิเศษต่อไปในอนาคต ในส่วนของการศึกษาการหดตัวในช่วงอายุดันของคอนกรีต ซึ่งเป็นการวัดการหดตัวตั้งแต่คอนกรีตก่อตัวขึ้นสุดท้ายจนกระทั่งคอนกรีตมีอายุ 48 ชั่วโมง จะดำเนินการทดสอบเพียงบางส่วนผสมเท่านั้นในเบื้องต้น เพื่อศึกษาค่าการหดตัวในช่วงอายุดัน จึงนำไปเปรียบเทียบกับผลการหดตัวที่วัดตั้งแต่แกะแบบที่อายุ 1 วันเป็นต้นไป

การหดตัวที่ดำเนินการทดสอบเพิ่มเติมนี้เป็นการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต แต่เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตไม่สามารถวัดค่าได้จากตัวอย่างโดยตรง เนื่องจากตัวอย่างที่ไม่มีการหุ้มผิว (Unsealed Specimen) ยังคงมีการหดตัวแบบออโตจีนิสเกิดขึ้นได้ ทำให้ค่าที่วัดได้จากตัวอย่างที่ไม่หุ้มผิว เป็นการหดตัวโดยรวม (Total Shrinkage) คือมีทั้งการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งรวมกันอยู่ ดังนั้นในการหาค่าการหดตัวแบบแห้งจะต้องทำการวัดการ

หัตถ์ของตัวอย่างที่ถูกหุ้มและไม่ถูกหุ้มควบคู่กันไป แล้วจึงคำนวณค่าการหดตัวแบบแห้งจากสมการที่ (3.1)

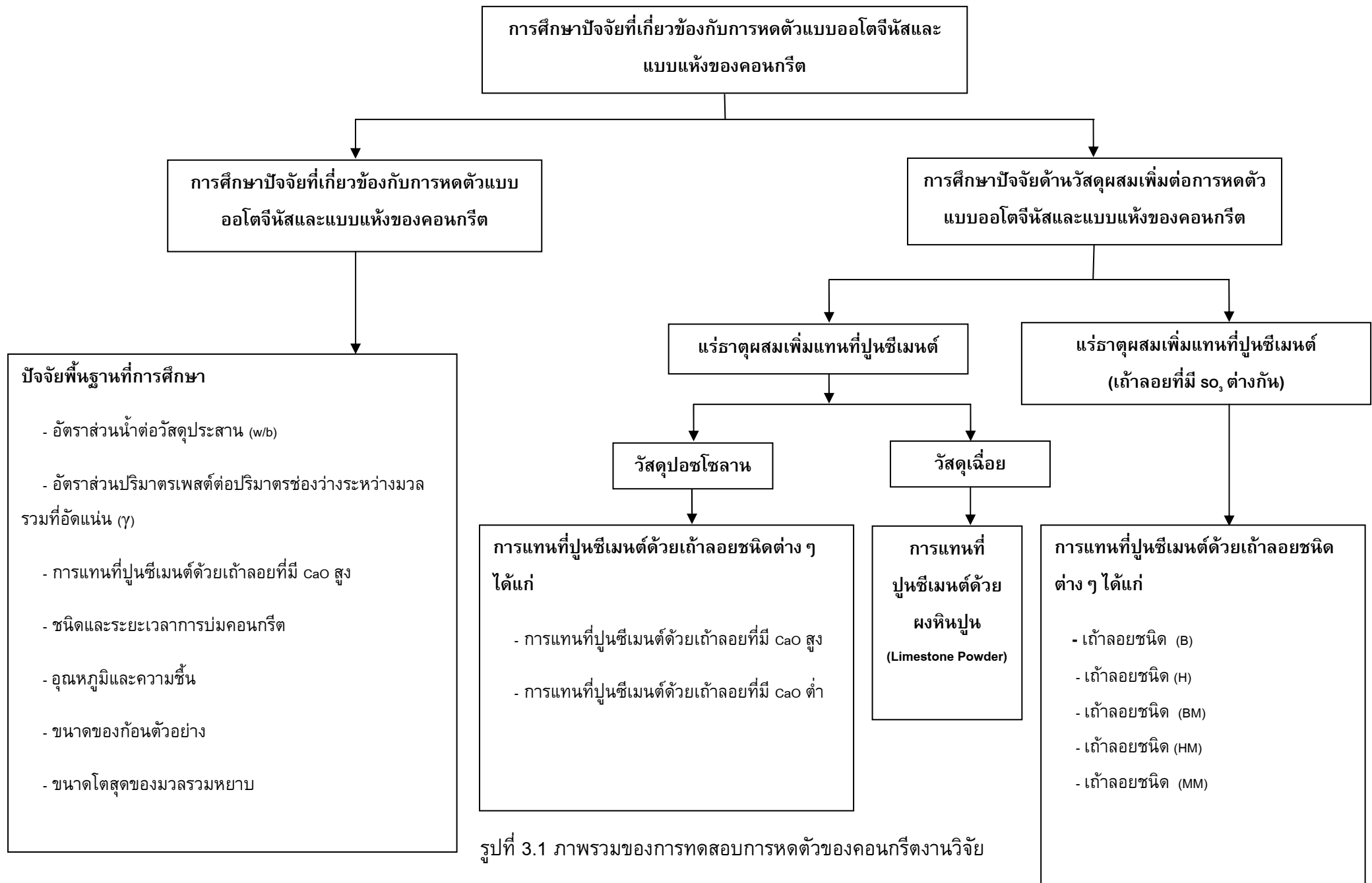
$$\varepsilon_{Drying}(t) = \varepsilon_{Unsealed}(t) - \varepsilon_{Sealed}(t) \quad (3.1)$$

โดย

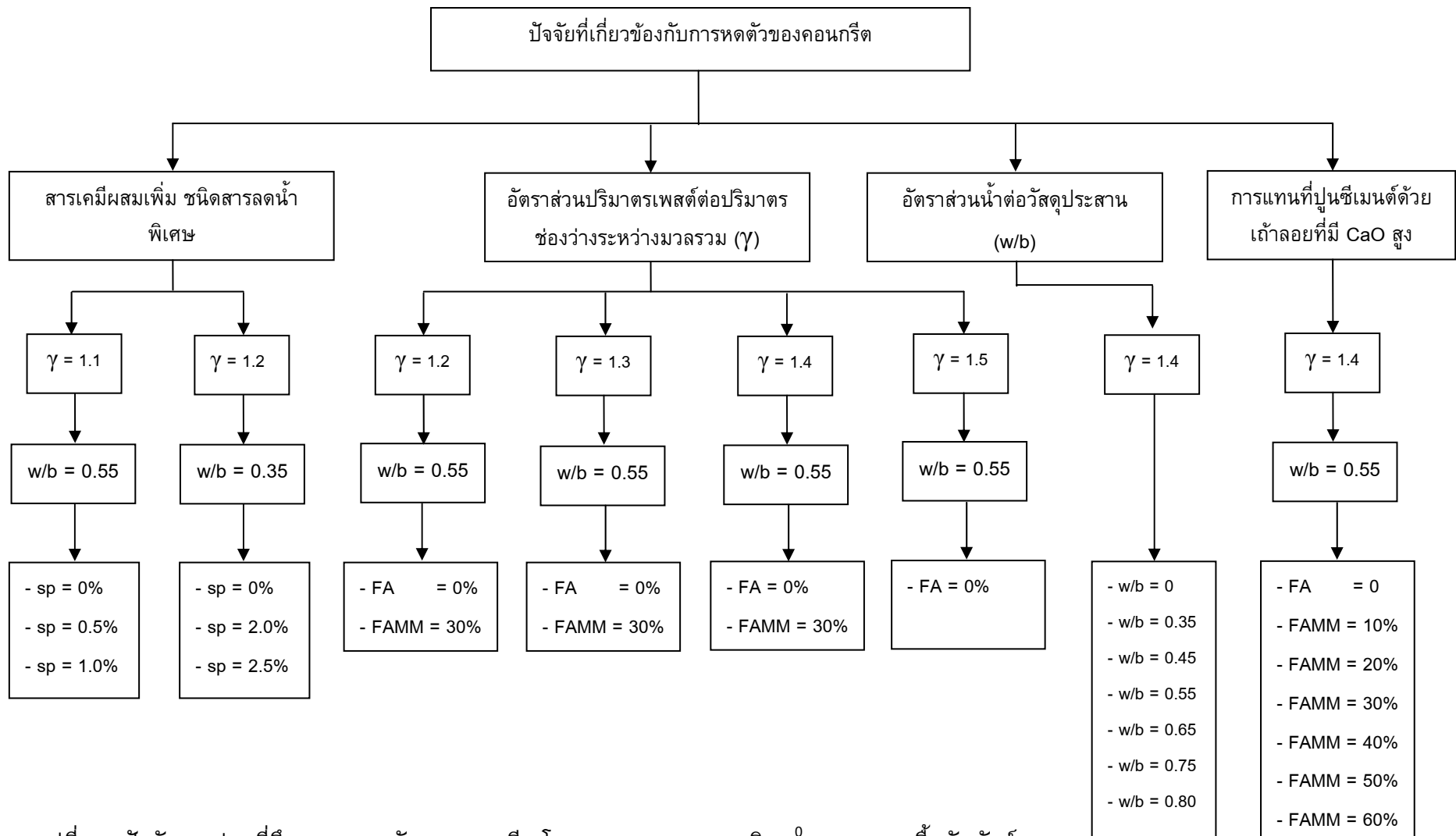
$\varepsilon_{Drying}(t)$  คือ ค่าการหดตัวแบบแห้ง

$\varepsilon_{Unsealed}(t)$  คือ ค่าการหดตัวที่วัดได้จากตัวอย่างที่ไม่หุ้มผิว (การหดตัวโดยรวม)

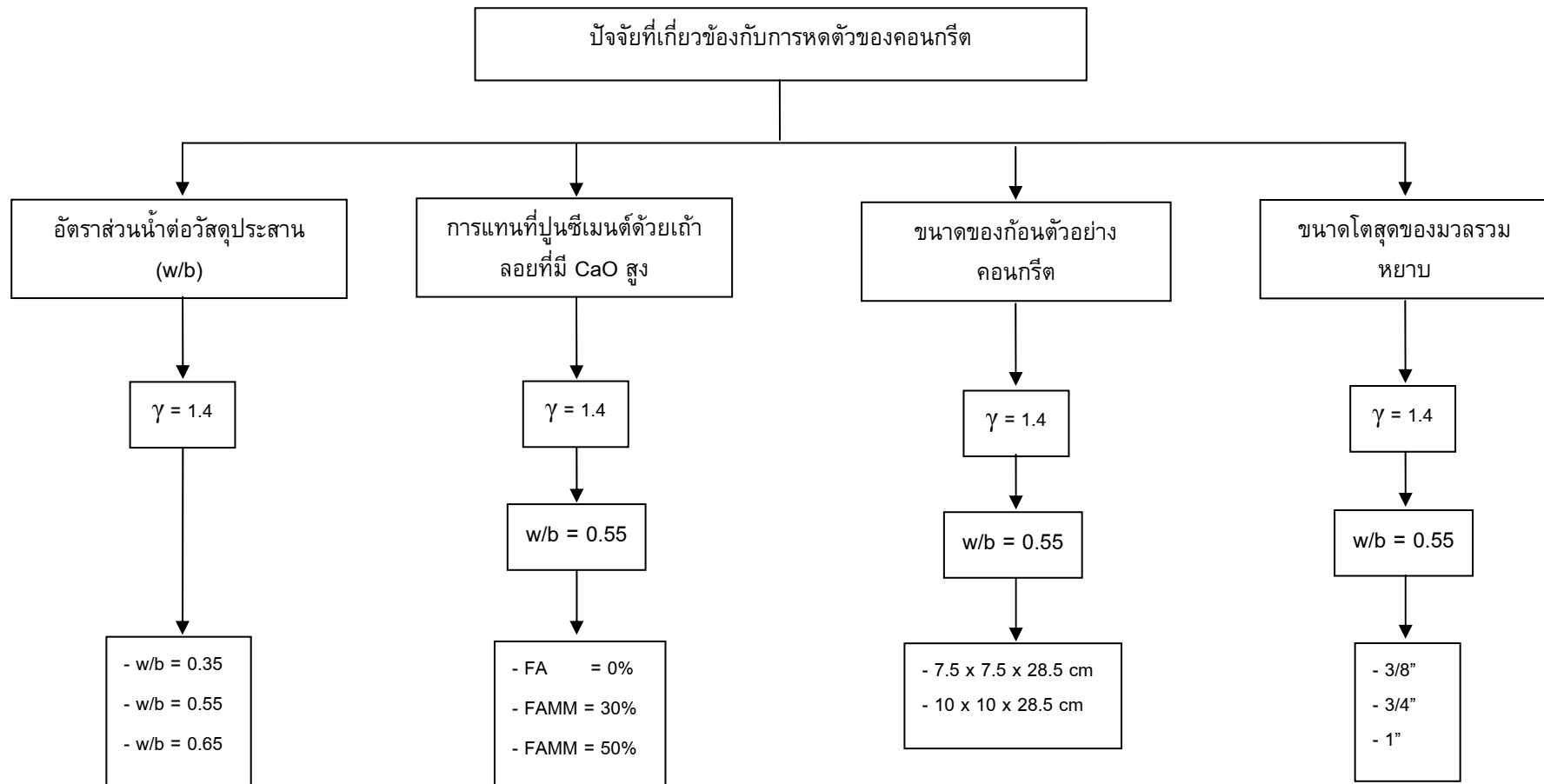
$\varepsilon_{Sealed}(t)$  คือ ค่าการหดตัวที่วัดได้จากตัวอย่างที่หุ้มผิว (การหดตัวแบบออตจิเนส)



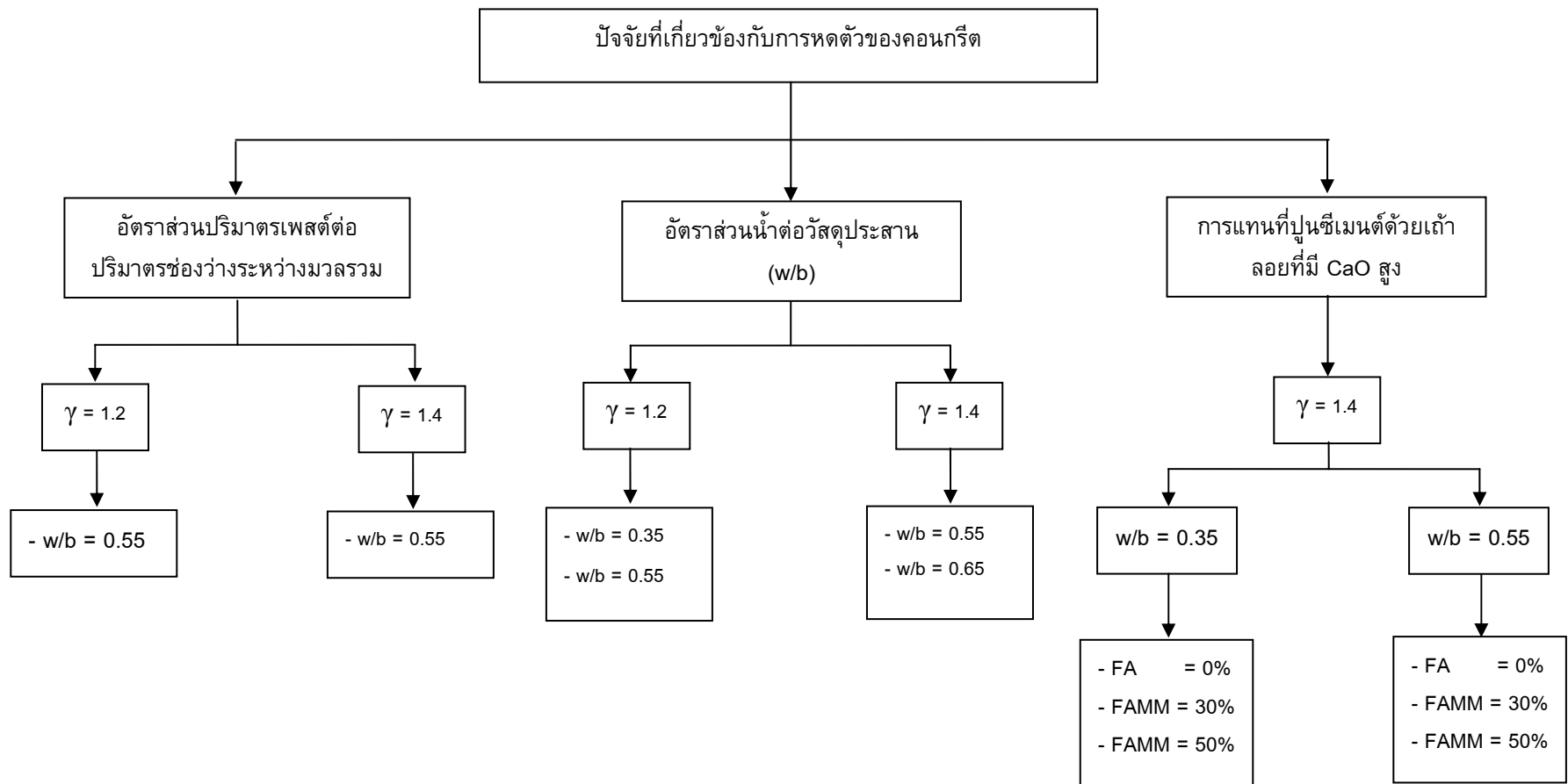
รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตงานวิจัย



รูปที่ 3.2 ปัจจัยบางส่วนที่ศึกษาการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%



รูปที่ 3.3 ปัจจัยบางส่วนที่ศึกษาการหัตถ์ของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 35<sup>0</sup>C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%



รูปที่ 3.4 ปัจจัยบางส่วนที่ศึกษาการหัดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75%

### 3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต ในส่วนของส่วนผสมคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ แร่ธาตุผสมเพิ่ม มวลรวม สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ และน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 1) ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) ตราช้างแดง ผลิตโดย บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ลำปาง) จำกัด ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.16 ตามมาตรฐาน ASTM C188 โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

##### 2) แร่ธาตุผสมเพิ่ม

แร่ธาตุผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอย และผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้

###### - เถ้าลอย

เถ้าลอย (FA) ที่ใช้ในงานวิจัยนำมาจากโรงไฟฟ้า 2 แหล่งผลิต คือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง ใช้ถ่านประเภทลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้ได้เถ้าลอย จำนวน 1 ชนิด คือ Mae Moh (FAMM) ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มี  $\text{CaO}$  สูง (High  $\text{CaO}$ ) ในปริมาณร้อยละ 19.19 และมีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ร้อยละ 3.03 และโรงไฟฟ้า BLCP จ. ระยอง ใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้ได้เถ้าลอยจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ Blair Athol (FAB), Hunter Valley (FAH), Blair Athol - Melawan (FABM) และ Hunter Valley - Melawan (FAHM) ซึ่งเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดนี้ เป็นเถ้าลอยที่มี  $\text{CaO}$  ต่ำ (Low  $\text{CaO}$ ) ในปริมาณร้อยละ 0.75 – 1.25 และมีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ร้อยละ 0.10 - 0.24 องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1 ส่วนในตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและรูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของเถ้าลอย



รูปที่ 3.5 เถ้าลอย

#### - ผงหินปูน

ผงหินปูน (LP) หรือผงแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดเฉลี่ย 5 และ 15 ไมครอนโดยนำมาจาก บริษัทสุรินทร์ออมยาเคมีคอล ประเทศไทย ค่าความถ่วงจำเพาะของผงหินปูนเท่ากับ 2.83 และ 2.70 สำหรับขนาดเฉลี่ย 5 และ 13 ไมครอน (LP1 และ LP2) ตามลำดับ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 และมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ลักษณะของผงหินปูนแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผงหินปูน

#### - มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด โดยศึกษาขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบต่อการหดตัวของคอนกรีต โดยมวลรวมมีรายละเอียดดังนี้

#### - มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบ คือ หินปูน (Limestone) แหล่งผลิตอยู่ที่ อำเภอคลองแสนขัน จังหวัดอุตรดิตถ์ ขนาดโตสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/8, 3/4 และ 1 นิ้ว หาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C127 หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29 โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบ แสดงดังตารางที่ 3.3

#### - มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทรายแม่น้ำ แหล่งผลิตอยู่ที่ อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128 โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียด แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

| Compound                       | OPC   | LP1<br>(5 $\mu$ ) | LP2<br>(15 $\mu$ ) | Type of Fly Ash |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------------------|--------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
|                                |       |                   |                    | FAH             | FAB   | FAHM  | FABM  | FAMM  |
| SiO <sub>2</sub>               | 19.87 | 3.25              | 0.27               | 65.15           | 62.37 | 61.64 | 60.34 | 39.40 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.87  | 1.50              | 0.18               | 22.06           | 28.68 | 21.86 | 26.78 | 17.93 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.55  | 1.28              | 0.08               | 4.17            | 2.57  | 5.85  | 4.75  | 12.92 |
| CaO                            | 65.03 | 65.40             | 54.30              | 1.25            | 0.75  | 2.13  | 1.32  | 19.19 |
| MgO                            | 2.52  | 1.32              | 0.62               | 0.68            | 0.30  | 1.47  | 0.85  | 2.99  |
| SO <sub>3</sub>                | 0.73  | -                 | -                  | 0.18            | 0.10  | 0.24  | 0.16  | 3.03  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.02  | -                 | -                  | 0.02            | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 1.36  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.45  | 0.26              | -                  | 1.09            | 0.60  | 1.11  | 0.61  | 2.50  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.26  | -                 | -                  | 1.00            | 1.44  | 0.97  | 1.39  | 0.34  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.07  | -                 | -                  | 0.35            | 0.27  | 0.33  | 0.24  | 0.20  |
| LOI                            | 2.26  | 26.15             | 43.63              | 3.78            | 2.57  | 4.09  | 3.29  | 0.17  |
| Free CaO                       | 0.20  | -                 | -                  | 0.08            | 0.11  | 0.17  | 0.08  | 1.60  |

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

| Compound                                  | OPC    | Type of Fly Ash |        |        |        |        |
|-------------------------------------------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
|                                           |        | FAH             | FAB    | FAHM   | FABM   | FAMM   |
| Moisture (%)                              | -      | 0.28            | 0.25   | 0.28   | 0.24   | 0.22   |
| Specific Gravity                          | 3.16   | 2.24            | 2.21   | 2.23   | 2.20   | 2.29   |
| Blaine's Fineness<br>(cm <sup>2</sup> /g) | 3,350  | 2,860           | 2,790  | 3,030  | 3,030  | 2,836  |
| Normal Consistency                        | 24.30  | 25.38           | 25.70  | 25.54  | 25.60  | 22.20  |
| Flow Test                                 | 111.95 | 112.20          | 113.95 | 112.55 | 112.38 | 114.58 |
| Water Requirement                         | 49.49  | 50.00           | 50.29  | 50.69  | 50.69  | 46.69  |

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

| Physical Properties                         | Fine Aggregate | Coarse Aggregate |
|---------------------------------------------|----------------|------------------|
| Specific Gravity<br>(Saturated Surface Dry) | 2.58           | 2.63             |
| Absorption (%)                              | 0.78           | 0.53             |
| Fineness Modulus<br>(F.M.)                  | 2.89           | 8.34             |
| Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )            | 1,639.03       | 1,593.13         |

### 3) สารเคมีผสมเพิ่ม

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ต่อการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว และการหดตัวของคอนกรีต โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ คือ ชนิด RHEOBUILD 1000 ผลิตโดยบริษัท O-BASF The Chemical Company มีสารประกอบหลักเป็นแนฟทาลีนซัลโฟนิก (Naphthalenesulfonic Acid) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมี แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารลดน้ำพิเศษ ชนิด RHEOBUILD 1000

| Compound                  | Properties of Superplasticizer                    |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Form                      | Liquid                                            |
| Odour                     | Characteristic                                    |
| Colour                    | Dark Brown                                        |
| pH Value                  | 6 – 8 (20 <sup>0</sup> C)                         |
| Density                   | 1.17 – 1.22 g/cm <sup>3</sup> (20 <sup>0</sup> C) |
| Relative Density          | 1.21                                              |
| Boiling Temperature       | > 100 <sup>0</sup> C                              |
| Toxicological Information | Polymer with Formaldehyde, Calcium Salt           |

### 4) น้ำ

ใช้น้ำสะอาด ซึ่งเป็นน้ำประปา มีค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) เท่ากับ 6.83 ที่อุณหภูมิ 26 ± 1<sup>0</sup>C

#### 3.3.2 แหล่งที่มาของวัสดุผสมเพิ่ม

วัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอย และผงหินปูน ซึ่งเถ้าลอยนำมาจากโรงงานไฟฟ้าภายในประเทศ 2 แห่ง คือ โรงงานไฟฟ้า BLCP จ. ระยอง และโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง และผงหินปูนนำมาจากบริษัทสุรินทร์ออมยาเคมีคอล ประเทศไทยโดยมีรายละเอียดของแหล่งที่มาและขั้นตอนการผลิตของวัสดุผสมก่อนที่จะนำมาเป็นส่วนในผสมคอนกรีตดังนี้

### 5) โรงไฟฟ้า BLCP

บริษัทบีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง เป็นบริษัทผลิตไฟฟ้าเอกชนตามโครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ หรือ ไอพีพี ของการไฟฟ้า

ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มีกำลังการผลิต 1,434 เมกะวัตต์ โดยใช้ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพดีประมาณ 3.6 ล้านตันต่อปี จากประเทศออสเตรเลียและประเทศอินโดนีเซียเป็นเชื้อเพลิงถ่านหินจะถูกขนส่งทางเรือและขนถ่ายที่ทำเรือของของโรงไฟฟ้าบีแอลซีพีจากนั้นจะถูกลำเลียงไปยังลานกองถ่านหินจำนวน 3 กอง โดยมีปริมาณรวมทั้งสิ้นประมาณ 700,000 เมตริกตัน ซึ่งถ่านหินจำนวนนี้สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 60 วันต่อเนื่องจากลานกองถ่านหิน จากการเผาไหม้ถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดเถ้าถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้ประมาณ 360,000 ตันต่อปี โดยเถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เถ้าลอย มีสัดส่วนประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเถ้าก้นเตาอีกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ([www.blcp.co.th](http://www.blcp.co.th))

#### 6) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง ใช้ถ่านลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณวันละ 40,000 ตันโดยชุดจากเหมืองแม่เมาะการเผาถ่านหินจะทำให้เกิดเถ้า 2 ชนิด คือเถ้าก้นเตาซึ่งจะตกลงสู่ก้นเตาและถูกลำเลียงออกจากเตาโดยระบบสายพานเหล็ก (Scrapper Conveyor) จำนวนสูงสุดประมาณวันละ 2,000 ตันต่อวัน และเถ้าลอย ซึ่งจะปะปนไปกับก๊าซร้อนปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นมีปริมาณร้อยละ 80-95 ของเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต เพื่อแยกฝุ่นออกจากก๊าซร้อน ก่อนจะปล่อยก๊าซออกทางปล่องควันอาจมีจำนวนสูงสุดถึงประมาณวันละ 8,000 ตัน

([http://maemoh.egat.com/index\\_maemoh/index.php?content=knowledge](http://maemoh.egat.com/index_maemoh/index.php?content=knowledge).)

#### 7) โรงงานผลิตผงหินปูน

หินปูนที่ใช้ในงานวิจัยนำมาจาก บริษัทสุรินทร์ออมยาเคมีคอล ประเทศไทย ซึ่งเป็นบริษัทผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีกำลังการผลิตมากที่สุดในประเทศไทย โดยโรงงานมีกำลังการผลิต 360,000 เมตริกตันต่อปี ที่จังหวัดลพบุรี

### 3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เครื่องมือพื้นฐานในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา เช่น ชุดทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตได้แก่ เครื่องวัดการยืดหดตัวของคอนกรีต (Length Comparator) ดังรูปที่ 3.7 เครื่องมืออื่นๆ ที่ใช้ในงานวิจัยเช่น

- แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบการหดตัวขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม. ดังรูปที่ 3.8
- แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบการหดตัวช่วงอายุต้นขนาด 7.5x7.5x40.0 ซม. ดังรูปที่ 3.9
- เครื่องผสมคอนกรีตแบบราบขนาด 56 ลิตร ดังรูปที่ 3.10

- ชุดทดสอบปริมาณอากาศในคอนกรีตสด ดังรูปที่ 3.11
- ชุดทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ดังรูปที่ 3.12
- เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวราบ ดังรูปที่ 3.13
- เครื่องบันทึกและแปลงสัญญาณ (Data Logger) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดการยืหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 3.8 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.



รูปที่ 3.9 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x40.0 ซม.



รูปที่ 3.10 เครื่องผสมคอนกรีตแบบราบขนาด 56 ลิตร



รูปที่ 3.11 ชุดทดสอบปริมาณอากาศในคอนกรีตสด



รูปที่ 3.12 ชุดทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวราบ (LVDT)



รูปที่ 3.14 เครื่องบันทึกและแปลงสัญญาณ (Data Logger)

### 3.4 สัดส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีปัจจัยที่ศึกษาจำนวนมาก รวมถึงมีวัสดุที่ใช้แตกต่างกันหลายชนิด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดสัญลักษณ์เพื่อให้สามารถสื่อความหมายกับปัจจัยที่ใช้ในแต่ละส่วนผสม โดยสัญลักษณ์ที่ใช้มีดังนี้

$\gamma$  หมายถึง อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

w หรือ w/b หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

(Water /(Cement+Fly Ash or Limestone Powder))

FA หมายถึง เถ้าลอย

LP หมายถึง ผงหินปูน

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

G หมายถึง มวลรวมหยาบ

S หมายถึง มวลรวมละเอียด

sp หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ

b หมายถึง วัสดุประสาน (Binder) ซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน

3/8", 3/4" และ 1" หมายถึง การใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ

7.5 x 7.5 x 28.4 เซนติเมตร และ 10 x 10 x 28.5 เซนติเมตร หมายถึง การใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.4 เซนติเมตร และ 10 x 10 x 28.5 เซนติเมตรตามลำดับ

H, B, HM และ BM หมายถึง ชื่อชนิดของเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ จากโรงไฟฟ้า BLCP จ. ระยอง โดยเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดนี้ มีองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกัน

MM หมายถึง ชื่อชนิดของเถ้าลอยที่มี CaO สูง และเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูง จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง

FA30 และ FA50 หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 ตามลำดับ

LP0, LP10 หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 10 ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยเช่น  $\gamma 1.4w55FAMM20$  หมายถึง คอนกรีตใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวม ( $\gamma$ ) เท่ากับ 1.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ชนิด FAMM ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

### 3.4.2 ส่วนผสมที่ใช้ในศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัว

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวที่ศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งอธิบายมาแล้วในหัวข้อ 3.2 สามารถนำมาออกแบบส่วนผสมที่ใช้สำหรับดำเนินการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.5 – 3.9 เป็นการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 63 ส่วนผสมซึ่งแบ่งเป็นดังนี้ ตารางที่ 3.5 แสดงสัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต แบ่งออกเป็น 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง หรือเถ้าลอย ชนิด FAMM โดยควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตเท่ากับ  $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$  ตารางที่ 3.6 ตารางที่ 3.6 เป็นสัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต แบ่งออกเป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ และขนาดของก้อนตัวอย่าง โดยการควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตเท่ากับ  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$  ส่วนตารางที่ 3.7 เป็นสัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต โดยควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตเท่ากับ  $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 5\%$  ส่วนการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีตที่เป็นการเปรียบเทียบผลของสภาพแวดล้อม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของอุณหภูมิ จะใช้ตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6 ในการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบ ส่วนผลของความชื้นสัมพัทธ์ จะใช้ตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.7 ในการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบ ตารางที่ 3.8 และ 3.9 เป็นสัดส่วนผสมที่ใช้ศึกษาผลของเถ้าลอยที่มี CaO และ  $\text{SO}_3$  ที่แตกต่างกันต่อการหดตัวของคอนกรีตนอกเหนือจากส่วนผสมในตารางที่ 3.5 – 3.9 แล้วยังมีการออกแบบการ

ทดลองเพื่อศึกษาผลของวิธีและระยะเวลาการบ่มคอนกรีตต่อการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย แต่เนื่องจากรายละเอียดค่อนข้างมากจึงไม่ขอนำเสนอในที่นี้ แต่จะนำเสนอเป็นผลการทดสอบในบทที่ 4 นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของคอนกรีต ซึ่งทดสอบขณะที่คอนกรีตอยู่ในแบบและจะวัดในสภาพที่คอนกรีตถูกห่อหุ้มเพื่อป้องกันน้ำไม่ให้ระเหยออกจากคอนกรีต การหดตัวที่วัดได้จึงเป็นการหดตัวแบบบอโตจีนัส ส่วนผสมที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.10 ซึ่งเป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดและปริมาณของวัสดุผสมเพิ่มเติมได้แก่ แก้วลอยและผงหินปูน

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28<sup>0</sup> C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%

| Mix Proportions       | $\gamma$ | w/b  | sp (%) | FA (%) | Mix Proportion (kg) |        |        |         |        |       | Slump (cm) |
|-----------------------|----------|------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------|--------|-------|------------|
|                       |          |      |        |        | C                   | FA     | W      | G       | S      | sp    |            |
| $\gamma 1.2w35FA0$    | 1.2      | 0.35 | 0      | -      | 413.44              | -      | 144.71 | 1094.14 | 774.91 | -     | 0.8        |
| $\gamma 1.2w35FA0$    | 1.2      | 0.35 | 2.0    | -      | 413.44              | -      | 139.74 | 1094.14 | 774.91 | 8.27  | 1.5        |
| $\gamma 1.2w35FA0$    | 1.2      | 0.35 | 2.5    | -      | 413.44              | -      | 138.51 | 1094.14 | 774.91 | 10.34 | 2.5        |
| $\gamma 1.1w55FA0$    | 1.1      | 0.55 | 0      | -      | 290.59              | -      | 159.82 | 1130.61 | 800.74 | -     | 0          |
| $\gamma 1.1w55FA0$    | 1.1      | 0.55 | 0.5    | -      | 290.59              | -      | 158.95 | 1130.61 | 800.74 | 1.45  | 0.5        |
| $\gamma 1.1w55FA0$    | 1.1      | 0.55 | 1.0    | -      | 290.59              | -      | 158.08 | 1130.61 | 800.74 | 2.91  | 1.5        |
| $\gamma 1.2w55FA0$    | 1.2      | 0.55 | 1.5    | -      | 318.06              | -      | 172.07 | 1094.14 | 774.91 | 4.77  | 7.7        |
| $\gamma 1.3w55FA0$    | 1.3      | 0.55 | 1.0    | -      | 345.52              | -      | 187.96 | 1057.67 | 749.08 | 3.46  | 9.5        |
| $\gamma 1.5w55FA0$    | 1.5      | 0.55 | -      | -      | 400.45              | -      | 220.25 | 984.73  | 697.42 | -     | 12.3       |
| $\gamma 1.2w55FAMM30$ | 1.2      | 0.55 | 1.0    | 30     | 213.77              | 91.62  | 166.13 | 1094.14 | 774.91 | 3.05  | 11.0       |
| $\gamma 1.3w55FAMM30$ | 1.3      | 0.55 | 0.75   | 30     | 232.23              | 99.53  | 180.98 | 1057.67 | 749.08 | 2.49  | 12.0       |
| $\gamma 1.4w35FA0$    | 1.4      | 0.35 | 1.75   | -      | 484.55              | -      | 164.61 | 1021.19 | 723.25 | 8.49  | 7.6        |
| $\gamma 1.4w45FA0$    | 1.4      | 0.45 | 1.0    | -      | 421.63              | -      | 187.20 | 1021.19 | 723.25 | 4.22  | 9.2        |
| $\gamma 1.4w55FA0$    | 1.4      | 0.55 | -      | -      | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.25 | -     | 8.8        |
| $\gamma 1.4w65FA0$    | 1.4      | 0.65 | -      | -      | 334.41              | -      | 217.37 | 1021.19 | 723.25 | -     | 14.8       |
| $\gamma 1.4w75FA0$    | 1.4      | 0.75 | -      | -      | 303.06              | -      | 227.29 | 1021.19 | 723.25 | -     | 16.5       |
| $\gamma 1.4w80FA0$    | 1.4      | 0.80 | -      | -      | 289.49              | -      | 231.59 | 1021.19 | 723.25 | -     | 19.0       |
| $\gamma 1.4w55FAMM10$ | 1.4      | 0.55 | -      | 10     | 331.11              | 36.79  | 202.35 | 1021.19 | 723.25 | -     | 10.5       |
| $\gamma 1.4w55FAMM20$ | 1.4      | 0.55 | -      | 20     | 290.36              | 72.59  | 199.62 | 1021.19 | 723.25 | -     | 11.0       |
| $\gamma 1.4w55FAMM30$ | 1.4      | 0.55 | -      | 30     | 250.69              | 107.44 | 196.98 | 1021.19 | 723.25 | -     | 11.4       |
| $\gamma 1.4w55FAMM40$ | 1.4      | 0.55 | -      | 40     | 212.07              | 141.38 | 194.39 | 1021.19 | 723.25 | -     | 12.5       |
| $\gamma 1.4w55FAMM50$ | 1.4      | 0.55 | -      | 50     | 174.44              | 174.44 | 191.88 | 1021.19 | 723.25 | -     | 13.8       |
| $\gamma 1.4w55FAMM60$ | 1.4      | 0.55 | -      | 60     | 137.77              | 206.65 | 189.43 | 1021.19 | 723.25 | -     | 15.5       |

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 35<sup>0</sup>C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%

| Mix Proportions                         | $\gamma$ | w/b  | sp<br>(%) | FA<br>(%) | Mix Proportion (kg) |        |        |         |        |      | Slump<br>(cm) |
|-----------------------------------------|----------|------|-----------|-----------|---------------------|--------|--------|---------|--------|------|---------------|
|                                         |          |      |           |           | C                   | FA     | W      | G       | S      | sp   |               |
| $\gamma$ 1.4w55FA0                      | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.19 | -    | 8.8           |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM30                   | 1.4      | 0.55 | -         | 30        | 250.69              | 107.44 | 196.98 | 1021.19 | 723.19 | -    | 11.4          |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM50                   | 1.4      | 0.55 | -         | 50        | 174.44              | 174.44 | 191.88 | 1021.19 | 723.19 | -    | 13.8          |
| $\gamma$ 1.4w35FA0                      | 1.4      | 0.35 | 1.75      | -         | 484.55              | -      | 194.61 | 1021.19 | 723.19 | 8.49 | 7.6           |
| $\gamma$ 1.4w65FA0                      | 1.4      | 0.65 | -         | -         | 334.41              | -      | 217.37 | 1021.19 | 723.19 | -    | 14.8          |
| $\gamma$ 1.4w55FA0 (3/8")               | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.19 | -    | 8.0           |
| $\gamma$ 1.4w55FA0 (1")                 | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.19 | -    | 9.5           |
| $\gamma$ 1.4w55FA0<br>(7.5x7.5x28.5 cm) | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.19 | -    | 8.5           |
| $\gamma$ 1.4w55FA0<br>(10x10x28.5 cm)   | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.19 | -    | 8.2           |

ตารางที่ 3.7 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28<sup>0</sup>C และความชื้นสัมพัทธ์ 75%

| Mix Proportions       | $\gamma$ | w/b  | sp<br>(%) | FA<br>(%) | Mix Proportion (kg) |        |        |         |        |       | Slump<br>(cm) |
|-----------------------|----------|------|-----------|-----------|---------------------|--------|--------|---------|--------|-------|---------------|
|                       |          |      |           |           | C                   | FA     | W      | G       | S      | sp    |               |
| $\gamma$ 1.2w35FA0    | 1.2      | 0.35 | 2.5       | -         | 413.44              | -      | 138.50 | 1094.14 | 774.91 | 10.34 | 2.5           |
| $\gamma$ 1.2w55FA0    | 1.2      | 0.55 | 1.5       | -         | 318.06              | -      | 172.07 | 1094.14 | 774.91 | 4.77  | 7.7           |
| $\gamma$ 1.4w55FA0    | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.25 | -     | 8.8           |
| $\gamma$ 1.4w65FA0    | 1.4      | 0.65 | -         | -         | 334.41              | -      | 217.37 | 1021.19 | 723.25 | -     | 14.8          |
| $\gamma$ 1.4w35FA0    | 1.4      | 0.35 |           | -         | 484.85              | -      | 164.61 | 1021.19 | 723.25 | 8.49  | 7.6           |
| $\gamma$ 1.4w35FAMM30 | 1.4      | 0.35 | 1.6       | 30        | 322.04              | 138.02 | 161.02 | 1021.19 | 723.25 | -     | 12.5          |
| $\gamma$ 1.4w35FAMM50 | 1.4      | 0.35 | 1.0       | 50        | 222.44              | 222.44 | 155.71 | 1021.19 | 723.25 | -     | 13.0          |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM30 | 1.4      | 0.55 | -         | 30        | 250.69              | 107.44 | 196.98 | 1021.19 | 723.25 | -     | 11.4          |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM50 | 1.4      | 0.55 | -         | 50        | 174.44              | 174.44 | 191.88 | 1021.19 | 723.25 | -     | 13.8          |

ตารางที่ 3.8 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยต่างชนิด

| Mix Proportion        | $\gamma$ | w/b  | Type of FA | FA (%) | sp (%) | Mix Proportion (kg) |        |        |        |         |      | Slump (cm) |
|-----------------------|----------|------|------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--------|---------|------|------------|
|                       |          |      |            |        |        | C                   | FA     | W      | G      | S       | sp   |            |
| $\gamma$ 1.4w35FA0    | 1.4      | 0.35 | -          | -      | 1.6    | 484.85              | -      | 165.04 | 723.25 | 1021.19 | 7.76 | 9.5        |
| $\gamma$ 1.4w35FAH30  | 1.4      | 0.35 | FAH        | 30     | 1.6    | 320.72              | 137.44 | 155.95 | 723.25 | 1021.19 | 7.33 | 10.6       |
| $\gamma$ 1.4w35FAB30  | 1.4      | 0.35 | FAB        | 30     | 1.6    | 319.88              | 137.09 | 155.55 | 723.25 | 1021.19 | 7.31 | 11.8       |
| $\gamma$ 1.4w35FAHM30 | 1.4      | 0.35 | FAHM       | 30     | 1.6    | 320.43              | 137.32 | 155.82 | 723.25 | 1021.19 | 7.32 | 11.0       |
| $\gamma$ 1.4w35FABM30 | 1.4      | 0.35 | FABM       | 30     | 1.6    | 319.59              | 136.97 | 155.42 | 723.25 | 1021.19 | 7.31 | 11.3       |
| $\gamma$ 1.4w35FAMM30 | 1.4      | 0.35 | FAMM       | 30     | 1.5    | 322.04              | 138.02 | 156.88 | 723.25 | 1021.19 | 6.90 | 12.5       |
| $\gamma$ 1.4w35FAH50  | 1.4      | 0.35 | FAH        | 50     | 1.6    | 220.96              | 220.96 | 150.43 | 723.25 | 1021.19 | 7.07 | 11.2       |
| $\gamma$ 1.4w35FAB50  | 1.4      | 0.35 | FAB        | 50     | 1.6    | 220.05              | 220.05 | 149.81 | 723.25 | 1021.19 | 7.04 | 12.2       |
| $\gamma$ 1.4w35FAHM50 | 1.4      | 0.35 | FAHM       | 50     | 1.6    | 220.66              | 220.66 | 150.22 | 723.25 | 1021.19 | 7.06 | 12.7       |
| $\gamma$ 1.4w35FABM50 | 1.4      | 0.35 | FABM       | 50     | 1.6    | 219.74              | 219.74 | 149.59 | 723.25 | 1021.19 | 7.03 | 11.5       |
| $\gamma$ 1.4w35FAMM50 | 1.4      | 0.35 | FAMM       | 50     | 1.5    | 222.44              | 222.44 | 153.04 | 723.25 | 1021.19 | 4.45 | 13.6       |

หมายเหตุ:  $\gamma = 1.4$  , w/b = 0.35, และ FA = 0, 30 และ 50% โดยควบคุมอุณหภูมิ 28<sup>0</sup> C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%

ตารางที่ 3.9 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยต่างชนิด

| Mix Proportion        | $\gamma$ | w/b  | Type of FA | FA (%) | sp (%) | Mix Proportion (kg) |        |        |         |         |    | Slump (cm) |
|-----------------------|----------|------|------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------|---------|----|------------|
|                       |          |      |            |        |        | C                   | FA     | W      | G       | S       | sp |            |
| $\gamma$ 1.4w55FA0    | 1.4      | 0.55 | -          | -      | -      | 372.99              | -      | 205.14 | 1021.19 | 723.25  | -  | 10.5       |
| $\gamma$ 1.4w55FAH30  | 1.4      | 0.55 | FAH        | 30     | -      | 249.89              | 107.09 | 196.34 | 1021.19 | 723.25  | -  | 10.0       |
| $\gamma$ 1.4w55FAB30  | 1.4      | 0.55 | FAB        | 30     | -      | 249.39              | 106.88 | 195.95 | 1021.19 | 723.25  | -  | 10.8       |
| $\gamma$ 1.4w55FAHM30 | 1.4      | 0.55 | FAHM       | 30     | -      | 249.72              | 107.02 | 196.21 | 1021.19 | 723.25  | -  | 9.8        |
| $\gamma$ 1.4w55FABM30 | 1.4      | 0.55 | FABM       | 30     | -      | 249.22              | 106.81 | 195.81 | 1021.19 | 723.25  | -  | 10.5       |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM30 | 1.4      | 0.55 | FAMM       | 30     | -      | 250.69              | 196.98 | 196.98 | 1021.19 | 723.25  | -  | 11.8       |
| $\gamma$ 1.4w55FAH50  | 1.4      | 0.55 | FAH        | 50     | -      | 173.53              | 173.53 | 190.88 | 1021.19 | 723.25  | -  | 10.6       |
| $\gamma$ 1.4w55FAB50  | 1.4      | 0.55 | FAB        | 50     | -      | 172.96              | 172.96 | 190.26 | 1021.19 | 723.25  | -  | 11.5       |
| $\gamma$ 1.4w55FAHM50 | 1.4      | 0.55 | FAHM       | 50     | -      | 173.34              | 173.34 | 190.67 | 1021.19 | 723.25  | -  | 10.0       |
| $\gamma$ 1.4w55FABM50 | 1.4      | 0.55 | FABM       | 50     | -      | 172.77              | 172.77 | 190.05 | 1021.19 | 723.248 | -  | 11.0       |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM50 | 1.4      | 0.55 | FAMM       | 50     | -      | 174.44              | 174.44 | 191.88 | 1021.19 | 723.248 | -  | 12.6       |

หมายเหตุ:  $\gamma = 1.4$ , w/b = 0.55, และ FA = 0, 30 และ 50% โดยควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%

ตารางที่ 3.10 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาการหดตัวของคอนกรีตในช่วง 48 ชั่วโมง

โดยการควบคุมอุณหภูมิ 28°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%

| Mix Proportions       | $\gamma$ | w/b  | sp<br>(%) | FA<br>(%) | Mix Proportion (kg) |            |        |         |        |      | Slump<br>(cm) |
|-----------------------|----------|------|-----------|-----------|---------------------|------------|--------|---------|--------|------|---------------|
|                       |          |      |           |           | C                   | FA<br>(LP) | W      | G       | S      | sp   |               |
| $\gamma$ 1.4w35FA0    | 1.4      | 0.35 |           | -         | 484.85              | -          | 164.61 | 1021.19 | 723.25 | 8.49 | 7.6           |
| $\gamma$ 1.4w55FA0    | 1.4      | 0.55 | -         | -         | 372.99              | -          | 205.14 | 1021.19 | 723.25 | -    | 8.8           |
| $\gamma$ 1.4w65FA0    | 1.4      | 0.65 | -         | -         | 334.41              | -          | 217.37 | 1021.19 | 723.25 | -    | 14.8          |
| $\gamma$ 1.4w35FAMM30 | 1.4      | 0.35 | 1.6       | 30        | 322.04              | 138.02     | 161.02 | 1021.19 | 723.25 | -    | 12.5          |
| $\gamma$ 1.4w35FAMM50 | 1.4      | 0.35 | 1.0       | 50        | 222.44              | 222.44     | 155.71 | 1021.19 | 723.25 | -    | 13.0          |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM30 | 1.4      | 0.55 | -         | 30        | 250.69              | 107.44     | 196.98 | 1021.19 | 723.25 | -    | 11.4          |
| $\gamma$ 1.4w55FAMM50 | 1.4      | 0.55 | -         | 50        | 174.44              | 174.44     | 191.88 | 1021.19 | 723.25 | -    | 13.8          |
| $\gamma$ 1.4w55LP10   | 1.4      | 0.55 | -         | 10(LP)    | 344.28              | (174.44)   | 191.88 | 1021.19 | 723.25 | -    | 9.2           |

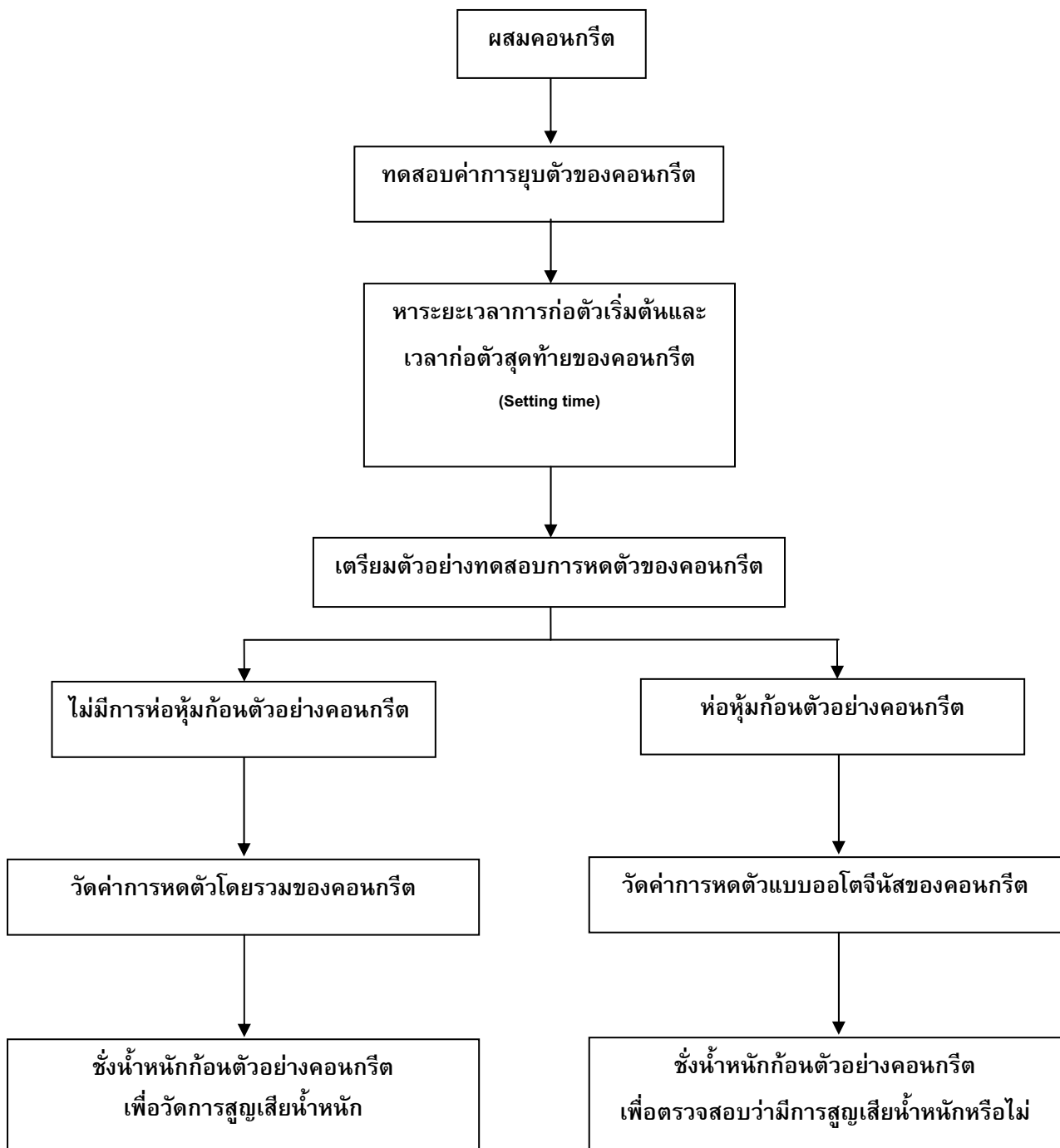
### 3.5 วิธีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต

งานวิจัยนี้ศึกษาการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต แต่เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงต้องวัดค่าการหดตัวโดยรวมจากตัวอย่างที่ไม่มีการห่อหุ้มผิว แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปหักลบด้วยค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัส ที่วัดได้จากตัวอย่างที่มีการห่อหุ้มผิวจึงจะได้ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3.1) ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมตัวอย่างการวัดการหดตัวแบบบอโตจีนัส และการเตรียมตัวอย่างการวัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งการเตรียมตัวอย่างของการวัดการหดตัวทั้งสองนี้ มีลักษณะการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยการวัดการหดตัวแบบบอโตจีนัสจะมีการห่อหุ้มตัวอย่างคอนกรีตเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นออกจากก้อนตัวอย่าง ส่วนการวัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะไม่มีการห่อหุ้มก้อนตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบการหดตัวทั้ง 2 ชนิด ใช้ตัวอย่างปริซึมขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม. ในแต่ละส่วนผสมใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่าง ในส่วนของการศึกษาผลของขนาดของก้อนตัวอย่างจะเพิ่มตัวอย่างที่มีขนาด 10 x 10 x 28.5 ซม. จำนวน 4 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม ทำการบ่มและเก็บตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตามเงื่อนไขการทดสอบที่วางแผนไว้ โดยตัวอย่างต้องอยู่ในห้องควบคุมตลอดการทดสอบ ภาพรวมของการเตรียมตัวอย่างและการวัดสำหรับการหาการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.15

ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวที่วัดได้จากตัวอย่างทดสอบการหดตัวจะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าความเครียดตามสมการที่ (3.2) แล้วจึงนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวต่อไป

$$\Delta L = \left( \frac{L_t - L_0}{L_G} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\Delta L$  คือร้อยละการเปลี่ยนแปลงความยาว  $L_t$  คือ ค่าการวัดความยาวของคอนกรีตที่เวลาใดๆ  $L_0$  คือ ค่าการวัดความยาวของคอนกรีตเริ่มต้น  $L_G$  คือค่าความยาวของแท่งตัวอย่างมาตรฐาน ในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 กระบวนการเตรียมตัวอย่างของการวัดค่าการหดตัวแบบบอโตจีเนส

และการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

### 3.5.1 วิธีการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนส์ของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนส์จะแบ่งเป็นสองส่วนคือ การหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรก และการหดตัวหลังจากแกะแบบเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยการวัดการหดตัวแบบอโตจีนส์ทั้งสองส่วนมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) การหดตัวแบบอโตจีนส์ในช่วง 48 ชั่วโมงแรก

การหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรก ทำได้ยากเนื่องจากการวัดการหดตัวในขณะที่คอนกรีตอยู่ในแบบหล่อ เนื่องจากจะเริ่มวัดการหดตัวเมื่อคอนกรีตก่อตัวเริ่มต้น ซึ่งคอนกรีตมีกำลังต่ำมากจึงไม่สามารถแกะออกจากแบบได้ การหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรกนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยตัวอย่างที่ใช้จะมีขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 40.0$  ซม. จากการที่มี LVDT สำหรับใช้วัดการหดตัวจำนวนจำกัด จึงใช้ตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย การเตรียมแบบหล่อเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากสำหรับการทดสอบการหดตัวช่วงอายุต้นของคอนกรีต หากเตรียมแบบหล่อไม่ดีอาจส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัวที่ได้ การเตรียมแบบหล่อแบ่งได้ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมถุงพลาสติก และการติดตั้งน็อตลงในแบบหล่อ รายละเอียดการเตรียมแสดงดังต่อไปนี้

#### - การเตรียมพลาสติกหุ้มคอนกรีต

จากปัญหาแรงเสียดทานที่อาจเกิดขึ้นจากผิวของคอนกรีตกับแบบหล่อ เพื่อลดหรือขจัดแรงเสียดทานดังกล่าว ผู้วิจัยจึงทดลองลดแรงเสียดทานด้วยวิธีต่างๆ จึงพบว่าถุงพลาสติกหรือถุงดำใส่ขยะสามารถช่วยลดแรงเสียดทานได้โดยสังเกตจากผลทดสอบการหดตัว นอกจากนี้ถุงพลาสติกดังกล่าวยังขึ้นรูปง่ายทำให้สะดวกต่อการทดสอบมากขึ้น สำหรับถุงพลาสติกหรือถุงดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด  $26 \times 34$  นิ้วดังรูปที่ 3.16ก และใช้จำนวน 2 ชั้น สำหรับการเตรียมถุงพลาสติกโดยเริ่มจาก ตัดถุงพลาสติกดังรูปที่ 3.16ข แล้วใช้เครื่องรีดหนีบถุงด้วยความร้อนบริเวณรอยต่อของถุงพลาสติก ดังรูปที่ 3.16ค จะได้ถุงพลาสติกดังรูปที่ 3.16ง และนำถุงพลาสติกที่ได้วางไว้ในแบบหล่อเพื่อเตรียมใส่คอนกรีตต่อไปดังรูปที่ 3.17

#### - การติดตั้งน็อต

การวัดการหดตัวจะใช้ LVDT ในการวัดและบันทึกค่าด้วย Data Logger แต่จากการทดสอบได้นำ LVDT สัมผัสกับผิวของคอนกรีตโดยตรงเพื่อวัดการหดตัวของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตบริเวณที่สัมผัสเกิดการยุบตัวเนื่องจากคอนกรีตยังไม่แข็งตัว จึงแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยนำน็อต ดังรูปที่ 3.18ค ผึงไว้ในคอนกรีตพบว่าสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ น็อตจะติดตั้งไว้ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ห่างกัน 340 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.18ก และเนื่องจากการทดสอบเป็นการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนส์ ซึ่งไม่ยอมให้น้ำออกจากก้อนตัวอย่างคอนกรีต และพบว่าในระหว่างขั้นตอนการติดตั้งน็อตต้องเจาะถุงพลาสติกเพื่อให้ติดตั้งน็อตได้ น้ำในคอนกรีตออกจากคอนกรีตได้โดยผ่านบริเวณด้านข้างของรอยเจาะ

ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงนำแผ่นยาง EVA มาซับด้านในและด้านนอกรอยต่อดังกล่าวดังรูปที่ 3.18ก เมื่อตั้งน็อต แล้วน็อตที่ติดตั้งจะอยู่ที่ปลายทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 3.18ข



ก.



ข.



ค.



ง.

รูปที่ 3.16 การเตรียมถุงพลาสติก

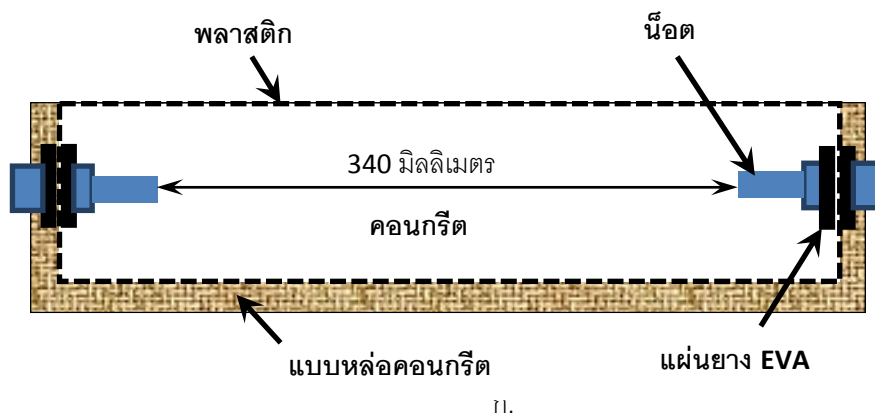


ก



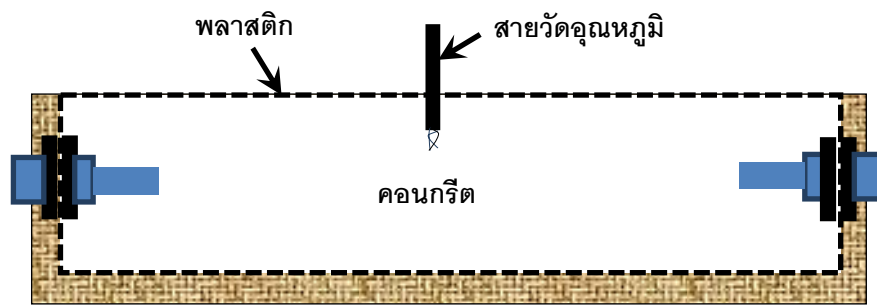
ข

รูปที่ 3.17 การใส่ถุงพลาสติกในแบบหล่อ



รูปที่ 3.18 การติดตั้งน้ำ

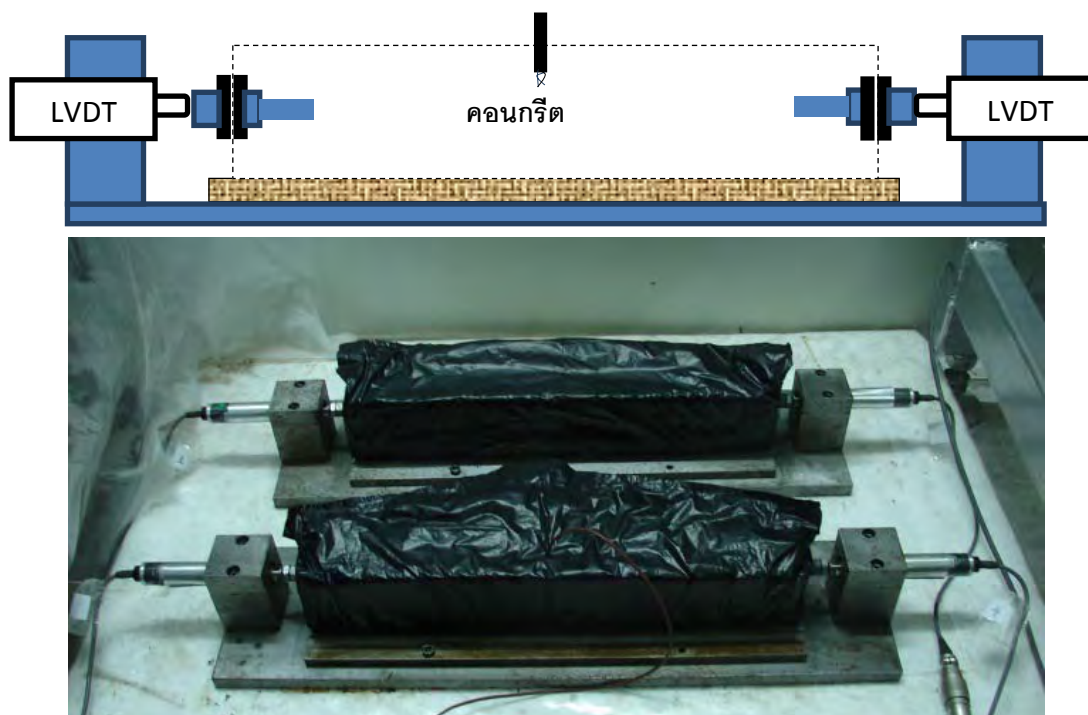
เมื่อเตรียมแบบหล่อเรียบร้อยแล้วจะเทคอนกรีตลงในแบบหล่อ จี้เขย่าแล้วนำไปวางบนชุดจับยึด LVDT ซึ่งอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และติดตั้ง Thermocouple เพื่อวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 3.19 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตจึงแกะแบบด้านข้างออก เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวของคอนกรีตกับหล่อ ดังรูปที่ 3.20 จากนั้นติดตั้ง LVDT เข้ากับชุดจับยึด และวัดการหดตัวของคอนกรีตดังรูปที่ 3.21 ซึ่งขั้นตอนการทดสอบโดยละเอียดสรุปได้ดังรูปที่ 3.22



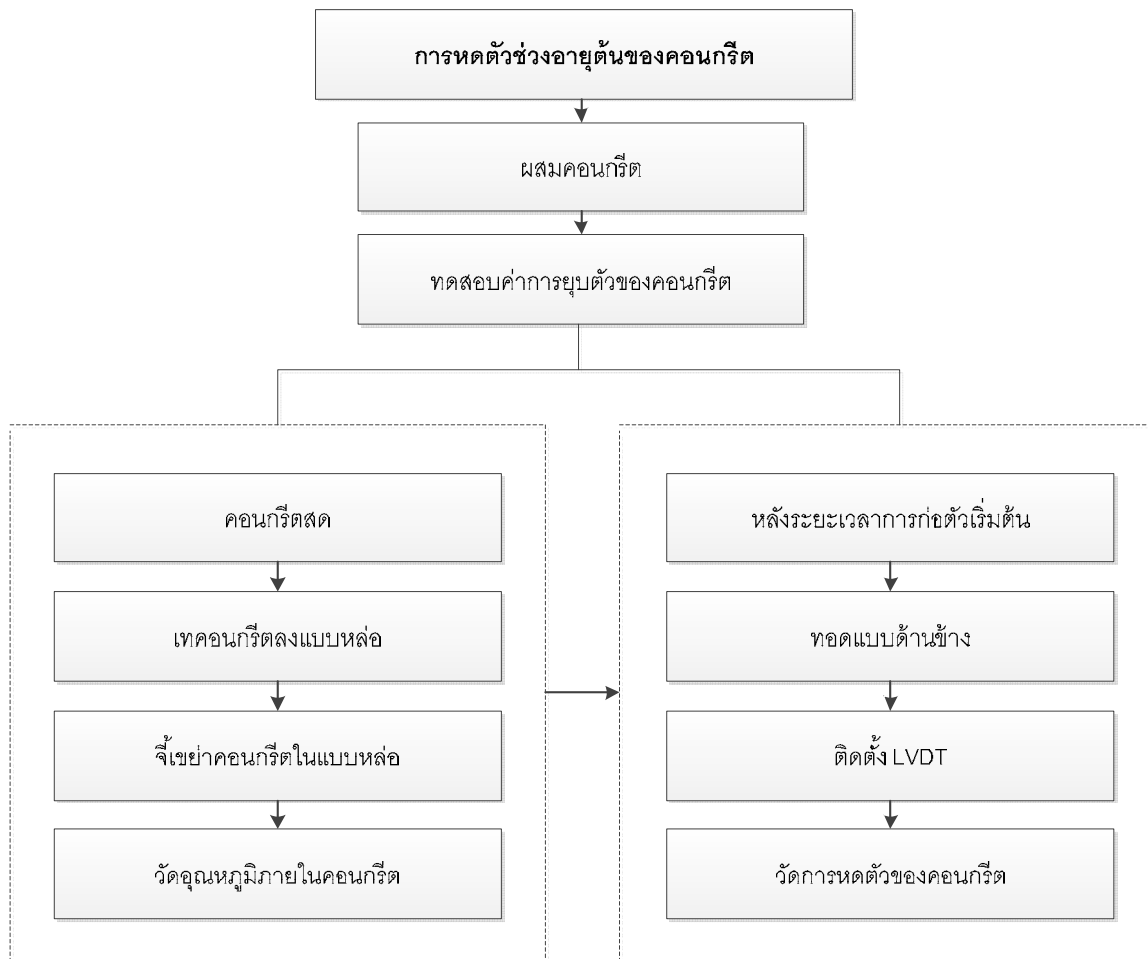
รูปที่ 3.19 การวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต



รูปที่ 3.20 ถอดแบบหล่อการหดตัว



รูปที่ 3.21 การวัดการหดตัวช่วงอายุต้นของคอนกรีต



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทดสอบการหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรก

## 2) การหัดตัวแบบบอโตจีนีสหลังจากก่อตัวขั้นสุดท้าย

การทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนีสของคอนกรีตหลังจากก่อตัวขั้นสุดท้าย ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยตัวอย่างที่ใช้วัดการหดตัวจะมีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม. ใช้จำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย การหดตัวแบบบอโตจีนีสเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีต โดยไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่ภายนอกของคอนกรีตตั้งนั้นตัวอย่างคอนกรีตที่จะวัดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนีสจึงต้องถูกหุ้มโดยรอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ก่อนเทคอนกรีต สกรูสแตนเลสปลายมน จะถูกนำมาติดไว้ที่ปลายทั้งสองข้างของแบบหล่อ เพื่อใช้เป็นจุดสัมผัสกับเครื่องวัดการยืดหดตัวของคอนกรีตโดยปลายด้านในของสกรูแต่ละข้างห่างกัน 250 มม. เท่ากันทุกตัวอย่าง เมื่อแกะตัวอย่างออกจากแบบต้องใช้กาวติดบริเวณรอยต่อของสกรูและคอนกรีต เพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากรอยต่อและป้องกันสกรูขยับตัวขณะวัดการหดตัวงานวิจัยนี้เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย เพื่อให้ตัวอย่างมี

ความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหายเมื่อแกะตัวอย่างออกจากแบบแล้ว จะหุ้มตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร 2 ชั้น ตามด้วย พลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้นดังรูปที่ 3.23 คอนกรีตจะถูกวัดการหดตัวดังรูปที่ 3.24 และชั่งน้ำหนักดังรูปที่ 3.25 ทุก 2 วัน ในช่วง 2 สัปดาห์แรกหลังจากนั้นความถี่จะลดลง โดยวัดทุก 2 สัปดาห์ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในห้องควบคุม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 3.26 ตามเงื่อนไขการทดสอบตลอดระยะเวลาการทดลอง การชั่ง น้ำหนักของตัวอย่างจะกระทำตลอดการทดลองเพื่อตรวจสอบว่ามีการสูญเสียความชื้นออกจากตัวอย่าง หรือไม่ โดยน้ำหนักที่หายไปต้องมีค่าไม่เกิน 0.05% ของน้ำหนักเริ่มต้น หากพบว่าน้ำหนักหายไปเกิน 0.05% จะถือว่าไม่มีผลของการหดตัวแบบแห้งร่วมอยู่ด้วยซึ่งต้องเตรียมตัวอย่างใหม่ ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาดเล็ก จึงถือว่าไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมอยู่ด้วย



(ก) การห่อหุ้มก่อนตัวอย่างคอนกรีต



(ข) หยอดกาว เพื่อป้องกันความชื้นตรงหัวสกรู

รูปที่ 3.23 การห่อหุ้มก่อนตัวอย่างคอนกรีตแบบออโตจีนิส



(ก) การวัดค่าการหดตัวของแบบอโตจีนัส



(ข) การตั้งค่าเริ่มต้นก่อนวัดการหดตัว

รูปที่ 3.24 การวัดก่อนตัวอย่างคอนกรีตแบบอโตจีนัส



รูปที่ 3.25 ชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียความชื้นของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.26 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวแบบออโตจีนิส

### 3.5.2 วิธีการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม. ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ตัวอย่างจะถูกนำออกจากแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง และเริ่มวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแกะออกจากแบบตัวอย่างจะถูกนำไปบ่มด้วยวิธีและระยะเวลาต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา โดยในช่วงที่บ่มคอนกรีตจะถูกวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวและน้ำหนักทุก 2 วัน เมื่อครบอายุการบ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังรูปที่ 3.27 ตามเงื่อนไขการทดสอบที่วางแผนไว้ในช่วง 1 เดือนแรกตัวอย่างจะถูกวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวและชั่งน้ำหนักทุก 7 วัน หลังจากนั้นจึงวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวทุก 2 สัปดาห์จนกระทั่งการหดตัวเริ่มคงที่



รูปที่ 3.27 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวแบบออโตจีนิส

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

บทนี้จะนำเสนอผลการวิจัยซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นผลการทดสอบการหัตถ์ของคอนกรีตที่มีปัจจัยแตกต่างกัน และส่วนที่ 2 เป็นแบบจำลองทำนายการหัตถ์ของคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในประเทศไทย โดยผลการทดสอบการหัตถ์ที่นำเสนอในรายงานฉบับนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของผลการทดสอบที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการหัตถ์ของคอนกรีต แต่ข้อมูลที่นำไปสร้างแบบจำลองทำนายการหัตถ์มีจำนวนมากและนำมาจากการทดสอบโดยผู้วิจัยและบางส่วนนำมาจากงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหัตถ์ของคอนกรีต นอกจากจะต้องทดสอบการหัตถ์แบบอโตจีนัสและการหัตถ์โดยรวมของคอนกรีตแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุประสานและคุณสมบัติของคอนกรีตสด ซึ่งได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี (แสดงดังตารางที่ 3.1) ลักษณะรูปร่างของอนุภาค ค่าการยุบตัว และระยะเวลาการก่อตัว เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ผลการทดสอบการหัตถ์ ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้

- 1) คุณสมบัติของวัสดุประสาน
- 2) การยุบตัวของคอนกรีต
- 3) ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต
- 4) การหัตถ์ของคอนกรีต

#### 4.1 คุณสมบัติของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ จะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีต ทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบทั้งองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์หรือเป็นปัจจัยที่ใช้คำนวณการหัตถ์ของคอนกรีต โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3.1 (บทที่ 3) นอกจากนี้ในส่วนของการศึกษาผลของชนิดของปูนซีเมนต์ต่อการหัตถ์ของคอนกรีต ได้นำข้อมูลการทดสอบการหัตถ์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 มาจากงานวิจัยของ Tongaroonsri (2008) ซึ่งวัสดุประสานที่ใช้มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1

ในส่วนของปูนซีเมนต์องค์ประกอบทางเคมีจะถูกกำหนดโดยมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1 หรือ ASTM C150 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าว

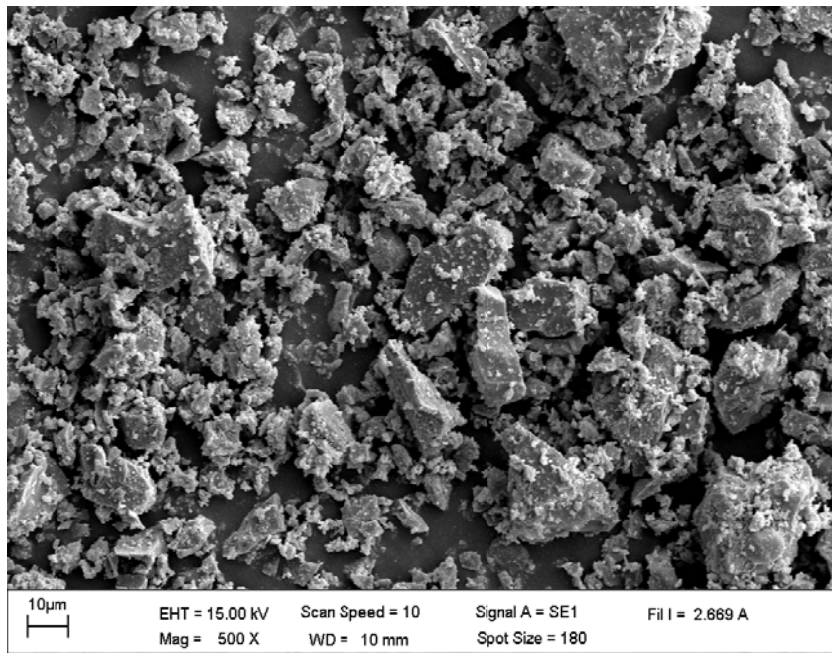
ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างที่มี CaO สูง ได้แก่ FAMM ซึ่งมี CaO ในปริมาณร้อยละ 19.19 และมีปริมาณ  $SO_3$  ร้อยละ 3.03 กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างที่มี CaO ต่ำ ได้แก่ FAH, FAB, FAHM และ FABM ซึ่งมี CaO ในปริมาณร้อยละ 0.75 – 1.25 และมีปริมาณ  $SO_3$  ร้อยละ 0.10 - 0.24

ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสาน ซึ่งทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.7 โดยรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงของปูนซีเมนต์ ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม และมีหลายขนาดปะปนกัน รูปที่ 4.2 ถึง 4.5 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงของตัวอย่าง FAH, FAB, FAHM และ FABM ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มี CaO ต่ำ จากภาพถ่ายกำลังขยายสูงพบว่ารูปร่างของอนุภาคของตัวอย่างที่มี CaO ต่ำ ทั้ง 4 ชนิด มีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ มีรูปร่างหลายชนิดโดยมีทั้งอนุภาคที่มี ผิวขรุขระ ทรงกลม หรือผิวเรียบปะปนกัน รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงของตัวอย่าง FAMM ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มี CaO สูง จากภาพถ่ายกำลังขยายสูงพบว่ารูปร่างของอนุภาคของ FAMM มีลักษณะส่วนใหญ่เป็นทรงกลมและผิวเรียบ รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงของผงหินปูน พบว่ามีรูปร่างลักษณะคล้ายกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีลักษณะรูปร่างที่ เป็นเหลี่ยมมุม

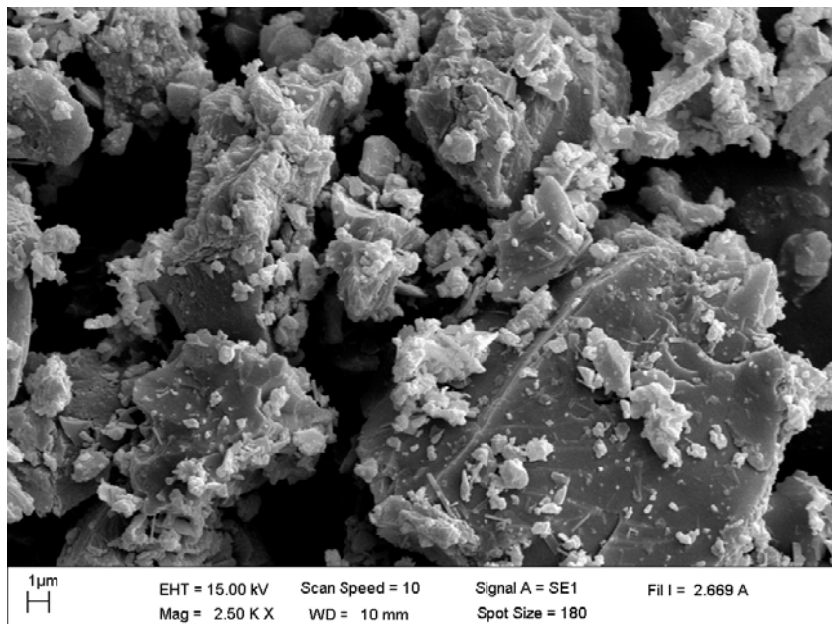
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5  
[Tongaroonsri, 2008]

| Chemical Composition (%)                                | Type I | Type III | Type V |
|---------------------------------------------------------|--------|----------|--------|
| Silicon Dioxide ( $\text{SiO}_2$ )                      | 20.20  | 20.73    | 21.87  |
| Aluminium Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )             | 4.70   | 4.49     | 3.87   |
| Ferric Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )                | 3.73   | 3.32     | 4.34   |
| Calcium Oxide ( $\text{CaO}$ )                          | 63.40  | 64.89    | 64.56  |
| Sulphur Trioxide ( $\text{SO}_3$ )                      | 1.22   | 2.76     | 2.08   |
| Magnesium Oxide ( $\text{MgO}$ )                        | 1.37   | 1.25     | 1.11   |
| Sodium Oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ )                  | <0.01  | 0.24     | <0.01  |
| Potassium Oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )                | 0.28   | 0.32     | 0.24   |
| Loss of Ignition, %                                     | 2.72   | 1.23     | 1.59   |
| Blaine Fineness <sup>a</sup> ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 3430   | 4770     | 3760   |
| Specific gravity                                        | 3.11   | 3.22     | 3.13   |

<sup>a</sup> Using Blaine's air permeability method.

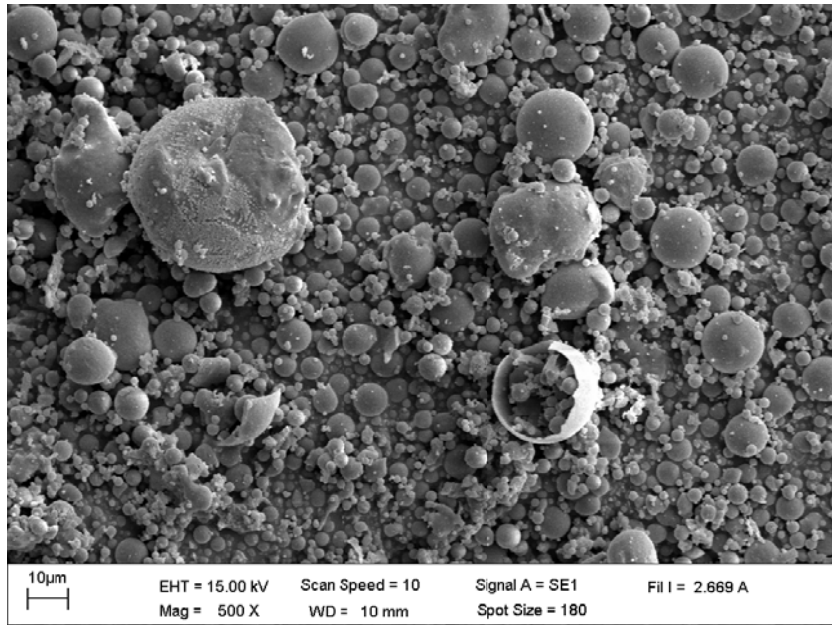


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (500X)

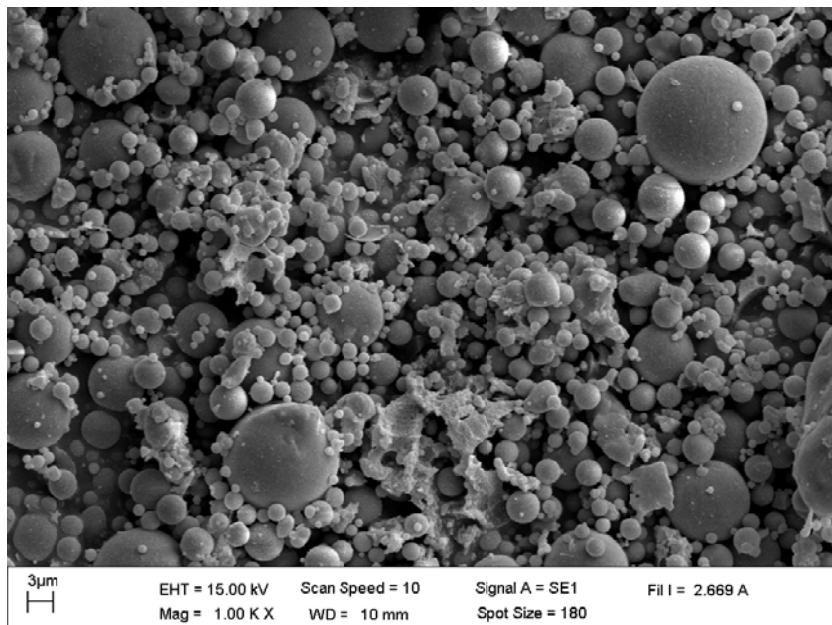


(ข) กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X)

รูปที่ 4.1 ภาพกำลังขยายสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

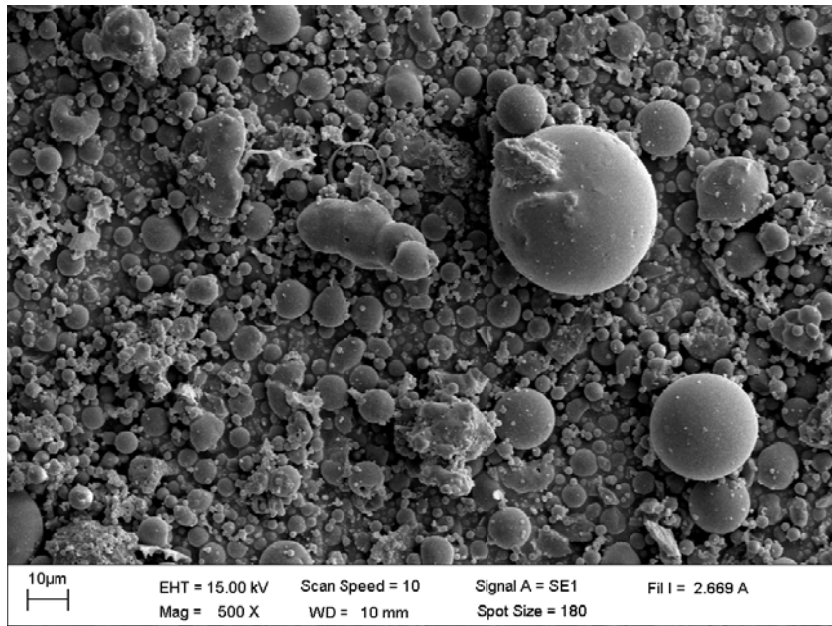


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (500X)

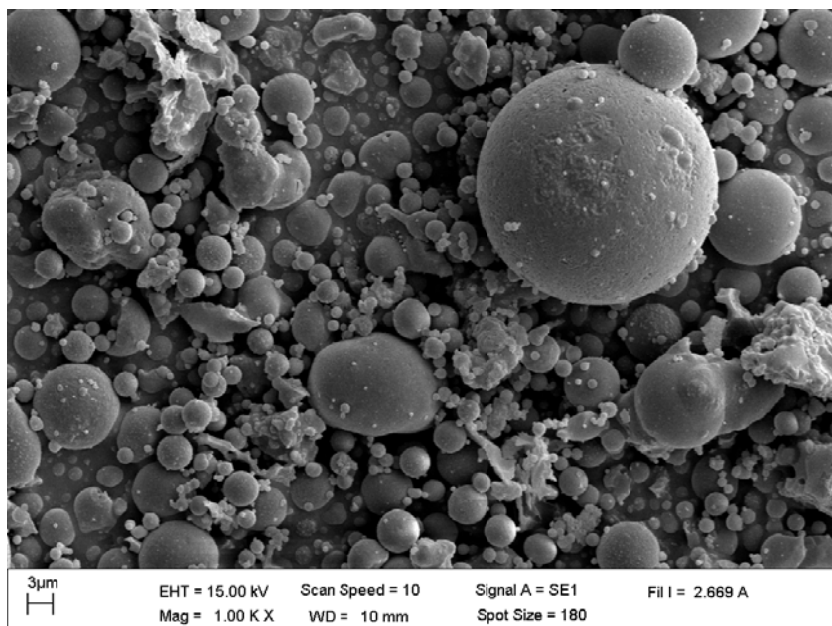


(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X)

รูปที่ 4.2 ภาพกำลังขยายสูงของถ้ำลอย ชนิด FAH

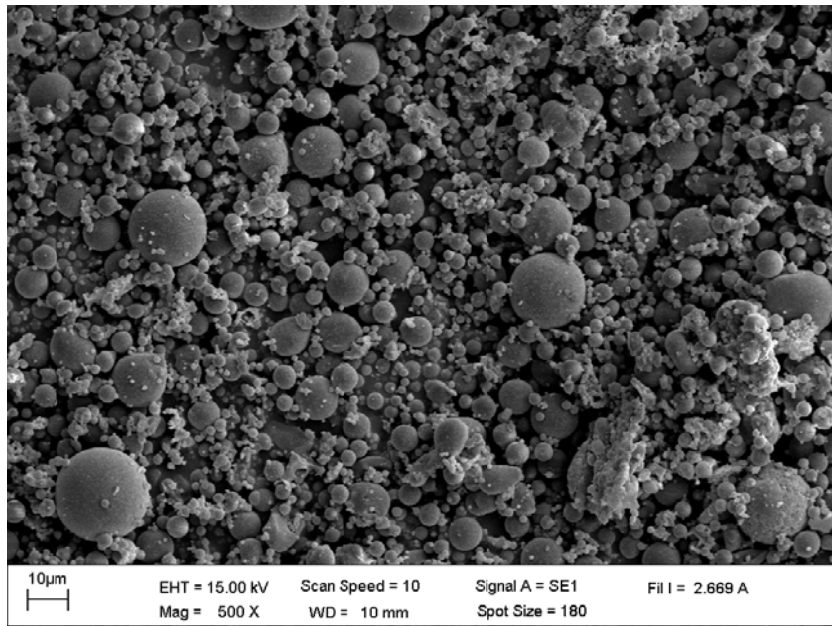


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (500X)

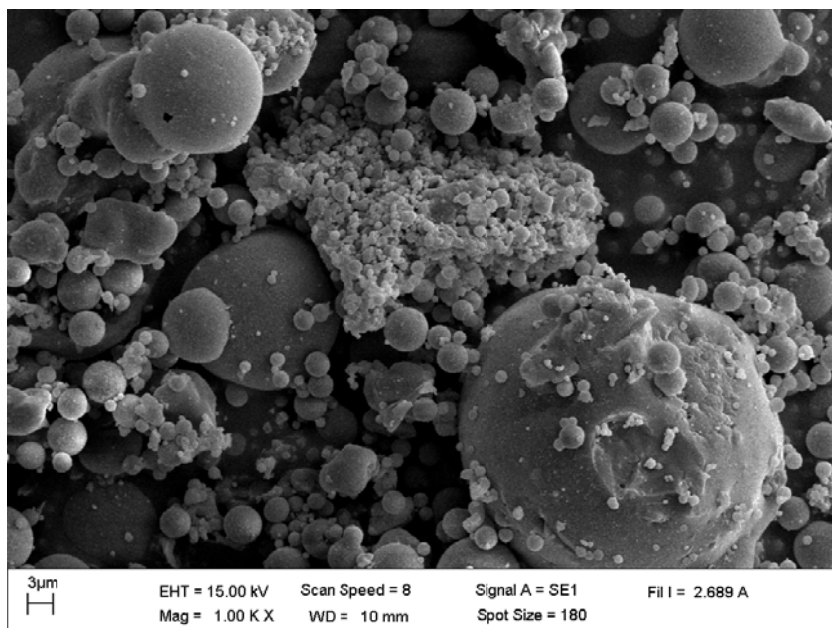


(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X)

รูปที่ 4.3 ภาพกำลังขยายสูงของถ้ำลอย ชนิด FAB

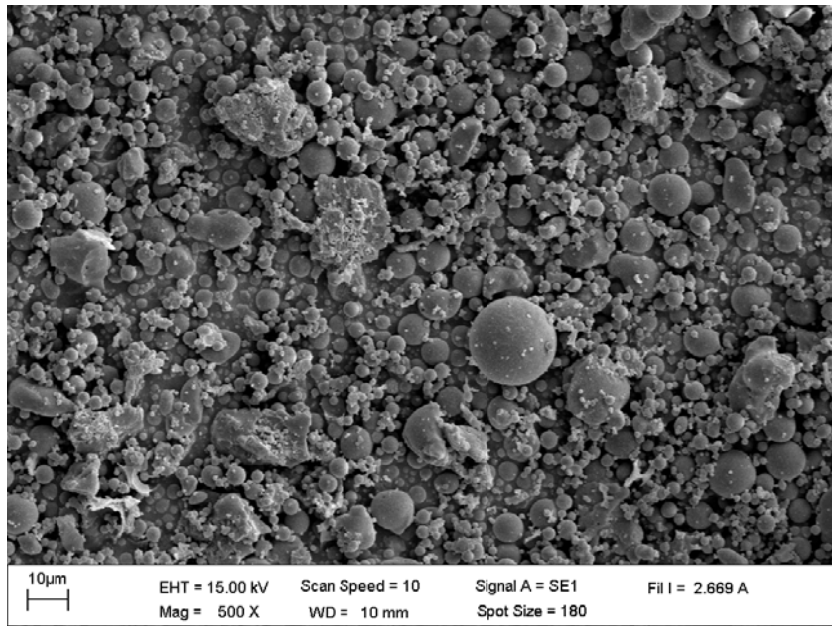


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (500X)

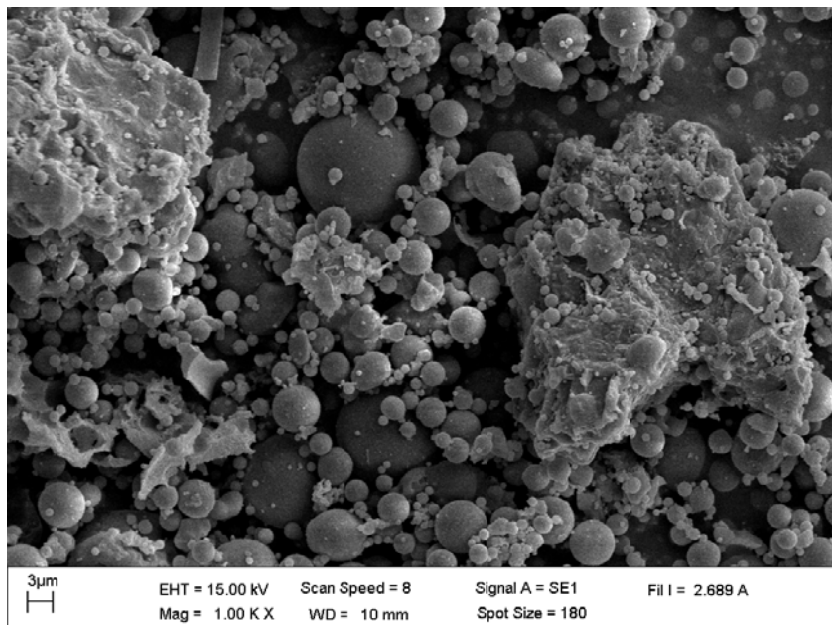


(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X)

รูปที่ 4.4 ภาพกำลังขยายสูงของถั่วลอย ชนิด FAHM

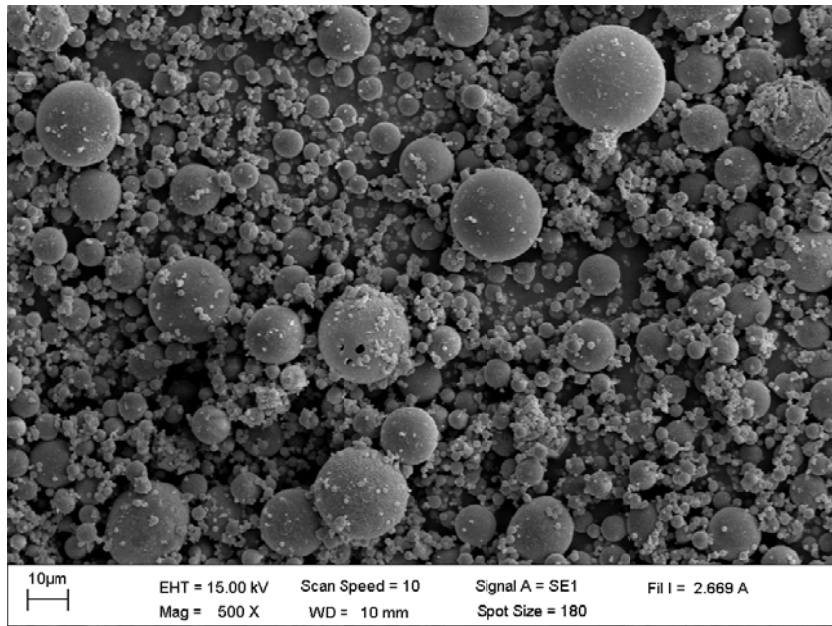


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (500X)

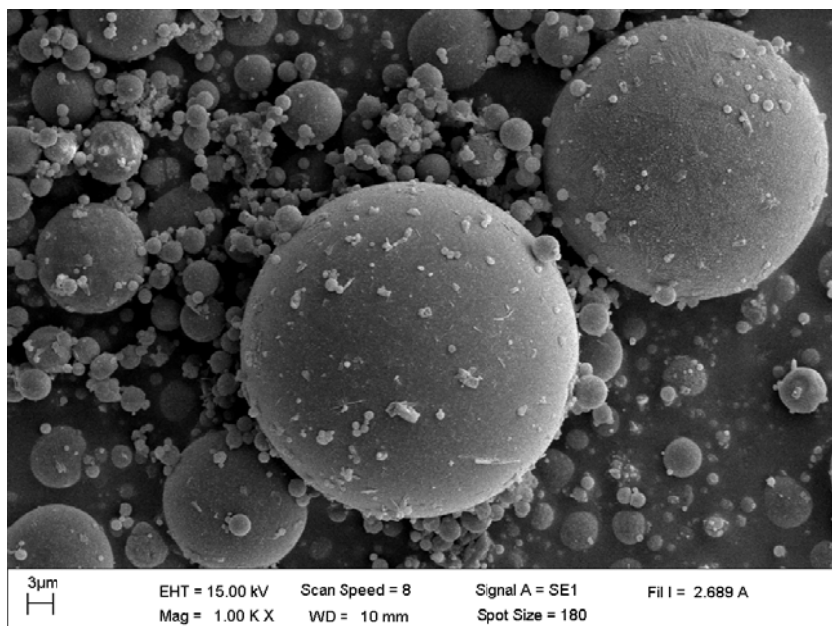


(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X)

รูปที่ 4.5 ภาพกำลังขยายสูงของถ้ำลอย ชนิด FABM

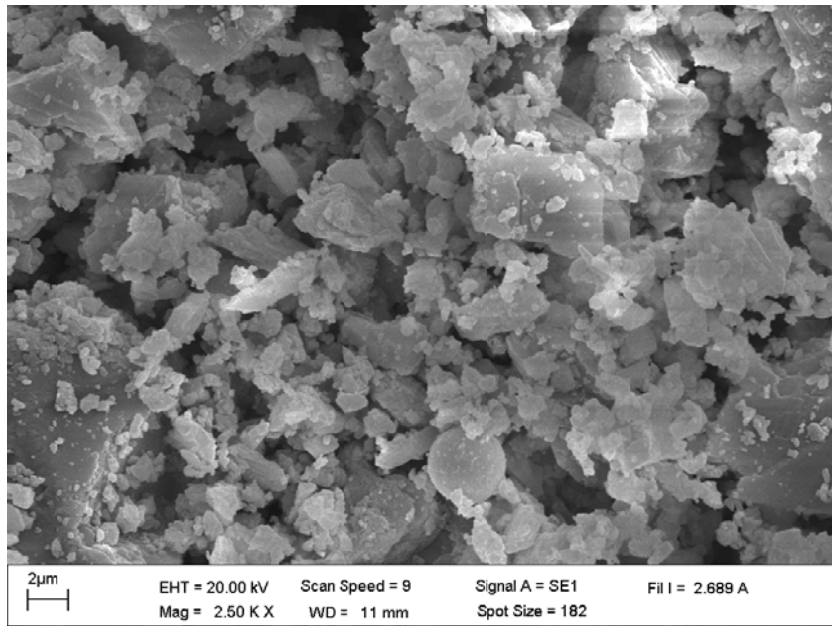


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (500X)

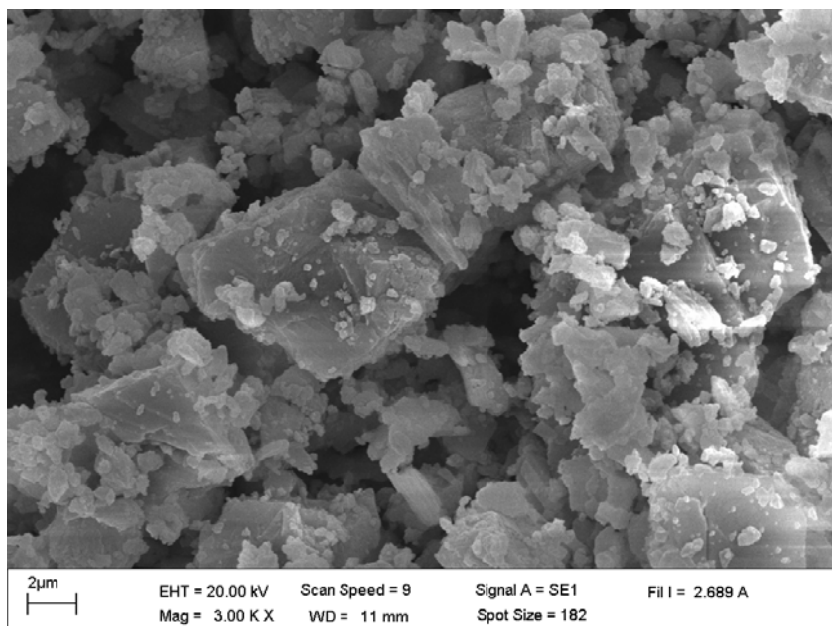


(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X)

รูปที่ 4.6 ภาพกำลังขยายสูงของถั่วลอย ชนิด FAMM



(ก) กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X)



(ข) กำลังขยาย 3000 เท่า (3000X)

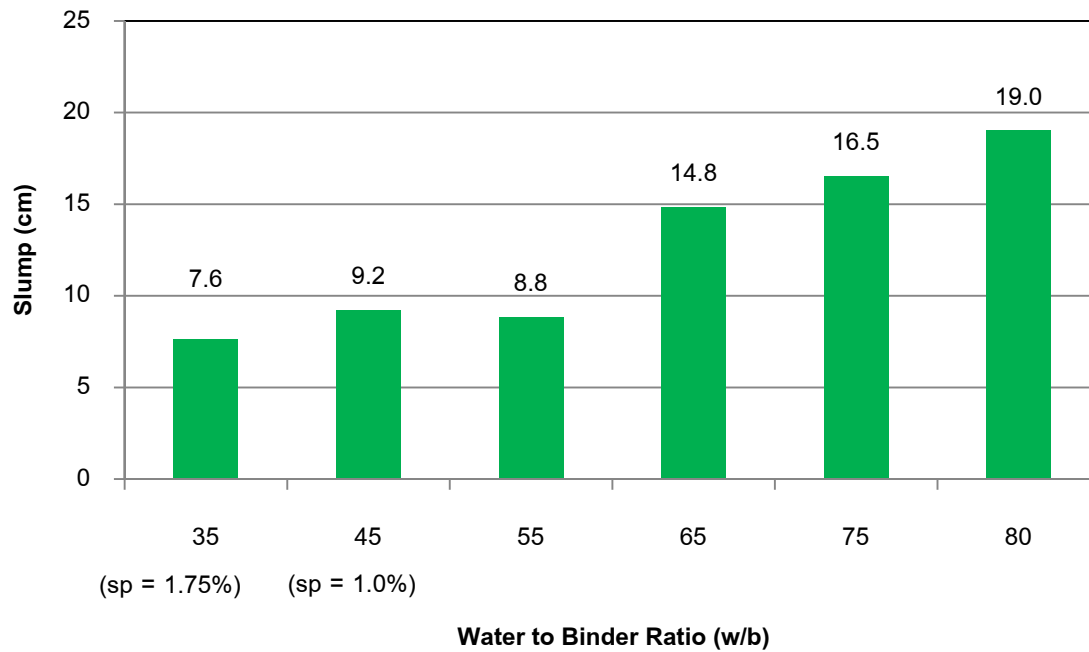
รูปที่ 4.7 ภาพกำลังขยายสูงของผงหินปูน (LP)

## 4.2 การยบตัวของคอนกรีต

จากการสืบค้นข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้ค่าการยบตัวของคอนกรีตเป็นปัจจัยในการคำนวณการหดตัว คือ แบบจำลองของ ACI 209 ดังแสดงในตารางที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าค่าการยบตัวส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการยบตัวของคอนกรีตจะสัมพันธ์กับปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ ซึ่งชนิดและปริมาณของสารเคมีผสมเพิ่มก็ส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีต จึงทำให้ปัจจัยต่างๆ มีความซับซ้อนและสัมพันธ์กัน ซึ่งคณะผู้วิจัยวางแผนที่จะศึกษาผลของสารเคมีผสมเพิ่มต่อการหดตัวแล้วนำปัจจัยนี้ใส่ลงในแบบจำลองในอนาคต นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณน้ำ และปริมาณปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักในการคำนวณค่าการหดตัว (Water to Binder Ratio Base) ซึ่งสามารถครอบคลุม ผลของการยบตัวของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ ดังจะเห็นได้จากแบบจำลองอื่นๆ ที่ไม่ใช้ค่าการยบตัวเป็นปัจจัยในการคำนวณ งานวิจัยนี้จึงควบคุมส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มให้มีค่าการยบตัวอยู่ในช่วง 7.5-12.5 ซม. แต่สำหรับส่วนผสมที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มและมีค่าการยบตัวมากกว่า 7.5 ซม. ก็จะใช้ค่าการยบตัวที่ทดสอบได้มาพิจารณา การทดสอบค่าการยบตัวของคอนกรีต สามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น และชนิดของวัสดุประสาน

### 4.2.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

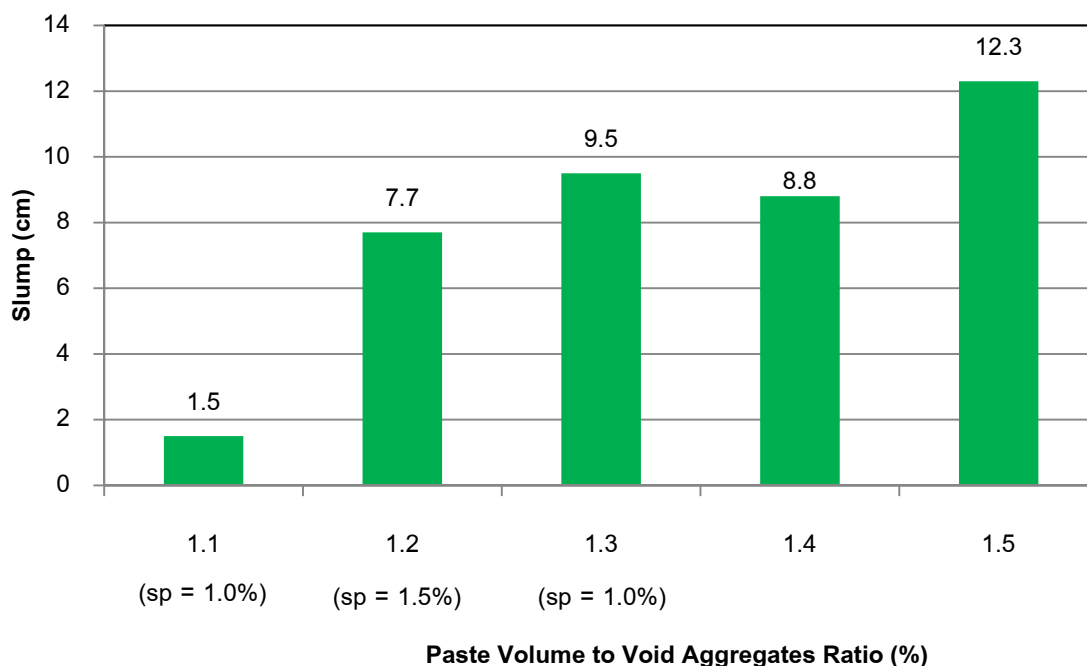
ผลการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการยบตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า การยบตัวของคอนกรีตแปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กล่าวคือ การยบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการยบตัวของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่มีค่าต่ำกว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนผสม  $w/b=0.45$  มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นทำให้การยบตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้น้ำในส่วนผสมมาก จะทำให้มีปริมาณน้ำอิสระ หรือน้ำส่วนเกินในปริมาณมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีความหล่อลื่นไหลสูง ค่าการยบตัวของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำอิสระเหล่านี้จะไปส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีตต่อไป



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการยุบตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

#### 4.2.2 อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) ต่อการยุบตัวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า การยุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม  $\gamma$  ที่เพิ่มขึ้น จากรูปพบว่าที่  $\gamma=1.3$  มีการยุบตัวมากกว่า  $\gamma=1.4$  เนื่องจากในกรณีของส่วนผสมที่มี  $\gamma=1.3$  มีการเติมสารเคมีผสมเพิ่มในปริมาณที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัวสูง จากผลการทดสอบสามารถอธิบายได้ว่าการที่  $\gamma$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น

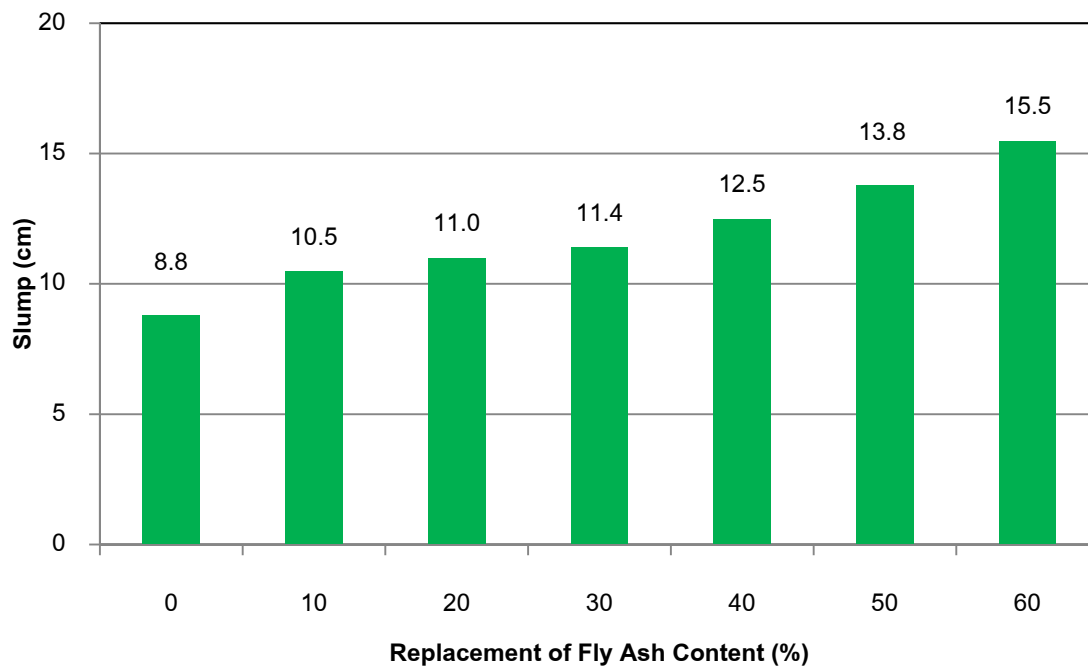


รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการยุบตัวของคอนกรีต  
(w/b = 0.55)

#### 4.2.3 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

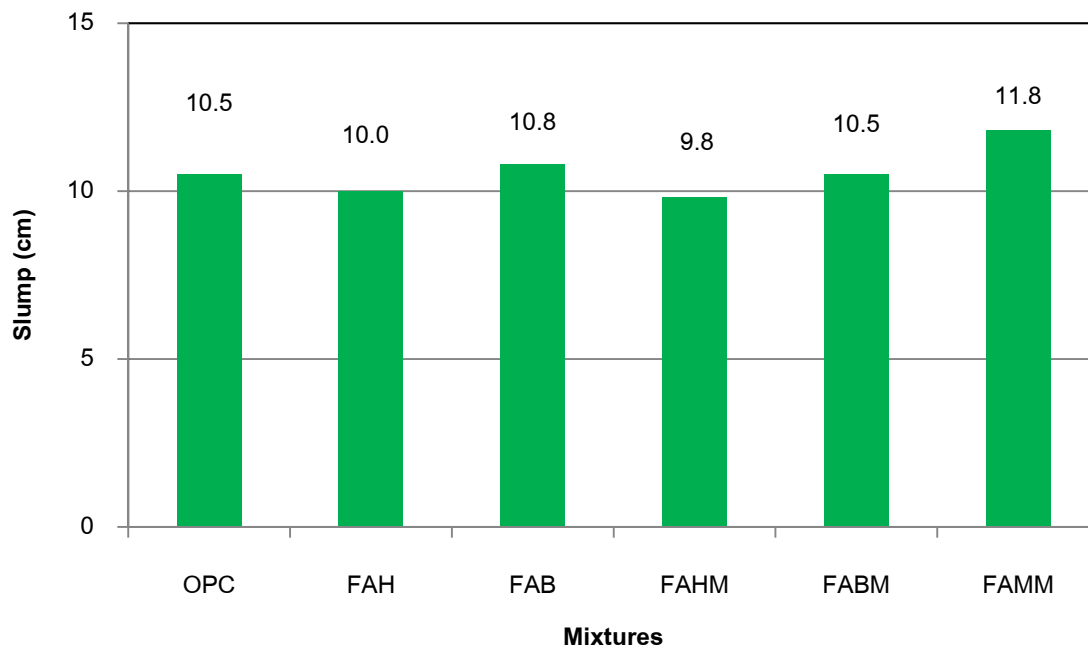
เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือเถ้าลอยที่มี CaO สูง และเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อการยุบตัวของคอนกรีต จะใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง ในการเปรียบเทียบ โดยใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เท่ากันทุกส่วนผสม ใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ในปริมาณร้อยละที่แตกต่างกัน คือ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง และจากการลักษณะอนุภาคที่เป็นทรงกลม มีผิวเรียบของเถ้าลอย จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ให้มีการลื่นไหลดีขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้น ส่วนผลของการใช้เถ้าลอยที่ต่างชนิดกันต่อการยุบตัวของคอนกรีต ใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง ทำให้การยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ จะมีค่าการยุบตัวใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ไม่ใช้เถ้าลอยแม้ว่าจะใช้เถ้าลอยถึงร้อยละ 50 ก็ตาม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ มีลักษณะอนุภาคที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุมและกลมปะปนกัน ทำให้มีความสามารถในการเป็นตัวหล่อลื่นลดลง

และมีความต้องการน้ำมากขึ้น เมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่มี CaO สูง นอกจากนี้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ มีค่า LOI เฉลี่ยประมาณ 3.43 ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์ (LOI=2.26) และเถ้าลอยที่มี CaO สูง (LOI=0.17) อย่างมาก จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการดูดน้ำได้มากกว่า ทำให้น้ำอิสระในคอนกรีตลดลง จึงทำให้การยุบตัวของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ มีพฤติกรรมแตกต่างจากส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง

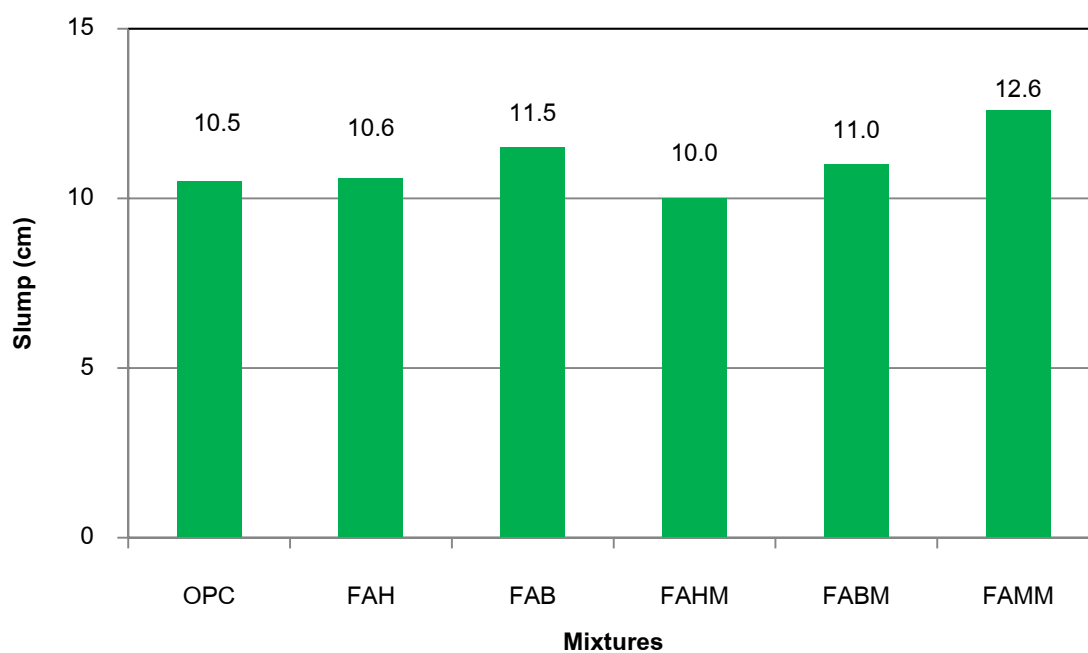


รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อการยุบตัวของคอนกรีต

( $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )



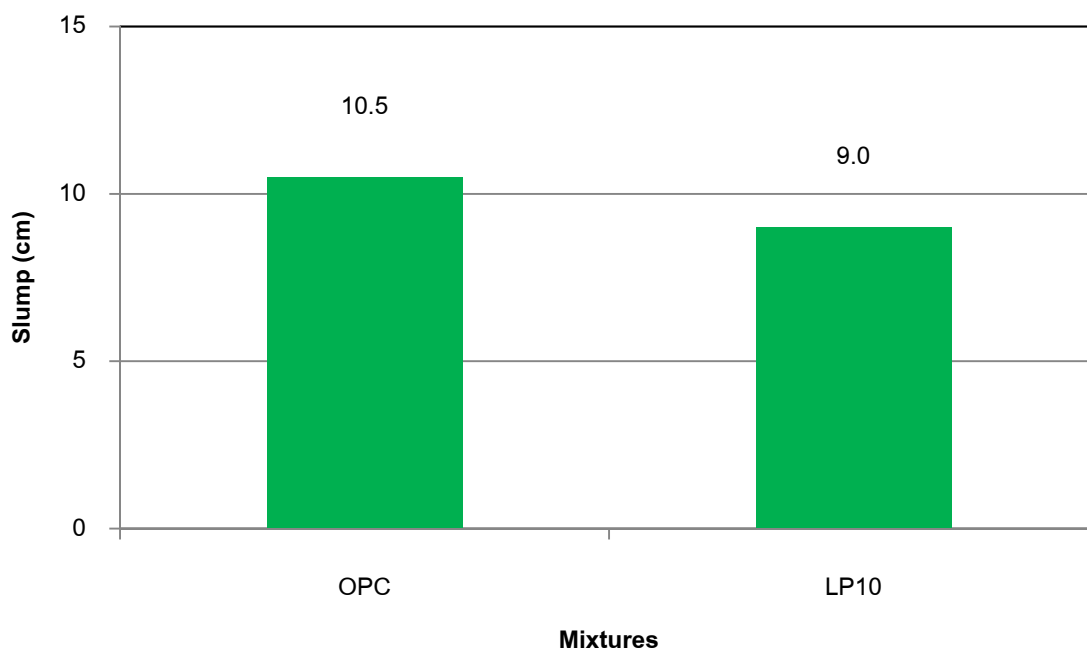
รูปที่ 4.11 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิดต่างๆ ต่อการยุบตัวของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$  w/b = 0.55 และ FA = 30%)



รูปที่ 4.12 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิดต่างๆ ต่อการยุบตัวของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$  w/b = 0.55 และ FA = 50%)

#### 4.2.4 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน

ผลของการใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อการยุบตัวของคอนกรีต โดยการใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนในปริมาณอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน มีค่าการยุบตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมผงหินปูนเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้ผงหินปูนทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลง เนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ สามารถเข้าไปช่วยในการลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ รวมถึงส่งผลให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุผงกับน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผงหินปูนยังมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม จึงทำให้คอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าการยุบตัวลดลง



รูปที่ 4.13 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการยุบตัวของคอนกรีต

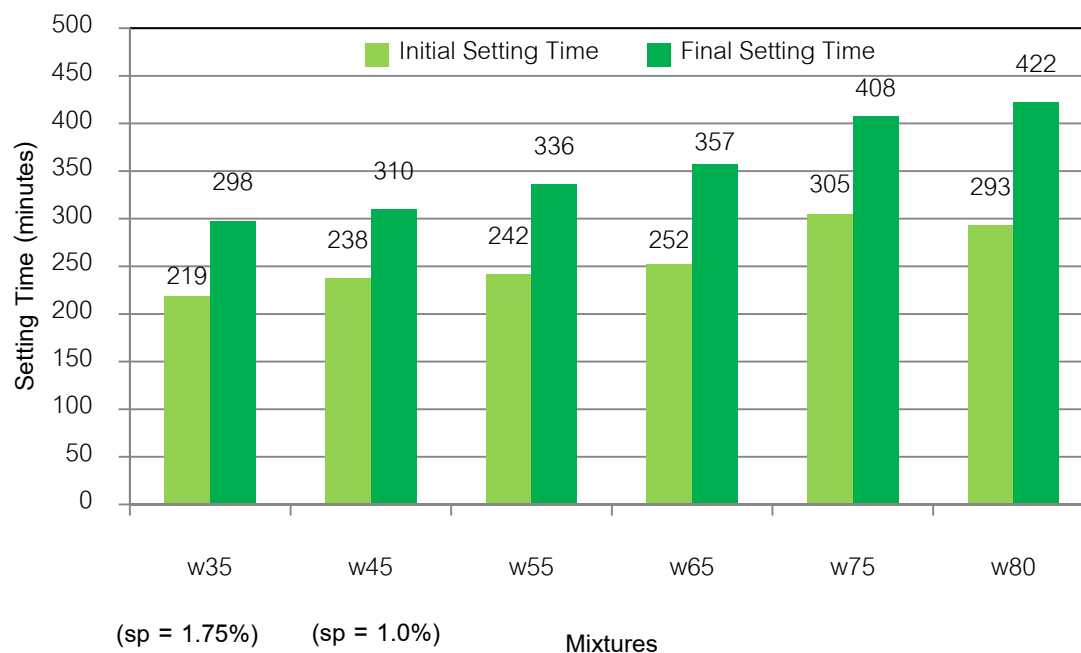
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.55$  และ  $LP = 10\%$ )

### 4.3 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีต จะเริ่มวัดการหดตัวหลังจากระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตแล้ว 2 ชั่วโมง ดังนั้นทุกส่วนผสมต้องหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเมื่อนำระยะเวลาก่อตัวที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันตามปัจจัยต่าง ๆ ได้ผลการทดสอบแยกตามปัจจัยต่างๆ ได้ดังนี้

#### 4.3.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

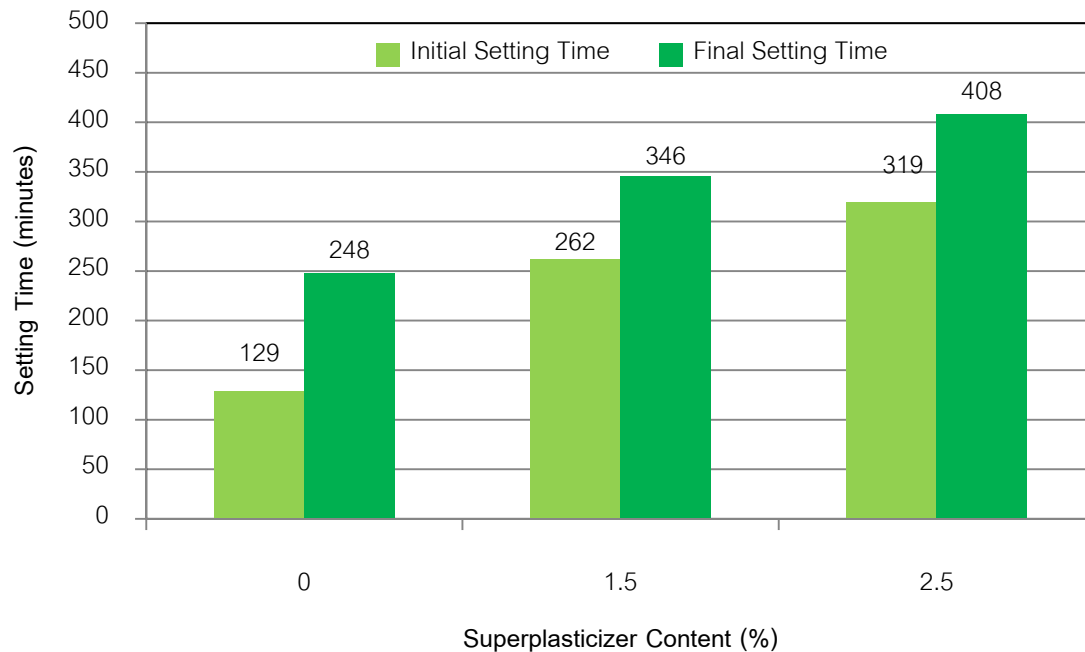
ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.14 จากผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต แปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน กล่าวคือ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.80 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.75 อยู่เล็กน้อย การที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีน้ำเป็นส่วนผสมมาก ทำให้มีปริมาณน้ำอิสระหรือน้ำที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ หรือเรียกว่า “น้ำส่วนเกิน (Excess Water)” เหลืออยู่ในปริมาณมาก อนุภาคของวัสดุประสานจะอยู่ห่างกันส่งผลให้การยึดเกาะหรือการแข็งตัวของซีเมนต์เกิดขึ้นได้ช้า จึงทำให้คอนกรีตมีความหล่อลื่นไหลสูงและคงสภาพความชื้นเหลวที่นาน ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

#### 4.3.2 สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ

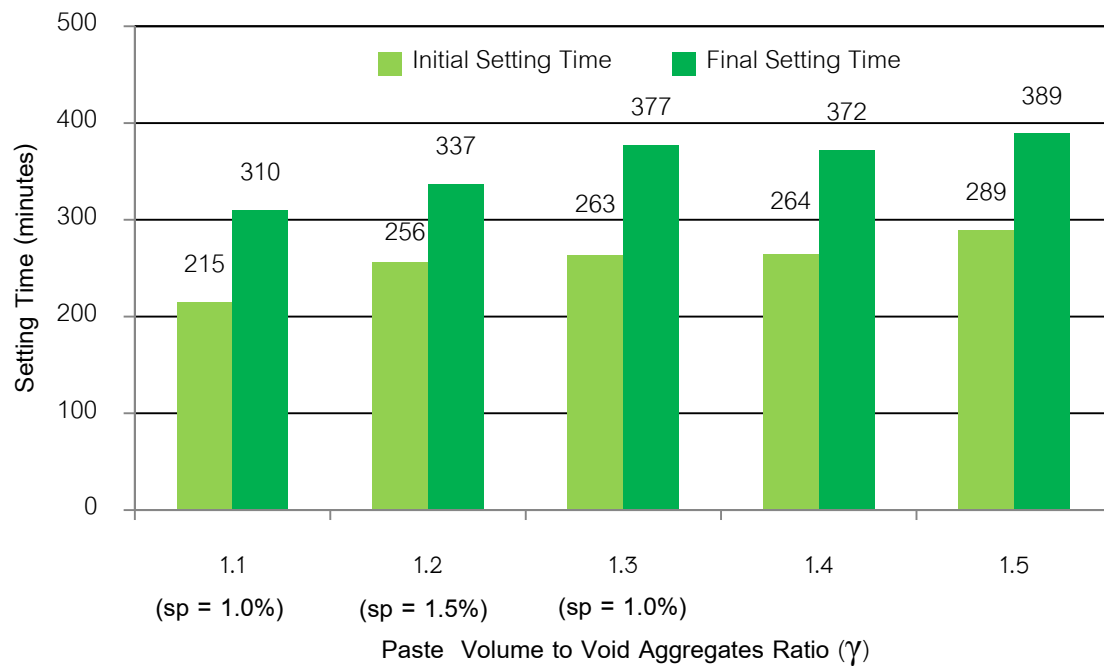
งานวิจัยนี้ใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ ในการควบคุมส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทำให้มีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 7.5 -12.5 ซึ่งสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้จะส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตและการหดตัวของคอนกรีต ผลของสารเคมีผสมเพิ่มต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.15 จากผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเคมีผสมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  ในปูนซีเมนต์ ทำให้ชะลออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยระดับการหน่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ [Zhang et Al., 2010] นอกจากนี้คุณสมบัติของสารเคมีผสมเพิ่มที่เติมลงไปในคอนกรีต สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตให้เกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน จนทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์ที่จับตัวแน่นกระจายตัวออก ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ผลของสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.2$  และ  $w/b = 0.35$ )

#### 4.3.3 อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

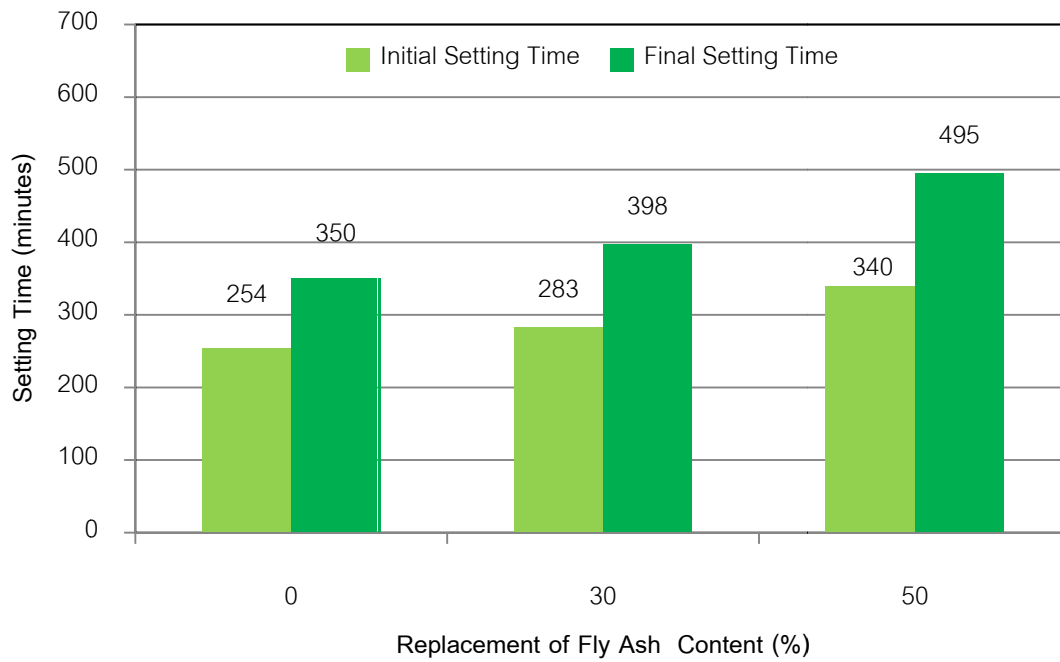
ผลของอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) ต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.16 จากผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.3 ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่มในส่วนผสมที่  $\gamma=1.4$  การที่คอนกรีตใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์มาก ปริมาณมวลรวมมีค่าลดลง ทำให้มีซีเมนต์เพสต์เหลือจากการเคลือบผิวของมวลรวมจำนวนมาก ประกอบกับมีปริมาณน้ำอิสระในปริมาณมาก ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้น



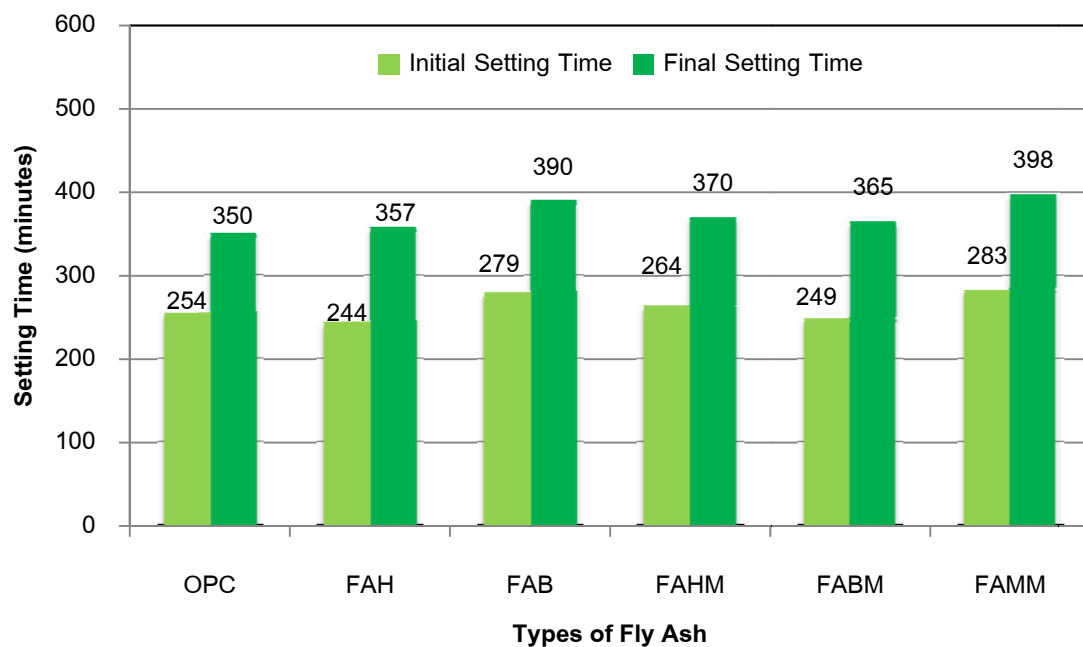
รูปที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )

#### 4.3.4 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง แสดงดังรูปที่ 4.17 จากผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้เถ้าลอยจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดช้าลง นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยยังทำให้มีปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของการใช้เถ้าลอยต่างชนิดกันแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าการใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง มีระยะเวลาการก่อตัวยาวกว่าการใช้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ อาจเป็นผลมาจากปริมาณน้ำอิสระที่ต่ำกว่าในกรณีที่ใช้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ ซึ่งความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับการยุบตัวของคอนกรีต



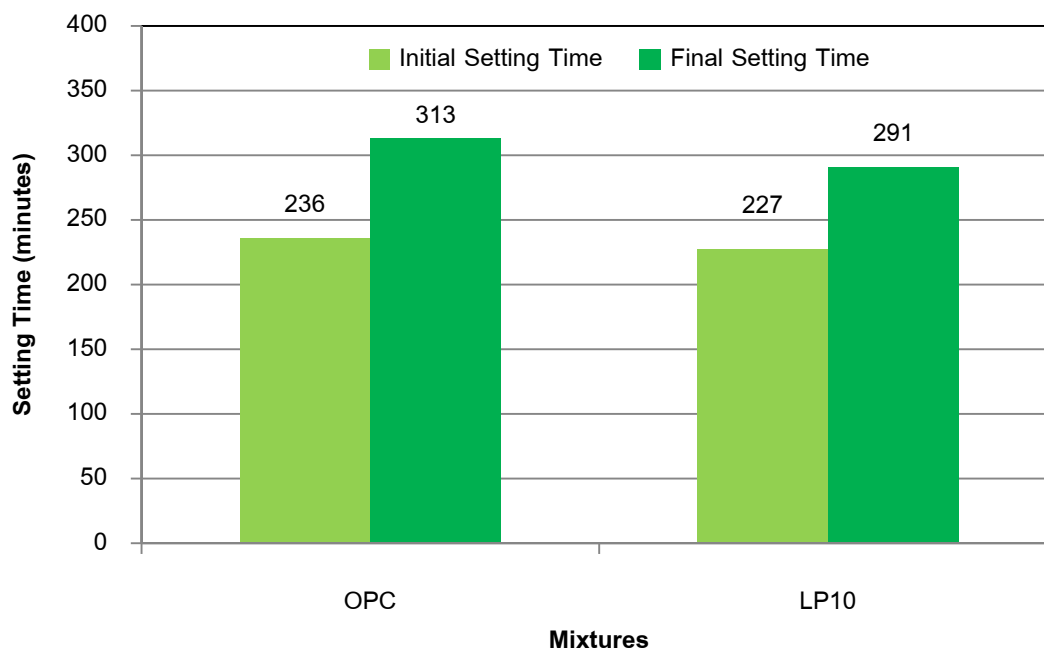
รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย CaO สูง ต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )



รูปที่ 4.18 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิดต่างๆ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$   $w/b = 0.55$  และ  $FA = 30\%$ )

#### 4.3.5 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน

ผลของผงหินปูนต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนที่มีความละเอียด 5 ไมครอน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 4.19 จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนบางส่วน ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากผงหินปูนจะทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุผงกับน้ำ ส่งผลทำให้เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้นที่เร็วขึ้น (Bentz et al., 2012)



รูปที่ 4.19 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ  $LP1 = 10\%$ )

#### 4.4 การหดตัวของคอนกรีต

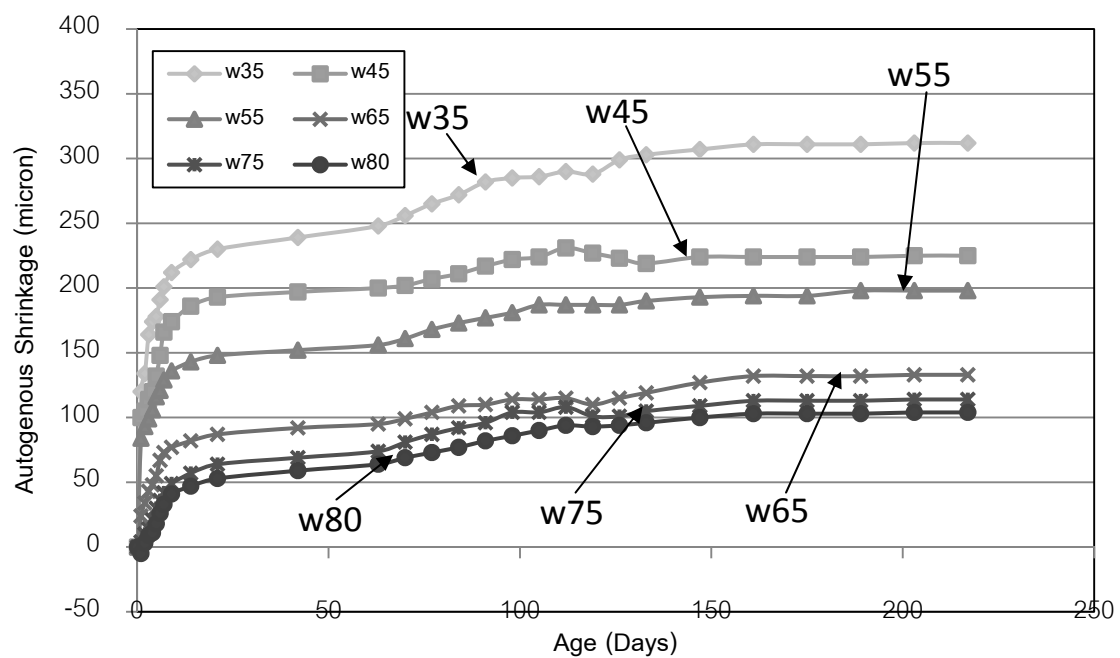
การศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนิสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต แบ่งตามปัจจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 9 ปัจจัย คือ

- 1) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
- 2) สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ
- 3) อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น
- 4) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
- 5) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน
- 5) ความชื้นสัมพัทธ์
- 7) อุณหภูมิ
- 8) ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ
- 9) ขนาดของก้อนตัวอย่าง

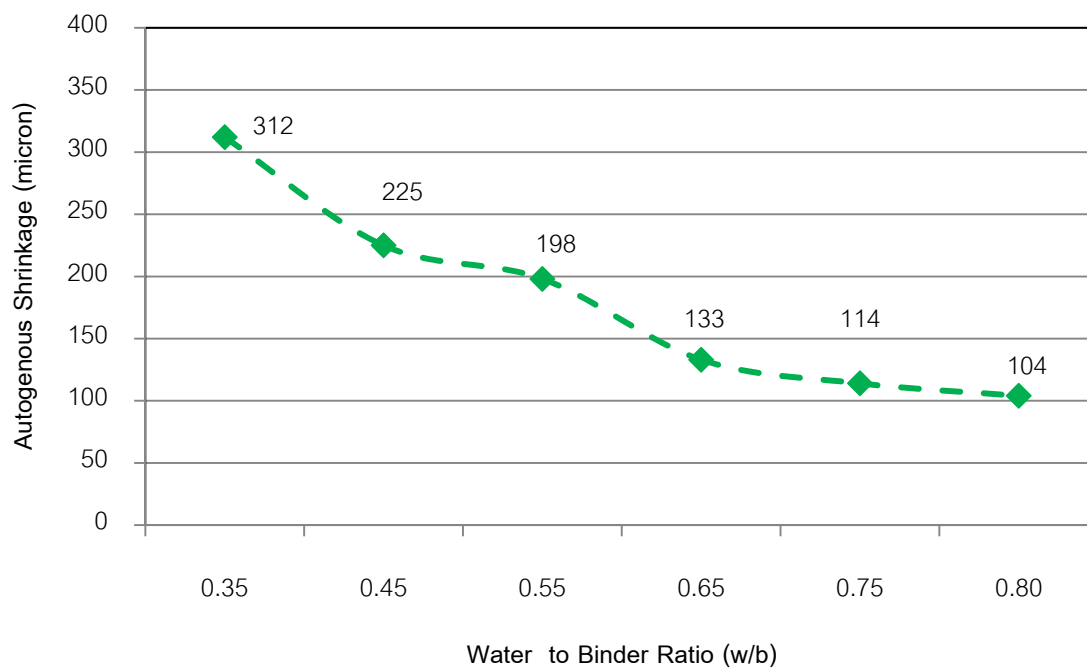
##### 4.4.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

###### - การหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75 และ 0.80 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 ในทุกส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับการหดตัวแบบออโตจีนิส ที่อายุ 217 วัน แสดงดังรูปที่ 4.21 จากผลการทดสอบพบว่า การหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีตลดลงตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมที่มี w/b ต่ำ จะมีช่องว่างคาปิลารีขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดแรงดึงคาปิลารีสูงเมื่อน้ำในช่องว่างคาปิลารีถูกดึงไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยิ่งช่องว่างมีขนาดเล็กจะทำให้แรงดึงคาปิลารียิ่งมีค่าสูง (Ishida et al., 1997) และทำให้การหดตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปไม่มีความเข้าใจว่าหาก w/b ต่ำกว่า 0.42 การหดตัวแบบออโตจีนิสจะเกิดขึ้นได้มาก (Altoubat and Lange, 2001) เนื่องจากน้ำจากการบ่มไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้จากการที่ช่องว่างมีขนาดเล็กมาก แต่หาก w/b สูงกว่า 0.42 ช่องว่างในคอนกรีตจะมีขนาดใหญ่และน้ำจากภายนอกสามารถเข้าไปแทนที่น้ำที่ถูกดึงไปทำปฏิกิริยาได้ จึงถือว่าการหดตัวแบบออโตจีนิสมีค่าต่ำมาก (Holt, 2001) จนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา ทำให้แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบออโตจีนิสของ JSCE 2002 และ Eucode2 กำหนดให้การหดตัวแบบออโตจีนิสมีค่าต่ำมากเมื่อ w/b มากกว่า 0.50 อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.20 และจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์สูงแม้ว่ามี w/b มากกว่า 0.50 จะยังคงมีการหดตัวแบบออโตจีนิส ซึ่งไม่สามารถละทิ้งได้ (Tongaroonsri, 2009)



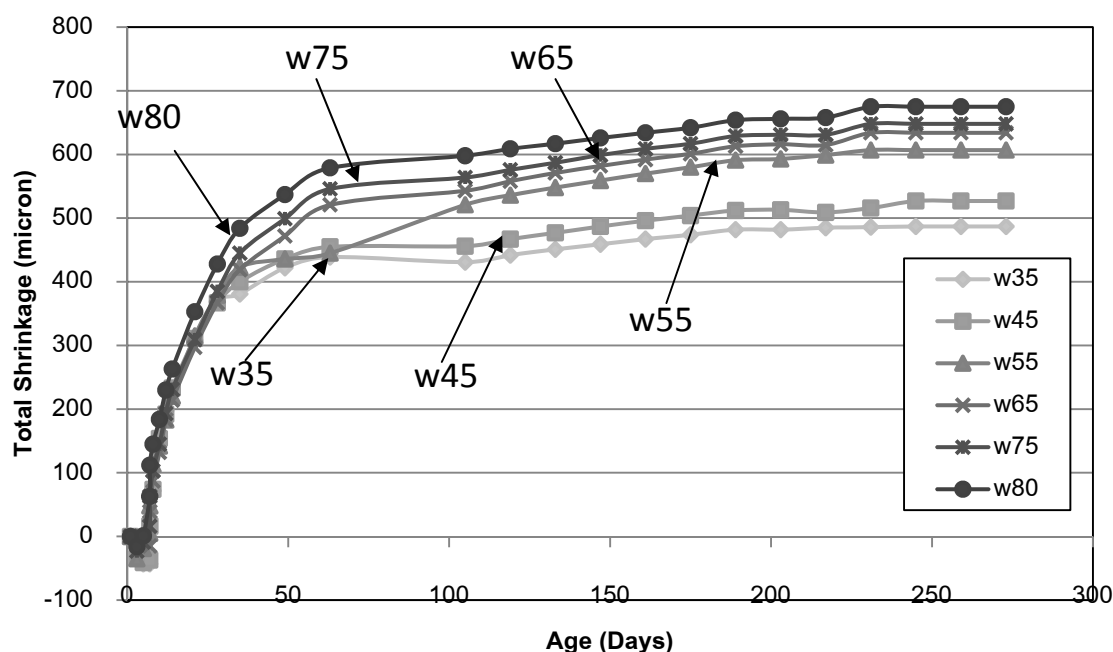
รูปที่ 4.20 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )



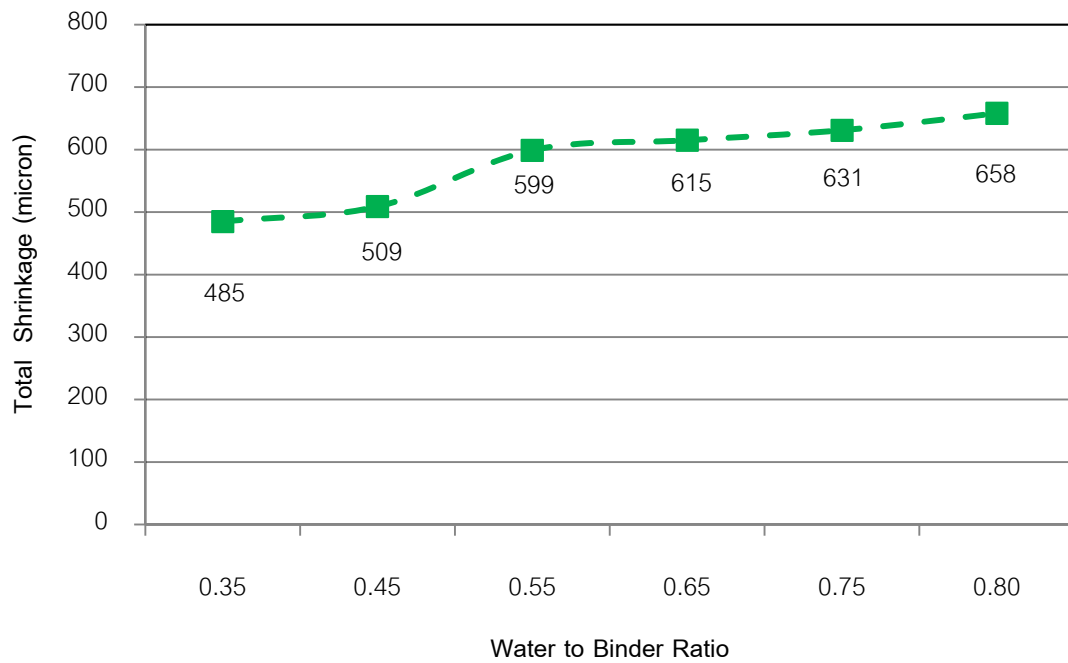
รูปที่ 4.21 ผลของความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน ( $\gamma = 1.4$ )

### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

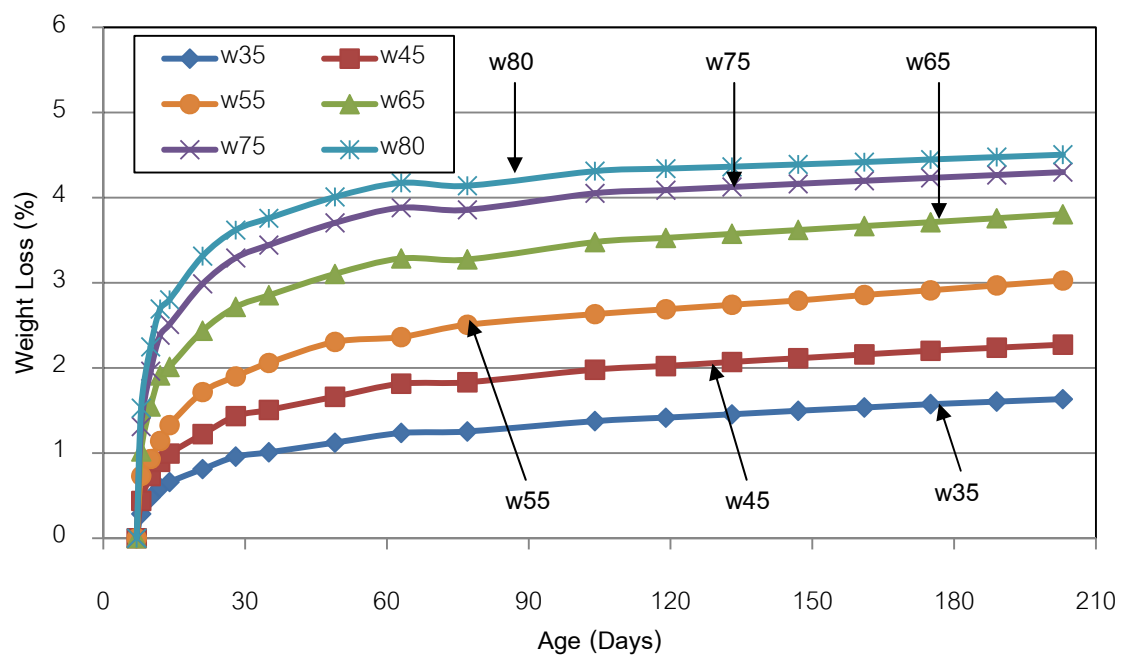
ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75 และ 0.80 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 ในทุกส่วนผสม แสดงในรูปที่ 4.22 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับการหดตัวแบบออโตจีนิส ที่อายุ 217 วัน แสดงดังรูปที่ 4.23 จากผลการทดสอบพบว่า การหดตัวโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนผสมที่มี w/b สูงจะมีน้ำในส่วนผสมมาก ทำให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างได้มาก ดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 จึงทำให้การหดตัวมีค่าสูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาการหดตัวในช่วงอายุต้นพบว่าการหดตัวโดยรวมในช่วงแรกมีค่าต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนิสเกิดขึ้นมากในช่วงอายุต้น และจะเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อคอนกรีตอายุมากขึ้น ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งจะเกิดขึ้นในช่วงแรกแต่จะเกิดมากในระยะยาว ส่วนผสมที่มี w/b ต่ำ จึงมีการหดตัวโดยรวมใกล้เคียงกับส่วนผสมที่มี w/b สูง ได้ อย่างไรก็ตามในระยะยาวพบว่าส่วนผสมที่มี w/b สูง จะมีการหดตัวโดยรวมสูงกว่าส่วนผสมที่มี w/b ต่ำ



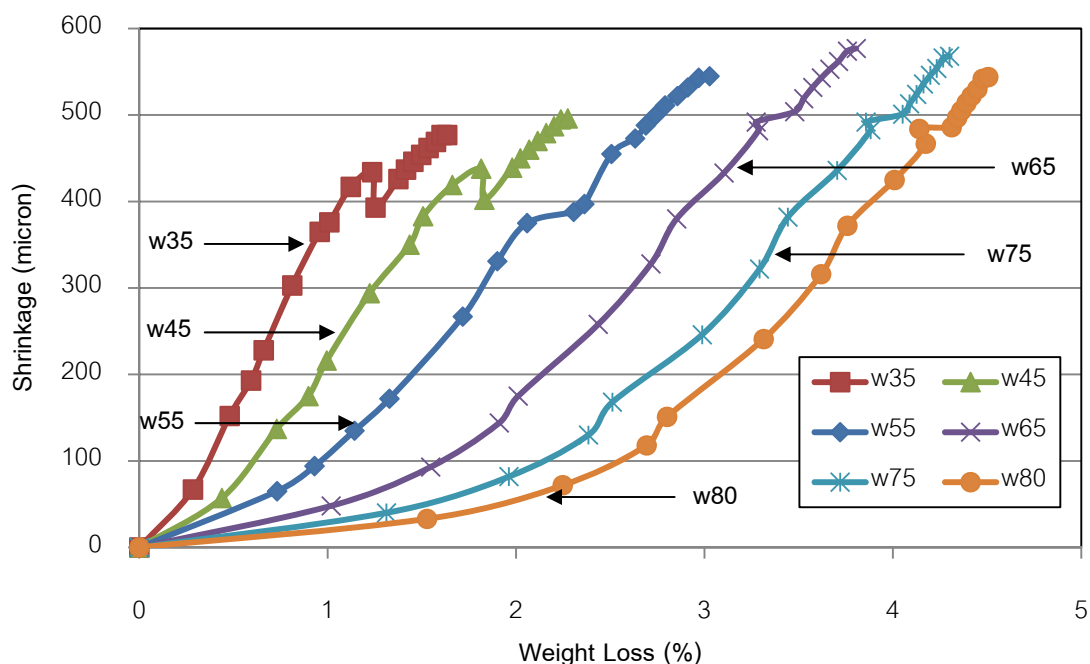
รูปที่ 4.22 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$ )



รูปที่ 4.23 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานกับการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน ( $\gamma = 1.4$ )



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

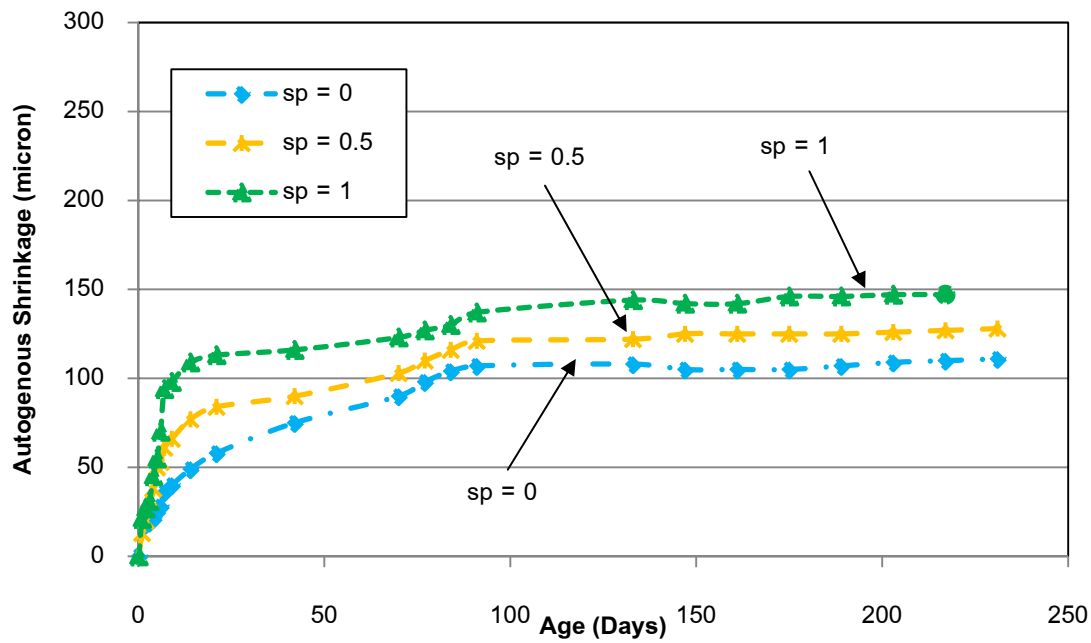


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

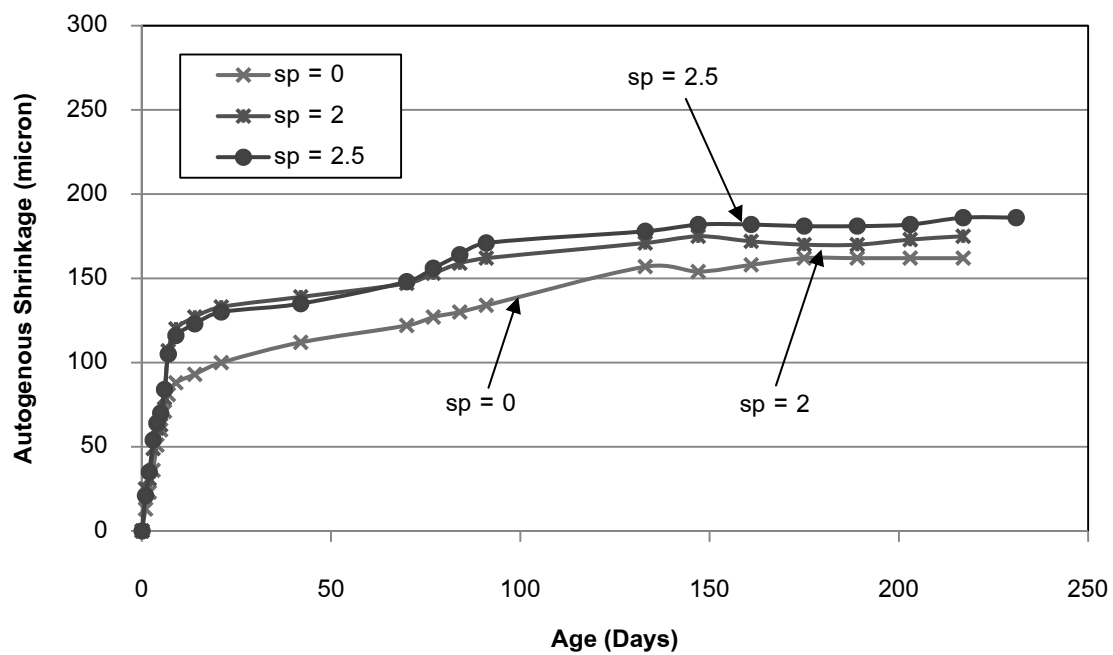
#### 4.4.2 สารเคมีผสมเพิ่มชนิดลดน้ำพิเศษ

##### - การหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต

การศึกษาผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ ต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต แบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละที่แตกต่างกัน คือ 0, 0.5 และ 1 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.26 และกรณีที่ 2 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละที่แตกต่างกัน คือ 0, 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.27 จากการทดสอบพบว่า การหดตัวแบบออโตจีเนสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเคมีผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม จะเข้าไปกระจายอนุภาคของซีเมนต์ ทำให้ลักษณะของโครงสร้างช่องว่างคาปิลารีในซีเมนต์เพสต์ มีขนาดเล็ก และมีความไม่ต่อเนื่อง การที่น้ำอิสระเคลื่อนตัวไม่สะดวกและช่องว่างมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดแรงดึงคาปิลารีสูง [Bentz และ Jensen, 2004] นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปได้ดีกว่าถ้าอนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.26 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.1$  และ  $w/b = 0.55$ )

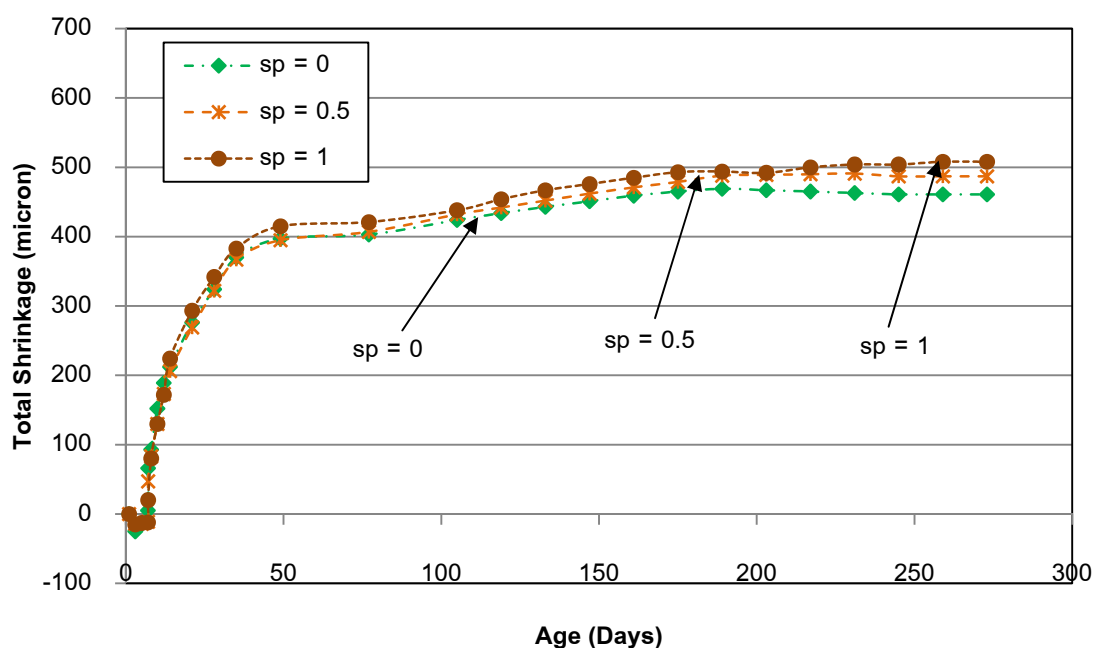


รูปที่ 4.27 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.2$  และ  $w/b = 0.35$ )

## - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

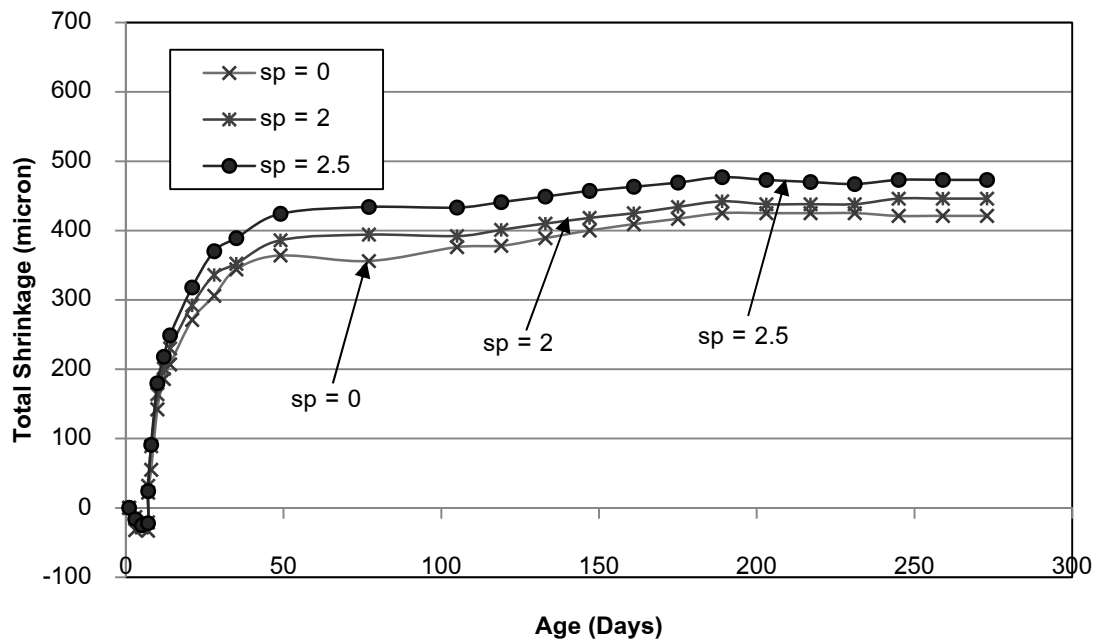
ผลการทดสอบการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่ต่างกัน ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยแบ่งผลการทดสอบเปรียบเทียบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ ในปริมาณร้อยละที่ต่างกัน คือ 0, 0.5 และ 1 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.28 และกรณีที่ 2 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละที่ต่างกัน คือ 0, 2, และ 2.5 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.29 จากผลการทดสอบพบว่า การหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการหดตัวแบบบอโตจีนิส

เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ ร่วมกับอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังตารางที่ 4.2 พบว่า การใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ มีผลกระทบต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิสมากกว่าการหดตัวโดยรวม ทั้งนี้เนื่องจากสารเคมีผสมเพิ่มจะส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น ซึ่งสอดคล้องกับการหดตัวแบบบอโตจีนิสที่สัมพันธ์กับการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน



รูปที่ 4.28 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

( $\gamma = 1.1$  และ  $w/b = 0.55$ )



รูปที่ 4.29 ผลของสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.2$  และ  $w/b = 0.35$ )

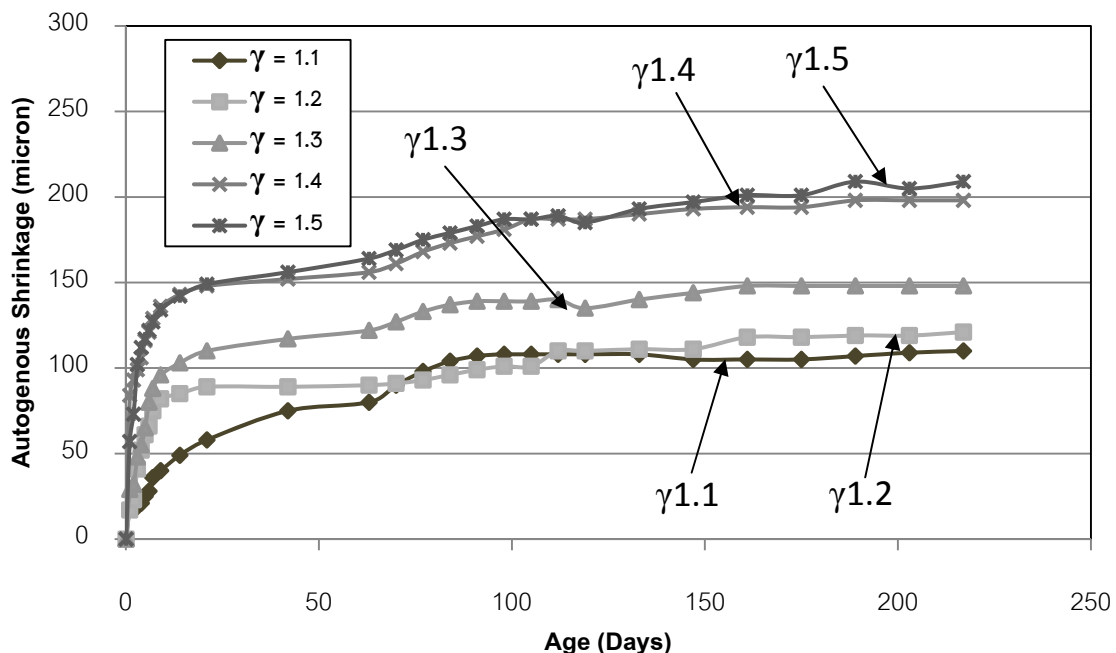
ตารางที่ 4.2 การใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษต่อการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต  
ที่อายุ 217 วัน

| Mix proportion     | Superplasticizer Content (%) | Autogenous Shrinkage (micron) | Autogenous Shrinkage Increases (%) | Total Shrinkage (micron) | Total Shrinkage Increases (%) |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| $\gamma 1.1w55FA0$ | 0                            | 110                           | 0                                  | 465                      | 0                             |
| $\gamma 1.1w55FA0$ | 0.5                          | 127                           | 15                                 | 490                      | 5                             |
| $\gamma 1.1w55FA0$ | 1.0                          | 147                           | 33                                 | 500                      | 7                             |
| $\gamma 1.2w35FA0$ | 0                            | 162                           | 0                                  | 425                      | 0                             |
| $\gamma 1.2w35FA0$ | 2.0                          | 175                           | 8                                  | 438                      | 3                             |
| $\gamma 1.2w35FA0$ | 2.5                          | 186                           | 14                                 | 470                      | 10                            |

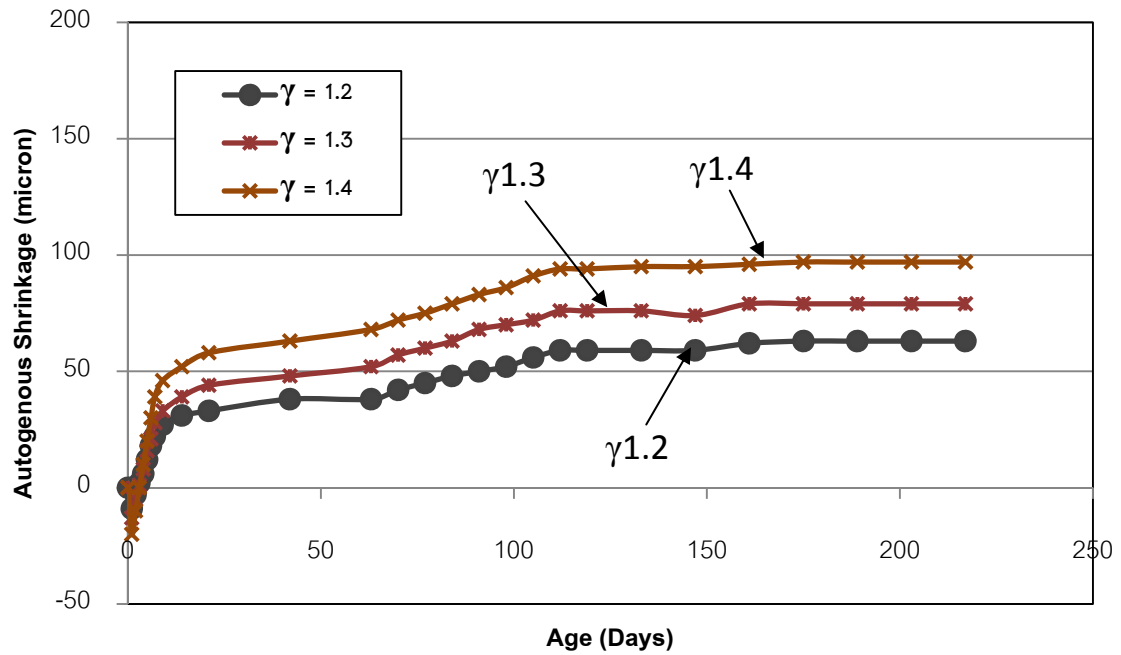
#### 4.4.3 อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

##### - การหัตถ์แบบบอโตจีนัสของคอนกรีต

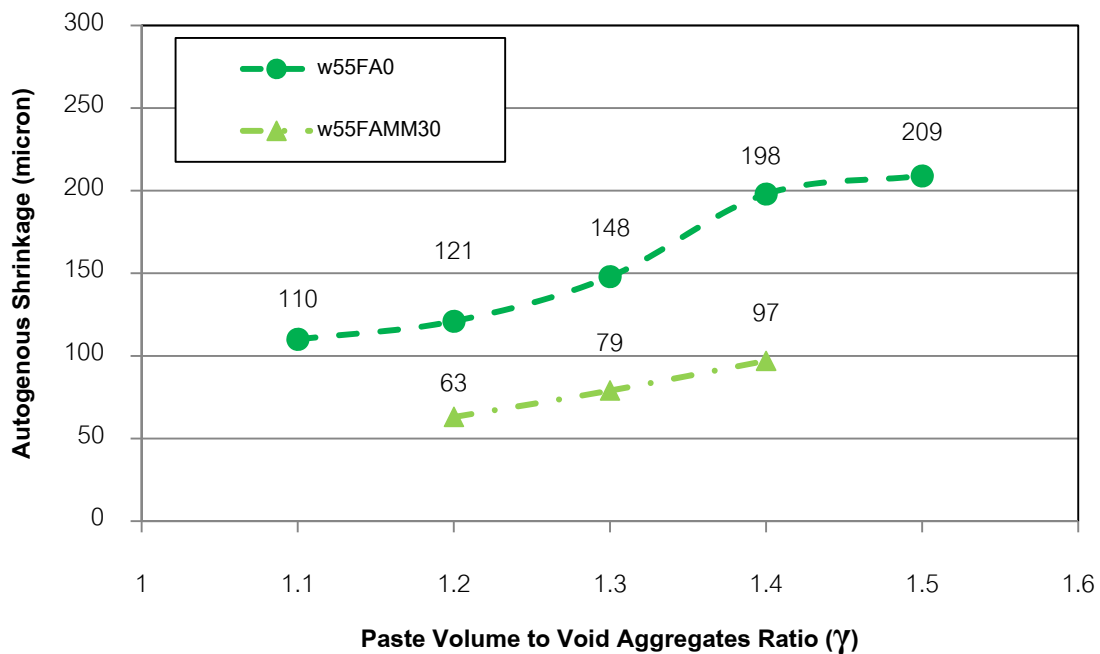
ผลการทดสอบการใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่ต่างกัน ต่อการหัตถ์แบบบอโตจีนัสของคอนกรีต โดยแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่ต่างกัน คือ 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 และ 1.5 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.30 และกรณีที่ 2 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ผสมกับผสมเถ้าลอยที่มี CaO สูง ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่ต่างกัน คือ 1.2, 1.3 และ 1.4 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.31 จากการทดสอบพบว่า การหัตถ์แบบบอโตจีนัสของคอนกรีตทั้ง 2 กรณี มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการหัตถ์จะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่มวลรวมจะช่วยต้านทานการหัตถ์ เมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้นและมีมวลรวมลดลง จึงทำให้การหัตถ์เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.32 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่าการหัตถ์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และมีผลกระทบจากปริมาณซีเมนต์เพสต์เช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.30 ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการหัตถ์แบบบอโตจีนัสของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )



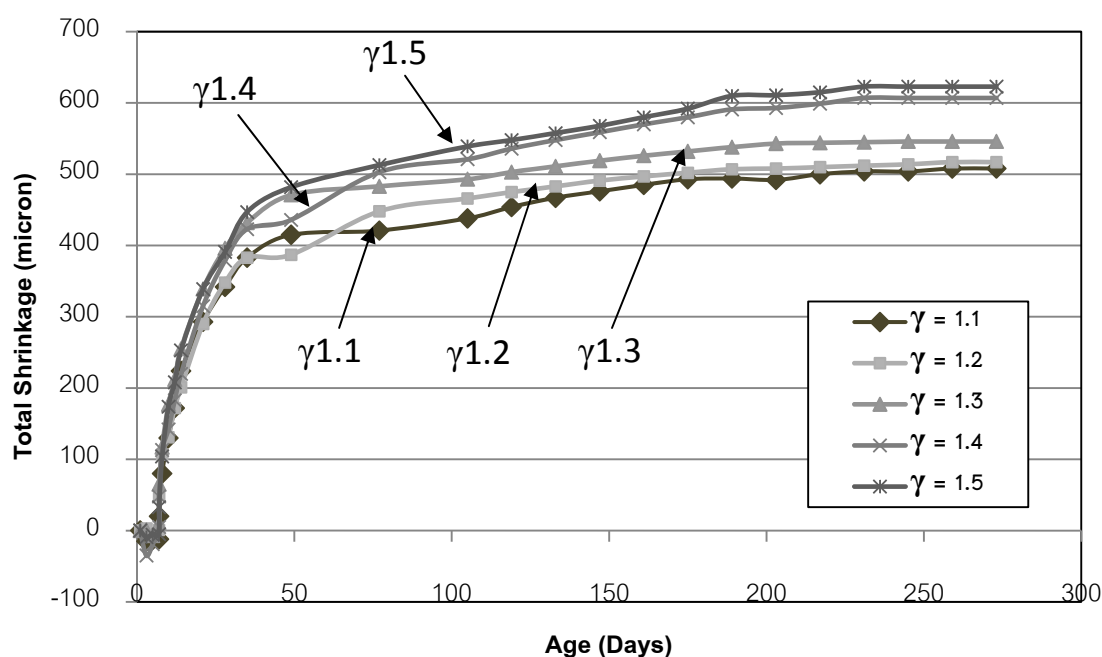
รูปที่ 4.31 ผลของปริมาณเฟสต่อปริมาณของช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต (w/b = 0.55 และเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 30)



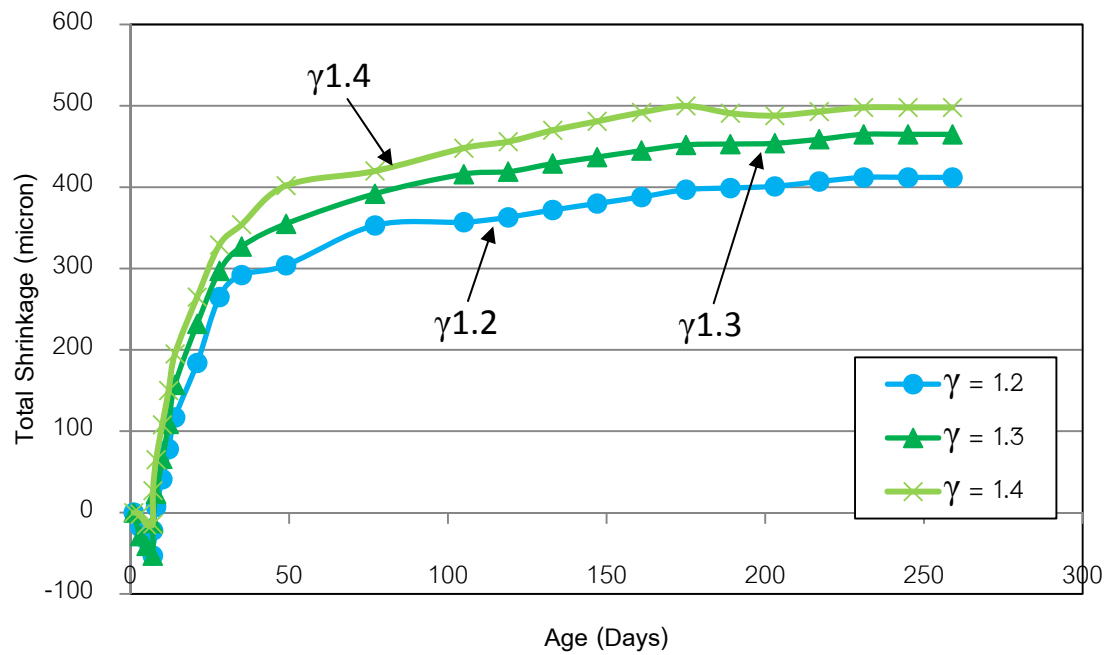
รูปที่ 4.32 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟสต่อปริมาณของช่องว่างระหว่างมวลรวมกับการหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน

## - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

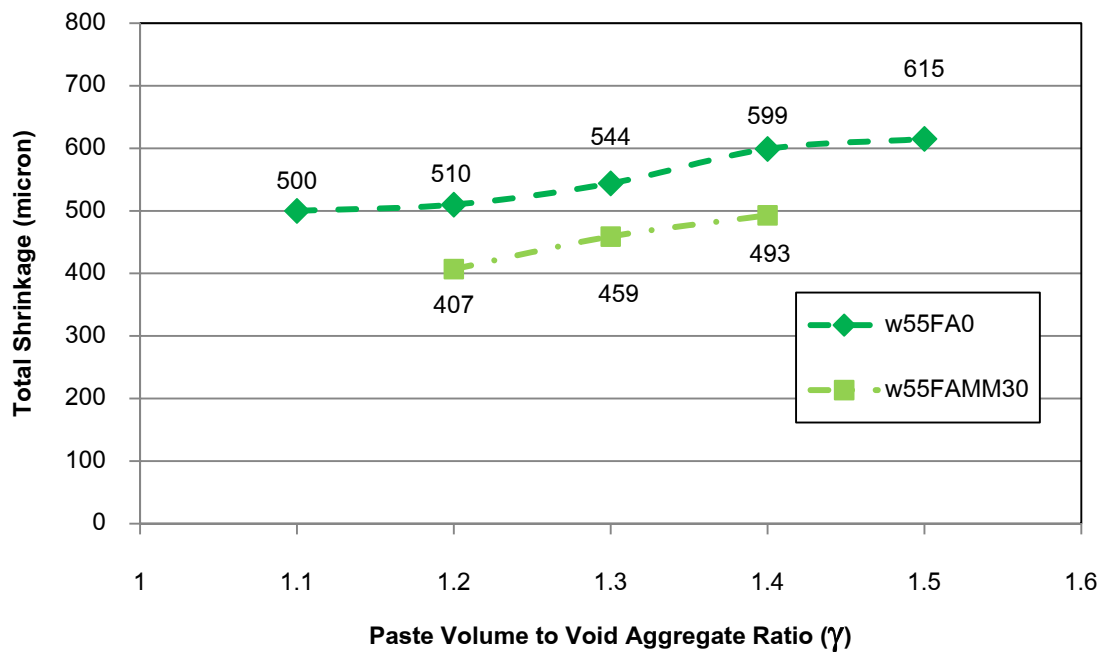
ผลการทดสอบการใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่ต่างกัน ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เท่ากันทุกส่วนผสม และใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่ต่างกัน คือ 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.33 และกรณีที่ 2 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ผสมกับผสมเถ้าลอยที่มี CaO สูงในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เท่ากันทุกส่วนผสมและใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นในปริมาณที่ต่างกัน คือ 1.2, 1.3 และ 1.4 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.34 จากการทดสอบพบว่า การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตทั้ง 2 กรณี จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องและเป็นไปในทางเดียวกับการหดตัวแบบออโตจีนัส ทั้งนี้ เนื่องจากการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่มวลรวมจะช่วยต้านทานการหดตัว เมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่นเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้นและมีมวลรวมลดลง จึงทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.35 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่าการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และมีผลกระทบจากปริมาณซีเมนต์เพสต์เช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 4.33 ผลของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $w/b = 0.55$ )



รูปที่ 4.34 ผลของปริมาณเพสต์ต่อปริมาณของช่องว่างระหว่างมวลรวมต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต (w/b = 0.55 และแก้ลอยร้อยละ 30)



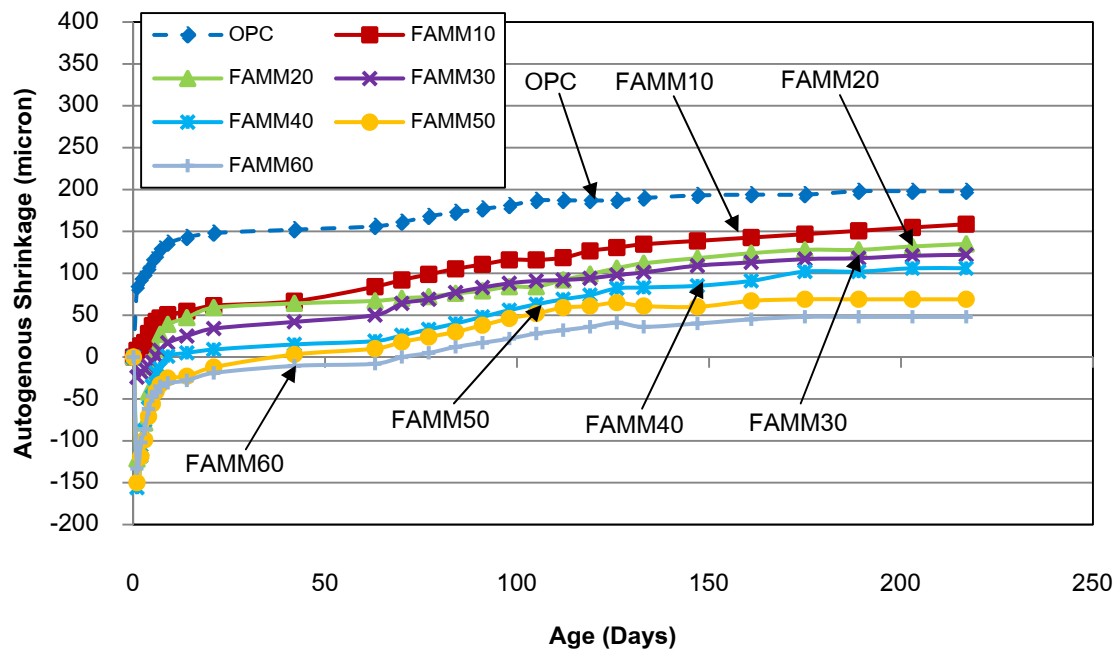
รูปที่ 4.35 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพสต์ต่อปริมาณของช่องว่างระหว่างมวลรวมกับการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน

#### 4.4.4 ปริมาณและชนิดของเถ้าลอย

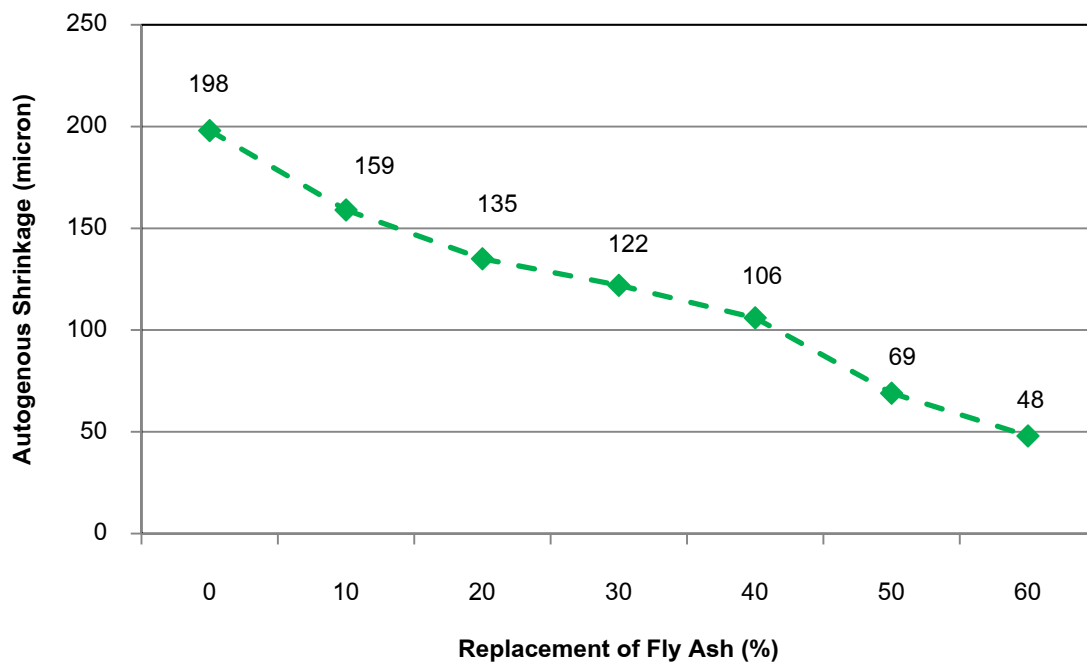
##### 1) เถ้าลอยที่มี CaO สูง

###### - การหัตถ์แบบบอโตจีนัสของคอนกรีต

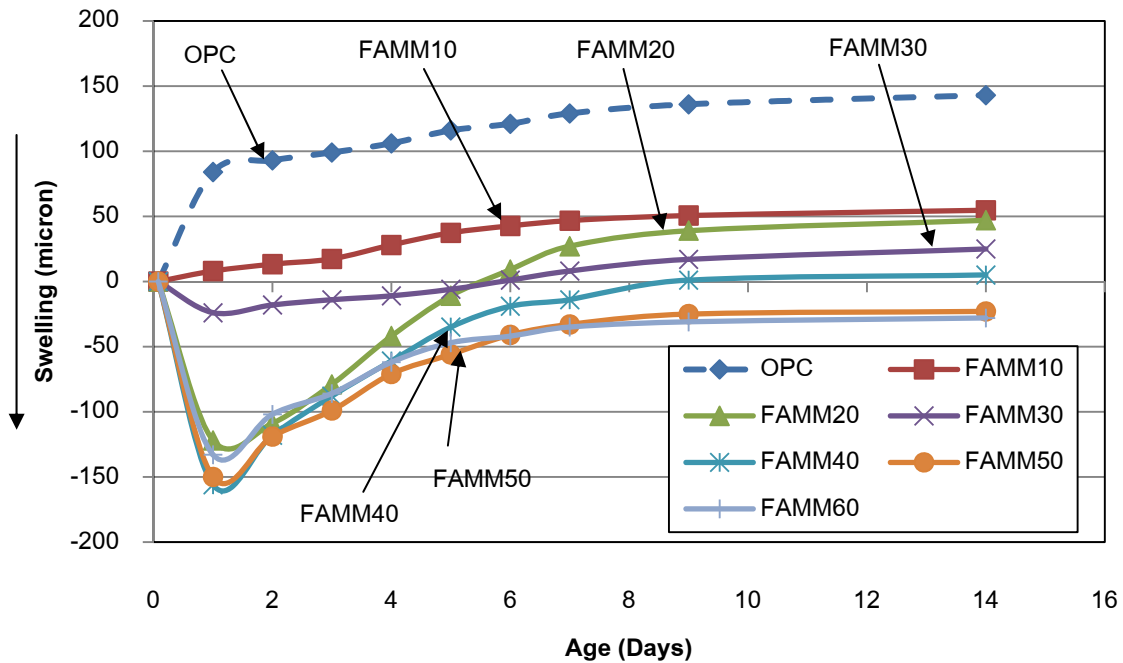
ผลการทดสอบการใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ต่อการหัตถ์แบบบอโตจีนัสของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการหัตถ์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยการหัตถ์จะมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง การสูญเสียน้ำในช่องว่างคาพิลลารีจึงลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยยังลดความต้องการน้ำและทำให้ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งการหัตถ์แบบบอโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาพิลลารีจนทำให้เกิดการหัตถ์ ดังนั้นเมื่อน้ำอิสระเพิ่มขึ้นการหัตถ์จึงลดลง ในกรณีที่เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ในปริมาณสูงจะทำให้คอนกรีตขยายตัวในช่วงอายุต้นและชะดเชยการหัตถ์ในช่วงอายุปลาย ส่งผลให้คอนกรีตมีการหัตถ์ที่ต่ำลง การใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้มี  $\text{SO}_3$  ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการขยายตัวนี้จึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ดังรูปที่ 4.38 ประกอบกับเถ้าลอยมีปริมาณ free lime และอัตราส่วน  $\text{SO}_3/\text{K}_2\text{O}$  สูง [Barcelo et al., 2005] ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในช่วงอายุต้นเพิ่มขึ้นและชะดเชยการหัตถ์ในช่วงอายุปลาย นอกจากนี้เถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาอาจทำหน้าที่เสมือนมวลรวมขนาดเล็ก (Micro Aggregates) ที่ช่วยต้านทานการหัตถ์ของคอนกรีตได้ส่วนหนึ่ง



รูปที่ 4.36 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง ต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )



รูปที่ 4.37 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง กับการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน



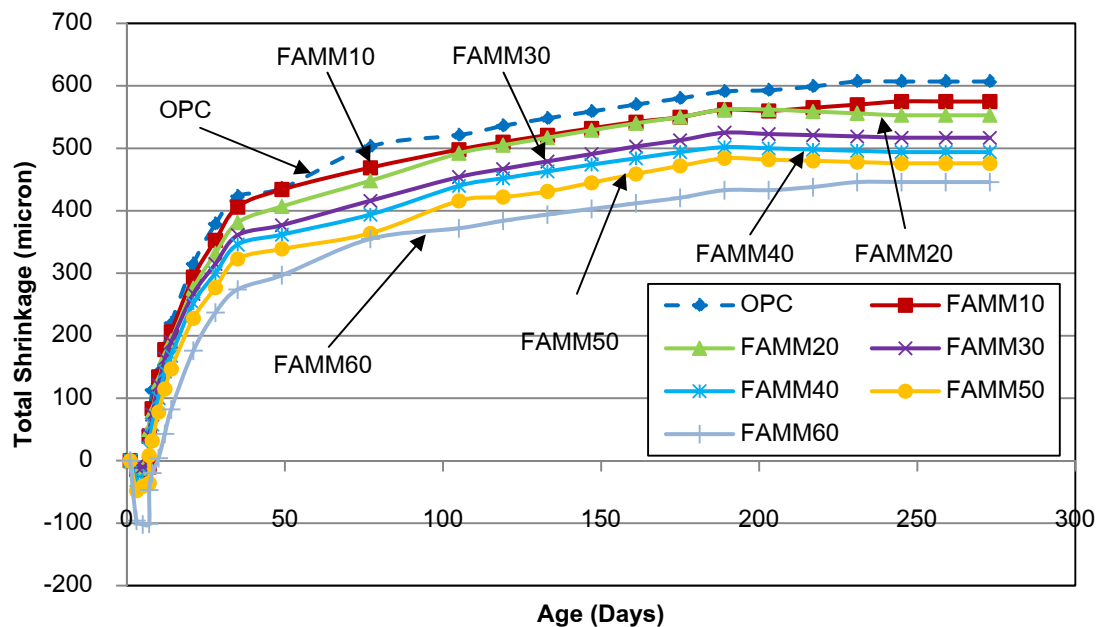
รูปที่ 4.38 การหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตในช่วงอายุ 14 วันแรก

#### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

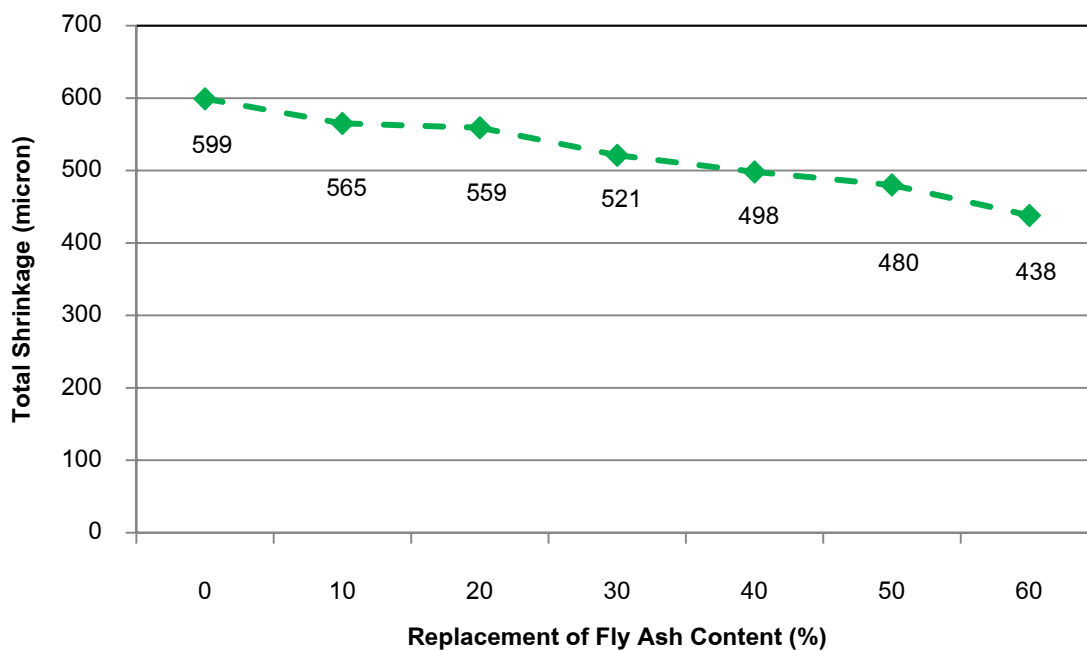
ผลการทดสอบการใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกันต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.39 และ 4.40 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย โดยการหดตัวจะมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ในช่วง 7 วันแรกของการบ่มน้ำ พบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.41 ทั้งนี้เนื่องจากในเถ้าลอยมี  $SO_3$  จึงทำให้คอนกรีตขยายตัวในช่วงอายุต้นและชะดเซยการหดตัวในช่วงอายุปลาย ส่งผลให้คอนกรีตมีการหดตัวที่ต่ำลง การใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้มี  $SO_3$  ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ภายหลังจากนำคอนกรีตขึ้นจากการบ่มน้ำ น้ำในคอนกรีตจะระเหยออกและทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลง ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งพบว่าน้ำหนักที่หายไปจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก การใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำอิสระในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการยุบตัวของคอนกรีต ดังรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตาม แม้ว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย แต่การหดตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยยังคงมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่ระเหยออกไปในช่วงแรกจะออกจากช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ จึงไม่ทำให้เกิดการหดตัวมากนัก คอนกรีตที่มีน้ำอิสระมากจึงระเหยได้มาก แต่เมื่อน้ำระเหยออกจากช่องว่างที่มี

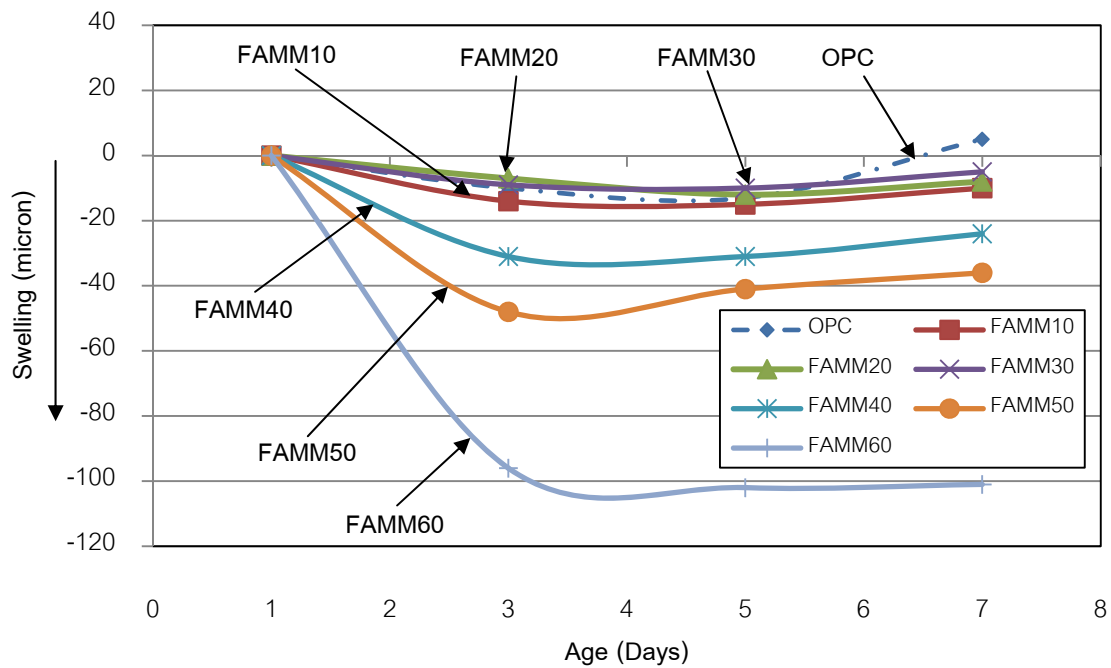
ขนาดเล็กจะส่งผลต่อการหดตัวมากกว่า โดยน้ำจะระเหยออกจากช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ก่อนแล้วจึงระเหยออกจากช่องว่างที่มีขนาดเล็กลง จึงทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและน้ำหนัที่หายไปเป็นไปตามรูปที่ 4.43



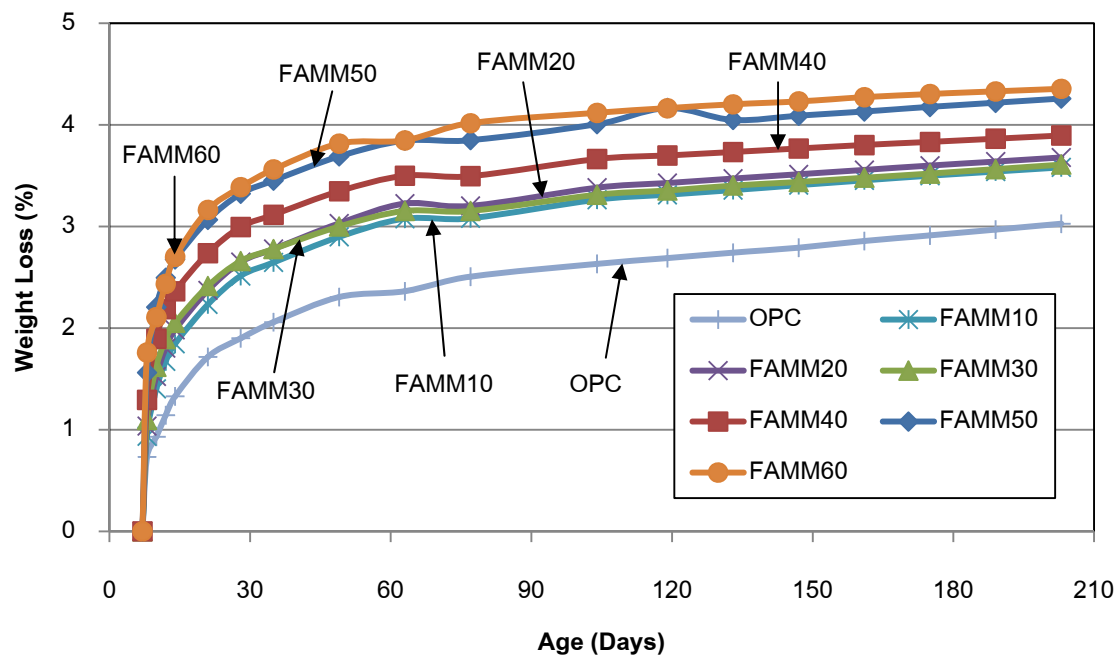
รูปที่ 4.39 ผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )



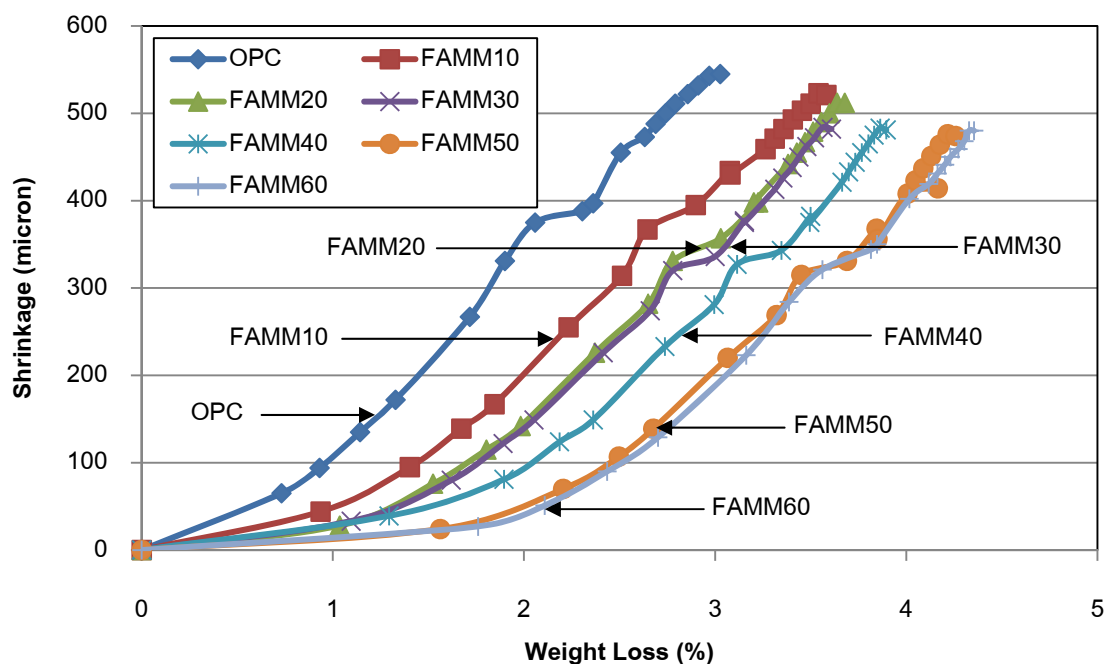
รูปที่ 4.40 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง กับการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ที่อายุ 217 วัน



รูปที่ 4.41 การขยายตัวของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มในน้ำ 7 วัน



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับอายุของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )



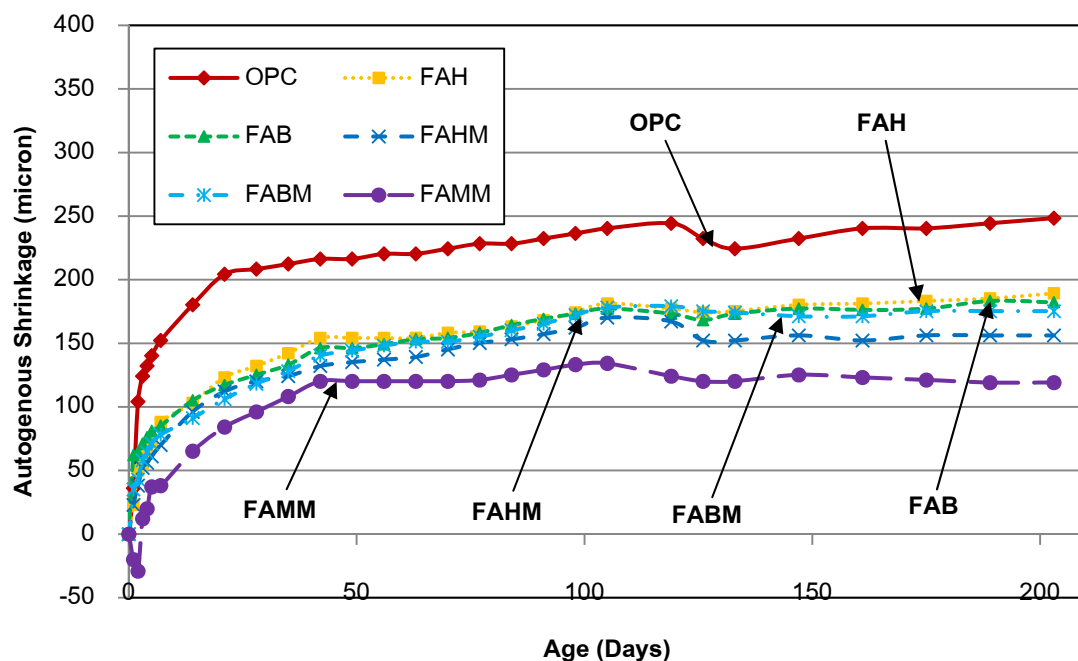
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )

## 2) แก้วลอยที่มี CaO ต่ำ

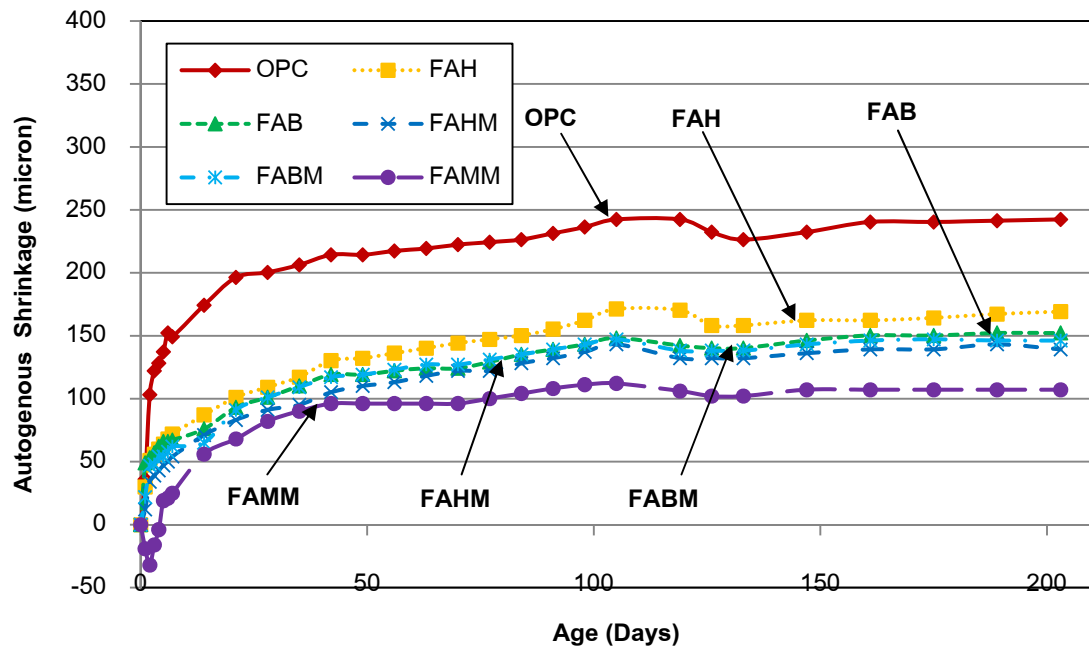
### - การหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต

ผลการทดสอบการใช้แก้วลอยที่มี CaO ต่ำ ต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลกับแก้วลอยที่มี CaO สูง ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลของการใช้แก้วลอยที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ แก้วลอยที่มี CaO สูง จำนวน 1 ชนิด คือ FAMM มี CaO ร้อยละ 19.19 และแก้วลอยที่มี CaO ต่ำ จำนวน 4 ชนิด คือ FAH, FAB, FAHM, FABM มี CaO ร้อยละ 1.25, 0.75, 2.13 และ 1.32 ตามลำดับ แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพลสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น 1.4 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.55 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.44 ถึงรูปที่ 4.47 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมแก้วลอย มีการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมแก้วลอย โดยคอนกรีตที่ใช้แก้วลอย ชนิด FAMM มีการหดตัวต่ำที่สุด รองลงมา ได้แก่ ชนิด FAHM, FABM, FAB และ FAH ตามลำดับ ซึ่งการใช้แก้วลอยสามารถลดการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีตได้ การที่คอนกรีตผสมแก้วลอยที่มี CaO ต่ำ (มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีความต้องการน้ำมาก) มีการหดตัวแบบออโตจีเนสมากกว่าแก้วลอยที่มี CaO สูง (มีรูปร่างทรงกลม) อาจเนื่องมาจากแก้วลอยที่มี CaO สูง มีน้ำอิสระในคอนกรีตมากกว่า หรือมีความต้องการน้ำต่ำกว่า เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมปริมาณเท่ากัน จึงทำให้การหดตัวมีค่าต่ำกว่า ซึ่งน้ำอิสระสามารถพิจารณาโดยอ้อมได้จากค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้แก้วลอยที่มี CaO สูง มีการยุบตัวมากกว่าการใช้แก้วลอยที่มี CaO ต่ำ

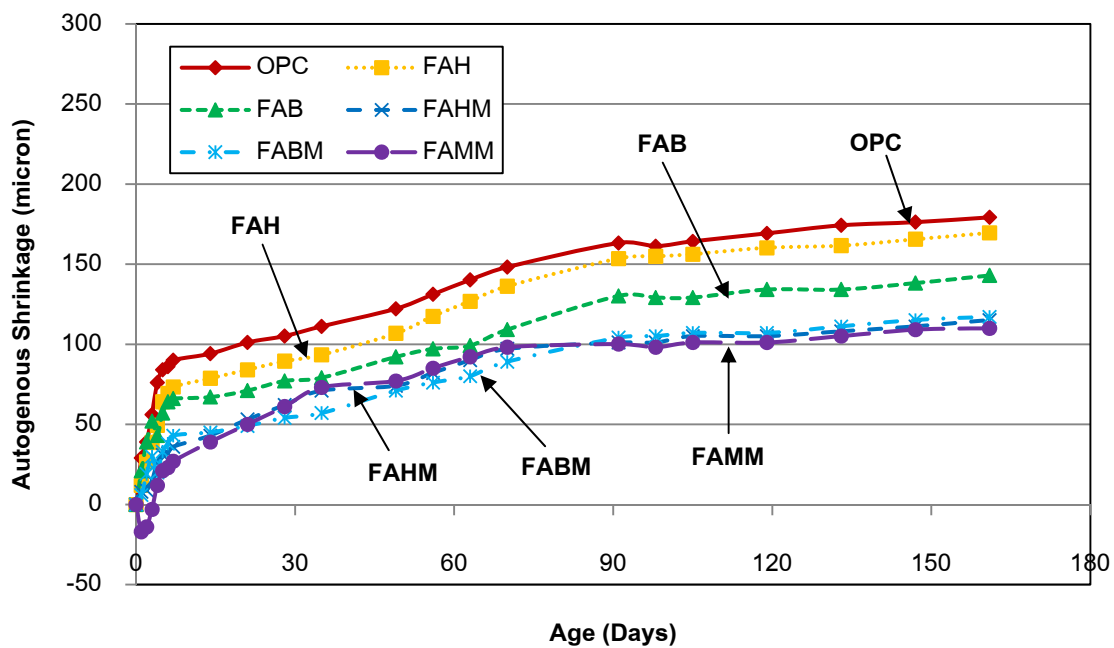
นอกจากนี้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ มีปริมาณ  $Al_2O_3$  สูงกว่าเถ้าลอยที่มี CaO สูง ดังตารางที่ 3.1 ส่งผลต่อการเร่งการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีตในช่วงอายุต้นที่เพิ่มขึ้น [Termkhajornkit et al., 2005] นอกจากนี้เถ้าลอยที่มี CaO สูง ยังมีปริมาณ  $SO_3$  สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ จึงทำให้มีการขยายตัวในช่วงต้นมากกว่า และชะลอการหดตัวในระยะต่อมา อีกทั้งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้วัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่าง  $SO_3/K_2O$  และ free lime ในปริมาณที่สูง สามารถช่วยลดการหดตัว หรือช่วยเพิ่มการขยายตัวในช่วงอายุต้น ส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีเนสในช่วงอายุปลายลดลง [Barcelo et al., 2005]



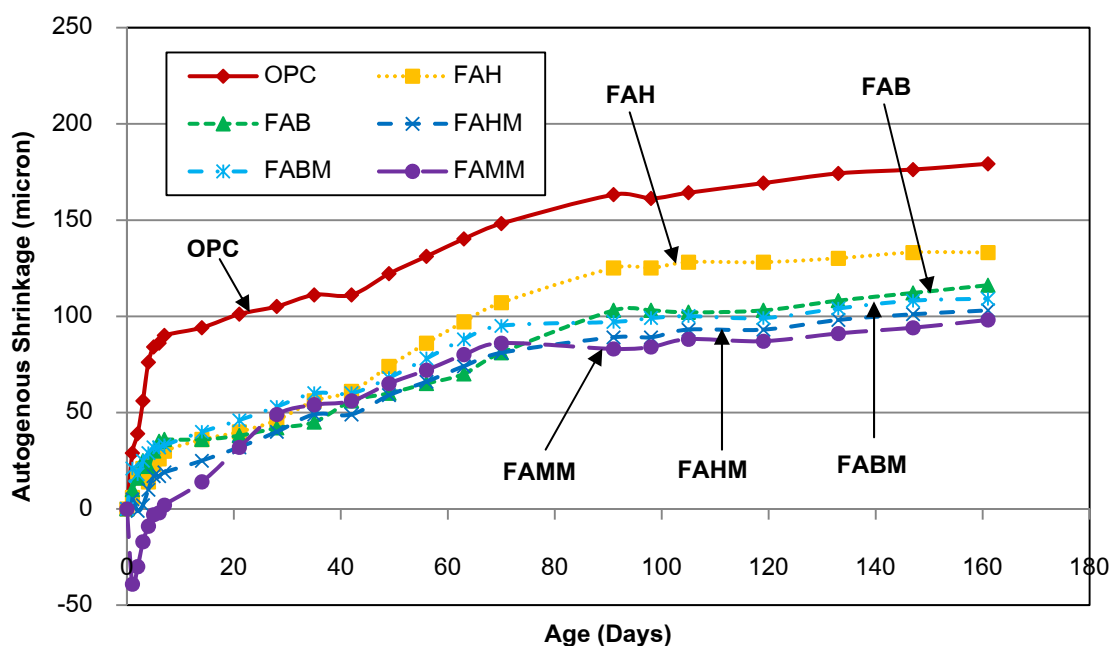
รูปที่ 4.44 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ  $FA = 30\%$ )



รูปที่ 4.45 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ  $FA = 50\%$ )



รูปที่ 4.46 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.55$  และ  $FA = 30\%$ )

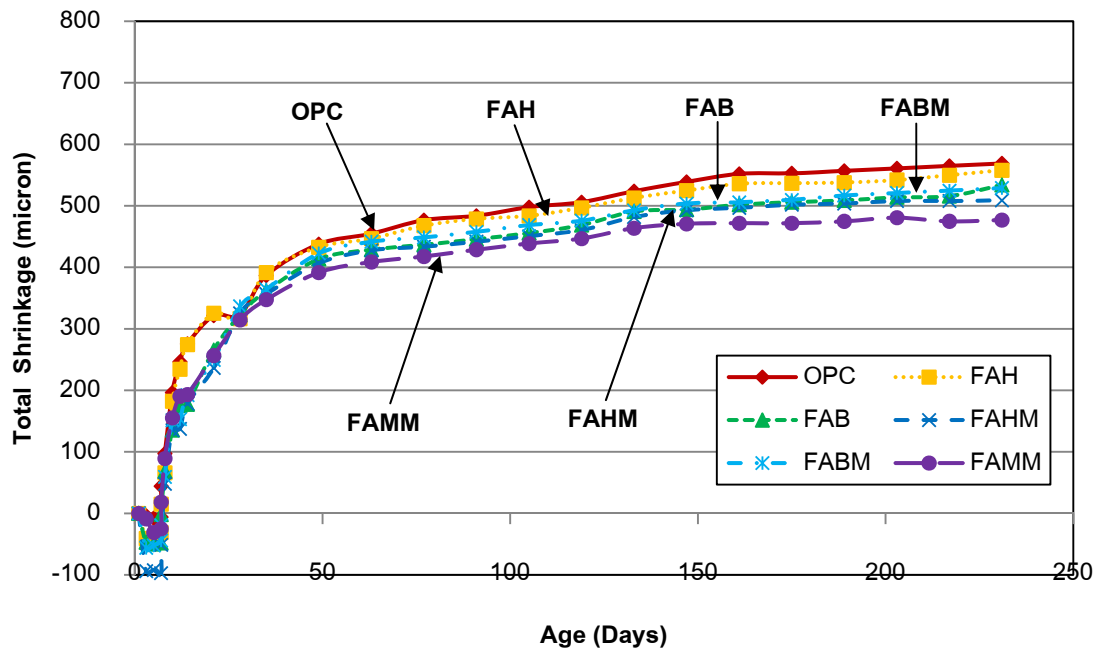


รูปที่ 4.47 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต

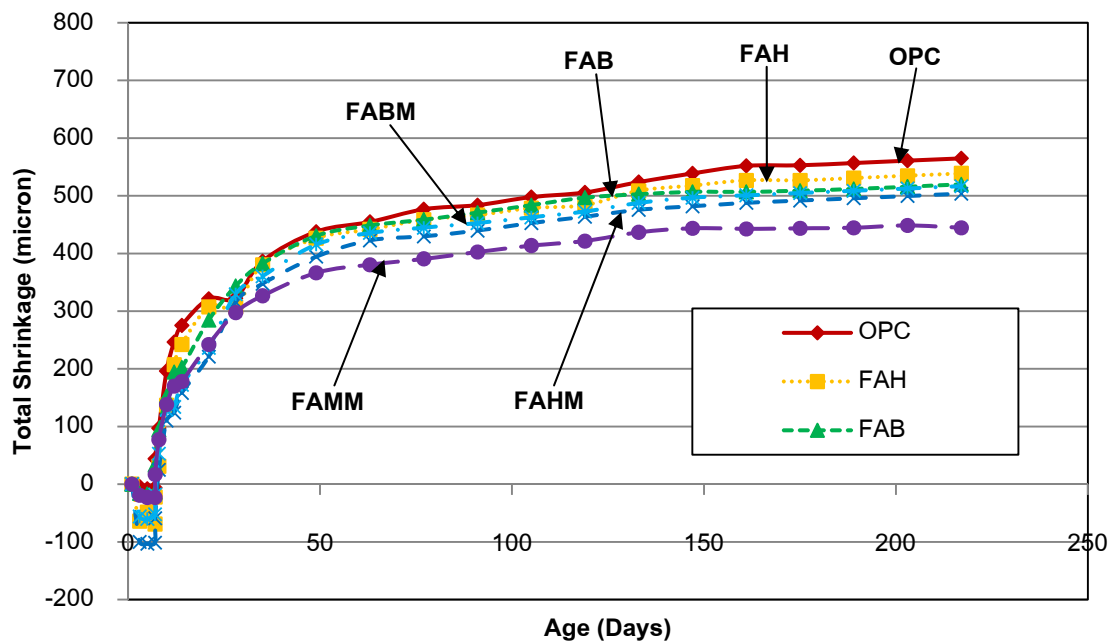
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.55$  และ  $FA = 50\%$ )

#### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

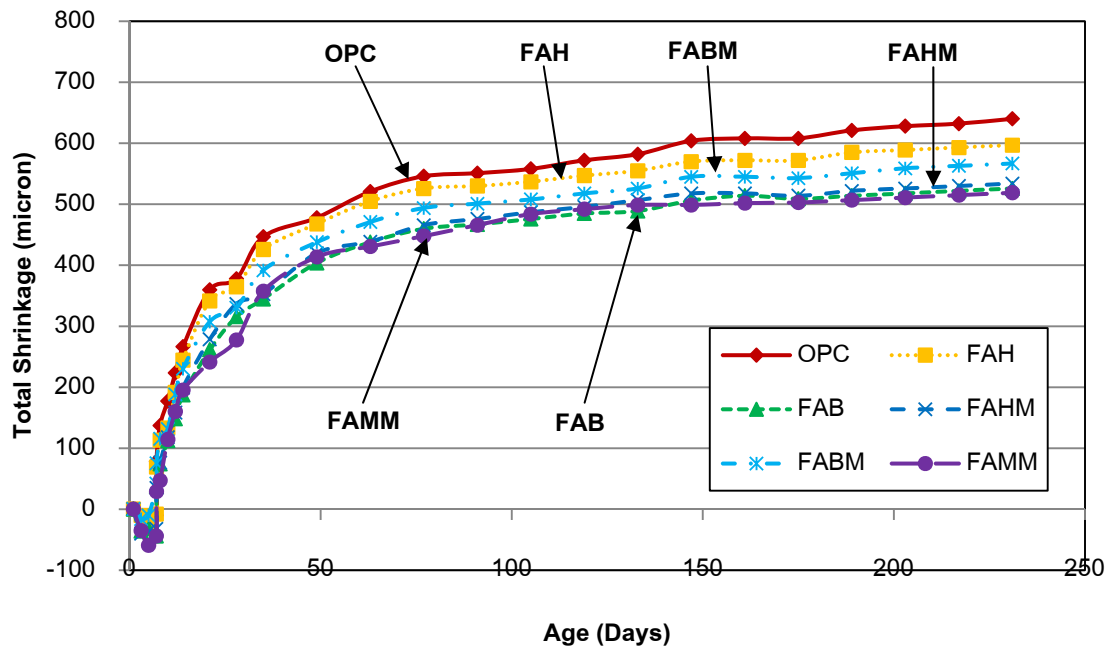
ผลการทดสอบการใช้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต แต่เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลกับเถ้าลอยที่มี CaO สูง ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลของการใช้เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 5 ชนิด เช่นเดียวกับการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.51 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการหดตัวโดยรวมมีแนวโน้มเดียวกับการหดตัวแบบออโตจีนัส กล่าวคือ การใช้เถ้าลอยทำให้การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตลดลง โดยคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ชนิด FAMB มีการหดตัวต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ ชนิด FAHM, FABM, FAB และ FAH ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณน้ำอิสระและองค์ประกอบทางเคมี ที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแตกต่างกัน ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว ที่ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยที่มี CaO สูง มีการหดตัวต่ำกว่าการใช้เถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ



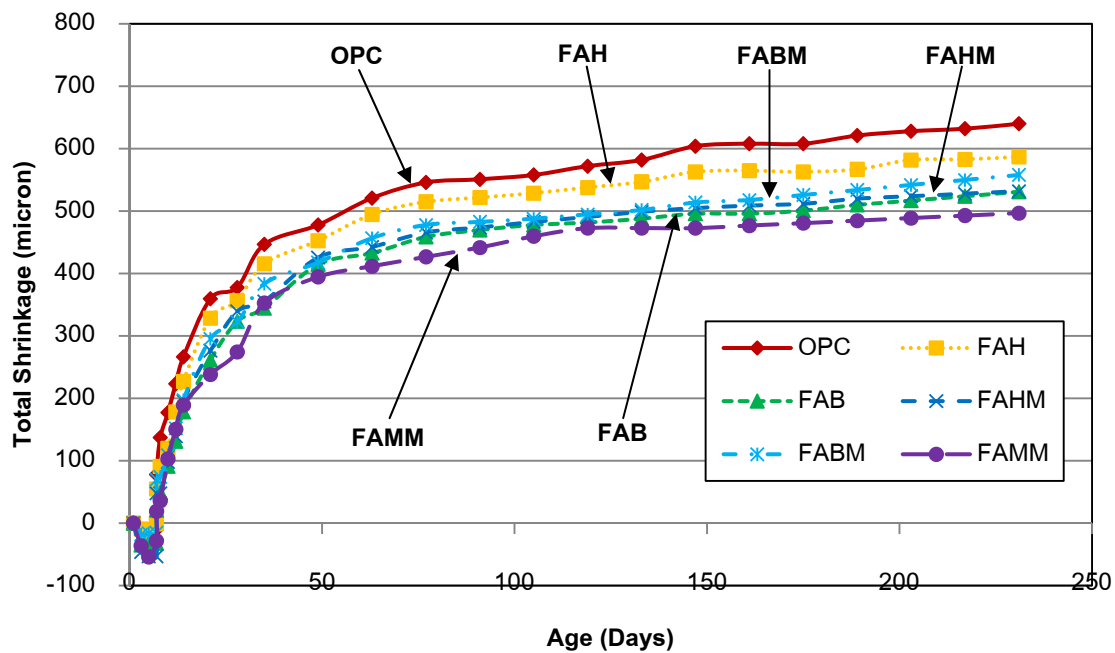
รูปที่ 4.48 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ  $FA = 30\%$ )



รูปที่ 4.49 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต  
( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ  $FA = 50\%$ )



รูปที่ 4.50 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.55$  และ  $FA = 30\%$ )

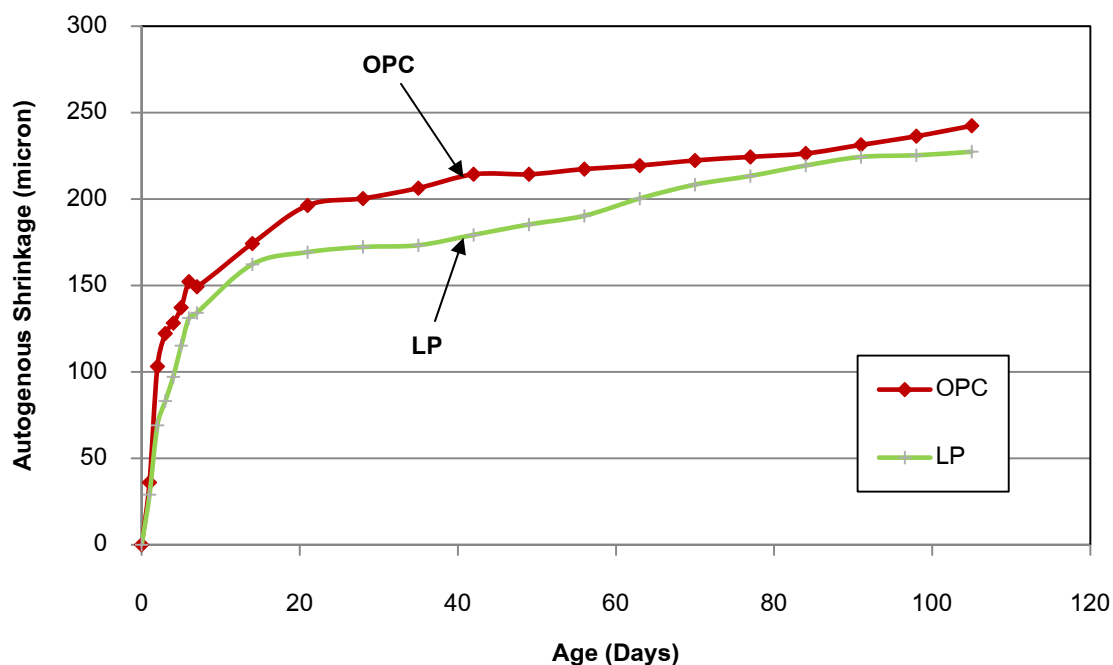


รูปที่ 4.51 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.55$  และ  $FA = 50\%$ )

#### 4.4.5 ผงหินปูน

##### - การหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต

ผลของผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (LP1) กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.52 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมผงหินปูน อาจเกิดจากการที่ผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อยและมีขนาดเล็ก ช่วยให้คอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่เสมือนมวลรวมขนาดเล็กที่ช่วยต้านทานการหดตัวของคอนกรีต และเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลง ส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีเนสลดลง

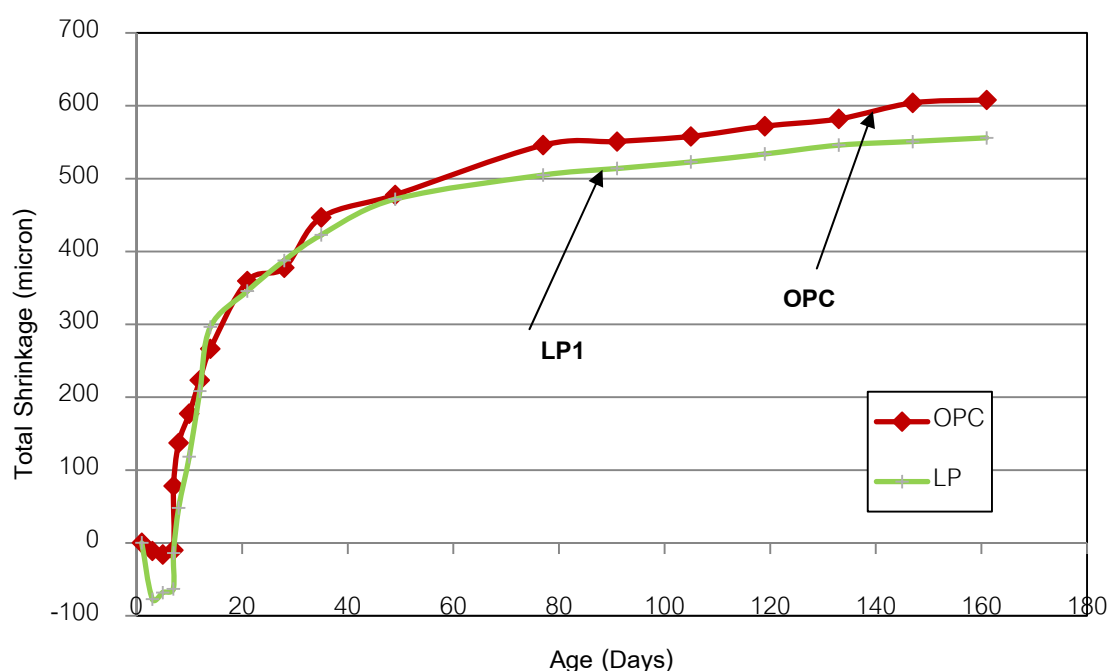


รูปที่ 4.52 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการหดตัวแบบออโตจีเนสของคอนกรีต

( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ LP1 ( $5 \mu$ ) = 10%)

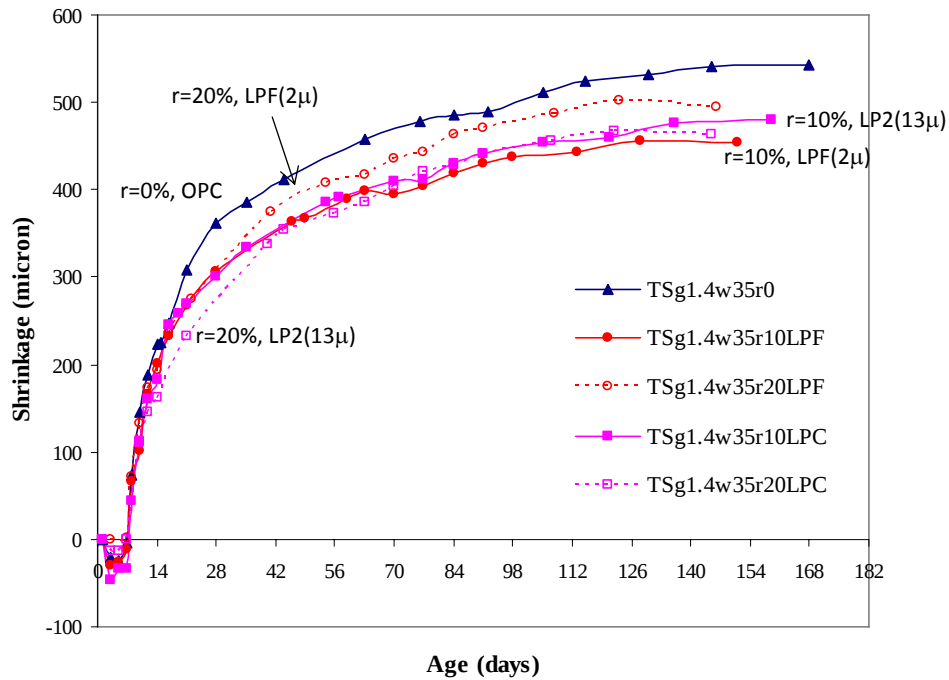
### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

ผลของผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต จะนำผลการทดสอบมาจาก 2 ส่วนคือ ทดสอบในงานวิจัยนี้โดยใช้ ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (LP1) ใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.53 และอีกส่วนหนึ่งนำผลการทดสอบมาจาก Tongaroonsri (2009) ซึ่งใช้ผงหินปูนขนาด 2 และ 13 ไมครอน (LPF และ LP1) ใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 กำหนดอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.54 จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงอายุต้น คอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าการหดตัวโดยรวมใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่ผสมผงหินปูน แต่ในระยะยาวคอนกรีตผสมผงหินปูนมีการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมผงหินปูน การใช้ผงหินปูนขนาด 2 ไมครอน ร้อยละ 10 ช่วยลดการหดตัวโดยรวมได้มากกว่าการใช้ผงหินปูนขนาด 2 ไมครอน ร้อยละ 20 ในขณะที่การใช้ผงหินปูนขนาด 13 ไมครอน ร้อยละ 10 และ 20 มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน นอกจากผงหินปูนจะทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและมีหน้าที่เสมือนมวลรวมขนาดเล็กที่ช่วยต้านทานการหดตัวแล้ว จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมผงหินปูนมีการขยายตัวขณะที่ย่อมในน้ำได้มากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้ผงหินปูน ซึ่งการขยายตัวนี้จะช่วยชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลัง



รูปที่ 4.53 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.55$  และ  $LP1(5\mu) = 10\%$   $28^{\circ}\text{C}$   $50\%\text{RH}$ )



รูปที่ 4.54 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

( $\gamma = 1.4$ ,  $w/b = 0.35$  และ  $LPF(2\mu)$ ,  $LP1(13\mu) = 10, 20\%$   $28^{\circ}\text{C}$   $75\%\text{RH}$ ) [Tongaroonsri, 2009]

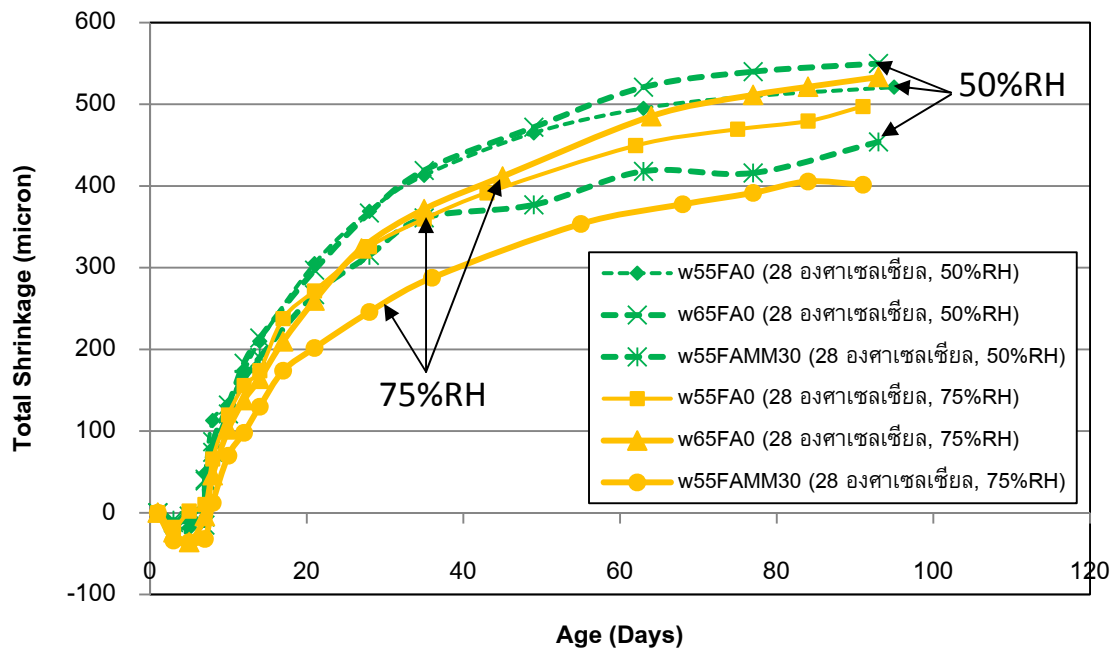
#### 4.4.6 ความชื้นสัมพัทธ์

การศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการหดตัวของคอนกรีต ทดสอบที่อุณหภูมิ  $28^{\circ}\text{C}$  และใช้ความชื้นสัมพัทธ์ในสถานะที่แตกต่างกัน 2 สถานะ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% และ 75% การหดตัวแบบอโตจีนิกของคอนกรีตเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นภายใน ตัวอย่างคอนกรีตจึงถูกห่อหุ้มเพื่อไม่ให้ความชื้นออกจากคอนกรีตได้ ดังนั้นความชื้นของสภาพแวดล้อมจึงไม่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนิก แต่ความชื้นสัมพัทธ์จะมีผลต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต เนื่องจากอัตราการระเหยเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอเฉพาะผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมเท่านั้น

##### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

ผลการทดสอบคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเท่ากัน คือ  $28^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ในสถานะที่แตกต่างกัน 2 กรณี คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% และ 75% ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 เท่ากันทุกส่วนผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกัน 2 ค่าคือ 0.55 และ 0.65 และโดยในกรณีของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีทั้งส่วนผสมที่ไม่ใช้เถ้าลอย และส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยที่มี  $\text{CaO}$  สูง ใน

ปริมาณร้อยละ 30 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.55 จากผลการทดสอบพบว่า การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง เนื่องจากคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้น้ำที่มีอยู่ภายในช่องว่างคาปิลารีของคอนกรีต สามารถระเหยออกสู่สภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำได้ง่าย ส่งผลให้น้ำในช่องว่างคาปิลารีลดลงได้มากกว่า คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและไม่ผสมเถ้าลอยให้ผลในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4.55 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

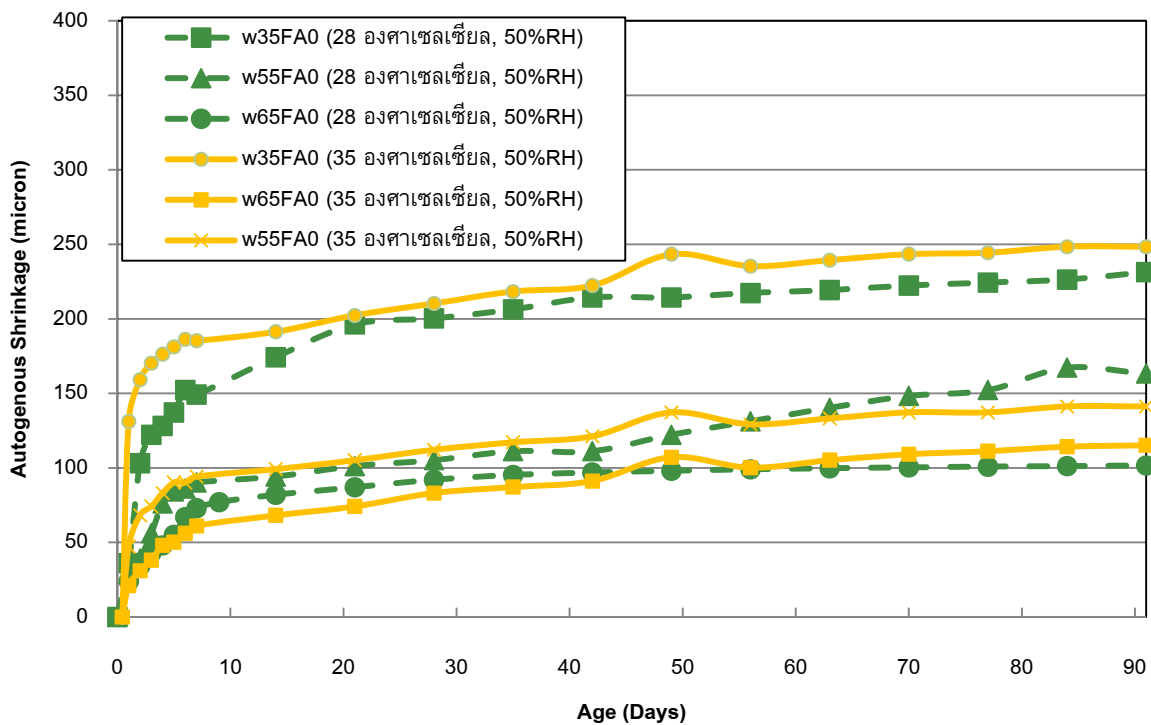
#### 4.4.7 อุณหภูมิ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวของคอนกรีต ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์คงที่คือ 50% และใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 28°C และ 35°C

##### - การหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต

ผลการทดสอบคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ต่อการหดตัวแบบออโตจีนิสของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ทดสอบอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน คือ 50% แต่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 2 สภาวะ คือ 28°C และ 35°C ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 เท่ากันทุกส่วนผสม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 0.55 และ 0.65 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.56 จากการทดสอบพบว่า การหดตัวแบบออโตจีนิสมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบต่างกันเพียง 7°C ซึ่งการใช้อุณหภูมิสูงสุดเพียง

350C เนื่องจากข้อจำกัดในการเข้าไปวัดการหดตัวในห้องทดสอบ โดยหากอุณหภูมิสูงกว่านี้ผู้วัดค่าจะหายใจลำบากจากการที่ห้องปิดทึบ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ทดสอบ ในอนาคตจึงควรมาการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ อย่างไรก็ตามการหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำในช่องว่างคาปิลารีถูกนำไปใช้เร็วขึ้น การหดตัวแบบออโตจีนัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

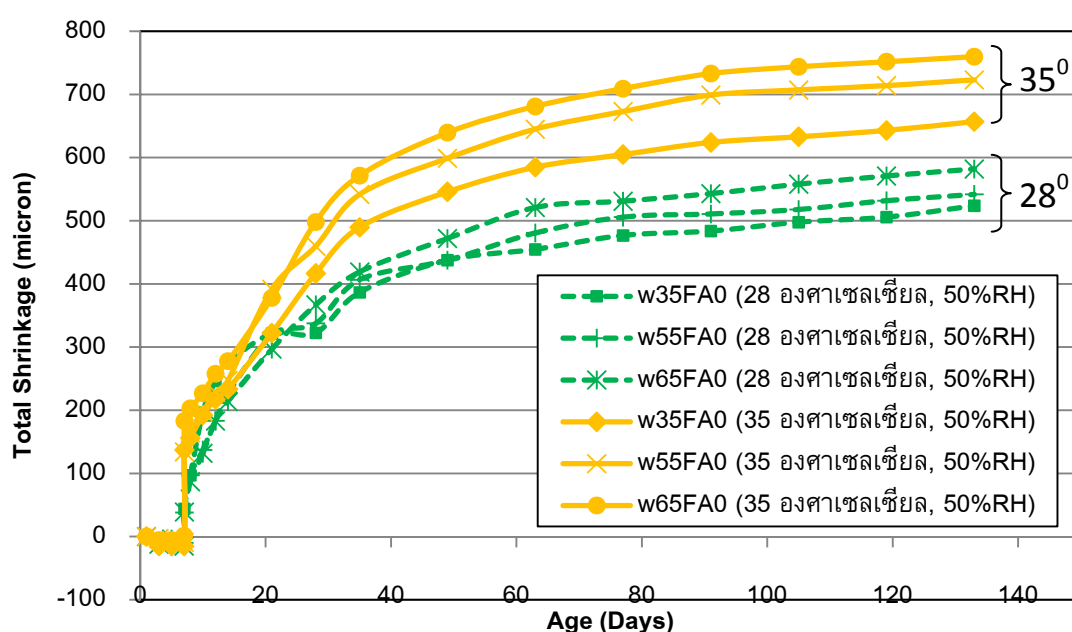


รูปที่ 4.56 ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

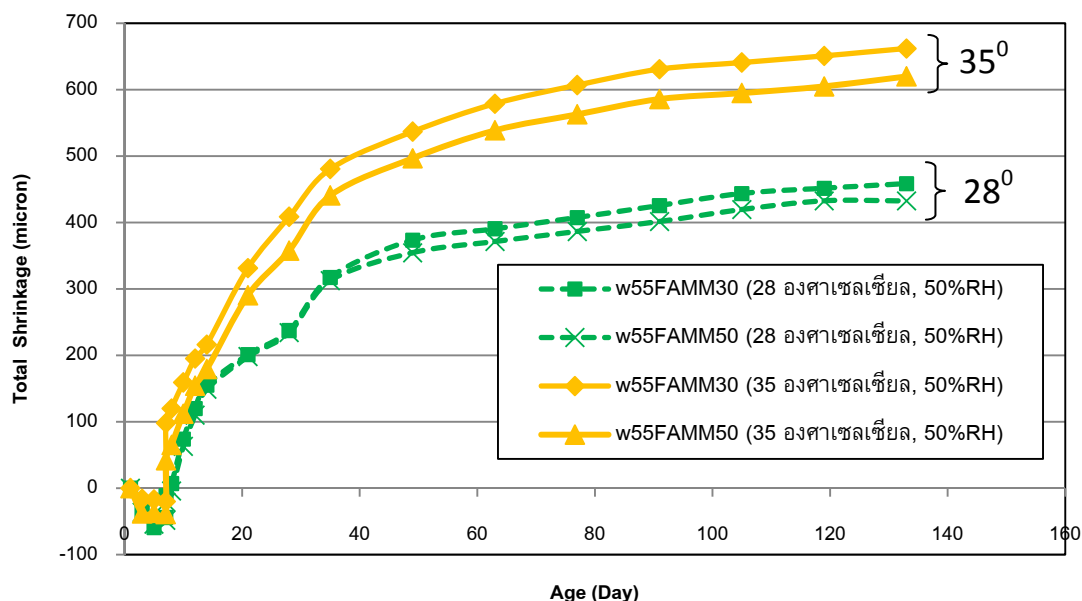
#### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

ผลการทดสอบคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน คือ 50% และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 2 สภาวะ คือ 28°C และ 35°C ใช้อัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 เท่ากันทุกส่วนผสม และแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ผลของอุณหภูมิต่อคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35, 0.55 และ 0.65 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.57 และกรณีที่ 2 ผลของอุณหภูมิต่อคอนกรีตผสมเถ้าลอย ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ผสมร่วมกับเถ้าลอยที่มี CaO สูงในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.58 จากผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมมีผลต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ

28°C มีค่าการหดตัวต่ำกว่า คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 35°C เนื่องจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่สูง จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น [Al-Saleh และ Al-Zaid, 2006] ส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราการระเหยของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จึงทำให้การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังนั้นการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลการทดสอบพบว่าทั้งคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและไม่ผสมเถ้าลอยให้ผลในลักษณะเดียวกัน และจากรูปที่ 4.58 สามารถสรุปได้ว่าจากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบนี้ปัจจัยด้านอุณหภูมิมีผลต่อการหดตัวมากกว่าผลของเถ้าลอย



รูปที่ 4.57 ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ( $\gamma = 1.4$ )

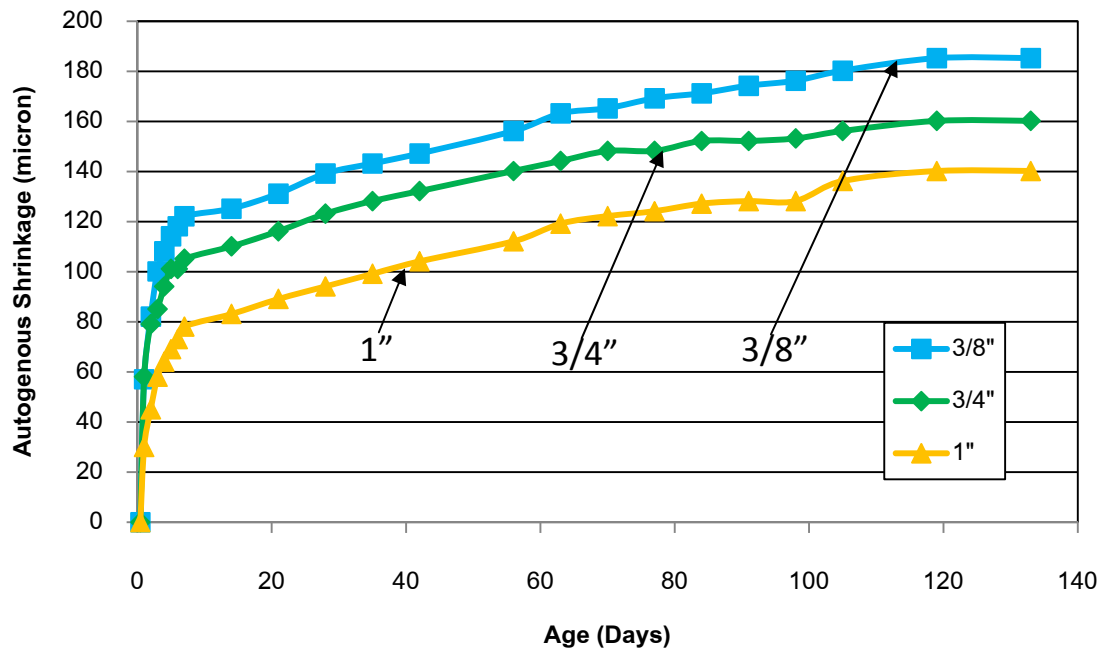


รูปที่ 4.58 ผลของอุณหภูมิการหดโดยรวมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ( $\gamma = 1.4$ )

#### 4.4.8 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ

##### - การหัดัวแบบบอโตจิ้นสของคอนกรีต

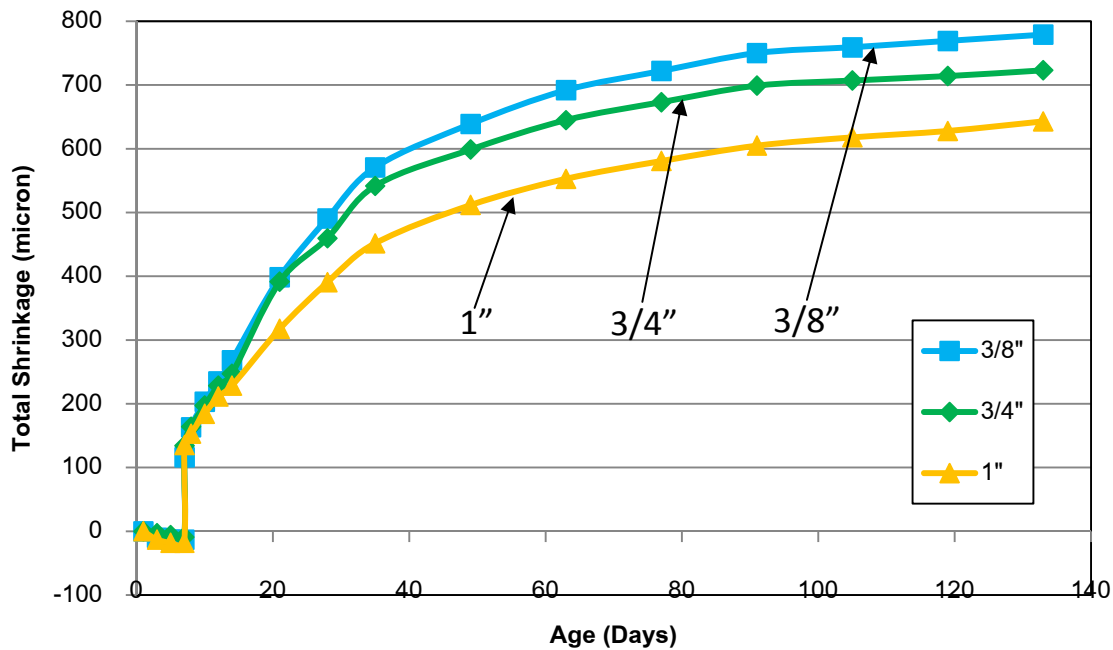
ผลการทดสอบการใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบต่อการหัดัวแบบบอโตจิ้นสของคอนกรีต ใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่มีความแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 3/8, 3/4 และ 1 นิ้ว ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เท่ากันทุกส่วนผสม ควบคุมคอนกรีตที่อุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.59 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้หินขนาด 1 นิ้ว มีค่าการหัดัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินขนาด 3/4 และ 3/8 นิ้ว ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้หินที่มีขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการยัดเรียงการหัดัวได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้หินที่มีขนาดเล็ก [Rao, 2001] นอกจากนี้การใช้หินที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าการใช้หินที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีการดูดซับน้ำหรือซีเมนต์เพสต์ได้มากกว่าการใช้หินที่มีขนาดใหญ่ เมื่อใช้น้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน ดังนั้นการใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จึงมีความต้องการน้ำน้อยกว่า ทำให้มีน้ำอิสระในคอนกรีตมากกว่าในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก ซึ่งการทดสอบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่พบว่า การใช้หินที่มีขนาด 1 นิ้ว มีค่าการยุบตัวมากกว่า การใช้หินที่มีขนาด 3/4 และ 3/8 นิ้ว โดยมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 9.5, 8.8 และ 8.0 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.59 ผลของขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบต่อการหดแบบออโตจีนัสของคอนกรีต  
(อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )

#### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

ผลการทดสอบการใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ ต่อการหดโดยรวมของคอนกรีต โดยใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่มีความแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 3/8, 3/4 และ 1 นิ้ว ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ควบคุมคอนกรีตที่อุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 50% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.60 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้หินขนาด 1 นิ้ว มีค่าการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินขนาด 3/4 และ 3/8 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการหดตัวแบบออโตจีนัส โดยกลไกที่ทำให้เป็นเช่นนี้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือขึ้นอยู่กับการยึดรั้งการหดตัวของมวลรวมที่แตกต่างกัน ตามขนาดของมวลรวม



รูปที่ 4.60 ผลของขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบต่อการหดโดยรวมของคอนกรีต  
(อุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )

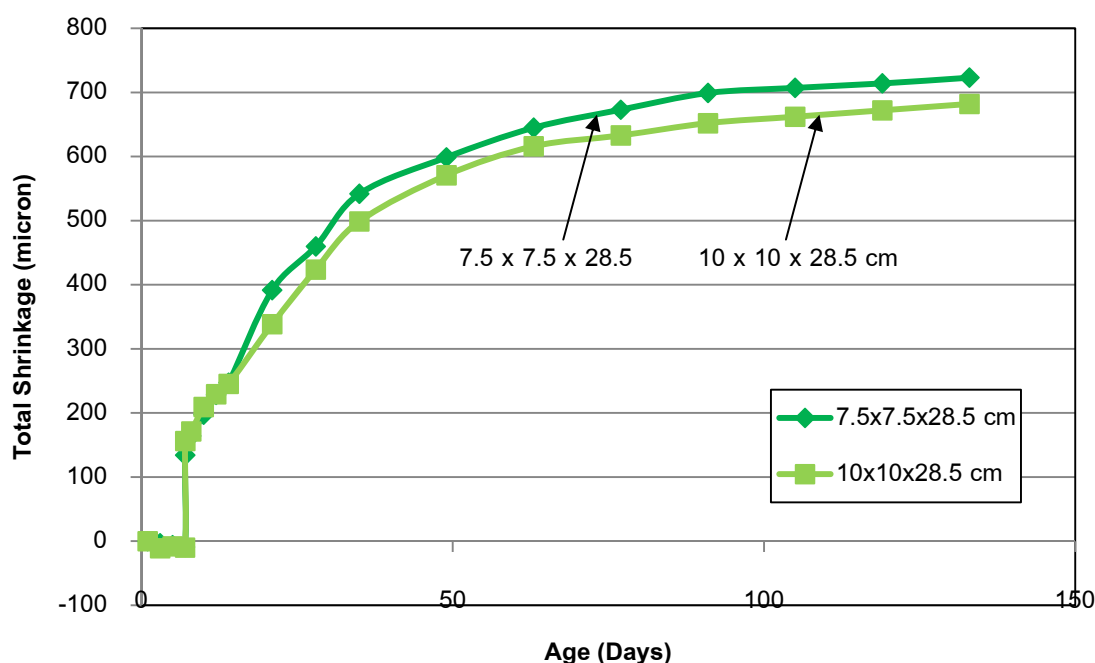
#### 4.4.9 ขนาดของก้อนตัวอย่าง

การศึกษาผลของขนาดของก้อนตัวอย่างจะศึกษาผลต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตเท่านั้น ส่วนการหดตัวแบบอโตจีนส์ในงานวิจัยนี้จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นศึกษาค่าการหดตัวแบบอิสระเพื่อนำไปใช้สำหรับโครงสร้างผนังบางเท่านั้น ขนาดของตัวอย่างจะมีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนส์หากตัวอย่างมีความหนา และแตกต่างกันมาก จนทำให้อุณหภูมิภายในต่างกัน และส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะมีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนส์

##### - การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

ผลการทดสอบการใช้ขนาดของก้อนตัวอย่างต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 7.5 x 7.5 x 28.5 และ 10 x 10 x 28.5 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้มีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ 165 และ 213 มม. ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เท่ากันทุกส่วนผสม ตามลำดับ ควบคุมคอนกรีตที่อุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.61 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่มีขนาด 10x10x28.5 เซนติเมตร มีค่าการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่มีขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีขนาดเล็ก (อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวต่ำ) มีการสูญเสียน้ำได้เร็วกว่าคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งคอนกรีตเมื่อ

เกิดการสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว โดยที่อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว หากคอนกรีตมีพื้นที่ผิวมาก เมื่อเทียบกับปริมาตร ทำให้การสูญเสียน้ำจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการหดตัวขึ้นที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปในส่วนในของคอนกรีต ซึ่งใช้เวลานานมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีขนาดใหญ่ขึ้น [Yuan และ Wan, 2002]

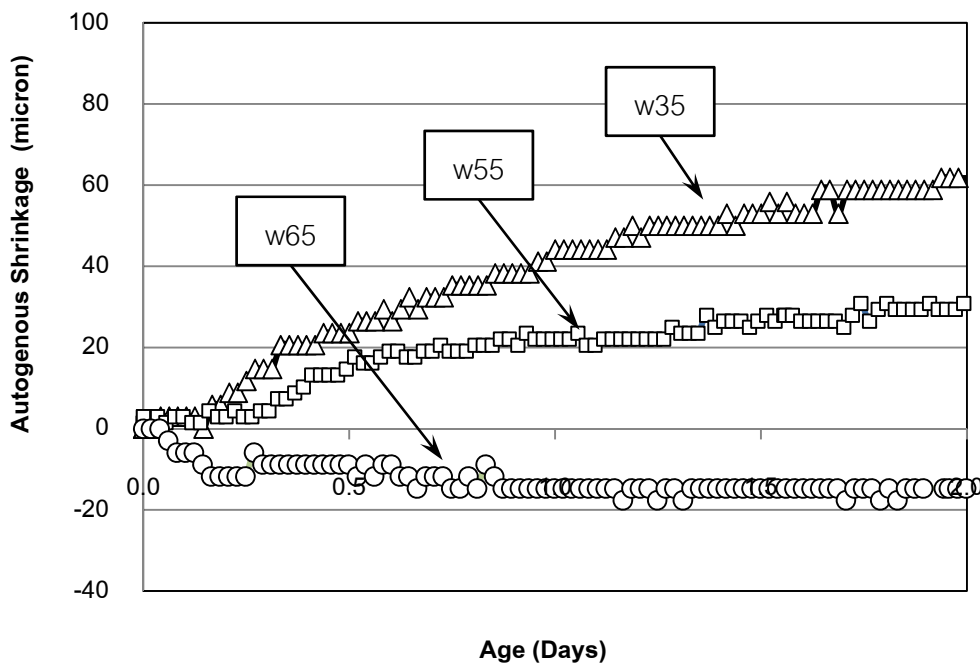


รูปที่ 4.61 ผลของขนาดก้อนตัวอย่างต่อการหดโดยรวมของคอนกรีต  
(อุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$  และ  $w/b = 0.55$ )

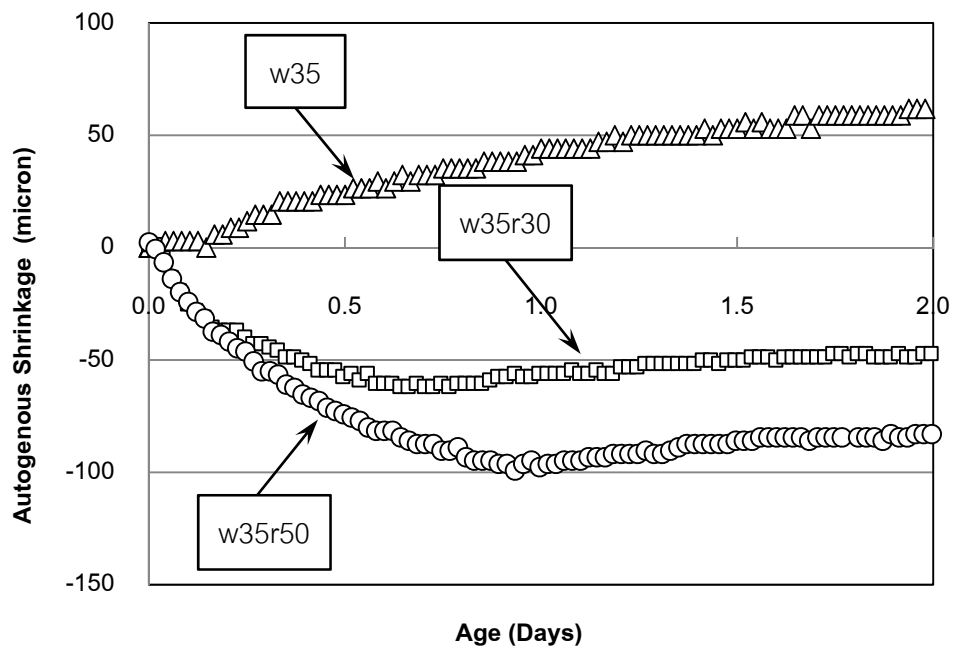
#### 4.4.10 การหดตัวแบบออโตจีนัสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก

การหดตัวของคอนกรีตโดยทั่วไปมักจะวัดตั้งแต่คอนกรีตแกะออกจากแบบ แต่ในความเป็นจริงขณะที่คอนกรีตอยู่ในแบบหล่อก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาว ในงานวิจัยนี้จึงวัดการหดตัวในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในแบบหล่อด้วย คือวัดตั้งแต่คอนกรีตก่อตัวเริ่มต้น เพื่อหาค่าการหดตัวหรือขยายตัวตั้งแต่คอนกรีตก่อตัวเริ่มต้น จนกระทั่งคอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้าย สำหรับค่าที่ได้นี้ไปใช้ในการสร้างสมการทำนายการหดตัวต่อไป โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.62 ถึง 4.65 จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการทดลองที่ใช้อาจทำให้ได้ค่าต่ำกว่าปกติในบางส่วนผสม ซึ่งจะเห็นได้จากเส้นกราฟมีค่าคงที่เมื่อเกิดการหดตัวไปเพียงช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจเกิดจากมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างตัวอย่างและแบบด้านล่าง แม้ว่าผู้วิจัยใช้วัสดุหลายชนิดในการแก้ปัญหาดังกล่าว แต่ยังคงพบปัญหาในบางส่วนผสม อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบส่วนใหญ่สามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินผลการหดตัวของคอนกรีตในช่วงอายุต้นได้ โดยพบว่า การหดตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตที่วัดหลังจากก่อ

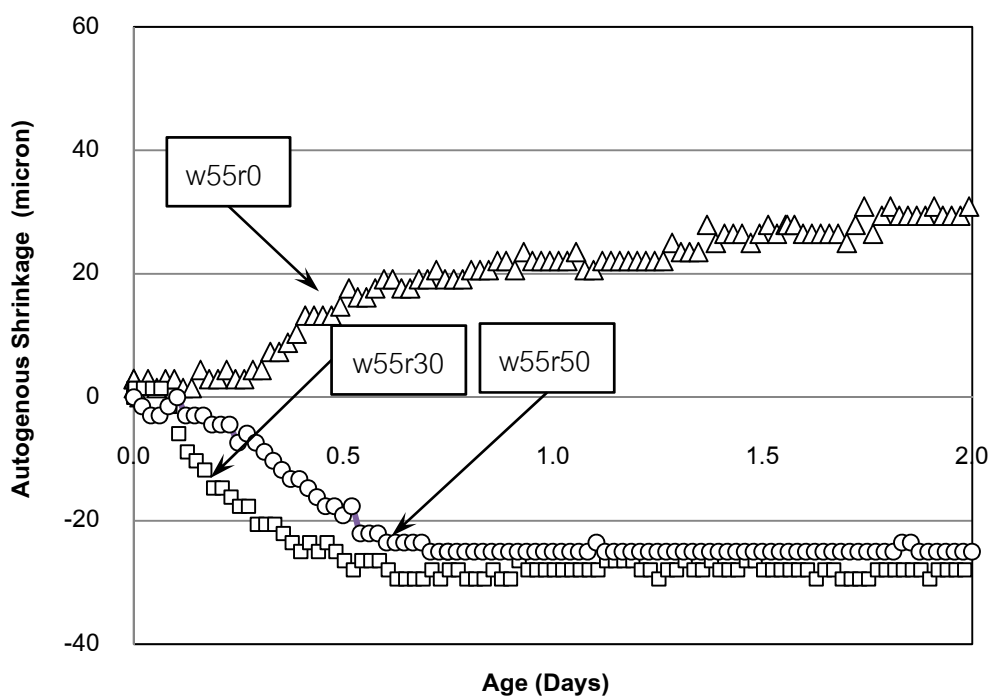
ตัวขั้นสุดท้ายแล้ว ในส่วนผสมที่มี  $w/b=0.65$  พบการขยายตัวของคอนกรีต ส่วนการใช้เถ้าลอยพบว่าทำให้คอนกรีตขยายตัวและการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมที่ผสมเถ้าลอยและมี  $w/b=0.35$  มีการขยายตัวมากกว่าส่วนผสมที่ผสมเถ้าลอยและมี  $w/b=0.55$  ส่วนการใช้ผงหินปูนพบว่าช่วยลดการหดตัวในช่วงอายุต้นได้เช่นเดียวกับผลการทดสอบหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้ายแล้ว เมื่อพิจารณาผลการหดตัวในช่วง 48 ชั่วโมงแรก กับการหดตัวที่เริ่มวัดตั้งแต่คอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้ายพบว่า ค่าที่ได้จากการวัดทั้งสองส่วน ไม่สามารถนำมาต่อเนื่องกันได้ เนื่องจากอาจเกิดจากการที่คอนกรีตที่อยู่ในแบบและมีการยึดรั้งจากแบบด้านข้างจะเกิดหน่วยแรงอัดจากการขยายตัวของคอนกรีต ทำให้เมื่อแกะคอนกรีตออกจากแบบ คอนกรีตจะมีการขยายตัวค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับการขยายตัวของคอนกรีตในขณะที่ยึดตั้งแต่เริ่มก่อตัว ในส่วนของการวัดการหดตัวในช่วงอายุต้นนี้ทำได้ยาก การวัดอีกวิธีที่สามารถทำได้คือการฝัง Strain Gage ในคอนกรีต แต่ Strain Gage แบบฝังมีราคาแพงมากและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงไม่สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้ ในอนาคตหากต้องการให้ได้ผลทดสอบในส่วนของการอายุต้นที่สมบูรณ์กว่านี้จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต



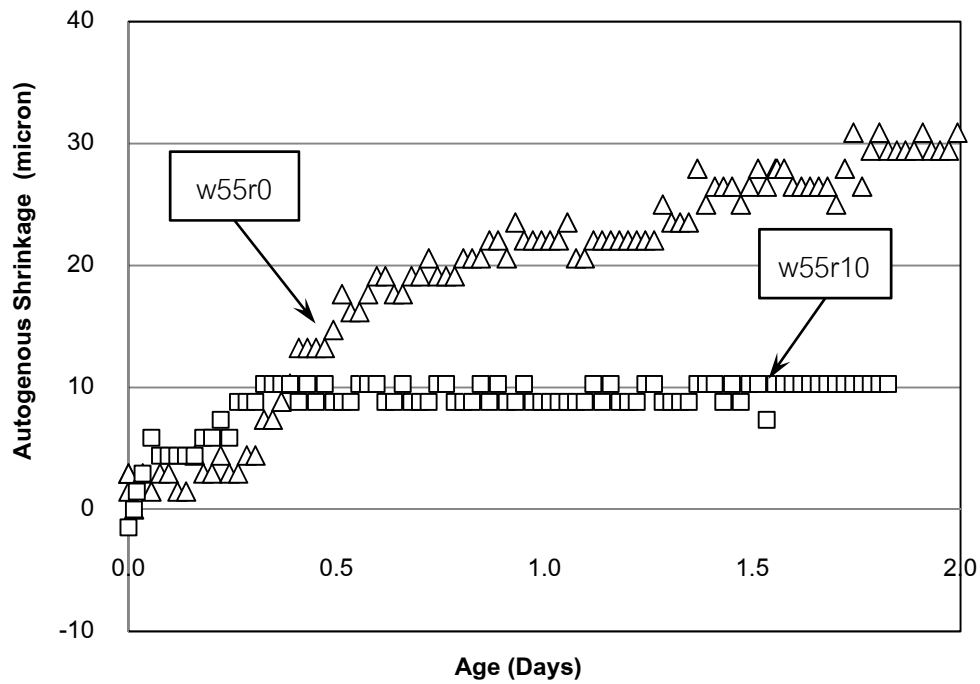
รูปที่ 4.62 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก  
(อุณหภูมิ  $28^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$ )



รูปที่ 4.63 ผลของเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบออโตจีเนียสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก  
(อุณหภูมิ  $28^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$ ,  $w/b=0.35$ )



รูปที่ 4.64 ผลของเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบออโตจีเนียสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก  
(อุณหภูมิ  $28^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$ ,  $w/b=0.55$ )



รูปที่ 4.65 ผลของหินปูนต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสในช่วง 48 ชั่วโมงแรก  
(อุณหภูมิ 28<sup>0</sup>C และความชื้นสัมพัทธ์ 50%  $\gamma = 1.4$ ,  $w/b=0.55$ )

## บทที่ 5

### แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต

#### 5.1 ประเด็นที่พิจารณาในการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่ถูกพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่ 1 แบบจำลองที่ใช้สมการคำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งได้แก่ ACI-209, Bazant B3 model, Gardner-Lockman model และ CEB-FIP 90 ส่วนประเภทที่ 2 แบบจำลองที่มีสมการคำนวณการหดตัวแยกกันระหว่างคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง แบบจำลองในประเภทนี้ ได้แก่ JSCE 2002 และ Eurocode 2 ซึ่งในกรณีของคอนกรีตกำลังอัดปกติ จะมีสมการสำหรับคำนวณการหดตัวโดยรวมเท่านั้น แต่สำหรับคอนกรีตกำลังสูง การคำนวณจะแยกระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม นอกจากนี้หากแบ่งแบบจำลองออกตามปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณค่าการหดตัว สามารถแบ่งแบบจำลองได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้กำลังอัดเป็นปัจจัยหลักในการคำนวณค่าการหดตัว (Strength Base) แบบจำลองในกลุ่มนี้ได้แก่ Bazant B3 model, Gardner-Lockman model, CEB-FIP 90 และ Eurocode 2 ประเภทที่ 2 ได้แก่ ประเภทที่ใช้ปริมาณน้ำ และปริมาณปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักในการคำนวณค่าการหดตัว (Cement-water Base) แบบจำลองในกลุ่มนี้ได้แก่ ACI-209 และ JSCE 2002 จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบในประเทศไทยบางส่วน กับแบบจำลองต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.7 จากผลการเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองที่คำนวณค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตโดยตรง จะมีความคลาดเคลื่อนสูงมากในกรณีของส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้ไม่พิจารณาการหดตัวแบบบอโตจีนัส ซึ่งปกติจะมีค่าสูงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ จึงทำให้ค่าที่คำนวณได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในขณะที่แบบจำลองที่คำนวณแยกกันระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม จะให้ค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงผลการทดสอบมากกว่าในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การสร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมจริงของคอนกรีตที่เกิดการหดตัวทั้ง 2 ประเภทไปด้วยกัน

จากผลการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัส พบว่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสมีค่าที่ไม่อาจละเลยได้แม้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะมีค่าสูงกว่า 0.42 ซึ่งเป็นค่าที่แบบจำลองทั่วไปถือว่าการหดตัวจะเกิดขึ้นน้อยมากหากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า 0.42 เช่น เมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ JSCE 2002 (ตามสมการที่ 2.35) และ Eurocode2 (ตามสมการที่ 2.43) มีค่าเท่ากับ 28 และ 33 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่ผ่านมา (Tongaroon Sri, 2009) ซึ่งเป็นผลทดสอบใน

ประเทศไทย พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองนี้ ถึงสองเท่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปัจจัยหลัก 2 ประการคือ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบการหดตัวของแบบจำลองทั้งสองนี้ใช้อุณหภูมิที่  $20^{\circ}\text{C}$  เป็นมาตรฐานในการทดสอบ และไม่มีปัจจัยด้านปริมาณซีเมนต์เพสต์หรือปริมาณมวลรวมในแบบจำลอง ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ทำให้ค่าที่คำนวณได้แตกต่างจากผลการทดสอบอย่างมาก จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิและปริมาณซีเมนต์เพสต์ มีผลอย่างมากต่อการหดตัวของคอนกรีตทั้งการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง ดังรูปที่ 4.32, 4.35, 4.56 และ 4.57 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ เป็นตัวแปรหนึ่งในการสร้างสมการการหดตัว อย่างไรก็ตามเพื่อให้ง่ายในการใช้งาน ในการสร้างแบบจำลองจึงใช้ค่าอัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตร ( $n_a$ ) ในส่วนผสมแทน อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) โดยในงานวิจัยนี้ใช้  $\gamma$  เท่ากับ 1.1 - 1.5 เมื่อคำนวณเป็น  $n_a$  แล้วมีค่าเท่ากับ 0.643 – 0.738

เมื่อพิจารณาผลของวัสดุประสานได้แก่ แก้วลอย และผงหินปูน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มากในประเทศไทย พบว่าวัสดุประสานทั้งสองมีผลกระทบต่อการหดตัวของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ และแบบจำลองส่วนใหญ่ที่มีอยู่ไม่สามารถคำนวณผลของปัจจัยนี้ได้ หนึ่งในประเทศไทยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณผลของแก้วลอยได้ ซึ่งพัฒนาโดย Tongaroonsri, 2009 แต่การคำนวณมีความซับซ้อนและจำเป็นต้องใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับเป็นมาตรฐานที่วิศวกรทั่วไปที่ไม่มีความรู้ด้านคอนกรีตในระดับสูงใช้งาน นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้านขอบเขตการใช้งานที่ยังไม่ครอบคลุมทุกปัจจัยที่จำเป็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่คำนึงถึงผลของแก้วลอยและผงหินปูน และให้มีความสะดวกในการใช้งานโดยวิศวกรทั่วไป

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้จากการนำผลการทดสอบการหดตัวอย่างอิสระของตัวอย่าง ซึ่งมีขนาดเล็ก มาใช้สร้างสมการ ซึ่งถือว่าการหดตัวเกิดขึ้นเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด และไม่มีผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันภายในคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมถึงการหดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Shrinkage) มาเกี่ยวข้อง ดังนั้นสมการที่ได้จึงเหมาะสำหรับคำนวณค่าการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีตในโครงสร้างบาง (Thin Member)

## 5.2 หลักการในการสร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต

จากประเด็นในการพิจารณาที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.1 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การสร้างสมการคำนวณการหดตัวแบบอโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตแยกกันแล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม ดังสมการที่ (5.1) และใช้หลักการ Water to Binder Ratio Base เป็นหลักในการสร้างแบบจำลอง แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้คล้ายคลึงกับแบบจำลองทำนายการหดตัวที่ใช้ทั่วไป กล่าวคือ คำนวณค่าการหดตัวสูงสุดของคอนกรีตเป็นอันดับแรก ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่พิจารณา แล้วจึงคูณด้วยฟังก์ชันของเวลาเพื่อหาค่าการหดตัวที่อายุต่างๆ ตามต้องการ ซึ่งฟังก์ชันของเวลามักจะสัมพันธ์กับปัจจัยด้านรูปร่าง หรือสภาพแวดล้อม ข้อมูลสำหรับใช้สร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีต ใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนิสโดยตรง ส่วนข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้ง ใช้ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (5.2) คือเป็นค่าที่ได้จากการนำค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมาหักออกด้วยค่าการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีต ซึ่งการใช้สมการที่ (5.2) ในการคำนวณค่าการหดตัวแบบแห้งได้นั้นตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็ก การหดตัวจึงเกิดขึ้นเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดไม่ว่าจะเป็นการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนิสหรือการหดตัวแบบแห้ง

$$\varepsilon_{TS}(t, t_0) = \varepsilon_{as}(t, t_0) + \varepsilon_{ds}(t, t_0) \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{ds}(t) = \varepsilon_{Unsealed}(t) - \varepsilon_{Sealed}(t) \quad (5.2)$$

โดย

|                             |                                                                                    |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_{TS}(t, t_0)$  | คือ ค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ ( $\times 10^{-6}$ )      |
| $\varepsilon_{as}(t, t_0)$  | คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีนิสของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ ( $\times 10^{-6}$ ) |
| $\varepsilon_{ds}(t, t_0)$  | คือ ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ ( $\times 10^{-6}$ )     |
| $\varepsilon_{Unsealed}(t)$ | คือ ค่าการหดตัวที่วัดได้จากตัวอย่างที่ไม่หุ้มผิวที่อายุ $t$ (การหดตัวโดยรวม)       |
| $\varepsilon_{Sealed}(t)$   | คือ ค่าการหดตัวที่วัดได้จากตัวอย่างที่หุ้มผิวที่อายุ $t$ (การหดตัวแบบอโตจีนิส)     |

### 5.3 แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจินัสของคอนกรีต

จากผลการทดสอบการหดตัวแบบอโตจินัสในบทที่ 4 รวมถึงข้อมูลที่ได้รวบรวมจากบทความทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแบบอโตจินัสและนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้แก่ ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน ปริมาณ  $SO_3$  ในเถ้าลอย อุณหภูมิ และขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ และจากบทความที่เกี่ยวข้อง โดยใช้หลักการทางสถิติให้ได้แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจินัสของคอนกรีตดังสมการที่ (5.3) ถึง สมการที่ (5.14)

$$\varepsilon_{as}(t, t_0) = \varepsilon_{as}(t) - \varepsilon_{as}(t_0) \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{as}(t) = \varepsilon_{asm} \cdot \beta(t) \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{asm} = 258 \left( -\ln \left( \frac{w}{b} \right) \right) \cdot \gamma_{na} \cdot \gamma_{FA} \cdot \gamma_{LP} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_c \cdot \gamma_T \quad (5.5)$$

$$\gamma_{na} = 0.13 \cdot n_a^{-5.12} \quad (5.6)$$

$$\gamma_{FA} = \beta \cdot \exp \left[ \left( \frac{1}{-1.13 + 0.49 \left( \frac{w}{b} \right)^{3.10}} \right) \cdot r_{fa} \right] \quad (5.7)$$

$$\beta = 1 \quad \text{สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย}$$

$$\beta = 1 + 0.46 \exp(-3.55 \cdot (\%SO_{3f})) \quad \text{สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย} \quad (5.8)$$

$$\gamma_{LP} = \frac{1}{1 + 1.08(r_{LP})^{1.23}} \quad (5.9)$$

$$\gamma_m = 1.30(G_{max})^{(-0.0045 \cdot G_{max})} \quad (5.10)$$

$$\gamma_T = 1.29 - 0.54 \exp(-0.04T^{0.83}) \quad (5.11)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp(-\eta \cdot t^\lambda) \quad (5.12)$$

$$\eta = 0.04 \left( \frac{w}{b} \right)^{-1.62} \quad (5.13)$$

$$\lambda = 0.22 \cdot (8.96)^{\left(\frac{w}{b}\right)} \quad (5.14)$$

เมื่อ

|                            |                                                                                    |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_{as}(t, t_0)$ | คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนสของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ ( $\times 10^{-6}$ ) |
| $\varepsilon_{asm}$        | คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีเนสสูงสุดของคอนกรีต ( $\times 10^{-6}$ )                    |
| $t$                        | คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)                                              |
| $t_0$                      | คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)                                     |
| $w/b$                      | คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน                                                     |
| $n_a$                      | คือ อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม                                          |
| $r_{ia}$                   | คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย                                                  |
| $r_{LP}$                   | คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูน                                                 |
| $\%SO_{3f}$                | คือ ปริมาณร้อยละของ $SO_3$ ในเถ้าลอย (%)                                           |
| $G_{max}$                  | คือ ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ (มม.)                                                   |
| $\gamma_c$                 | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 5.1)                           |
| $T$                        | คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )                                         |

ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์

| Cement type | $\gamma_c$ |
|-------------|------------|
| Type I      | 1.00       |
| Type III    | 1.11       |
| Type V      | 1.01       |

เนื่องจากแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจีนิกของคอนกรีตที่สร้างขึ้น ได้จากการนำผลการทดสอบมาใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยหลักการทางสถิติ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงข้อจำกัดในการใช้งานตามช่วงของตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ โดยแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจีนิกของคอนกรีตที่นำเสนอในรายงานฉบับนี้เหมาะสมสำหรับใช้กับคอนกรีตที่มีส่วนผสมอยู่ในขอบเขตของปัจจัยต่างดังนี้

|                                                                               |                               |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| - ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                                               | (Type I, Type III และ Type V) |
| - อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)                                            | (0.35 – 0.80)                 |
| - อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) | (1.1 - 1.5)                   |
| - อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ( $n_a$ )                                | (0.643 – 0.746)               |
| - การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)                   | (0% - 60%)                    |
| - ปริมาณ $SO_3$ ในเถ้าลอย                                                     | (0.1% – 3.03%)                |
| - การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)                  | (0% -20%)                     |
| - ความละเอียดของผงหินปูน                                                      | (2 – 13 micron)               |
| - อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (โดยน้ำหนักของมวลรวม)                                | (0.42-0.44)                   |
| - มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ                                           |                               |
| - มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูน                                                  |                               |
| - ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ                                                      | (3/8", 3/4" และ 1")           |
| - อุณหภูมิคงที่                                                               | (28°C - 35°C)                 |

อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อนำแบบจำลองที่ใช้คำนวณการหดตัวแบบอโตจีนิกที่มีค่าของตัวแปรต่างๆ อยู่นอกขอบเขตนี้ โดยใช้ผลการทดลองจากต่างประเทศ พบว่าค่าการหดตัวที่ได้ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงในหัวข้อที่ 5.6.1 ซึ่งทำให้ขอบเขตของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสามารถขยายการคำนวณออกไปในช่วง 0.27- 0.80 ได้ นอกจากนี้ในส่วน of อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมสามารถขยายออกไปในช่วง 20°C - 35°C

#### 5.4 แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

จากผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมในบทที่ 4 รวมถึงข้อมูลที่ได้รวบรวมจากบทความทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแห้งและนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองได้แก่ ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน ปริมาณ  $SO_3$  ในเถ้าลอย ระยะเวลาและ

วิธีการปม ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่ทดสอบในงานวิจัยนี้และจากบทความที่เกี่ยวข้อง โดยใช้หลักการทางสถิติให้ได้แบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตตั้งสมการที่ (5.15) ถึง สมการที่ (5.30)

$$\varepsilon_{ds}(t, t_0) = \varepsilon_{dsm} \cdot \beta(t, t_0) \cdot \beta(h) \quad (5.15)$$

$$\varepsilon_{dsm} = \left( 587 - 150 \exp \left( -75 \left( \frac{w}{b} \right)^{8.28} \right) \right) \cdot K_{na} \cdot K_{FA} \cdot K_{LP} \cdot K_m \cdot K_c \cdot K_{cu} \cdot K_T \quad (5.16)$$

$$K_{na} = \frac{1.30 n_a^{-7.34} - 0.16}{n_a^{-7.34} + 5.73} \quad (5.17)$$

$$K_{FA} = \delta \cdot \left( 1 + 0.07 r_{fa} \right)^{\left( -\frac{1}{0.20} \right)} \quad (5.18)$$

$$\delta = 1 \quad \text{สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้ถั่วลอย}$$

$$\delta = 1 + 0.17 \exp \left( -3.07 (\% SO_{3f}) \right) \quad \text{สำหรับคอนกรีตผสมถั่วลอย} \quad (5.19)$$

$$K_{LP} = \frac{1}{1 + 1.08 (r_{LP})^{1.23}} \quad (5.20)$$

$$K_m = \left( \frac{0.43}{1 - 0.67 \exp(-0.008 \cdot G_{\max})} \right) \quad (5.21)$$

$$K_{cu} = \left( \frac{1}{0.917 + \alpha \cdot (t_0)^\psi} \right) \quad (5.22)$$

$$K_T = 0.88 (1.049^T) \cdot (T^{-0.36}) \quad (5.23)$$

$$\beta(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0) \cdot B \cdot P}{(t - t_0) + A \cdot G \cdot N \cdot F} \right] \quad (5.24)$$

$$A = 10 \exp \left( \frac{16}{f_c'} \right) \quad (5.25)$$

$$B = 9.21 \left( \frac{1}{f_c'} \right) \quad (5.26)$$

$$G = 0.24 \left( \frac{V}{S} \right)^{0.51} \quad (5.27)$$

$$N = 2.58 \exp(-1.44 \cdot n_a) \quad (5.28)$$

$$F = (0.93 r_{fa}^{0.94})^{r_{fa}} \quad (5.29)$$

$$\beta(h) = 1.143 \left( 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^3 \right) \quad (5.30)$$

|                            |                                                                                            |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_{ds}(t, t_0)$ | คือ ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ $t_0$ ถึง $t$ ( $\times 10^{-6}$ )             |
| $\varepsilon_{dsm}$        | คือ ค่าการหดตัวแบบแห้งสูงสุดของคอนกรีต ( $\times 10^{-6}$ )                                |
| $t$                        | คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)                                                      |
| $t_0$                      | คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ (วัน)                                             |
| $w/b$                      | คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน                                                             |
| $n_a$                      | คือ อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม                                                  |
| $r_{fa}$                   | คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย                                                          |
| $r_{LP}$                   | คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูน                                                         |
| $\%SO_{3f}$                | คือ ปริมาณร้อยละของ $SO_3$ ในเถ้าลอย (%)                                                   |
| $G_{max}$                  | คือ ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ (มม.)                                                           |
| $K_c, P$                   | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 5.2)                                   |
| $K_{cu}$                   | คือ สัมประสิทธิ์สำหรับวิธีการบ่มและระยะเวลาการบ่ม<br>( $\alpha$ และ $\psi$ ดูตารางที่ 5.3) |
| $T$                        | คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )                                                 |
| $f'_c$                     | คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต (MPa)                                                |
| $\frac{V}{S}$              | คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศ (มม.)                                     |
| $RH$                       | คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)                                                                   |

ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดของปูนซีเมนต์ ( $K_c$  และ  $P$ )

| Cement type | $K_c$ | $P$   |
|-------------|-------|-------|
| Type I      | 1.00  | 1.000 |
| Type III    | 0.96  | 0.997 |
| Type V      | 0.95  | 0.942 |

ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์สำหรับชนิดและระยะเวลาการบ่ม

| Coefficients | Water curing | Moist cured | Seal curing |
|--------------|--------------|-------------|-------------|
| $\alpha$     | 0.014        | 0.0012      | 0.0003      |
| $\psi$       | 0.912        | 1.738       | 2.100       |

เนื่องจากแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่สร้างขึ้น ได้จากการนำผลการทดสอบมาใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยหลักการทางสถิติ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงข้อจำกัดในการใช้งานตามช่วงของตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ โดยแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่นำเสนอในรายงานฉบับนี้เหมาะสมสำหรับใช้กับคอนกรีตที่มีส่วนผสมอยู่ในขอบเขตของปัจจัยต่างดังนี้

- ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Type I, Type III และ Type V)
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) (0.35 – 0.80)
- อัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ( $\gamma$ ) (1.1 - 1.5)
- อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ( $n_a$ ) (0.643 – 0.746)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) (0% - 60%)
- ปริมาณ  $SO_3$  ในเถ้าลอย (0.1% – 3.03%)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) (0% -20%)
- ความละเอียดของผงหินปูน (2 – 13 micron)
- อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (โดยน้ำหนักของมวลรวม) (0.42-0.44)
- มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ
- มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูน
- ระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต (0 - 14 วัน)
- ชนิดของการบ่ม (ไม่บ่ม บ่มน้ำ บ่มกระสอบ ห่อพลาสติก)
- อุณหภูมิคงที่ ( $28^{\circ}C$  -  $35^{\circ}C$ )
- ความชื้นสัมพัทธ์ (50% - 75%)
- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ ( $3/8"$ ,  $3/4"$  และ  $1"$ )

## 5.5 แบบจำลองทำนายการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ หรือโครงสร้างที่ความชื้นสามารถเข้าหรือออกจากคอนกรีตได้ เป็นการหดตัวที่เกิดขึ้นจากการหดตัวแบบอโตจีนีส์รวมกับการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งรวมเรียกว่า การหดตัวโดยรวม และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1) ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างเพื่อควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีต จึงต้องนำค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตนี้ไปใช้ในการออกแบบ ในการคำนวณการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของชนิดและระยะเวลาการบ่มคอนกรีต เนื่องจากจะส่งผลต่อพฤติกรรมการหดตัวทั้งแบบอโตจีนีส์และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยการหดตัวแบบอโตจีนีส์ที่เกิดขึ้นในสภาวะการบ่มที่แตกต่างกันจะมีค่าการหดตัวที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในกรณีของการบ่มด้วยน้ำหรือบ่มด้วยกระสอบที่เปียกตลอดเวลา น้ำที่ใช้บ่มสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้บางส่วน ซึ่งน้ำเหล่านี้จะเข้าไปแทนที่น้ำในช่องว่างคาปิลารีที่สูญเสียไปจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้การหดตัวแบบอโตจีนีส์มีค่าลดลงหรืออาจไม่เกิดขึ้นในช่วงที่ทำการบ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างบาง ส่วนในกรณีที่ไม่บ่มหรือการบ่มโดยการหุ้มด้วยพลาสติก จะไม่มีน้ำจากภายนอกเข้าไปในคอนกรีต จึงทำให้การหดตัวแบบอโตจีนีส์สามารถเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่ ส่วนในกรณีของการหดตัวแบบแห้ง ในขณะที่บ่มถือว่าน้ำไม่สามารถออกจากคอนกรีตได้ จึงไม่ทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้ง การคำนวณการหดตัวแบบแห้งจึงเริ่มเมื่อพื้นผิวคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับอากาศ หรือเมื่อเลิกบ่ม ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นการคำนวณการหดตัวโดยรวมจึงต้องพิจารณาปัจจัยเรื่องชนิดและระยะเวลาการบ่มร่วมด้วย

ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณการหดตัวครอบคลุมผลของการบ่มดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และสอดคล้องกับการหดตัวโดยรวมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจึงกำหนดให้ คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำหรือกระสอบที่เปียกตลอดเวลาจะไม่เกิดการหดตัวในช่วงที่บ่ม โดยการหดตัวแบบอโตจีนีส์ที่มีระยะเวลาการบ่ม  $t_0$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.31 ซึ่งมีลักษณะการหดตัวโดยรวมแสดงดังรูปที่ 5.1 ส่วนในกรณีที่บ่มด้วยพลาสติก ลักษณะการหดตัวโดยรวมแสดงดังรูปที่ 5.2

$$\varepsilon_{as}(t, t_0) = \varepsilon_{as}(t) - \varepsilon_{as}(t_0) \quad (5.30)$$

เมื่อ

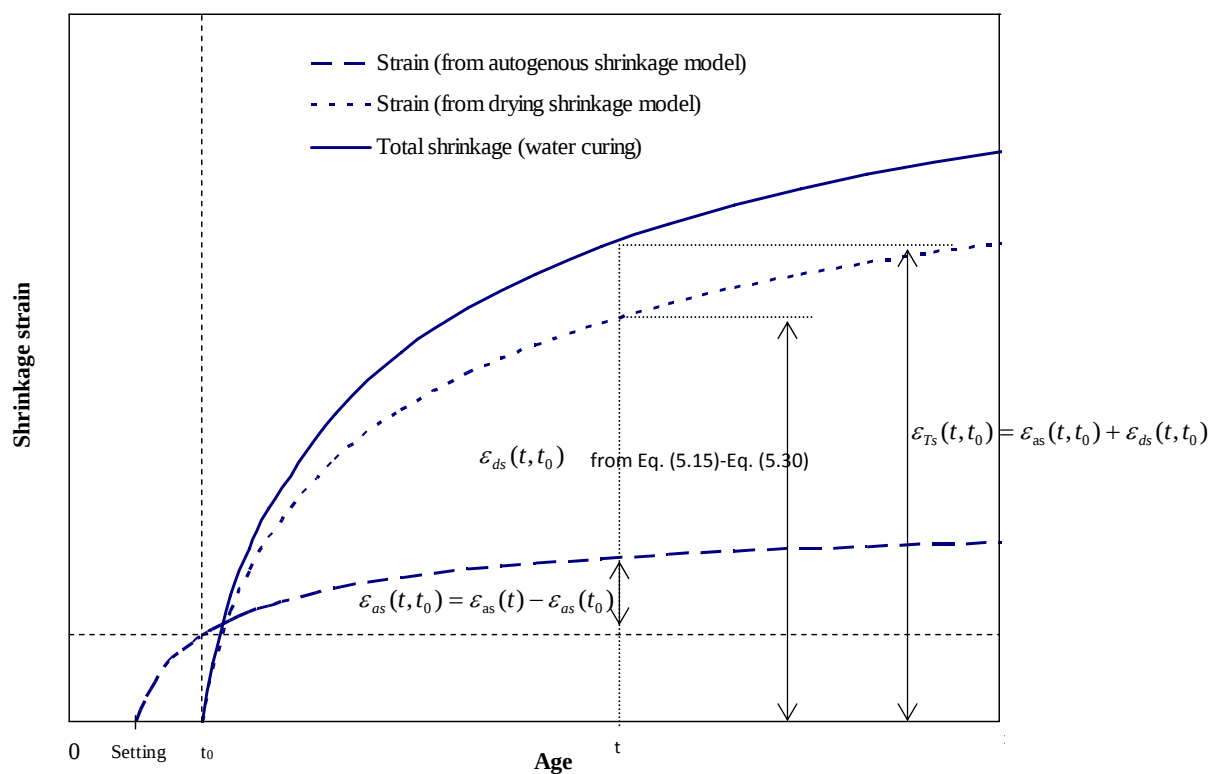
$\varepsilon_{as}(t, t_0)$  คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีนีส์ของคอนกรีตระหว่างอายุ  $t_0$  ถึง  $t$  ( $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon_{as}(t)$  คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีนีส์ของคอนกรีตที่อายุ  $t$  ( $\times 10^{-6}$ )

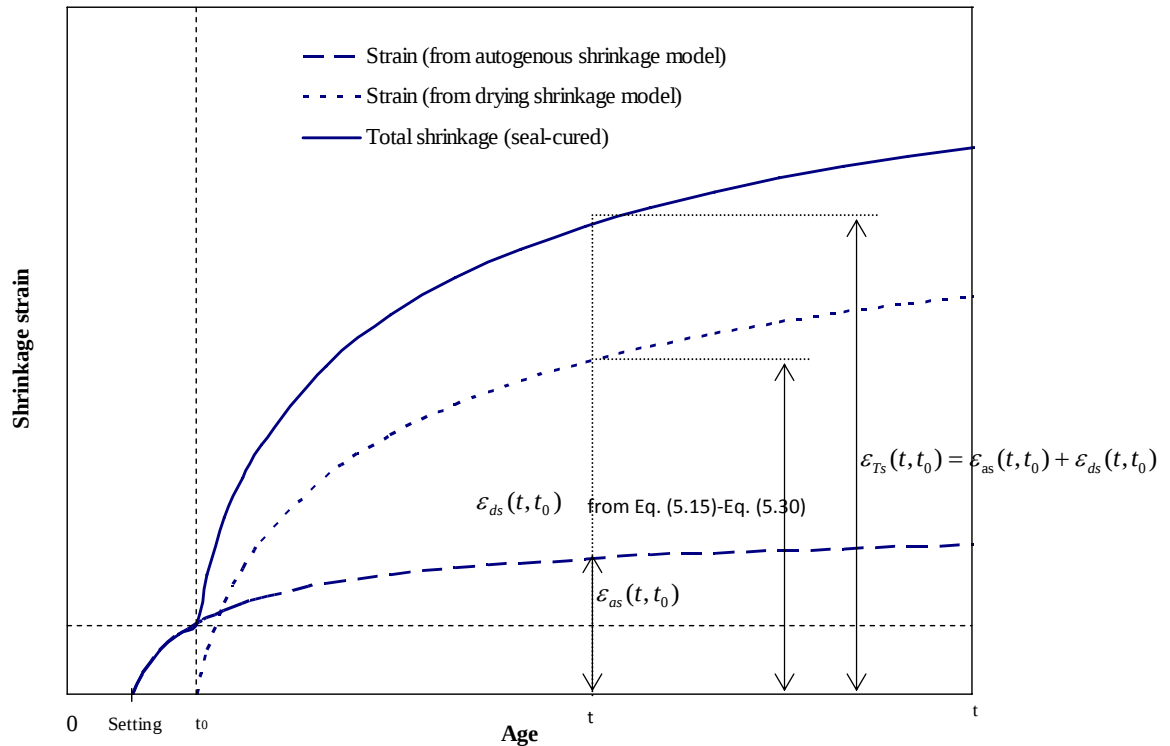
$\varepsilon_{as}(t_0)$  คือ ค่าการหดตัวแบบอโตจีนีส์ของคอนกรีตที่อายุ  $t_0$  ( $\times 10^{-6}$ )

$t$  คือ เวลาที่ต้องการหาค่าการหดตัว (วัน)

$t_0$  คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มเกิดการแห้ง, หรือระยะเวลาการบ่ม (วัน)



รูปที่ 5.1 ลักษณะการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำหรือกระสอบที่เปียกตลอดเวลา และมีระยะเวลาการบ่ม  $t_0$



รูปที่ 5.2 ลักษณะการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่บ่มด้วยพลาสติก และมีระยะเวลาการบ่ม  $t_0$

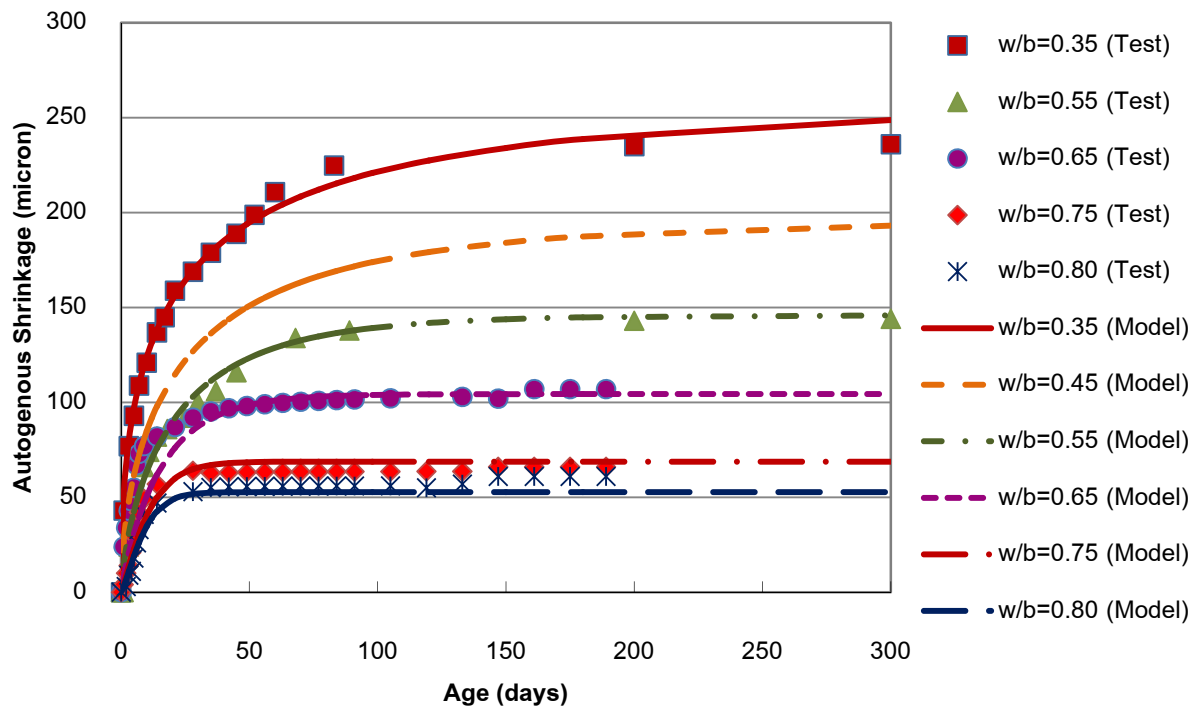
## 5.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต

### 5.6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการหดตัวแบบอโตจีเนสของคอนกรีต

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนี้ เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ผลการทดลองการหดตัวในประเทศไทยที่ใช้เปรียบเทียบมาจากการทดลองที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ร่วมกับผลการทดลองจาก Tongaroonsri, 2009 ดังรูปที่ 5.3 ถึงรูปที่ 5.11 โดยส่วนผสมที่ทดลองจากงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่จะมีค่า  $na = 0.667$  ในขณะที่ส่วนผสมที่ทดลองจาก Tongaroonsri, 2009 มีค่า  $na = 0.676$  ส่วนการเปรียบเทียบผลการทดลองการหดตัวจากต่างประเทศได้จากบทความวิชาการบางส่วนที่เกี่ยวข้อง ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.14 อนึ่งจากการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีเนสที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ พบว่าข้อมูลในบางช่วงมีค่าสูงผิดปกติ เนื่องจากในขณะดำเนินการทดลอง ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเกิดการขัดข้อง ทำให้อุณหภูมิของห้องมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อค่าการหดตัวที่ได้ ดังนั้นก่อนการเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจึงต้องมีการปรับแก้ผลที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้ด้วย

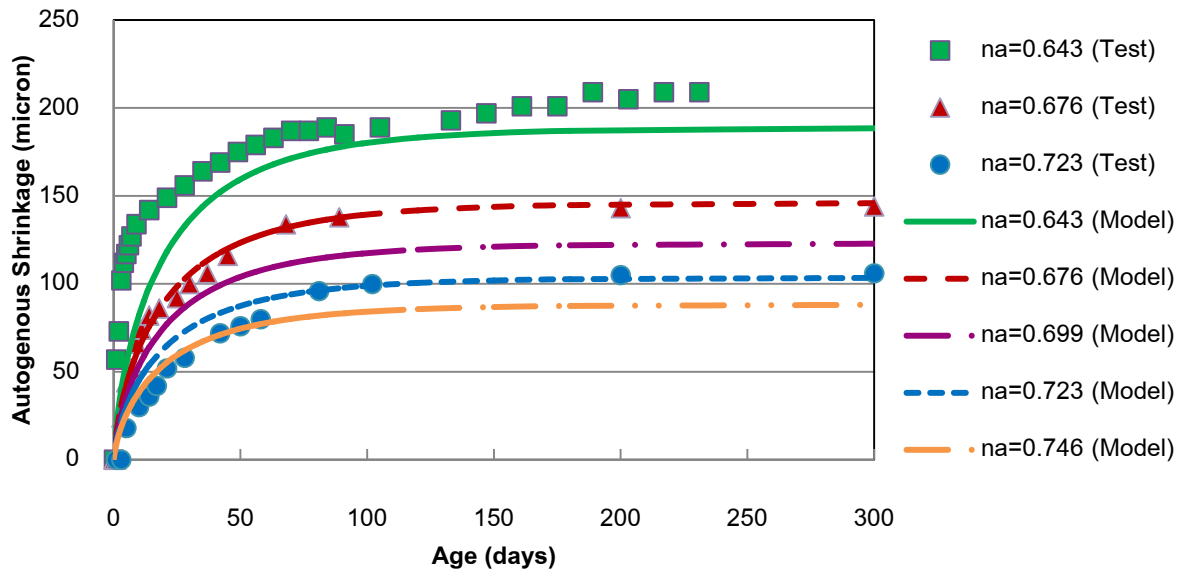
จากผลการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบอโตจีเนสที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการหดตัวแบบอโตจีเนสของคอนกรีตได้

เป็นอย่างดี โดยเฉพาะข้อมูลที่ทดลองในประเทศไทย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากต่างประเทศ พบว่าค่าจากแบบจำลองก็มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเช่นกัน



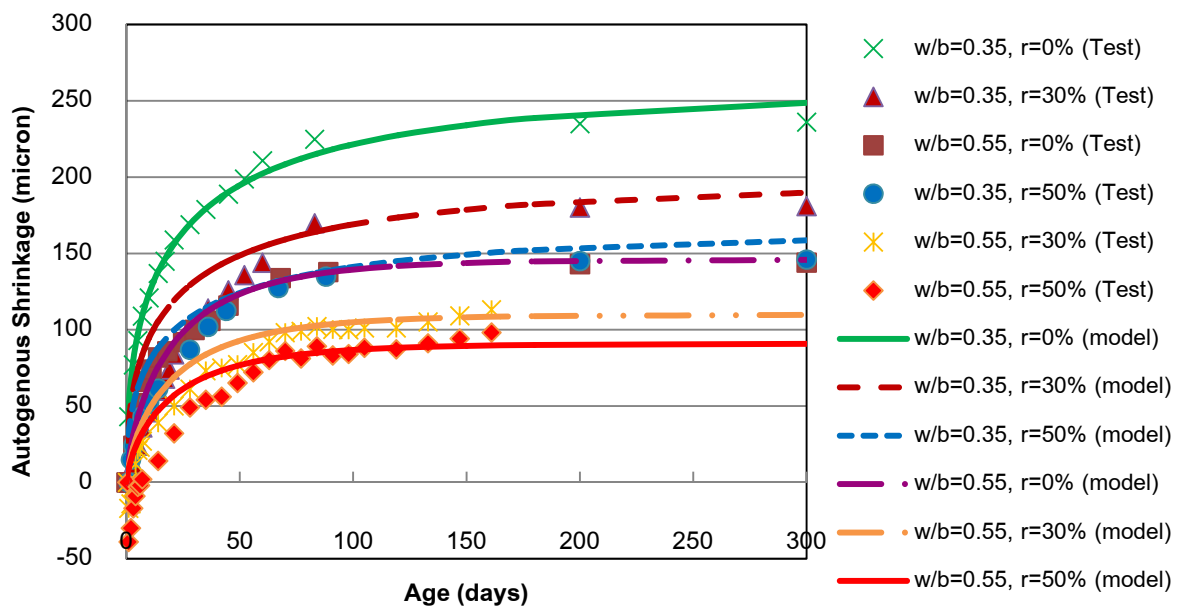
รูปที่ 5.3 การหาค่าแบบออโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) แตกต่างกัน

(ปัจจัยที่ใช้ : w/b = 0.35 – 0.80,  $n_a = 0.676$ , Temperature = 28°C)

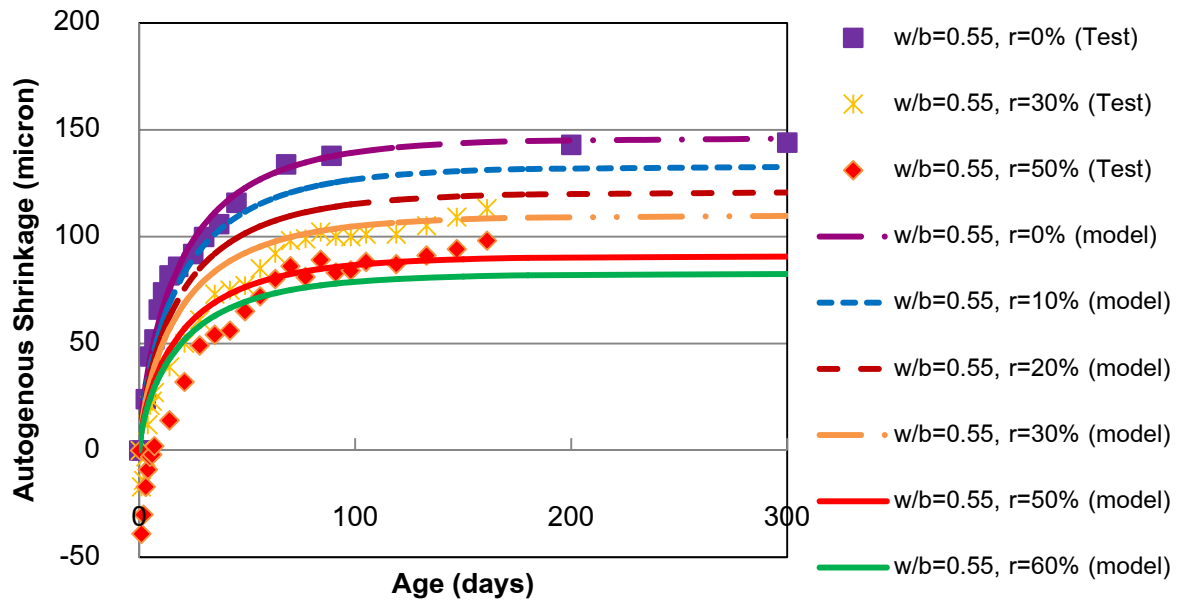


รูปที่ 5.4 การหัดตัวแบบอโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ( $n_a$ ) แตกต่างกัน

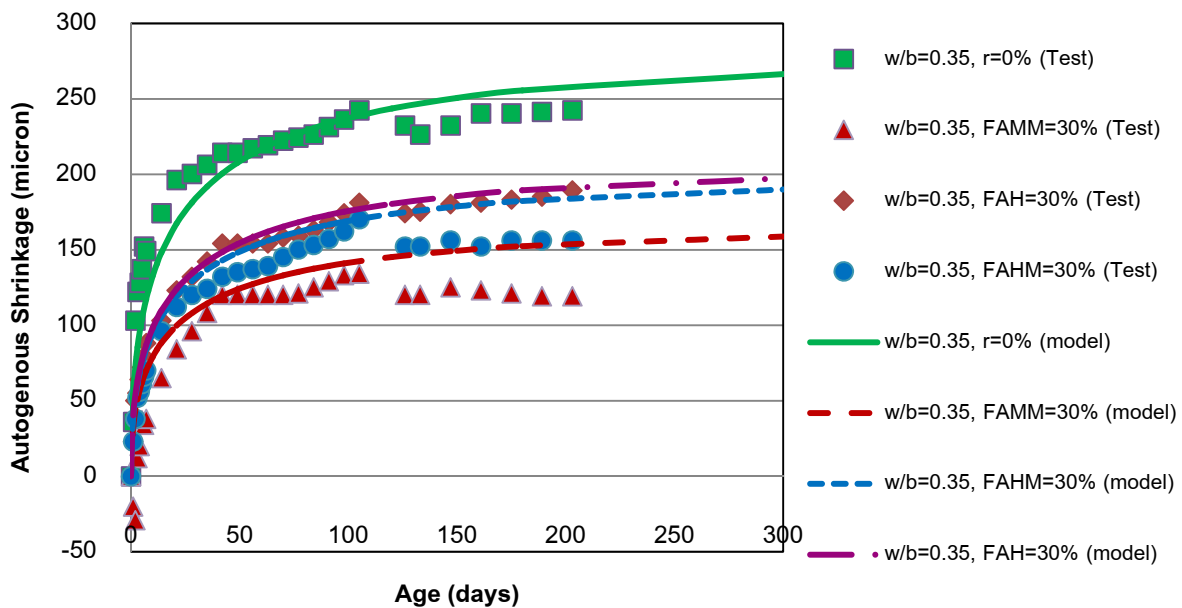
(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.643 - 0.746$ , Temperature =  $28^\circ\text{C}$ )



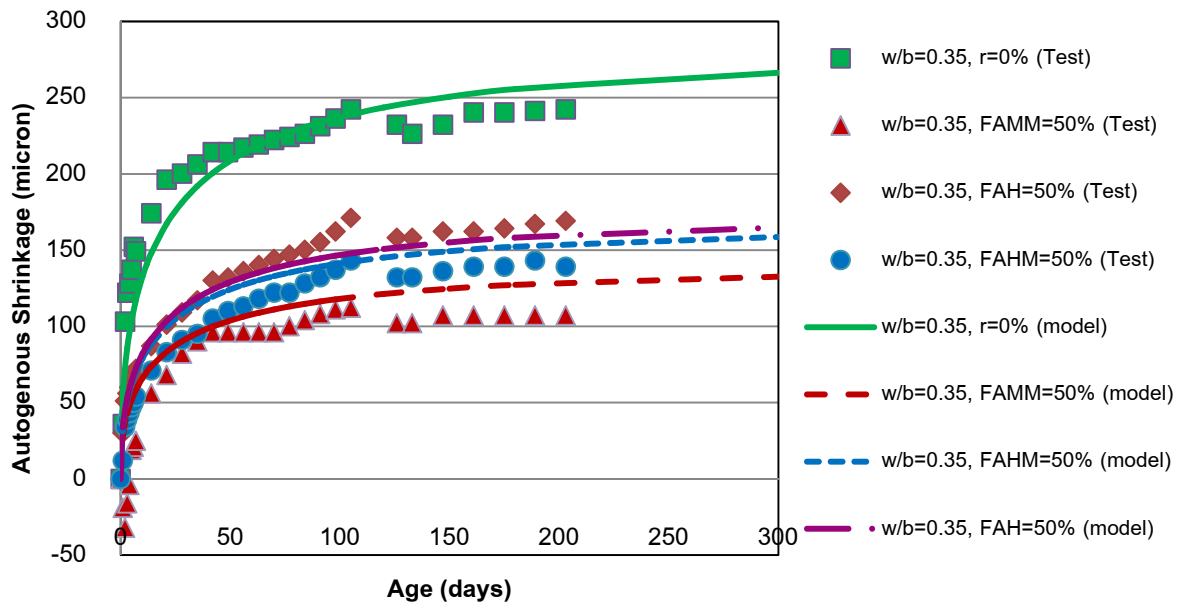
รูปที่ 5.5 การหัดตัวแบบอโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ถั่วลอยเป็นส่วนผสม (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.35$  และ  $0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0 - 0.5$ ,  $\%SO_3 = 3.03$ , Temperature =  $28^\circ\text{C}$ )



รูปที่ 5.6 การหัดตัวแบบออโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0 - 0.6$ ,  $\%SO_3 = 3.03$ , Temperature =  $28^\circ C$ )

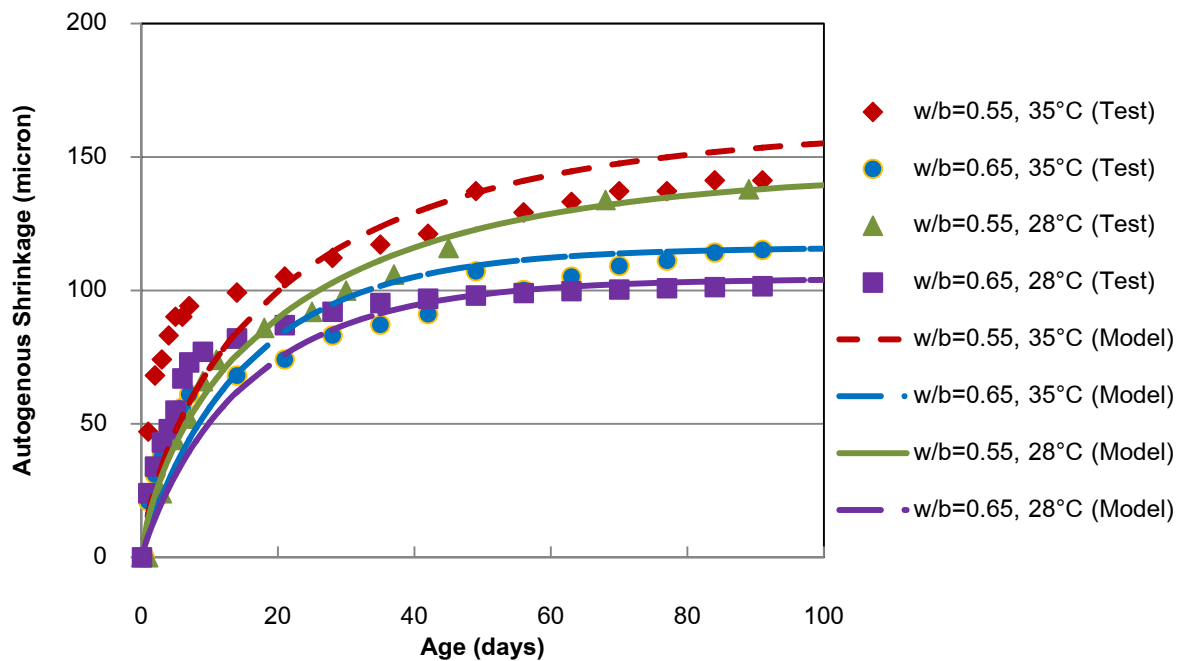


รูปที่ 5.7 การหัดตัวแบบออโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มี ปริมาณ  $\%SO_3$  แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.35$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0.3$ ,  $\%SO_3 = [3.03 \text{ (FAMM)}, 0.24 \text{ (FAHM)}, 0.18 \text{ (FAH)}]$ , Temperature =  $28^\circ C$ )



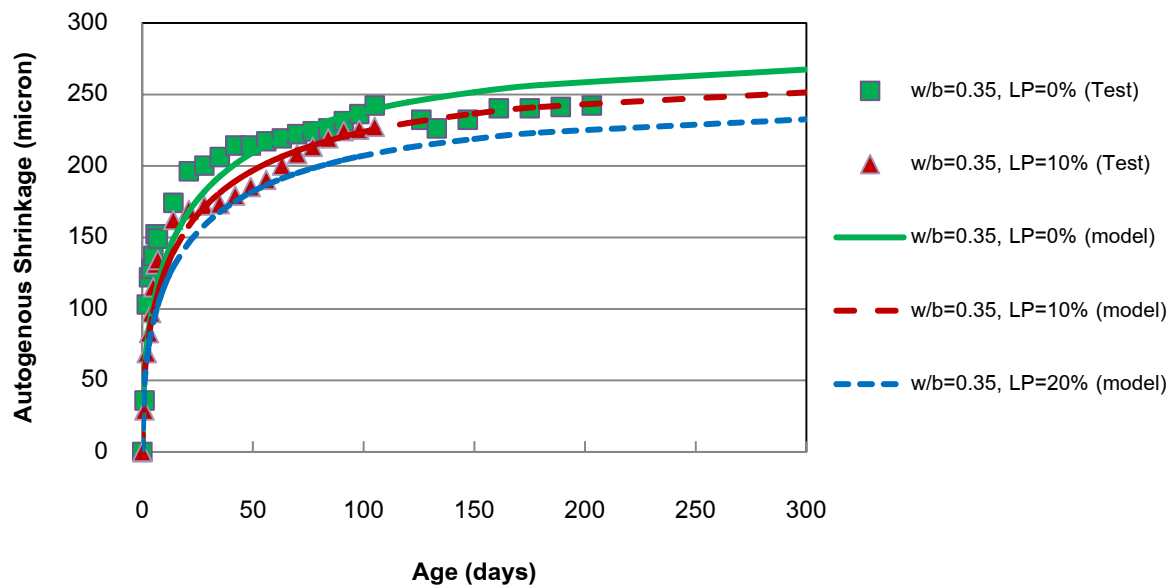
รูปที่ 5.8 การหดตัวแบบออโตจีเนสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.35$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0.5$ ,  $\text{SO}_3 = [3.03 \text{ (FMM)}, 0.24 \text{ (FAH)}, 0.18 \text{ (FAH)}]$ , Temperature =  $28^\circ\text{C}$ )



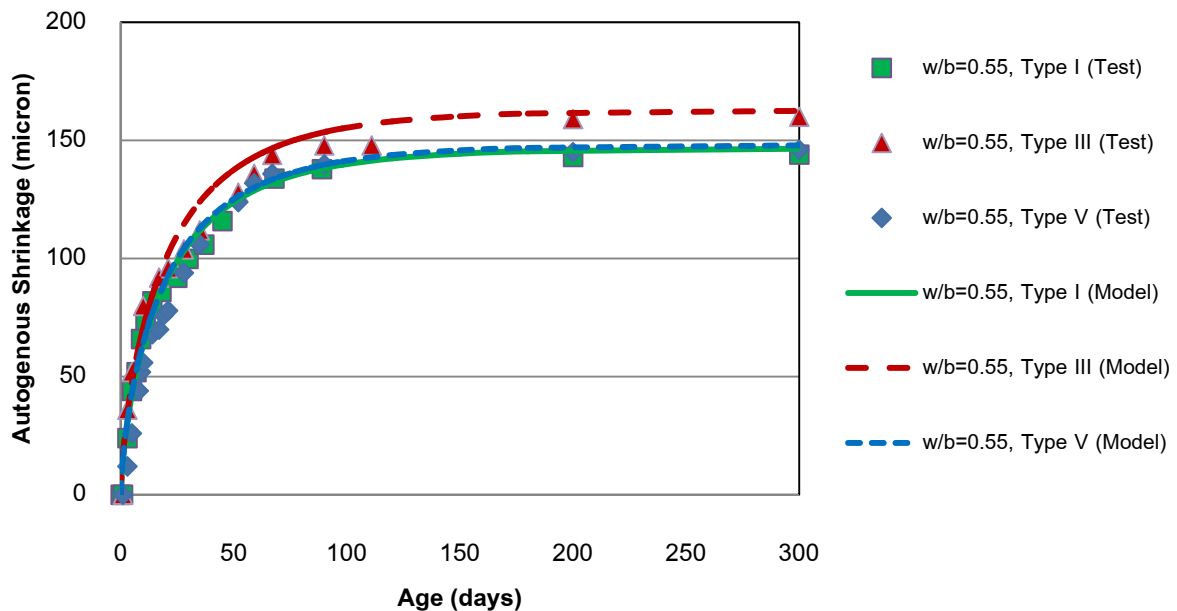
รูปที่ 5.9 การหดตัวแบบออโตจีเนสจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตในสภาวะที่มีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55, 0.65$ ,  $n_a = 0.667$ , Temperature =  $28^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}$ )

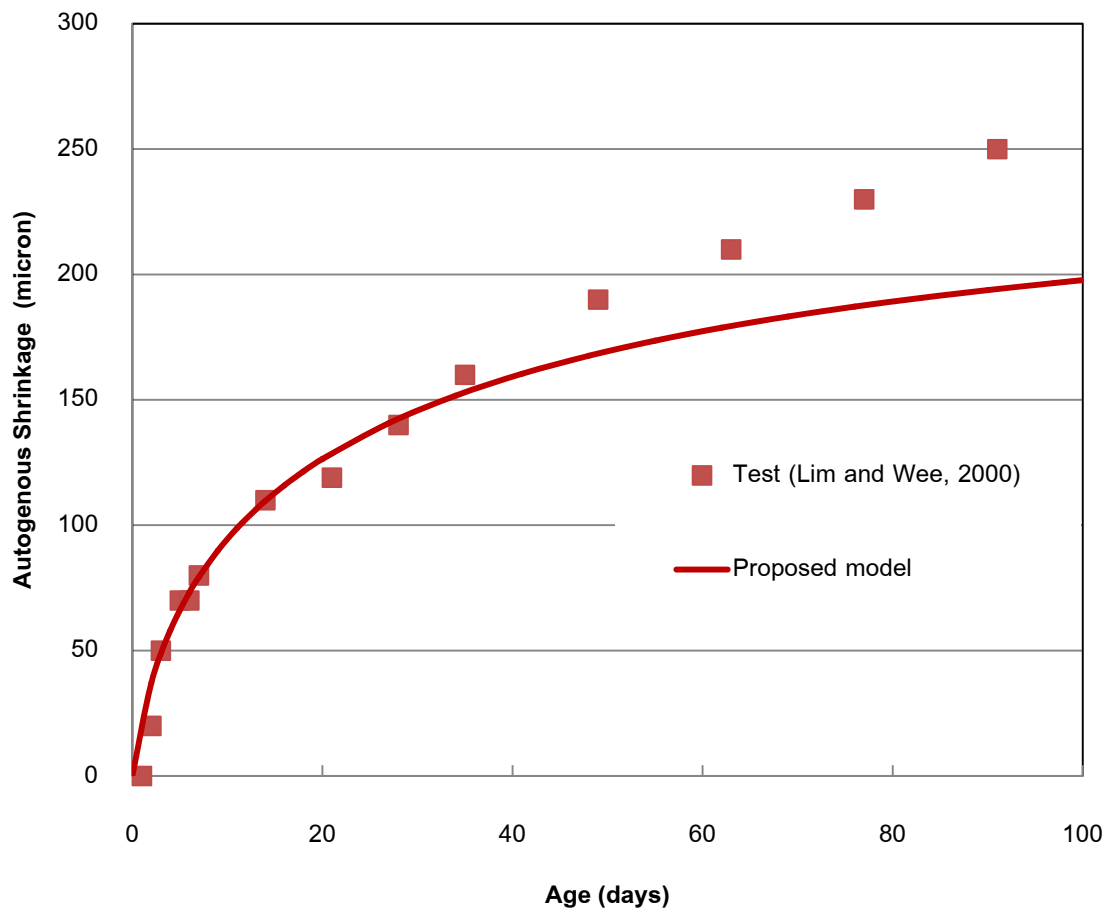


รูปที่ 5.10 การหาค่าแบบบอโตจีนิ์สจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนเป็นส่วนผสม

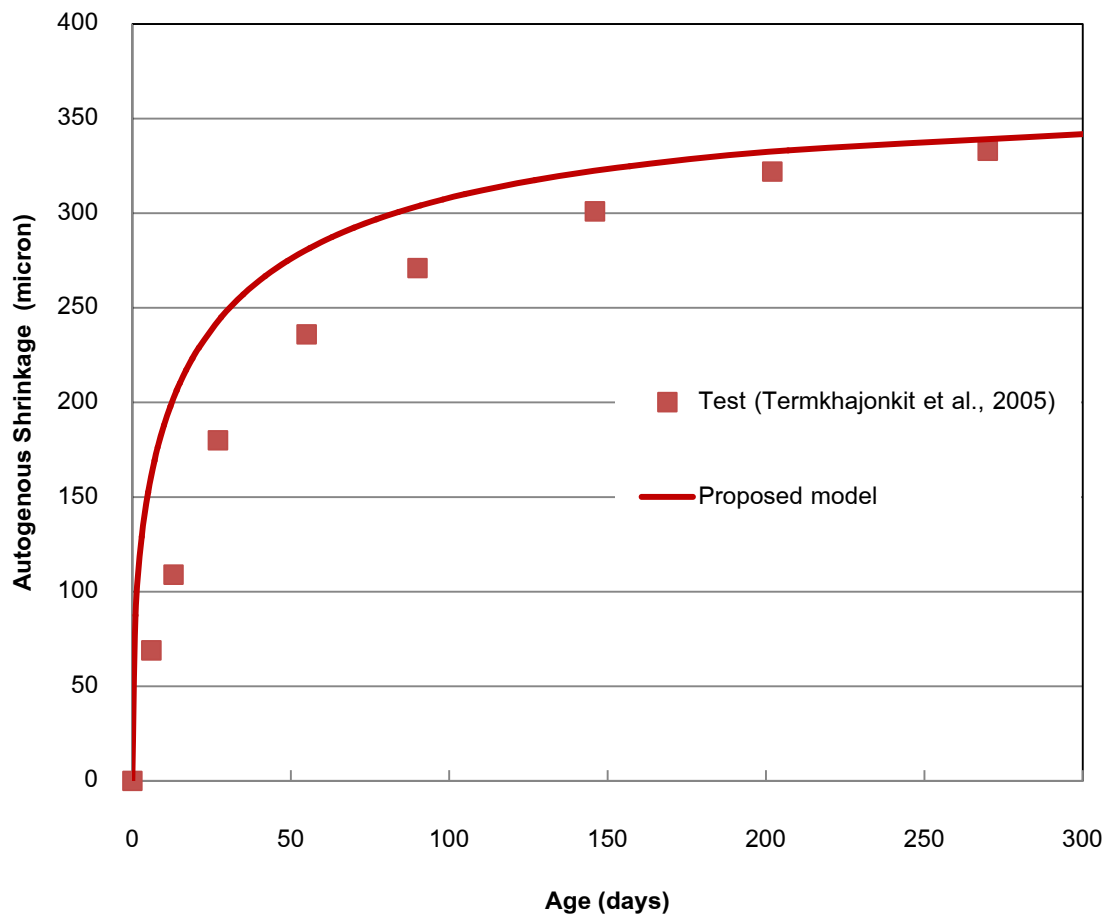
(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.35$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{LP} = 0 - 0.2$ , Temperature =  $28^{\circ}\text{C}$ )



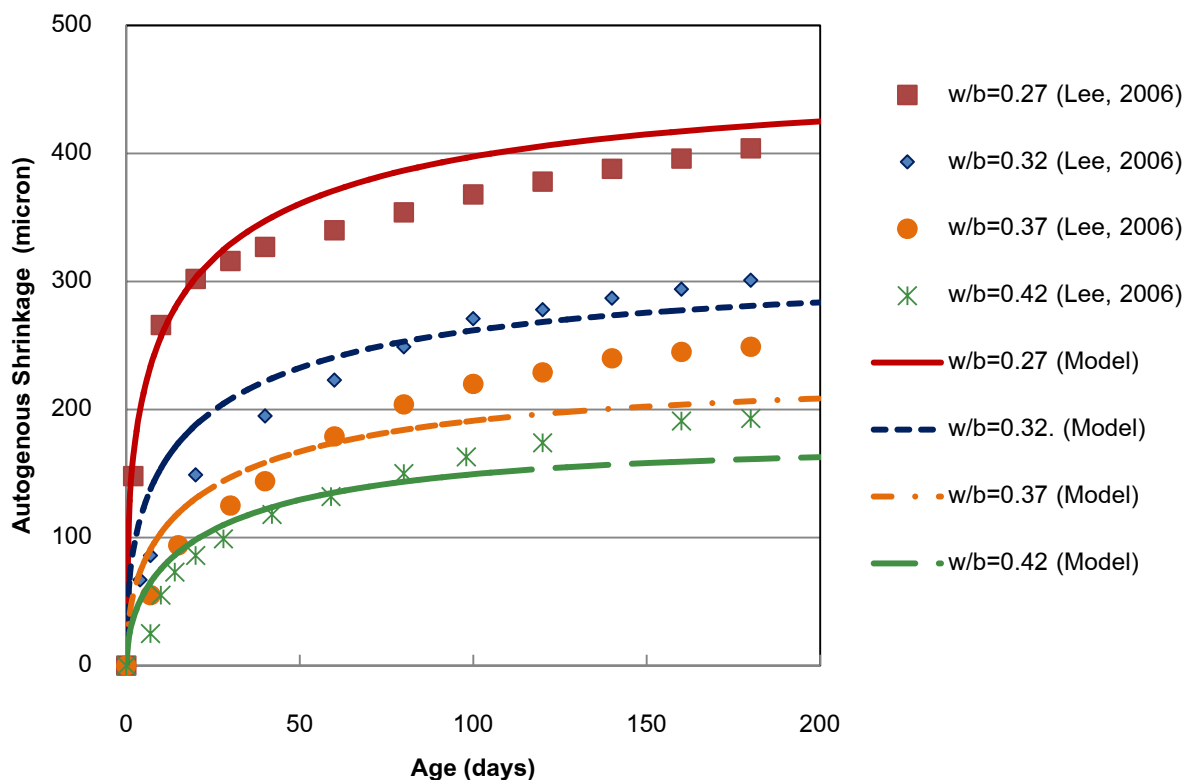
รูปที่ 5.11 การหาค่าแบบบอโตจีนิ์สจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตปูนซีเมนต์ต่างชนิด (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.676$ , cement type = [I, III, V], Temperature =  $28^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 5.12 การหดตัวแบบออโตจีเนียสจากแบบจำลองและผลการทดสอบจาก Lim and Wee, 2000  
 (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.30$ ,  $n_a = 0.671$ , Temperature =  $30^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 5.13 การหาค่าแบบอโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบจาก Termkhajonkit et al., 2000  
(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.30$ ,  $n_a = 0.649$ , Temperature =  $20^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 5.14 การหดตัวแบบบอโตจีนัสจากแบบจำลองและผลการทดสอบจาก Lee, 20006

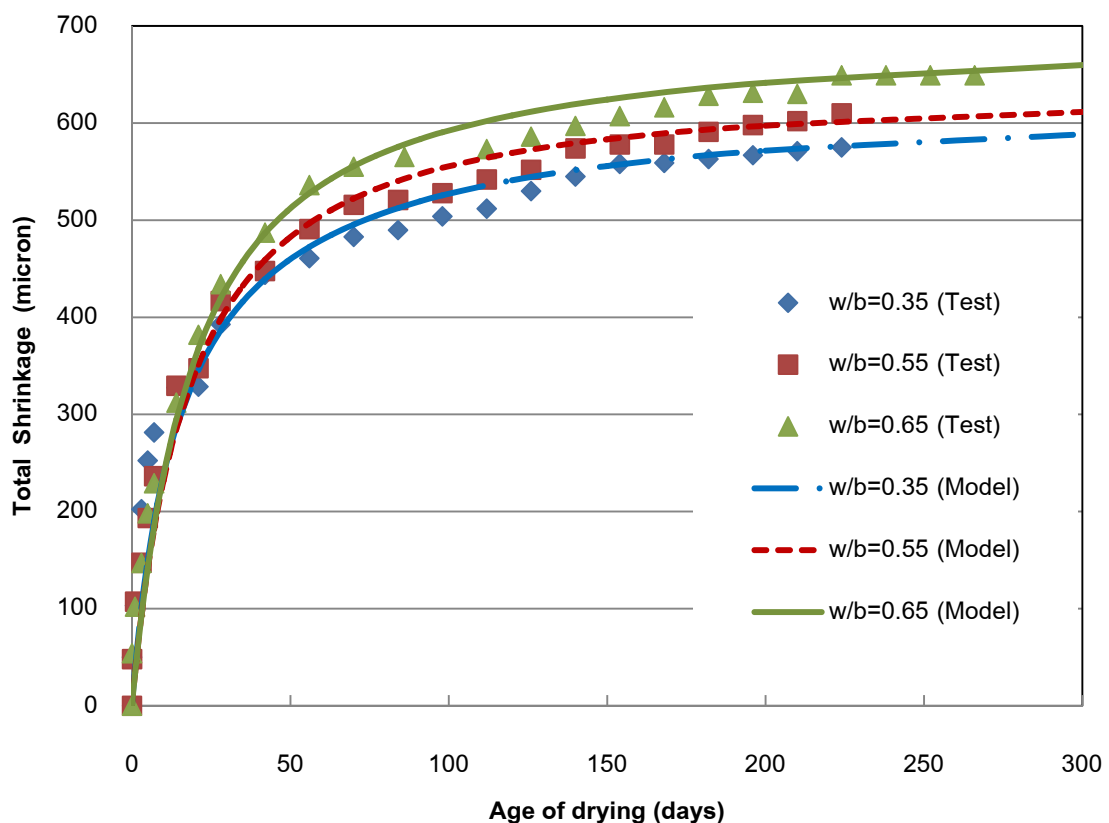
(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.27 - 0.42$ ,  $n_a = 0.616 - 0.688$ , Temperature =  $20^{\circ}\text{C}$ )

## 5.6.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตเป็นผลรวมของการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ในการคำนวณการหดตัวโดยรวมต้องคำนึงถึงวิธีการบ่มและระยะเวลาการบ่ม ซึ่งส่งผลต่อค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสในช่วงที่บ่มคอนกรีต ดังที่อธิบายในหัวข้อ 5.5 แล้ว ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการหดตัวแบบแห้งจะไม่นำเสนอในรายงานฉบับนี้ เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง แต่จะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการหดตัวโดยรวม ซึ่งรวมผลที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งไว้แล้ว การเปรียบเทียบในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ผลการทดลองการหดตัวในประเทศไทยที่ใช้เปรียบเทียบมาจากผลการทดลองที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ร่วมกับผลการทดลองจาก Tongaroonsri, 2009 ดังรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.25 โดยส่วนผสมที่ทดลองจากงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่จะมีค่า  $n_a = 0.667$  ในขณะที่ส่วนผสมที่ทดลองจาก Tongaroonsri, 2009 มีค่า  $n_a = 0.676$  ส่วนการเปรียบเทียบผลการทดลองการหดตัวจากต่างประเทศได้จากบทความวิชาการบางส่วนที่เกี่ยวข้อง ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.26 ถึงรูปที่ 5.28 ซึ่งผลการหดตัวที่แสดงในรูปเป็นการพล็อตเทียบกับระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับอากาศ ปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณหากไม่มีการกำหนดได้ภาพแสดงว่าใช้ค่าดังนี้ ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ Type I, ขนาดโตสุดของมวลรวม (MAS) = 19 mm, อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศ (V/S) = 16.57 mm, อุณหภูมิ 28°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และบ่มน้ำ 7 วัน

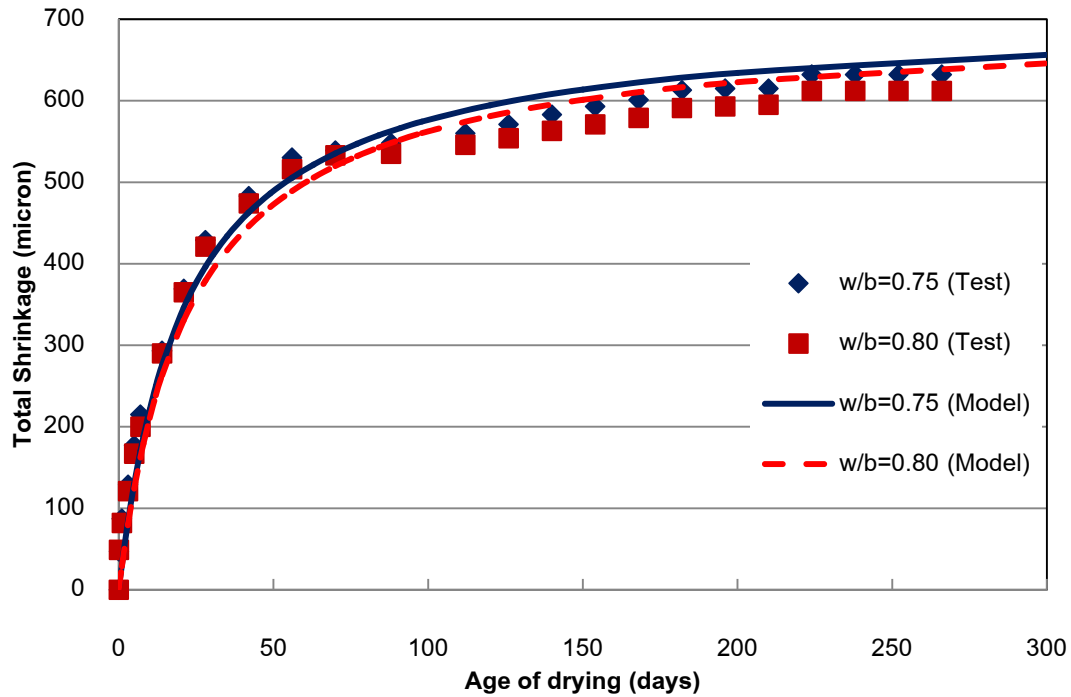
จากผลการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทำนายการหดตัวที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการหดตัวของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะข้อมูลที่ทดลองในประเทศไทย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากต่างประเทศ พบว่าค่าจากแบบจำลองก็มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเช่นกัน



รูปที่ 5.15 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

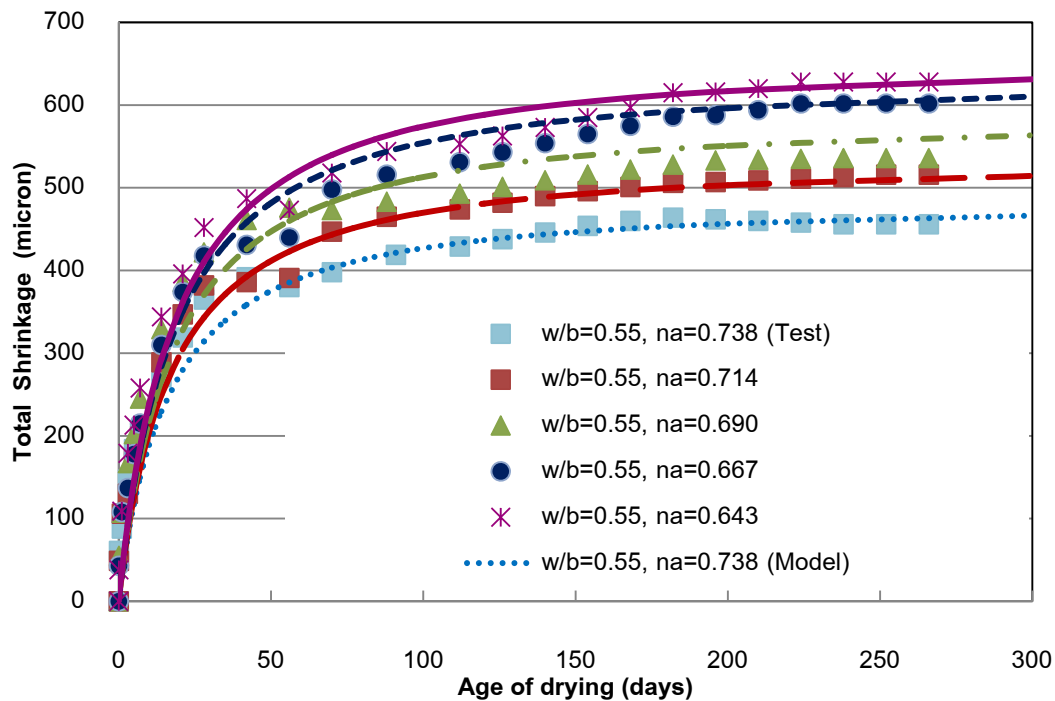
ประสาน (w/b) 0.35 – 0.65

(ปัจจัยที่ใช้ : w/b = 0.35 – 0.65,  $n_a = 0.667$ , Temperature = 28°C)



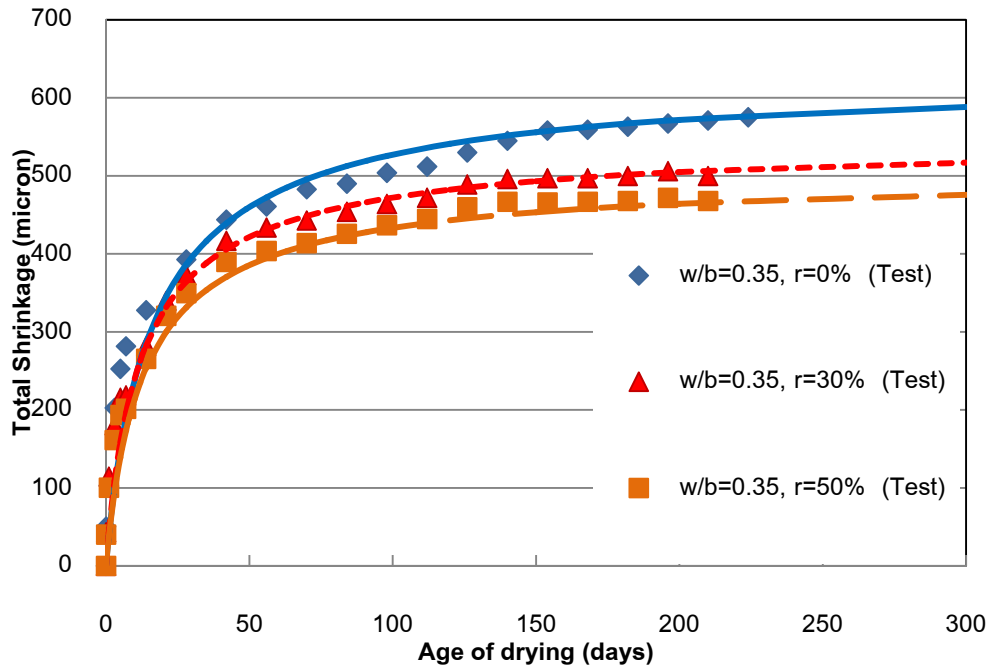
รูปที่ 5.16 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ  
ประสาน (w/b) 0.75 – 0.80

(ปัจจัยที่ใช้ : w/b = 0.75 – 0.80,  $n_a = 0.667$ , Temperature = 28°C)



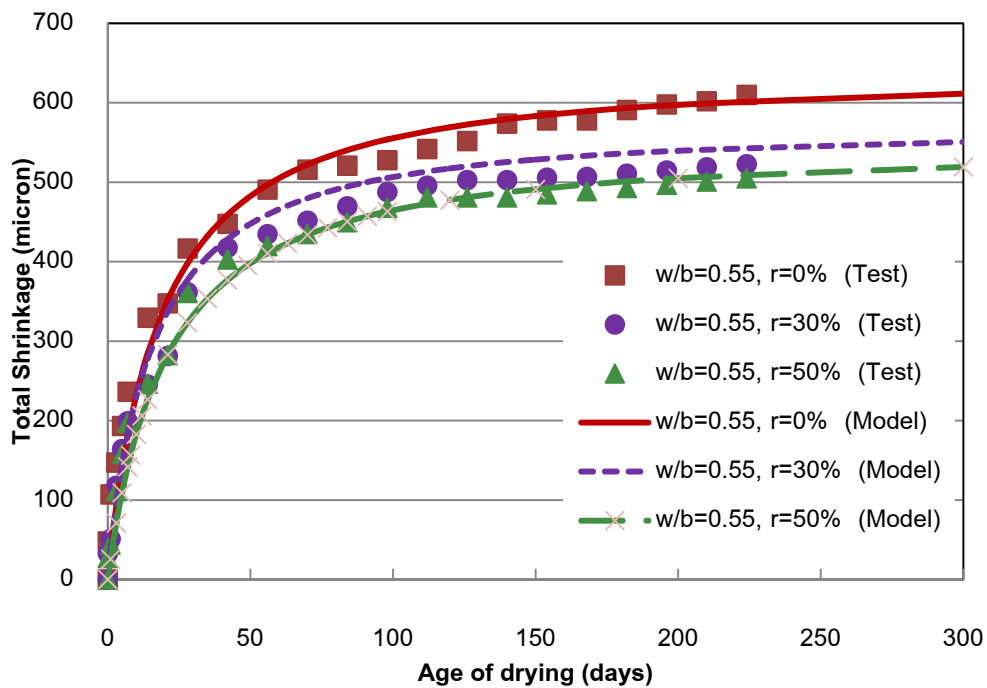
รูปที่ 5.17 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมโดย  
ปริมาตรในส่วนผสม ( $n_a$ ) แตกต่างกัน

(ปัจจัยที่ใช้ : w/b = 0.55,  $n_a = 0.643 - 0.738$ , Temperature = 28°C)



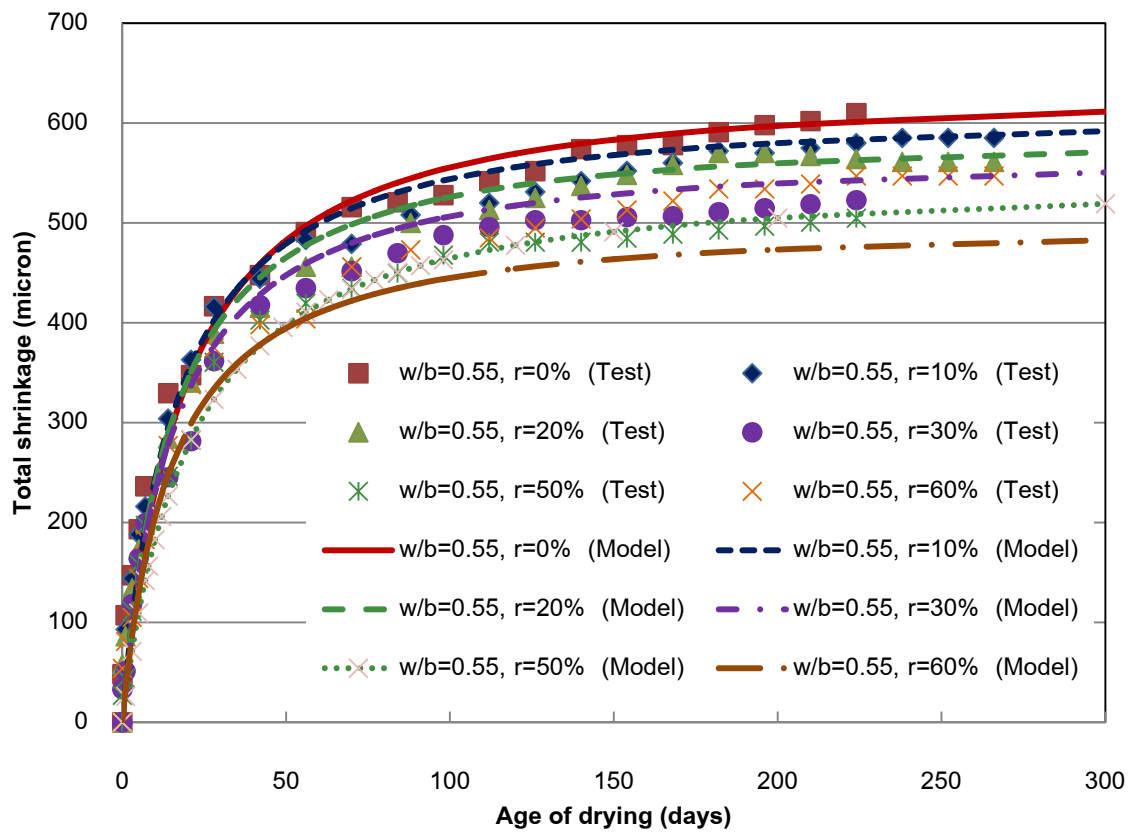
รูปที่ 5.18 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม  
( $w/b=0.35$ )

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.35$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0 - 0.5$ ,  $\%SO_3 = 3.03$ , Temperature =  $28^\circ C$ )



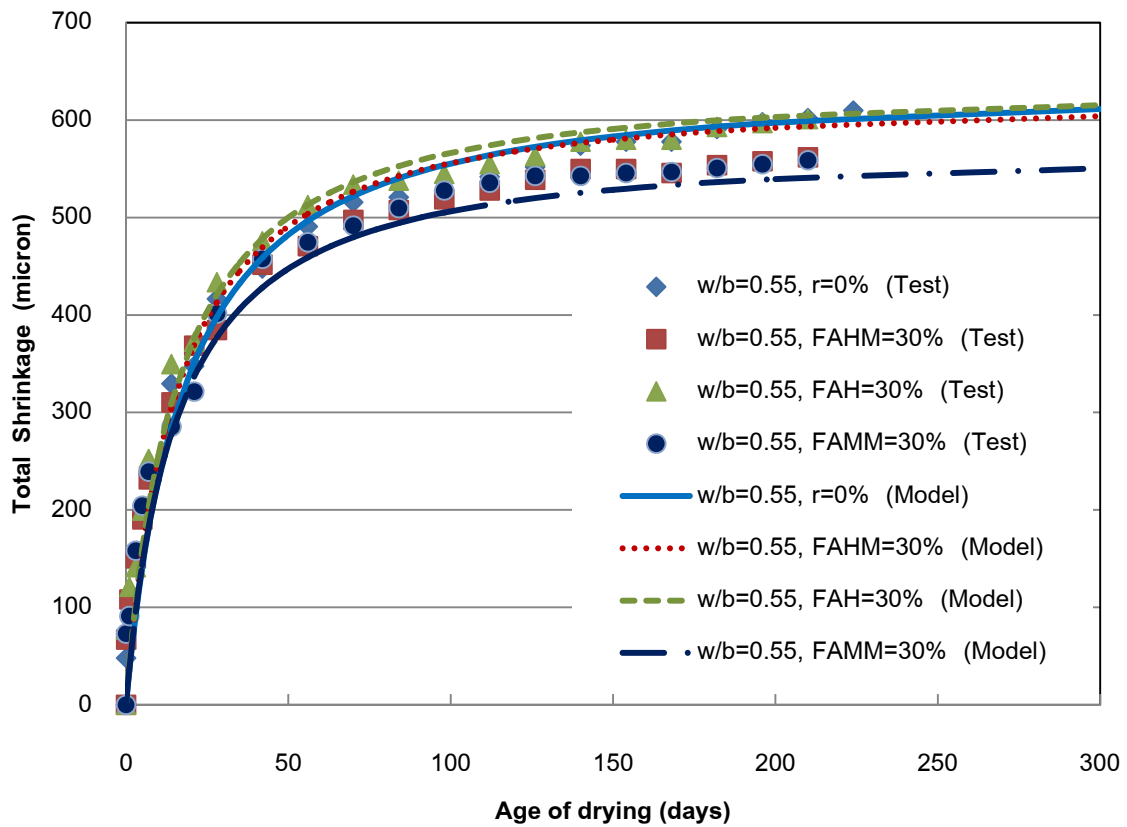
รูปที่ 5.19 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม  
( $w/b=0.55$ )

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0 - 0.5$ ,  $\%SO_3 = 3.03$ , Temperature =  $28^\circ C$ )

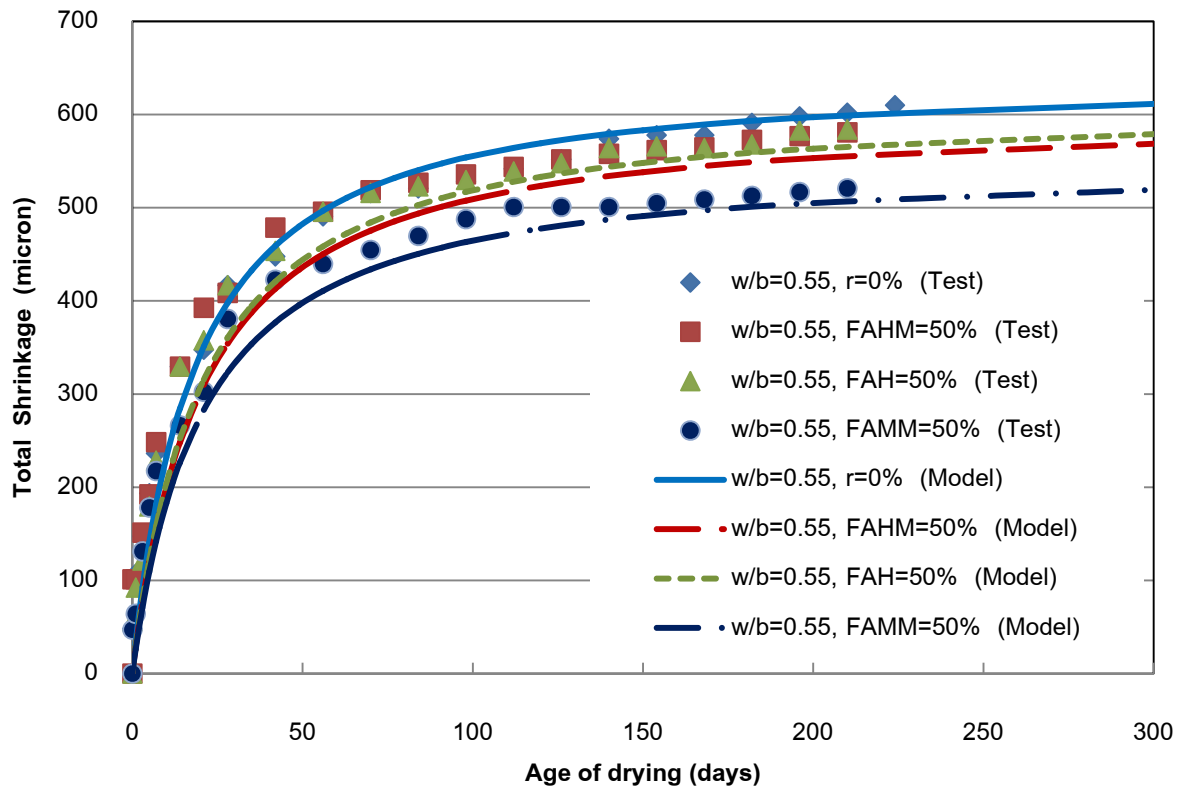


รูปที่ 5.20 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้แกล้อยเป็นส่วนผสม ( $w/b=0.55$ )

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0 - 0.6$ ,  $\%SO_3 = 3.03$ , Temperature =  $28^\circ C$ )



รูปที่ 5.21 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มี  
 ปริมาณ  $\text{SO}_3$  แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30  
 (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0.3$ ,  $\text{SO}_3 = [3.03 \text{ (FAMM)}, 0.24 \text{ (FAHM)}, 0.18 \text{ (FAH)}]$ ,  
 Temperature =  $28^\circ\text{C}$ )

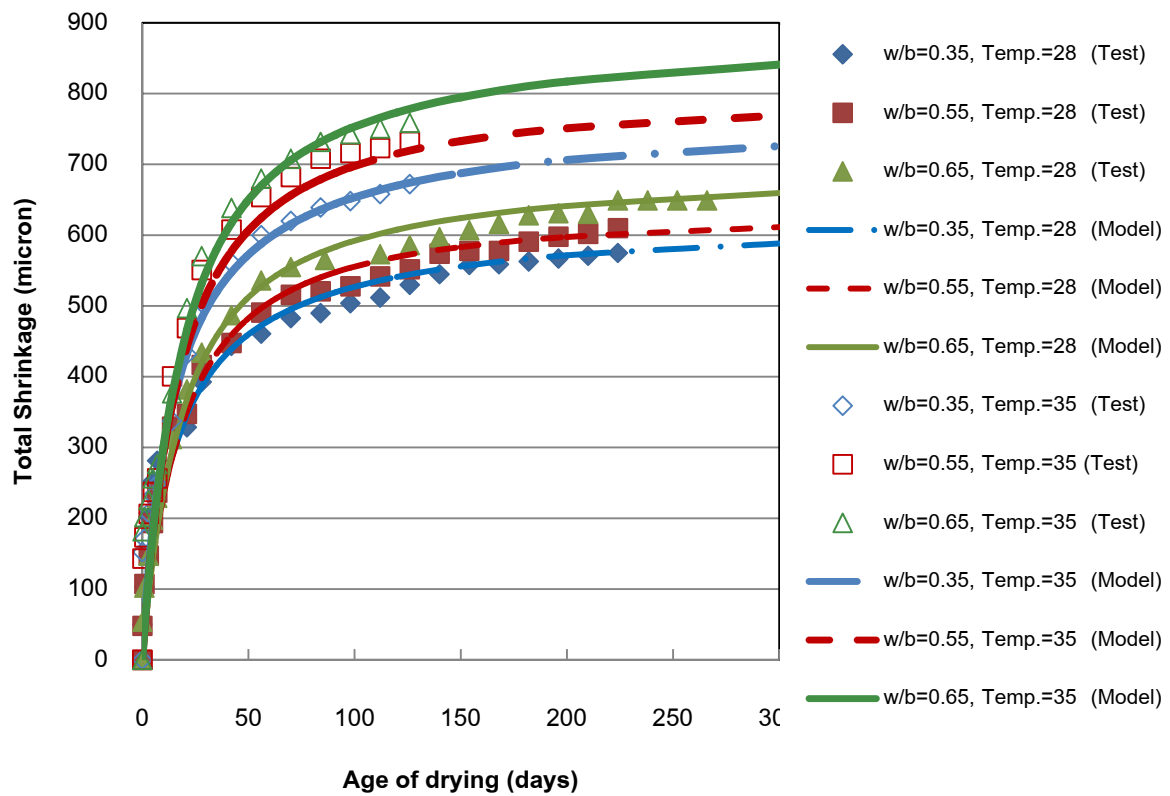


รูปที่ 5.22 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มี

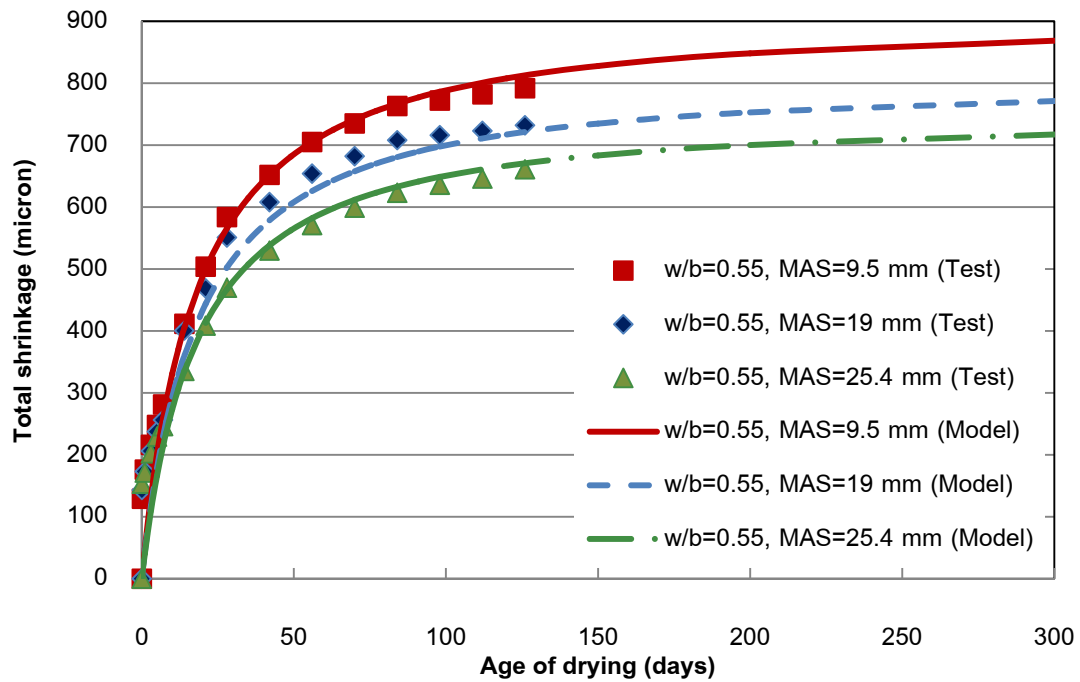
ปริมาณ  $\%SO_3$  แตกต่างกัน ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{fa} = 0.5$ ,  $\%SO_3 = [3.03 \text{ (FAMM)}, 0.24 \text{ (FAHM)}, 0.18 \text{ (FAH)}]$ ,

Temperature =  $28^\circ\text{C}$ )

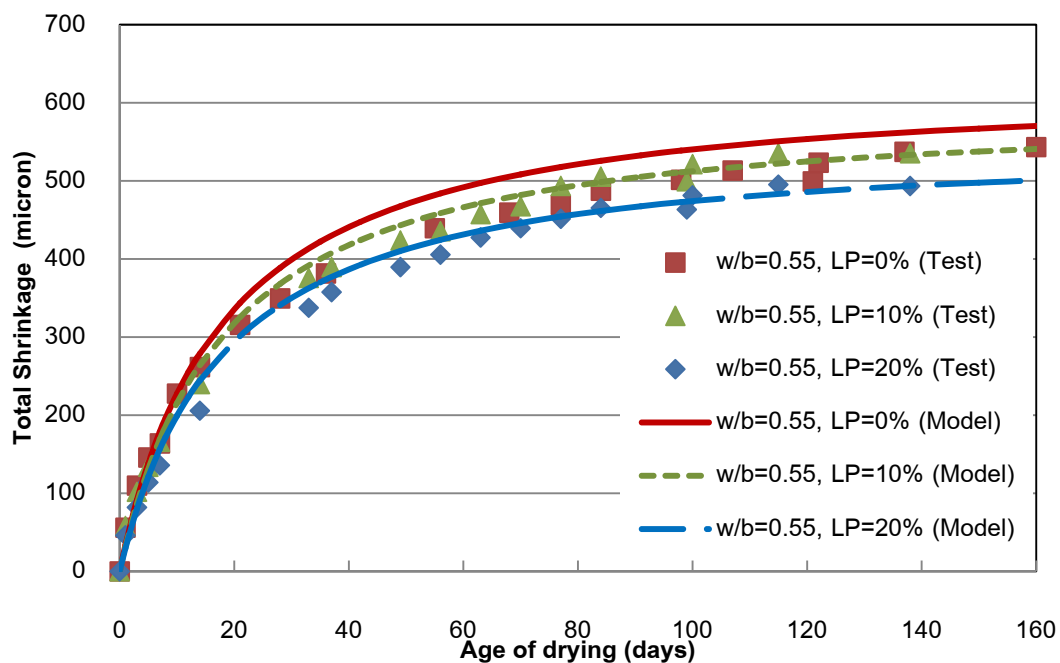


รูปที่ 5.23 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตในสภาวะที่มีอุณหภูมิ  
 สิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน  
 (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.35, 0.55, 0.65$ ,  $n_a = 0.667$ , Temperature =  $28^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 5.24 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ขนาดโตสุดของมวลรวม (MAS) แตกต่างกัน

(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ , Temperature =  $35^{\circ}\text{C}$ )

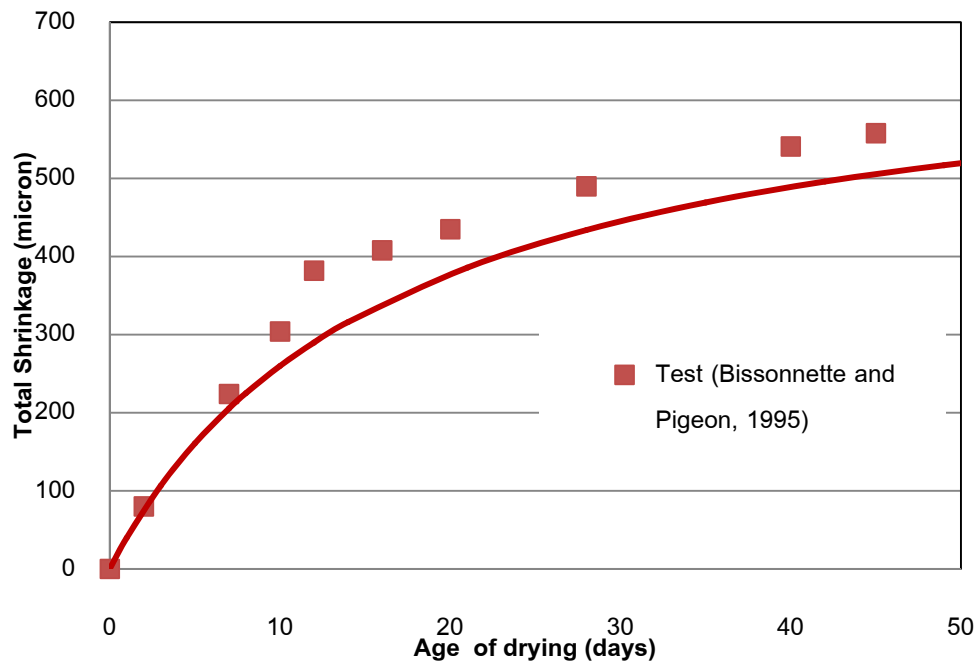


รูปที่ 5.25 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนเป็นส่วนผสม

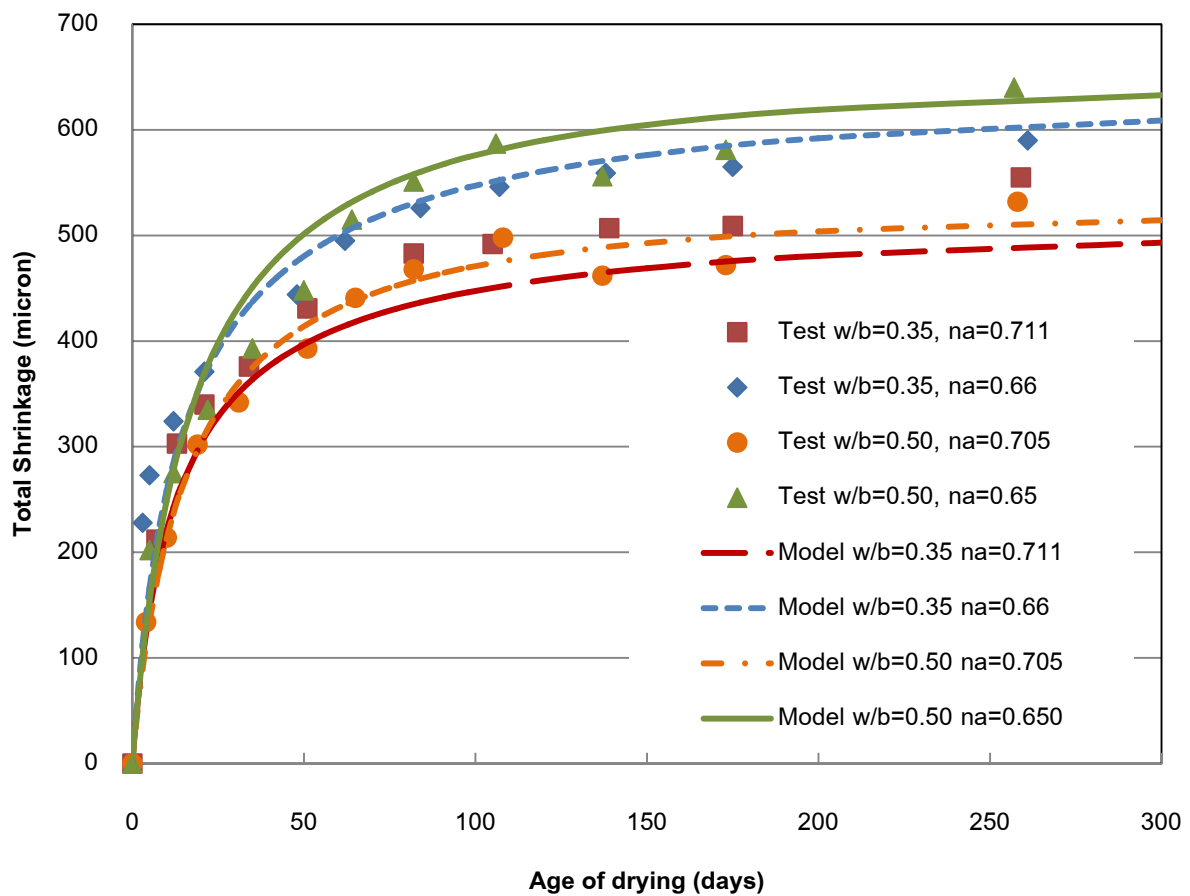
(ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.667$ ,  $r_{LP} = 0 - 0.2$ , Temperature =  $28^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 5.26 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Al-Saleh and Al-Zaid, 2006  
 (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.51$ ,  $n_a = 0.685$ ,  $MAS = 10$  mm,  $V/S = 11.54$  mm, Temperature =  $28^{\circ}\text{C}$ ,  
 $RH = 48\%$ , water cured = 7 days)



รูปที่ 5.27 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Bissonnette and Pigeon, 1995  
 (ปัจจัยที่ใช้ :  $w/b = 0.55$ ,  $n_a = 0.650$ ,  $MAS = 10$  mm,  $V/S = 11.76$  mm, Temperature =  $23^{\circ}\text{C}$ ,  
 $RH = 50\%$ , water cured = 7 days)



รูปที่ 5.28 การหดตัวโดยรวมจากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Bissonnette et al., 1999  
 (ปัจจัยที่ใช้ : w/b = 0.35, 0.50, MAS = 10 mm, V/S = 11.76 mm, Temperature = 23°C,  
 RH = 48%, water cured = 7 days)

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนมากพบว่าส่วนหนึ่ง เกิดจากการหดตัวของคอนกรีต เพื่อแก้ไขปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวนี้ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างที่คำนึงถึงการหดตัวของคอนกรีต ดังนั้นการทราบค่าการหดตัวของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ค่าการหดตัวนอกจากจะใช้ในการคำนวณระยะห่างของรอยต่อในโครงสร้าง เพื่อควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวที่เกิดขึ้น ยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถประเมินโอกาสเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวในคอนกรีตได้ แม้ว่าปัจจุบันมีแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตจากต่างประเทศจำนวนมาก แต่จากผลการวิจัยนี้พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองของต่างประเทศกับผลการทดลองการหดตัวในประเทศไทย พบว่าแบบจำลองของต่างประเทศมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง เมื่อนำมาใช้กับวัสดุและสภาพแวดล้อมในประเทศไทย ส่วนแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้หลักการ Water to Binder Ratio Base ในการสร้างแบบจำลองโดยคำนวณการหดตัวแบบอโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตแยกกัน แล้วจึงนำมารวมกันเป็นการหดตัวโดยรวม สามารถคำนวณการหดตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองในประเทศ และมีความถูกต้องมากกว่าการใช้แบบจำลองจากต่างประเทศ ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้คำนวณการหดตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงหินปูนได้ จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยและผงหินปูนช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต โดยการหดตัวลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงตามปริมาณ  $SO_3$  ในเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เถ้าลอยช่วยลดการหดตัวในคอนกรีตได้ดีกว่าการใช้ผงหินปูน อย่างไรก็ตามจากการรวบรวมเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ผงหินปูนช่วยลดการแตกร้าวของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี แนวทางการออกแบบส่วนผสมที่มีการหดตัวต่ำสามารถทำได้โดยการออกแบบส่วนผสมให้มีปริมาณเพสต์ต่ำ ซึ่งจะทำให้มีปริมาณมวลรวมสูง ใช้หินที่มีขนาดใหญ่ การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการหดตัวต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ควรเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเป็นส่วนผสม ในขั้นตอนการก่อสร้างเพื่อลดปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวควรเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่มีการหดตัวและอัตราการหดตัวต่ำ การเทคอนกรีตในช่วงเวลาที่อุณหภูมิต่ำจะมีการหดตัวต่ำกว่าการเทในช่วงที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศหลังจากเทคอนกรีตเสร็จ บ่มคอนกรีตด้วยน้ำจะมีประสิทธิภาพในการลดการหดตัวได้ดีที่สุด รองลงมาคือ การบ่มด้วยวัสดุที่เปียกน้ำ และบ่มด้วยพลาสติก ตามลำดับ สุดท้ายคือการออกแบบระยะห่างรอยต่อของคอนกรีตและปริมาณของ

เหล็กเสริมให้สอดคล้องกับการหดตัวของคอนกรีตในส่วนผสมที่เลือกใช้ งานวิจัยนี้ได้จัดทำร่างมาตรฐานการคำนวณค่าการหดตัวของคอนกรีต เพื่อใช้ประกอบในการออกแบบโดยคำนึงถึงการหดตัวในโครงสร้างคอนกรีตในประเทศไทยต่อไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1) แบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นใช้ข้อมูลการหดตัวในประเทศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการใช้ปัจจัยในการคำนวณที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทย จะมีความถูกต้องมากกว่าการคำนวณการหดตัวจากสภาพแวดล้อมของต่างประเทศที่มีปัจจัยแตกต่างกัน

2) จากข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการวิจัยและเงื่อนไขของเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ รวมถึงข้อมูลผลการทดลองการหดตัวของคอนกรีตในประเทศไทยที่มีจำกัด ทำให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใช้ผลการทดลองจากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ  $28^{\circ}\text{C}$  และ  $35^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และ 75 เท่านั้น หากต้องการให้แบบจำลองมีความถูกต้องในขอบเขตที่กว้างมากยิ่งขึ้น ควรมีการปรับปรุงในอนาคตโดยการนำผลการทดลองการหดตัวในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากนี้มาพัฒนาแบบจำลอง เช่น สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  และ  $45^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 35 และ 90

3) ควรมีการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถคำนวณการหดตัวของส่วนผสมที่ใช้วัสดุประสานร่วมสามชนิดได้ เช่นการใช้ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนร่วมกัน เนื่องจากแนวโน้มการใช้วัสดุร่วมสามชนิดจะมีมากขึ้นในอนาคต

4) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้จากการนำผลการทดสอบการหดตัวอย่างอิสระของตัวอย่าง ซึ่งมีขนาดเล็ก มาใช้สร้างสมการ ซึ่งถือว่าการหดตัวเกิดขึ้นเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด และไม่มีผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันภายในคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมถึงการหดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Shrinkage) มาเกี่ยวข้อง ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงเหมาะสำหรับคำนวณค่าการหดตัวแบบอิสระของคอนกรีตในโครงสร้างชนิดบาง (Thin Member) เช่น ถนน กำแพง ผนัง หรือพื้น

5) ควรศึกษาผลของสารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ ต่อการหดตัวของคอนกรีต แล้วนำผลที่ได้มาพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้สารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ ได้

6) ควรศึกษาผลของวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ เช่น ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม เป็นต้น

7) ควรศึกษาการหดตัวสำหรับโครงสร้างแบบหนา ซึ่งมีการหดตัวที่ผิวแตกต่างจากการหดตัวภายใน และจะทำให้เกิดการยึดรั้งการหดตัวด้วยตัวเอง (Self-restrained shrinkage) ขึ้นในโครงสร้าง

## บรรณานุกรม

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ      วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์,  
“ความคงทนของคอนกรีต”, สำนักพิมพ์ จุฑาทอง, 2543

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ  
คอนกรีต. (1).

สุพัฒน์ชัย ใจช่วย, สรรณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี, วรางคณา แสงสร้อย และสมนึก  
ตั้งเต็มสิริกุล, (2555) “การหดตัวแบบบอโตจีนิสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจาก  
แหล่งต่างๆ ในประเทศไทย” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, 9-11 พฤษภาคม  
2555, อุตรธานี

ACI Committee 209, Prediction of creep, shrinkage, and temperature effect in concrete  
structures (ACI 209R-92)., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1992.

Altoubat, S.A., and Lange, D.A., 2001. Creep, shrinkage, and cracking of restrained  
concrete at early age. *ACI Material Journal* 98 (4): 323-331.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 33.(2003). Standard Specification  
for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 128.( 2004). Standard Test  
Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.  
Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 127. (2004). Standard Test  
Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.  
Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 136. (2004). Standard Test  
Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 188. (1995). Standard Test  
Method for Density of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 778. (2000). Standard  
Specification for Standard Sand. Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 490. (2004). Standard Practice for  
Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar,  
and Concrete. Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 494. (2004). Standard  
Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standard.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 157. (2004). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Annual Book of ASTM Standard.

Al-Salen, S. A. and Al-Zaid, R.Z. 2006. Effect of drying condition, admixtures and specimen size on shrinkage strains, *Cement and Concrete Research*, 36, 1985-1991.

Asamoto, S., Ishida, T. and Maekawa, K. 2008. Investigations into volumetric stability of aggregate and shrinkage of concrete as a composite, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6, 1, 77-90.

Barcelo, L., Moranville, M. and Clavaud, B. (2005). Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 177-183.

Bazant, Z.P., and Murphy, W.P., 1995. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – model B3. *ACI Materials and Structures* 28: 357-365.

Bentz, D. P. and Jensen, O. M. (2004). Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 677-685.

Bentz, D. P., Sato, T., Varga, I.D.L. and Jason Weiss, W. (2012). Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 11-17.

Bissonnette, B., Pierre, P., and Pigeon, M. 1999. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 29, 1655-1662.

CEB-FIP, Model code for concrete structures MC90. Bulletin d'Information No.199, Comite Euro-International du Beton, Thomas Telford, 1991, London.

Chanmeka, A., 1999. Autogenous Shrinkage Modelling of Cement Paste with Fly Ash. Master Thesis., AIT, Bangkok, Thailand.

Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V. 2004. Influence of fly ash finess on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34, 1087-1092.

Eguchi, K., and Teranishi, K., 2005. Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model. *Cement and Concrete Research* 35: 483-493.

Fujiwara, T. 2008. Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6, 1, 31-44.

Gardner, N.J., and Lockman, N.J., 2001. Design provisions for drying shrinkage and Creep of Normal-strength concrete. *ACI Material Journal*, 98, 2, 159-167.

Holt, E., and Leivo, M. "Autogenous shrinkage at early ages," Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, E. Tazawa, ed., Hiroshima, Japan, E&FN Spon, 1998, pp. 135-142.

Holt, E.E. 2001. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 446, 184-193.

Ishida, T., Chaube, R.P., Kishi, T., and Maekawa, K., 1997. *Micro-physical approach to coupled autogenous and drying shrinkage of concrete*, Proceeding of JSCE, No.578/V-37, November 1997.

JSCE Guideline for Concrete No.3 Standard Specifications for Concrete Structures-2002 (2002).

Mak, S. L., Ritchie, D., Taylor, A., and Diggins, R. 1998. Temperature Effects on Early Age Autogenous Shrinkage in High Performance Concretes. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 155-166.

Rao, G. A. (2001). Long-term drying shrinkage of mortar — influence of silica fume and size of fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 171-175.

Tazawa, E., and Miyazawa, S. 1993. Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology. Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, Barcelona, Spain, 189-168.

Tangtermsirikul, S. 1998. Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 175-186.

Tatong, S., 2001. Autogenous shrinkage model for fly ash concrete considering effect of reaction, pore structure, and aggregate restraint. Master Thesis., SIIT, Bangkok, Thailand.

Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, "Autogenous Shrinkage of Concrete", Proceedings of the International Workshop organized by JCI, Hiroshima, June 13-14, 1998, E&FN Spon, pp.3-60

Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M. and Saito, T. (2005). Effect of fly ash on autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 473-482.

Tongaroonsri, S., 2008. Prediction of autogenous shrinkage, drying shrinkage and shrinkage cracking in concrete. PhD Thesis., SIIT, Bangkok, Thailand.

Tongaroonsri, S. and Tangtermsirikul, S. (2009) "Effect of Mineral Admixtures and Curing Periods on Shrinkage and Cracking Age under Restrained Condition", *Construction and Building Materials*, 23, 1050-1056

Valcuende, M., Marco, E., Parra, C. and Serna, P. (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(4), 583-592.

Videla, C., Covarrubias, J. P. and Masana, C. 2004. Updating concrete drying-shrinkage prediction models for local materials. *ACI Material Journal*, 101, 3, 187-198.

Zhang, M-H, Sisomphon, K., Ng, T.S. and Jun Sun, D. (2010). Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1700-1707.