



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: ความเสถียรเชิงมิติของคอนกรีตมวลเบา

โดย

ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ

ตุลาคม 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา ที่ผลิตโดยระบบ CLC (Cellular Lightweight Concrete) และปูนฉาบ ปัญหาการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา ที่มีมากกว่าคอนกรีตธรรมดาสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งปัญหานี้พบในคอนกรีตมวลเบาที่หล่อในที่ การควบคุมการหดตัวจะทำให้เกิดการใช้งานคอนกรีตมวลเบากว้างขวางขึ้น การแตกร้าวของปูนฉาบงานผนังบล็อกคอนกรีตมวลเบาก็เป็นปัญหาที่สำคัญและพบบ่อยมาก

การลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาสามารถใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่เป็นสารประกอบไดออลซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดน้ำออกจากระบบ โดยเลือก ไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol) และ โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol) เปรียบเทียบกับสารลดการหดตัวสำเร็จรูป ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทั้ง ไตรเอทิลีนไกลคอล และ โพรพิลีนไกลคอลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาได้เหลือร้อยละ 48-80 ของการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาปกติ

ในการศึกษาปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา ได้พัฒนาปูนฉาบที่มีการอุ้มน้ำ (Water retentivity) สูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา โดยใช้เถ้าลอย สารเพิ่มฟองสำหรับปูนฉาบ (Mortar plasticizer) และ เพอร์ไลต์ (Expanded perlite) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปูนฉาบผสมเถ้าลอยและสารเพิ่มฟองสามารถใช้ฉาบคอนกรีตมวลเบาได้ สำหรับงานที่ต้องการปูนฉาบที่มีการอุ้มน้ำสูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา การใช้เพอร์ไลต์ (Expanded perlite) แทนที่ทรายประมาณร้อยละ 3.3-6.6 สามารถให้ผลที่ดีมาก จากการทดลองฉาบจริงไม่พบการแตกร้าวของปูนฉาบงานผนังบล็อกคอนกรีตมวลเบา

Abstract

This research aimed to develop some of the properties of the cellular light weight concrete (CLC) and its plastering mortar. The problem of drying shrinkage of CLC concrete which is larger than normal concrete can lead to cracking. This can be found in the cast in place CLC concrete. The control of this shrinkage problem will lead to the increase use of this CLC concrete. The cracking of the plaster of the CLC concrete block wall is also an important issue and can often be seen.

The shrinkage of CLC concrete can be reduced with the addition of chemical admixture of di-ol base which has the properties in repelling water from the system. Triethylene glycol and propylene glycol were selected for testing and compared with the commercially available shrinkage reducing agent. The study showed that both triethylene glycol and propylene glycol at the dosage of 1-2% by weight of cement could reduce the drying shrinkage to 48-80% of that of normal CLC concrete.

In the study of the plastering mortar for CLC concrete, plastering mortar with high water retention, high elasticity and low density were developed. The study showed that plastering mortar containing fly ash as cement substitute of 20-40% and mortar plasticizer 0.1-0.2% by weight of binder could be used for plastering of CLC concrete. For work requiring higher water retention and elasticity and lower density, the incorporation of 3.3-6.6% of expanded perlite in place of sand could be very effective. From the plastering tests of CLC concrete block walls, no cracking could be observed.

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: ความเสถียรเชิงมิติของคอนกรีตมวลเบา

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2. ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
3. ผศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
4. นายสุรพล พฤษฐานกุล	บริษัท ฟินิกซ์ เอส ดี เอส จำกัด

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา ที่ผลิตโดยระบบ CLC (Cellular Lightweight Concrete) และปูนฉาบ ปัญหาการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา ที่มีมากกว่าคอนกรีตธรรมดาสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งปัญหานี้พบในคอนกรีตมวลเบาที่หล่อในที่ การควบคุมการหดตัวจะทำให้เกิดการใช้งานคอนกรีตมวลเบากว้างขวางขึ้น การแตกร้าวของปูนฉาบงานผนังบล็อกคอนกรีตมวลเบาก็เป็นปัญหาที่สำคัญและพบบ่อยมาก

การลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาสามารถใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่เป็นสารประกอบไดออลซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดน้ำออกจากระบบ โดยเลือก ไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol) และ โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol) เปรียบเทียบกับสารลดการหดตัวสำเร็จรูป ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทั้ง ไตรเอทิลีนไกลคอล และ โพรพิลีนไกลคอลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาได้เหลือร้อยละ 48-80 ของการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาปกติ

ในการศึกษาปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา ได้พัฒนาปูนฉาบที่มีการอุ้มน้ำ (Water retentivity) สูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา โดยใช้เถ้าลอย สารเพิ่มฟองสำหรับปูนฉาบ (Mortar plasticizer) และ เพอร์ไลต์ (Expanded perlite) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปูนฉาบผสมเถ้าลอยและสารเพิ่มฟองสามารถใช้ฉาบคอนกรีตมวลเบาได้ สำหรับงานที่ต้องการปูนฉาบที่มีการอุ้มน้ำสูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา การใช้เพอร์ไลต์ (Expanded perlite) แทนที่ทรายประมาณร้อยละ 3.3-6.6 สามารถให้ผลที่ดีมาก จากการทดลองฉาบจริงไม่พบการแตกร้าวของปูนฉาบงานผนังบล็อกคอนกรีตมวลเบา

Abstract

This research aimed to develop some of the properties of the cellular light weight concrete (CLC) and its plastering mortar. The problem of drying shrinkage of CLC concrete which is larger than normal concrete can lead to cracking. This can be found in the cast in place CLC concrete. The control of this shrinkage problem will lead to the increase use of this CLC concrete. The cracking of the plaster of the CLC concrete block wall is also an important issue and can often be seen.

The shrinkage of CLC concrete can be reduced with the addition of chemical admixture of di-ol base which has the properties in repelling water from the system. Triethylene glycol and propylene glycol were selected for testing and compared with the commercially available shrinkage reducing agent. The study showed that both triethylene glycol and propylene glycol at the dosage of 1-2% by weight of cement could reduce the drying shrinkage to 48-80% of that of normal CLC concrete.

In the study of the plastering mortar for CLC concrete, plastering mortar with high water retention, high elasticity and low density were developed. The study showed that plastering mortar containing fly ash as cement substitute of 20-40% and mortar plasticizer 0.1-0.2% by weight of binder could be used for plastering of CLC concrete. For work requiring higher water retention and elasticity and lower density, the incorporation of 3.3-6.6% of expanded perlite in place of sand could be very effective. From the plastering tests of CLC concrete block walls, no cracking could be observed.

บทสรุปผู้บริหาร

1. บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาและควบคุมการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา และลดการแตกของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา โดยทำการศึกษาและป้องกันการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา ไม่ให้เกิดมาก หรือควบคุมการเกิดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา เพื่อให้ผู้บริโภคมั่นใจที่จะเลือกใช้คอนกรีตมวลเบามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้โรงงานสามารถจำหน่ายคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น และส่งเสริมการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาให้เป็นประโยชน์มากขึ้นในอนาคต

คณะวิจัยได้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา โดยแบ่งประเภทของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมเป็น 2 ประเภทตามความหนาแน่น โดยมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และทรายต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของคอนกรีตในช่วงที่กำหนด

ประเภทที่ 1 ช่วงความหนาแน่นน้อยกว่า 1,000-1,200 กก./ม³ สำหรับงานบล็อกคอนกรีตมวลเบา

ประเภทที่ 2 ช่วงความหนาแน่นระหว่าง 1,400-1,750 กก./ม³ สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้าง

โดยในการผสมจะผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้ากับสารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ บ.ฟีนิกซ์ เอส ดี เอส จำกัด ในอัตราส่วนสารทำให้เกิดฟองต่อน้ำ ที่ 1 ต่อ 40 โดยน้ำหนัก แล้วอัดอากาศด้วยปั๊มลมที่ความดัน 5 กก/ซม² จนได้ฟองอากาศที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงระหว่าง 45-50 กก/ม³ การทดลองประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติความหนาแน่น กำลังอัด และการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเมื่อไม่ได้ใส่สารผสมเพิ่ม และทำการผสมมวลเบาตามสูตรที่ใช้ทางการค้าเปรียบเทียบกับ

ส่วนในเรื่องสารผสมเพิ่มเพื่อลดการหดตัวในคอนกรีตมวลเบานั้น ได้ใช้สารเคมี 2 ประเภทคือ

ประเภทที่ 1 สารประกอบไดออล ไดออลคือสารเคมีที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 2 ตัวในสูตรโมเลกุลของสาร ซึ่งหมู่ไดออลจะมีคุณสมบัติพิเศษในการกำจัดน้ำออกจากระบบได้ และจากการทำงานทวนวรรณกรรม งานวิจัยต่างๆ ทำให้คณะวิจัยเลือกสารเคมีในกลุ่มไดออล 2 ชนิดในการศึกษาคุณสมบัติการช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา คือ ไตรเอทิลีนไกลคอล ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) โพรพิลีนไกลคอล ($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH}$)

ประเภทที่ 2 สารเคมีที่มีโมเลกุลยาว ได้แก่ สารไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ (Dipropylene glycol tert-butyl ethers) และใช้ผสมกับไตรเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนไกลคอล ในการศึกษาคุณสมบัติการช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาด้วย

ทั้งนี้ได้ทดสอบสารลดการหดตัว เป็นสารผสมเพิ่มสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาด เพื่อเป็นการเปรียบเทียบด้วย

ในด้านการลดการแตกร้าวของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา ได้เลือกศึกษาการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water retentivity) และความสามารถทำงานได้ (Workability) ของปูนฉาบ โดยใช้ ถั่วลอ่ย สารเพิ่มฟองสำหรับปูนฉาบ (Mortar plasticizer) และ เพอร์ไลต์ (Expanded perlite)

2. ความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาโดยใช้สารเพิ่มฟอง ผู้ประกอบการพยายามที่จะพัฒนาคุณสมบัติและลดต้นทุนการผลิต เพื่อให้สามารถจำหน่ายสินค้าที่มีคุณภาพในราคาที่เหมาะสม โดยการนำสารเคมี และของเหลือจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ได้แก่ ถั่วถ่านหิน ผุ่หิน หิน และถั่วกลบเป็นวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพื่อเพิ่มมูลค่าจากการนำของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น และปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา อีกทั้งยังเป็นการลดของเสียที่จะปล่อยออกสู่ชุมชนได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบายังมีคุณสมบัติบางประการที่ต้องการการปรับปรุงเพื่อช่วยให้การใช้คอนกรีตมวลเบาแพร่หลายมากขึ้น นั่นคือการหดตัวเมื่อแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไป ปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญ ที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายได้ โดยเฉพาะปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) เนื่องจากในคอนกรีตประกอบด้วยโพรงอากาศแทนที่ซีเมนต์เฟสและมวลรวม ด้วยปัญหาการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่สูงนี้ เมื่อนำคอนกรีตมวลเบามาใช้ในงานกำแพงหรือคอนกรีตโครงสร้างหล่อในที่ จะทำให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ ก่อให้เกิดผลเสียต่อชิ้นงานและความน่าเชื่อถือของผู้ใช้งาน

ในส่วนของการงานปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา ปัญหาด้านการแตกร้าวยังมีให้เห็นอยู่เป็นประจำ ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาหลายประการ เช่น ปัญหาของการก่อปูนที่ไม่ได้มาตรฐาน การดูแลน้ำของผนังคอนกรีตมวลเบา การสูญเสียอย่างรวดเร็วของปูนฉาบ ทั้งจากการดูแลน้ำของผนังคอนกรีตมวลเบา และจากอากาศที่ร้อน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพัฒนาปรับปรุงคอนกรีตมวลเบาและป้องกันการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาไม่ให้เกิดขึ้นมาก หรือควบคุมการเกิดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา การและลดการแตกร้าวของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา เพื่อให้ผู้บริโภคมั่นใจที่จะเลือกใช้คอนกรีตมวลเบาชนิดนี้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้โรงงานสามารถจำหน่ายคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น และส่งเสริมการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์มากขึ้นในอนาคต

3. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำที่ใช้สารเพิ่มฟองและใช้การบ่มขึ้นปกติ โดยใช้การผสมสารเคมีผสมเพิ่มและเถ้าลอยลงไปในส่วนผสม เพื่อลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา และศึกษาผลของสารเคมีผสมเพิ่มและเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำและคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี

คอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำตามการศึกษานี้ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, หทราย, เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์, สารเพิ่มฟอง, โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol; PG), ไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol; TEG) และน้ำ ซึ่งกรรมวิธีในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำประกอบด้วยขั้นตอน คือ

วิธีที่ 1 ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และทรายลงในเครื่องผสม แล้วผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นผสมสารเคมีผสมเพิ่ม สารประกอบโพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol; PG) หรือ ไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol; TEG) และน้ำ กวนให้เข้ากัน แล้วจึงเทลงในเครื่องผสม และผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำการตวงสารเพิ่มฟองเติมลงไปในส่วนผสมดังกล่าว หลังจากนั้นก็ผสมสารทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วนำไปเทลงในแบบหล่อ และทำการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการแกะแบบ แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

วิธีที่ 2 ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เถ้าลอยและทรายลงในเครื่องผสม แล้วผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเติมน้ำ และผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำการตวงสารเพิ่มฟองเติมลงไปในส่วนผสมดังกล่าว หลังจากนั้นก็ผสมสารทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วนำไปเทลงในแบบหล่อ และทำการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการแกะแบบ แล้วนำไปบ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังศึกษาการพัฒนาการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำ ขณะเดียวกันให้กำลังรับแรงสูงด้วย โดยใช้สารลดน้ำปริมาณมาก (Superplasticizer)

ในด้านการลดการแตกของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา ได้ศึกษาวิธีการฉาบของผู้ประกอบการ และได้เลือกศึกษาการเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water retentivity) และความสามารถทำงานได้ (Workability) ของปูนฉาบ โดยใช้เถ้าลอย สารเพิ่มฟองสำหรับปูนฉาบ (Mortar plasticizer) และเพอร์ไลต์ขยายตัว (Expanded perlite)

4. Output ที่ได้จากโครงการ

จากงานวิจัยนี้สามารถผลิต 2 สิทธิบัตร คือสิทธิบัตรเรื่อง คอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำ และ สิทธิบัตรเรื่อง มอร์ตาร์สำหรับปูนฉาบที่มีการอุ้มน้ำสูง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
บทสรุปผู้บริหาร	iii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คอนกรีตมวลเบา	4
2.2 เถ้าถ่านหิน	5
2.3 ปฏิกริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน	8
2.4 การหดตัวแห้งของคอนกรีต	9
2.5 สารลดการหดตัว	12
2.6 โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol, PG)	13
2.7 ไตรเอทธิลีนไกลคอล (Triethylene glycol, TEG)	15
2.8 สารก่อโฟม (Foaming agent)	15
2.9 ปูนฉาบ	16
2.10 มอร์ตาร์พลาสติกไฮเซอ์	17
2.11 เพอร์ไลต์	17
2.12 สรุปร	17
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	19
3.1 แผนการทดสอบ	19

3.2	วัสดุ	20
3.3	การเตรียมสารก่อไฟ	20
3.4	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา	22
3.5	การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนฉาบ	23
บทที่ 4	คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบา	25
4.1	ผลของปริมาณโฟมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา	25
4.2	กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา	27
4.3	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบา	28
4.4	การสำรวจการใช้งานคอนกรีตมวลเบาในภาคสนาม	30
4.5	การศึกษาเบื้องต้นการฉาบคอนกรีตมวลเบาในสถานที่ก่อสร้าง	31
4.6	การศึกษาการยึดเกาะระหว่างปูนฉาบสำเร็จรูปและคอนกรีตมวลเบา	33
4.7	การศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของผิวผนังคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉาบ	34
บทที่ 5	การหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง	25
5.1	การหัดตัวของคอนกรีตมวลเบา	36
5.2	กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา	41
5.3	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา	44
5.4	สรุป	47
บทที่ 6	การหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์	49
6.1	การหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์	49
6.2	กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา	53
6.3	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา	56
6.4	สรุป	57
บทที่ 7	การพัฒนาปูนฉาบ	58
7.1	คุณสมบัติของวัสดุ	58
7.2	ส่วนผสมของปูนฉาบ	59
7.3	ผลการทดสอบมอร์ตาร์	61

7.4	ผลการทดสอบการฉาบจริง	68
บทที่ 8	สรุปผล	70
	บรรณานุกรม	71
	Output ที่ได้จากโครงการ	73
	ภาคผนวก	74
	• คำขอสิทธิบัตร เรื่อง คอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำ	
	• คำขอสิทธิบัตร เรื่อง มอร์ตาร์ที่มีการอุ้มน้ำสูงสำหรับงานปูนฉาบ	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาโดยใช้สารเพิ่มฟอง ผู้ประกอบการพยายามที่จะพัฒนาคุณสมบัติและลดต้นทุนการผลิต เพื่อให้สามารถจำหน่ายสินค้าที่มีคุณภาพในราคาที่เหมาะสม โดยการนำสารเคมี และของเหลือจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ได้แก่ แกลบฮิน ผุ่นฮิน และแกลบเป็นวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพื่อเพิ่มมูลค่าจากการนำของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น และปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา อีกทั้งยังเป็นการลดของเสียที่จะปล่อยออกสู่ชุมชนได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบายังมีคุณสมบัติบางประการที่ต้องการการปรับปรุงเพื่อช่วยให้การใช้คอนกรีตมวลเบาแพร่หลายมากขึ้น นั่นคือการหดตัวเมื่อแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไป ปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) เนื่องจากโพรงอากาศภายในคอนกรีต ด้วยปัญหาการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่สูงนี้ เมื่อนำคอนกรีตมวลเบามาใช้ในงานทำกำแพงหรือคอนกรีตโครงสร้างหล่อในที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ ปัญหาอีกประการหนึ่งของการใช้คอนกรีตมวลเบาคือการแตกร้าวของปูนฉาบงานผนังบล็อกคอนกรีตมวลเบาก็เป็นปัญหาที่สำคัญและพบบ่อยมาก ซึ่งการเสียหายเหล่านี้ก่อให้เกิดผลเสียต่อชิ้นงานและความน่าเชื่อถือของผู้ใช้งาน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพัฒนาปรับปรุงคอนกรีตมวลเบาและป้องกันการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาไม่ให้เกิดขึ้นมาก หรือควบคุมการเกิดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา การและพัฒนาสูตรปูนฉาบเพื่อลดการแตกร้าวของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา เพื่อให้ผู้บริโภคมั่นใจที่จะเลือกใช้คอนกรีตมวลเบาชนิดนี้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้โรงงานสามารถจำหน่ายคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น และส่งเสริมการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์มากขึ้นในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ศึกษาพัฒนาปรับปรุงคอนกรีตมวลเบาและควบคุมการเกิดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา หรือลดการหดตัวของคอนกรีต โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่ม และพัฒนาปูนฉาบที่

มีการอุ้มน้ำ (Water retentivity) สูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถใช้ฉาบและลดการแตกร้าวของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบาได้

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการหัดตัวต่ำที่ใช้สารเพิ่มฟองและใช้การบ่มขึ้นปกติ โดยใช้การผสมสารเคมีผสมเพิ่มลงไปในส่วนผสม เพื่อลดการหัดตัวของคอนกรีตมวลเบา และศึกษาผลของสารเคมีผสมเพิ่มต่อค่ากำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีการหัดตัวต่ำและคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี และยังศึกษาเบื้องต้นของการใช้เถ้าลอยเพื่อลดการหัดตัวของคอนกรีตมวลเบา และศึกษาการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) เพื่อพัฒนากำลังของคอนกรีตมวลเบาด้วย นอกจากนี้ยังพัฒนาปูนฉาบที่มีการอุ้มน้ำ (Water retentivity) สูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถใช้ฉาบและลดการแตกร้าวของปูนฉาบคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาที่มีการหัดตัวต่ำตามการศึกษานี้ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, ทราย, เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์, สารเพิ่มฟอง, โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol; PG), ไตรเอทธิลีนไกลคอล (Triethylene glycol; TEG) และน้ำ ซึ่งกรรมวิธีในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการหัดตัวต่ำประกอบด้วยขั้นตอน คือ

ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เถ้าลอย และทรายลงในเครื่องผสม แล้วผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นผสมสารเคมีผสมเพิ่ม คือ สารประกอบโพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol; PG) หรือ ไตรเอทธิลีนไกลคอล (Triethylene glycol; TEG) และน้ำ (สำหรับการใช้สารลดน้ำพิเศษ ทำการผสมสารลดน้ำพิเศษกับน้ำก่อน) กวนให้เข้ากัน แล้วจึงเทลงในเครื่องผสม และผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำการตวงสารเพิ่มฟองเติมลงไปในส่วนผสมดังกล่าว หลังจากนั้นก็ผสมสารทั้งหมดให้เข้ากัน แล้วนำไปเทลงในแบบหล่อ ที่มีขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน BS EN 12390-3:2009 และแบบหล่อขนาด $7.62 \times 7.62 \times 25.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ($3 \times 3 \times 10$ ลูกบาศก์นิ้ว) เพื่อใช้ในการทดสอบการหัดตัว ตามมาตรฐาน ASTM C596-07 โดยใส่หลอดทองเหลืองบริเวณปลายทั้งสองข้าง ทำการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการแกะแบบ แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้นำไปทดสอบการหัดตัว โดยนำไปบ่มในห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่วนคอนกรีตที่ใช้ทดสอบกำลังอัดจะบ่มขึ้น จนครบอายุการทดสอบ

การศึกษาพัฒนาปรับปรุงปูนฉาบ หรือมอร์ตาร์ที่มีค่าการอุ้มน้ำสูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา สำหรับงานปูนฉาบทำโดยการผสมปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอยเพื่อเพิ่มความลื่นและเหนียว

การผสมเพอร์ไลต์ และผสมสารมอร์ตาร์ทพลาสติกไซเซอ์ เพื่อเพิ่มค่าการอุ้มน้ำ โดยจะได้เนื้อมอร์ตาร์ท สำหรับงานฉาบที่ให้ค่าการอุ้มน้ำสูงเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1506 ค่ายังโมดูลัส หรือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Young modulus or Modulus of Elasticity) ที่อายุ 28 วันต่ำเมื่อทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM C469 และ มีความหนาแน่นต่ำจากการชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตร

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวางแผนการทดสอบจะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ

1. การศึกษาอิทธิพลของสารผสมเพิ่มลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้สารหลักคือสารประกอบโพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol; PG) และ ไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol; TEG)
2. มอร์ตาร์ทที่มีค่าการอุ้มน้ำสูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา สำหรับงานปูนฉาบ โดยผสมเกล็ดลอยเพื่อเพิ่มความลื่นและเหนียว ผสมเพอร์ไลต์ และสารมอร์ตาร์ทพลาสติกไซเซอ์ เพื่อเพิ่มค่าการอุ้มน้ำ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในเชิงอุตสาหกรรม

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติการหดตัวต่ำ และมอร์ตาร์ทที่มีค่าการอุ้มน้ำสูง ความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา สำหรับงานปูนฉาบ ราคาประหยัด ได้มาตรฐานตามมาตรฐานอุตสาหกรรม รวมทั้งเปิดโอกาสให้บริษัทขนาดเล็กมีส่วนแบ่งทางการตลาด สามารถผลิตสินค้าแข่งขันกับโรงงานขนาดใหญ่ด้วยเงินลงทุนน้อย แต่ผลิตสินค้าราคาถูกและมีคุณภาพทัดเทียมผู้ผลิตรายใหญ่ และส่งเสริมการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาให้เป็นประโยชน์มากขึ้นในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา เป็นนวัตกรรมรูปแบบใหม่ด้านวัสดุก่อสร้าง ที่ในปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง เนื่องจากคอนกรีตมวลเบา มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากคอนกรีตชนิดอื่นๆ คือ มีน้ำหนักเบา มีค่าการนำความร้อนต่ำ หนไฟ สามารถนำไปปลูกสร้างได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ประหยัดแรงงาน และลดต้นทุนในการดำเนินการก่อสร้าง รวมทั้งยังสามารถช่วยประหยัดพลังงาน ป้องกันความร้อนได้ดี มีความคงทน และมีอายุการใช้งานนานกว่า 50 ปี ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นนี้ทำให้มีการเปลี่ยนมาใช้คอนกรีตมวลเบาทดแทนอิฐมวลเบาหรือคอนกรีตบล็อกมากขึ้น [1,2]

โดยทั่วไป คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่ผลิตมาจากการผสมระหว่างทราย ซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัม และผงอลูมิเนียม โดยมีฟองอากาศมากประมาณร้อยละ 40 ถึง 75 ทำให้มีน้ำหนักเบา บางกรณีสามารถลอยน้ำได้ ฟองอากาศภายในคอนกรีตมวลเบาจะเป็นแบบเซลล์ปิด ไม่ดูดซึมน้ำ หรือดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมวลเบา 4 เท่า ความเบาของคอนกรีตจะช่วยให้ประหยัดโครงสร้าง ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน มีค่าการต้านทานความร้อนดีกว่าคอนกรีตบล็อก 4 เท่า ดีกว่าอิฐมวลเบา 6 ถึง 8 เท่า ไม่สะสมความร้อน ไม่ติดไฟ หนไฟที่ 1,000 องศาเซลเซียสได้นาน 4 ชั่วโมง และกันเสียงได้ดี

คอนกรีตมวลเบา มีหลายประเภท หากมองเพียงภายนอกอาจไม่แตกต่างกัน แต่ในความเป็นจริงแล้ว คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแตกต่างกันด้วย คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปอาจแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง ซึ่งระบบนี้แบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ

1.1 ใช้วัสดุเบาเป็นส่วนผสม เช่น ขี้เถ้าลอย เถ้า ชานอ้อย หรือเม็ดโฟม ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น แต่จะมีอายุการใช้งานที่สั้น เสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิดไฟไหม้ สารเหล่านี้อาจติดไฟและเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัยได้

1.2 ใช้สารเคมีเป็นส่วนผสม เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟู และทิ้งให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวสูง ทำให้แตกร้าวได้

คอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิสูงนี้ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลึกสีขาว

2. ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง ซึ่งระบบนี้สามารถแบ่งได้อีก 2 ประเภท ตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ

2.1 ใช้ปูนขาว มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ซึ่งประเภทนี้จะควบคุมคุณภาพได้ยาก ทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ มีการดูดซับน้ำมาก

2.2 ระบบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นระบบที่นอกจากจะช่วยควบคุมให้คอนกรีตมีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้กำลังในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง และทนทานกว่าการผลิตในระบบอื่นมาก

เมื่อเปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียระหว่างคอนกรีตมวลเบากับคอนกรีตปกติพบว่า

1. คอนกรีตมวลเบามีความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากมีโพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานตกแต่งภายใน หรืองานฉนวนกันความร้อน

2. สำหรับความคงทนพบว่า คอนกรีตมวลเบาไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี ความเค้นทางกายภาพและการกระทบกระแทกเนื่องจากแรงภายนอกได้ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบา มีโพรงอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพที่มีจำพวกซัลเฟตเจือปนอยู่ หรือในสภาพดินขึ้น ดังนั้นในการนำไปใช้งานควรมีการฉาบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

3. การนำความร้อน คอนกรีตมวลเบา มีค่าการนำความร้อนต่ำ เนื่องจากในเนื้อคอนกรีตมีโพรงอากาศอยู่มาก ทำให้คอนกรีตมวลเบาดูดซับความร้อนได้ไม่ดี

4. มีความสามารถทนไฟได้ดี กำลังรับแรงดึงได้มากกว่าคอนกรีตปกติ

5. คอนกรีตมวลเบาสามารถรับกำลังและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับเนื้อคอนกรีตได้ดี

2.2 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับจะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อไปเก็บไว้ยังไซโล ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อน

หรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักรวมมากจึงตกลงสู่ก้นเตา เรียกว่าเถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash) การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยเถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และเถ้าก้นเตาอีกประมาณร้อยละ 20 [3]

2.2.1 ศักยภาพของการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์

เถ้าถ่านหิน นิยมที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ

ประการที่ 1 เถ้าถ่านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม

ประการที่ 2 เถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าถ่านหินนี้จะช่วยให้คอนกรีตมีการไหลลื่นได้ดีขึ้นทำให้การสูบลงคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น

นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้ เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

การใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการถ่ายเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดัดประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าถ่านหินก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตรงตามที่ต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่

การใช้งานเถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตสามารถใช้เพื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีทรงกลมจึงทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น และต้องการน้ำลดลง การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุนต้นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหิน แต่จะมีค่ากำลังสูงกว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น นอกจากนี้การบ่มคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินก็มีความสำคัญมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะคอนกรีตที่

ผสมเถาเถาหนึ่ต้องอาศัยต่างที่ไ้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและต้องการความชื้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.2.2 การใช้เถาเถาหนึ่ในงานคอนกรีตทั่วไป

การใช้งานเถาเถาหนึ่ในงานคอนกรีตสามารถใช้เพื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากเถาเถาหนึ่มีทรงกลมจึงทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น และต้องการน้ำลดลง การใช้เถาเถาหนึ่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุต้นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถาเถาหนึ่ แต่จะมีค่ากำลังสูงกว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น นอกจากนี้การบ่มคอนกรีตที่มีเถาเถาหนึ่ก็มีความสำคัญมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหนึ่ต้องอาศัยต่างที่ไ้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและต้องการความชื้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

การใช้เถาเถาหนึ่ควรใช้ในปริมาณร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์บวกกับเถาเถาหนึ่ การใช้เถาเถาหนึ่ที่มากเกินไปจะทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่ต่ำจนอาจใช้งานไม่ได้ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงการใช้เถาเถาหนึ่เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพราะจะทำให้คอนกรีตมีราคาที่สูงลง ขณะที่การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถาเถาหนึ่ควรมีค่าใกล้เคียงหรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถาเถาหนึ่

2.2.3 คุณสมบัติของเถาเถาหนึ่

1. คุณสมบัติทางกายภาพ

เถาเถาหนึ่ที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง เถาเถาหนึ่ขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ เถาเถาหนึ่ที่มีขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงมีทรงกลมและผิวเรียบ เถาเถาหนึ่ที่มีขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิวอาจมีปริมาณของคาร์บอนสูง อนุภาคของเถาเถาหนึ่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน ความละเอียดของเถาเถาหนึ่จากโรงไฟฟ้าที่แม่เมาะซึ่งทดสอบด้วยวิธีของเบลนมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500-3,500 ซม²/ก

การวัดความละเอียดของเถาเถาหนึ่มี 2 วิธี คือ วิธีการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 ไมครอน) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวที่ใช้กำหนดความละเอียดของเถาเถาหนึ่ กล่าวคือ ขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก เถาเถาหนึ่ที่มีความละเอียดจะมี

ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น และกำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า

เถ้าถ่านหินประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างใน เรียกว่า เถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในโพรงเรียกว่า พลัสโรสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน ความกลวงทำให้ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินต่ำกว่าปกติ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินแม่เมาะอยู่ที่ 2.0-2.2

2. องค์ประกอบทางเคมี

เถ้าถ่านหินมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน, อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงแบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ Class C และ Class F โดยที่เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก โดยส่วนใหญ่แล้วถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าถ่านหิน Class C เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นส่วนใหญ่ สำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้เถ้าถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน แต่เถ้าถ่านหินที่ได้ นั้นเป็นเถ้าถ่านหิน Class C และ Class F การที่จะมี Class C และ Class F จากแหล่งเดียวกันถือเป็นเรื่องที่ไม่ปกติ เพราะถ่านหินเป็นวัสดุมาจากธรรมชาติและมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีย่อมเปลี่ยนแปลงไปได้ อย่างไรก็ตามเถ้าถ่านหินทั้ง Class C และ Class F ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้ในงานคอนกรีต จากการศึกษพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ระหว่างร้อยละ 29.2 ถึง 43.1 และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ระหว่างร้อยละ 8.10 ถึง 23.4 ซึ่งมีความแตกต่างทางด้านเคมีพอสมควร แต่ให้ผลการทดสอบกำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนัก

2.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน [3]

ความสามารถของเถ้าถ่านหินในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่มีสถานะไม่เป็นผลึกอยู่ประมาณร้อยละ 70-80 โดยเถ้าถ่านหินที่ละเอียดจะมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่า

เถาถ่านหินที่หยาบ เถาถ่านหินที่ละเอียดจึงทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถาถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ และให้กำลังอัดที่สูง ซึ่งอาจสูงกว่ามอร์ต้าหรือคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถาถ่านหิน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว (สมการที่ 1) ซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถาถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, CAH) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต ดังแสดงในสมการที่ 2 โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วันและมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อเถาถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น

โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ แสดงในสมการต่อไปนี้



จากนั้นซิลิกาจากเถาถ่านหินเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



2.4 การหดตัวของคอนกรีต [3]

การหดตัวแห้ง (Drying shrinkage) เกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว การหดตัวแห้งในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นการหดตัวที่สำคัญมากกว่าการหดตัวอื่นๆ หากการออกแบบและก่อสร้างคอนกรีตไม่ได้เผื่อการหดตัวแห้งอย่างเพียงพอแล้ว จะทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวได้ ซึ่งส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการยัดรังของโครงสร้าง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนในเรื่องนี้ คือ การตัดหรือสร้างร่องในพื้นที่ถนนหรือพื้นคอนกรีตสำหรับเพื่อการหดตัวและการขยายตัวของคอนกรีต เพื่อป้องกันรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบไม่มีทิศทางและดูไม่สวยงาม

2.4.1 กลไกของการหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก

1. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงคาпилลารีเป็นหลัก โดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาпилลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อนตามด้วยน้ำในโพรงคาпилลารีที่มีขนาดเล็กลง การสูญเสียน้ำทำให้น้ำที่เหลืออยู่ในโพรงเกิดเป็นผิวโค้ง (Meniscus)

และเกิดแรงตึงผิว (Surface tension) ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กนอกจากนี้การสูญเสีย น้ำดูดซับที่อยู่ในซอก (Hindered adsorbed water) หรือที่อยู่ในโพรงขนาดเล็ก (Microspore) มีส่วนทำให้เกิดการหดตัว ในการหดตัวพบว่าแผ่นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะเคลื่อนเข้าใกล้กันมากขึ้น แผ่น CSH บางแผ่นที่เคลื่อนเข้าใกล้กันพอที่จะยึดเกาะกันอย่างถาวรทำให้เกิดชั้น (Layer) ของแผ่น CSH ซึ่งการเคลื่อนตัวและยึดเกาะกันดังกล่าวเป็นส่วนของการหดตัวอย่างถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (Irreversible shrinkage)

2. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ ในช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงคาปิลลารีถูกขจัดออกไปและแรงตึงผิวจะหมดไป การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสีย น้ำดูดซับ (Absorbed water) ที่ผิวของอนุภาคของเจลเป็นหลัก ซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของ ชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสีย น้ำ อาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนัก เมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสีย น้ำที่ดูดซับชั้นสุดท้ายและทำให้เกิด การหดตัวมากขึ้น การหดตัวในช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible shrinkage)

3. การหดตัวในช่วงต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดขึ้นในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่น CSH (Interlayer water) ถูกขจัดออกไป การสูญเสีย น้ำ ในช่วงนี้ทำให้แผ่น CSH เคลื่อนที่เข้าหากัน การหดตัวจะเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าวการตากแห้งรุนแรง และนานพอ แผ่น CSH ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันจะสามารถยึดเกาะกันได้ ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวแบบ ถาวร

2.4.2 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต

องค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวม ปริมาณของน้ำ และ ปูนซีเมนต์ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ รูปร่างและขนาดของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีต สามารถลดการหดตัวเพราะเหล็กช่วยยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงใน คอนกรีตได้ คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง

1. มวลรวม เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรของ มวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และลดการหดตัวได้อย่างดี นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยัง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ กำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น ความพรุน ลักษณะของผิว รูปร่าง ปริมาณ ขนาด และขนาดคละ มวลรวมที่แข็งแกร่งมีการดูดซึมน้ำน้อยและมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้ คอนกรีตมีการหดตัวน้อย ส่วนกำลังของมวลรวมนั้นไม่เป็นปัจจัยที่สำคัญนักเพราะกำลังของมวลรวม จะสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มาก การใช้หิน ทราวย และมวลรวมเบา ซึ่งไม่แข็งแกร่งจะทำให้คอนกรีตมีการหด

ตัวสูงกว่าการใช้หินควอร์ตในสวนผสมคอนกรีต ขณะที่หินปูนและหินอ่อนจะทำให้การหดตัวต่ำ ส่วนหินบะซอลต์ กรวด และหินแกรนิต จะให้การหดตัวปานกลาง ขนาดคละและขนาดของวัสดุผสมจะมีผลทางอ้อมต่อการหดตัวของคอนกรีต คอนกรีตที่มีขนาดคละของวัสดุผสมที่ใช้กันทั่วไปจะมีการหดตัวใกล้เคียงกัน การใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ใช้ซีเมนต์เฟสตัน้อยลงจึงทำให้การหดตัวน้อยลงด้วย ส่วนรูปร่างของวัสดุผสมจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการหดตัว การใช้มวลรวมก้อนกลมสามารถลดปริมาณน้ำได้ซึ่งการลดปริมาณน้ำจะทำให้การหดตัวแห้งลดลงได้ การเพิ่มปริมาตรของหินโดยให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ ทำให้การหดตัวลดลงแต่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการยุบตัวต่ำลงด้วย

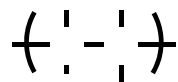
2. ปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสตัน ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์อย่างมาก ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากจะมีการหดตัวสูง และการหดตัวจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น เพราะการมีน้ำในส่วนผสมมากย่อมมีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตมากขึ้น การหดตัวของไฮเดรตซีเมนต์มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงประมาณ 0.2 ถึง 0.6

3. ความชื้น ความชื้นอาจแบ่งได้เป็นความชื้นขณะที่บ่มคอนกรีตและความชื้นของอากาศตอนตากแห้ง การบ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตไม่มากนัก การบ่มที่ดียอมทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้นและได้จำนวนของเจลเพิ่มขึ้น เม็ดปูนจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเหลือเม็ดปูนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาอยู่น้อย ซึ่งเม็ดปูนที่ยังไม่ได้ปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ต้านทานการหดตัว นอกจากนี้การบ่มที่ดียอมทำให้โพรงคาปิลารี่น้อยลงและคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น ดังนั้นการบ่มธรรมดาจึงมีผลต่อการหดตัวไม่มาก การใช้ความดันสูงในการบ่มสามารถลดการหดตัวได้มาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจล ถ้าทั้งคอนกรีตไว้ในน้ำจะมีการขยายตัวแต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศแห้งจะเกิดการหดตัว ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพสมดุลมีค่าประมาณร้อยละ 94 สำหรับคอนกรีตที่ตากแห้งแล้วนำเอามาใส่ในน้ำสามารถขยายตัวกลับคืนมาบางส่วนแต่มีบางส่วนเป็นการหดตัวแบบถาวร และถ้าเอาไปตากแห้งอีกคอนกรีตจะหดตัวได้อีก

4. ขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวพื้นที่ผิวที่มากทำให้การสูญเสียน้ำเกิดได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำไววกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ คอนกรีตเมื่อสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว การหดตัวเกิดที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปส่วนในของคอนกรีตซึ่งใช้เวลานานมากเมื่อเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับกันว่า การหดตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต โดยการหดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของคอนกรีต

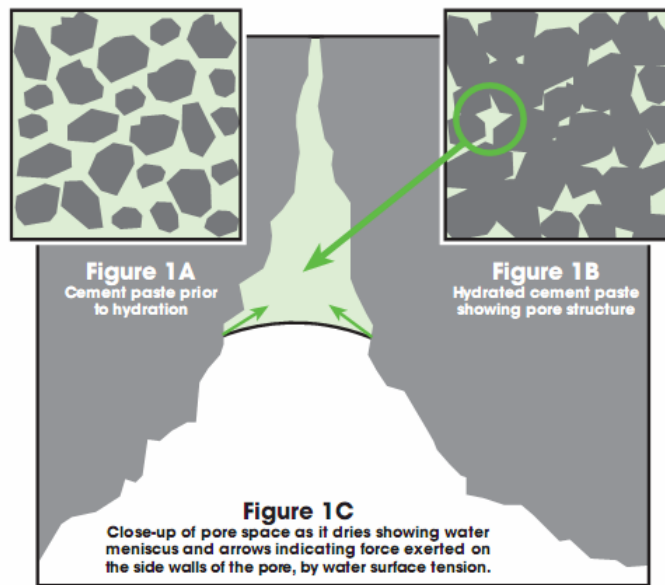
2.5 สารลดการหดตัว (Drying shrinkage-reducing agent, SRA) [4]

สารลดการหดตัวของคอนกรีต หรือ Drying shrinkage-reducing agent (SRA) เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ โดยต้องประกอบด้วยโครงสร้าง ดังรูป 2.1 อย่างน้อยที่สุด 1 หน่วย โดยมีหมู่ R^1 , R^2 และ R^3 เป็นไฮโดรเจนอะตอม, หมู่เมทิล หรือหมู่ $-(CH_2)_nCOOX$ โดยหมู่ X จะแทนด้วยโลหะที่เป็น monovalent หรือ divalent หรืออาจจะเป็นหมู่แอมโมเนียม, หรือหมู่ไฮโดรคาร์บอน และ n คือเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0-2 และ R^4 เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 4-30 อะตอม มีความตึงผิวอยู่ที่ 25-50 mN/m ในสารละลายที่ร้อยละ 2 โดยมวลของสารพอลิเมอร์นี้ในซีเมนต์ สารลดการหดตัวของคอนกรีตหรือ SRA นี้ โดยปกติจะไม่สามารถกระจายตัวได้เอง แต่เมื่อนำมาผสมกับสารกักกระจายฟองอากาศหรือโฟม จะทำให้ SRA นั้นมีคุณสมบัติลดการหดตัวของคอนกรีตได้



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของสารลดการหดตัว

เมื่อคอนกรีตแข็งตัว น้ำที่อยู่ภายในรูพรุนจะมีการระเหยออกไป จึงทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการหดตัวแห้งของคอนกรีต เมื่อทำการเติมสารลดการหดตัวลงไป สารนี้จะเข้าไปแทนที่น้ำที่ระเหยออกจากคอนกรีตเมื่อแข็งตัว เนื่องจากสารลดการหดตัวนี้เป็นสารที่ไม่ละลายในของผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เมื่อเติมเข้าไปในส่วนผสมสารนี้จะเข้าไปกระจายตัวอยู่ในของผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ภายหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวสารลดการหดตัวก็ยังคงกระจายอยู่ในรูพรุนจึงมีผลทำให้ลดแรงดึงผิวของคอนกรีตได้ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (W/C ratio) มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต ถ้าอัตราส่วน (W/C ratio) ต่ำจะทำให้ร้อยละการลดลงของค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่ามาก ทั้งนี้อัตราการผสมสารลดการหดตัวที่ร้อยละ 1.5 ถึง 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะทำให้ลดค่าการหดตัวของคอนกรีตได้ดีที่สุด

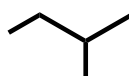


รูปที่ 2.2 แผนภาพ 1A ลักษณะของรูปพรุนก่อนที่คอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
 แผนภาพ 1B ลักษณะของรูปพรุนหลังจากที่คอนกรีตเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว
 แผนภาพ 1C ลักษณะเส้นโค้ง และลูกศรที่บอกถึงแรงกระทำของคอนกรีต

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างรูปพรุนเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังแสดงในแผนภาพ 1B ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าเนื้อคอนกรีตจะอัดแน่นกันมากขึ้น เมื่อเทียบกับ แผนภาพ 1A ส่วนเส้นโค้งและลูกศรที่แสดงดังแผนภาพ 1C บ่งบอกถึงแรงกระทำภายในของคอนกรีตที่เกิดจากแรงตึงผิวซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว

2.6 โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) [5]

โพรพิลีนไกลคอลมีสูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH}$ เป็นสารประกอบไกลคอล ซึ่งไกลคอลเป็นสารเคมีที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) 2 ตัวในสูตรโมเลกุลของสารดังแสดงในรูป 2.3 ซึ่งหมู่ไกลคอลจะมีคุณสมบัติพิเศษในการทำให้น้ำออกจากระบบได้ และจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าสารเคมีพวกไกลคอลมักจะใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตสารลดการหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของโพรพิลีนไกลคอล

โพรพิลีนไกลคอลได้มาจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันระหว่างเอทิลีนออกไซด์ และโพรพิลีนออกไซด์ ซึ่งโพรพิลีนไกลคอลมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี แต่การละลายน้ำจะลดลงเมื่อมวลโมเลกุลมากขึ้น และสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ ด้วยคุณสมบัติในการละลายน้ำที่ดีนี้ทำให้โพรพิลีนไกลคอลดูดซับน้ำและความชื้นได้ดีด้วย โพรพิลีนไกลคอลเป็นสารละลายที่ไม่มีสี และกลิ่น มีจุดเดือดที่ 188 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็งที่ -39 องศาเซลเซียส โพรพิลีนไกลคอลเตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของโพรพิลีนออกไซด์ โดยส่วนมาก โพรพิลีนไกลคอลจะใช้มากในอุตสาหกรรมพลาสติกในการผลิตไฟเบอร์พอลิเอสเตอร์และเรซินอัลคีด (alkyd resins)

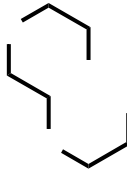
ไกลคอลจะเป็นสารที่มีจุดเดือดสูงพอๆ กับน้ำ เมื่อทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันกับก๊าซธรรมชาติจะได้ของเหลวแห้ง เมื่อทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันจะได้ไอน้ำที่นำไปใช้ในกระบวนการกลั่นในหอกกลั่น จึงทำให้ได้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแห้ง ออกมาทางด้านบนของหอกกลั่น เนื่องจากเป็นสารที่มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ อีเทอร์ และแอลกอฮอล์ และทั้งอีเทอร์และแอลกอฮอล์ต่างก็เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี

สารประเภทไกลคอลมีประโยชน์มากมายหลายประการ ดังเช่น

1. เป็นสารลดการแข็งตัว และเติมไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเกาะตัวของน้ำแข็ง
2. เป็นสารตัวกลางที่ใช้ในการการผลิตพอลิเมอร์ และเป็นสารที่ใช้ทำปฏิกิริยา
3. เป็นตัวทำละลายหรือ Plasticizing สำหรับกระบวนการผลิตพลาสติก, สารเคลือบเงา สี และน้ำมันขัดเงา
4. เป็นสารทำความชื้นและ Plasticizing
5. เป็นสารเชื่อมต่อบetween เครื่องปั้นกับน้ำหมึก
6. ใช้ควบคุมสถานะของอุตสาหกรรมสิ่งทอ
7. ใช้เป็นตัวทำละลายแห้ง ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ, หนังสือตัว และเคลือบเงา
8. ใช้ในการเกษตรกรรม
9. ใช้เป็นสารกันบูด ป้องกันการทำลายจากธรรมชาติ และใช้ในการฆ่าเชื้อโรค
10. เป็นสารดูดความชื้น
11. ใช้ในการทำความสะดวก

2.7 ไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol, TEG)

ไตรเอทิลีนไกลคอลมีสูตรโมเลกุลคือ $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ มีมวลโมเลกุล 150.17 กรัม/โมล เป็นสารประกอบไกลคอลเช่นเดียวกับโพรพิลีนไกลคอล ดังแสดงสูตรโมเลกุลในรูป 2.4 มีความสามารถในการละลายน้ำและมีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติ



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของโพรพิลีนไกลคอล

ไตรเอทิลีนไกลคอล, $\text{OH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_3\text{H}$ เป็นสารที่มีสี มีกลิ่น ไม่ระเหยง่าย และมีความชื้น เป็นสารที่ประกอบมีหมู่ไฮดรอกซี 2 หมู่ เชื่อมอยู่กับหมู่อีเธอร์ 2 หมู่ ดังรูปที่ 2.3 จึงทำให้มีความสามารถละลายน้ำได้ดี มีความชื้นสูง จึงมักใช้เป็นสารดูดความชื้น มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้หลายตัว มีการใช้ไตรเอทิลีนไกลคอลแทนที่ไดเอทิลีนไกลคอล ซึ่งสามารถลดความเป็นพิษลงได้ ไตรเอทิลีนไกลคอลได้มาจากการใช้ vinyl plasticizer และเป็นสารตัวกลางในกระบวนการผลิตเรซินพอลิเอสเตอร์ อีกทั้งยังใช้เป็นตัวทำละลายที่มีความสามารถละลายกับสารตัวอื่นๆ ได้ดี

ไตรเอทิลีนไกลคอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้มาจากการผลิตเอทิลีนไกลคอลจากเอทิลีนออกไซด์ และจุดประสงค์หลักในการนำมาใช้คือ เป็นการใช้ประโยชน์จากไดเอทิลีนไกลคอล ในการใช้ไตรเอทิลีนไกลคอลจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของความชื้น ในสภาวะอากาศปกติไตรเอทิลีนไกลคอลจะไม่มี ความชื้น และเมื่อระเหยกลายเป็นไอจะสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้

2.8 สารก่อโฟม (Foaming agent) [6]

คอนกรีตมวลเบาแบบที่ใช้สารสร้างโฟมก่อน (ต่างจากสารกักกระจายฟองอากาศที่ใช้ในกรณีคอนกรีตกักกระจายฟองอากาศ เนื่องจากสารกักกระจายฟองอากาศจะให้ฟองที่มีขนาดเล็กกว่าและฟองจะมีความเสถียรมากกว่า) ในกรณีนี้ ส่วนผสมที่ใช้จะประกอบไปด้วย ปูน ทราย น้ำ และ ฟองอากาศที่ได้จากการผสมสารก่อโฟมและน้ำในถังอัดอากาศ โดยที่ถังอัดอากาศจะต้องมีการควบคุมความดันให้คงที่อยู่ที่ 5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร อัตราส่วนสารก่อโฟมต่อน้ำที่ใช้เท่ากับ 1 : 40 ตามคำแนะนำของผู้ผลิต ปริมาตรของน้ำผสมสารก่อโฟมควรมีปริมาตรร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 20 ของความจุถัง

ลักษณะโฟม ที่ได้จะต้องมีเนื้อละเอียด ไม่ยุบตัวง่าย โดยตรวจสอบได้จากความหนาแน่นของโฟมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 40 ถึง 60 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โฟมที่มีความหนาแน่นมากกว่านี้มีแนวโน้มจะแยกชั้น เนื่องจากโฟมไม่สามารถอุ้มน้ำได้ โฟมจะแตกตัวเป็นฟองขนาดใหญ่ขึ้น และน้ำจะแยกตัวออกอยู่ด้านล่าง ลักษณะโฟมที่ดีต้องไม่แยกตัวเมื่อเทลงขวดแก้ว 1000 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้ 15 นาที

โฟมจะถูกนำไปผสมให้เข้ากับซีเมนต์ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งถ้าผสมนานเกินไปจะทำให้ฟองอากาศแตก ปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมก็จะลดลงได้ คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องมีการบ่มด้วยไอน้ำ โดยปริมาณฟองอากาศที่ใส่หรือการออกแบบสัดส่วนผสมขึ้นอยู่กับกำลังอัดที่ต้องการ หน่วงน้ำหนักที่ต้องการ และคำแนะนำจากผู้ผลิตน้ำยา

2.9 ปูนฉาบ

ปูนฉาบ หรือมอร์ตาร์สำหรับงานฉาบ เป็นวัสดุประสานที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ ทราย และ น้ำ อาจผสมวัสดุละเอียดที่บดละเอียดหรือผสมสารเพิ่มลงไปเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ปัจจุบันนิยมใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของปูนฉาบประเภทมอร์ตาร์พลาสติกไซเซเซอร์ (Mortar plasticizer) อุตสาหกรรมก่อสร้างไทย มีการใช้ปูนฉาบในงานผนังและผิวผนังเป็นจำนวนมาก เนื่องจากราคาถูกและค่าแรงที่ใช้ในการฉาบไม่สูงมากนัก โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างที่อยู่อาศัยขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง อาทิเช่น หมู่บ้านจัดสรร อาคารชุด อาคารพาณิชย์ เป็นต้น ซึ่งพบปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ปูนฉาบที่แห้งแล้วมักเกิดการแตกร้าว แตกหลายงา (Hair crack) ทำให้เกิดการหลุดร่อนไม่ยึดเกาะกับผนังหรือวัสดุที่ใช้ก่อผนัง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากอัตราการดูดซับน้ำของวัสดุก่อ และการอุ้มน้ำของปูนฉาบไม่เหมาะสมกัน โดยวัสดุก่อจะดูดซับน้ำจากปูนก่อและปูนฉาบในบริเวณที่สัมผัสกัน ทำให้ปูนก่อและปูนฉาบบริเวณนั้นแห้งเร็วกว่าจุดอื่น หรืออาจเกิดจากสาเหตุอื่น เช่น การยืดหดตัวของปูนจากการได้หรือสูญเสียน้ำ และการยืดหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การแตกร้าวและการหลุดร่อนดังกล่าว ทำให้ผนังขาดความสวยงาม ไม่คงทน

ปูนฉาบที่ดีนั้นต้องเหนียวนุ่ม ก่อและฉาบขึ้น สามารถทำงานได้สะดวกรวดเร็ว มีความชื้นเหลวพอเหมาะที่สามารถจะทำงานได้ มีระยะเวลาการแห้งตัวไม่เร็วหรือช้าจนเกินไป สามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น เมื่อแห้งแล้วจะต้องมีความแข็งแรงพอสมควร ผิวของปูนฉาบจะต้องเรียบเนียนสวยงาม ไม่แตกร้าว หรือแตกหลายงา ปูนฉาบที่ใช้งานโดยทั่วไป คือ ปูนที่ใช้เป็นตัวประสานโดยตรงในการฉาบปูน โดยลักษณะทางวิศวกรรมปูนฉาบจะอยู่ในรูปของมอร์ตาร์

2.10 มอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์

โดยทั่วไปมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับฉาบ ประกอบด้วย ส่วนผสมของวัสดุที่ยึดประสานกับมวลรวมละเอียด เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินทรายและน้ำ ในบางครั้งอาจใช้วัสดุที่ช่วยทำให้คุณสมบัติของมอร์ตาร์ดีขึ้น ในอดีตนิยมใช้ปูนขาว แต่ในปัจจุบันมีการผลิตสารเคมีผสมเพิ่มเพื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้ในงานปูนฉาบ รวมทั้งมีการผลิตปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานฉาบโดยตรง จึงทำให้ความสำคัญของการใช้ปูนขาวลดลง สารผสมเพิ่มที่ใช้ เช่น สารกระจายกักฟองอากาศ และ สารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ (Mortar plasticizer) มีคุณสมบัติในการสร้างฟองอากาศ ทำให้ปูนฉาบขึ้น สามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น [19]

2.11 เพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ (Perlite) มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกา มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีน้ำเป็นส่วนประกอบร้อยละ 2 - 5 โดยประมาณ เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว เกิดตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นเม็ดคล้ายแก้วมีหลายสี การกำเนิด โดยทั่วไปหินเพอร์ไลต์มักเกิดร่วมกับหินภูเขาไฟ [20] โดยเกิดจากการไหลของลาวาที่เกิดร่วมกับแก๊สหินภูเขาไฟ และหินลาวาชนิดอื่น หรือเกิดแทรกอยู่ในหินภูเขาไฟชนิดอื่นๆ หินเพอร์ไลต์ในประเทศไทยมีที่จังหวัดลพบุรี ประโยชน์ โดยทั่วไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้งน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate) ซึ่งมีคุณสมบัติทนไฟ ทนความร้อนได้ดี ใช้ทำฉนวน ผลผลิต ในปี พ.ศ. 2539 ผลิตได้ 1200 ตัน

เป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่นได้ยาก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อนำหินเพอร์ไลต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 - 1100 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้หินเพอร์ไลต์ขยายตัวได้ตั้งแต่ 4 - 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้แปรสภาพเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง มี น้ำหนักเบา ทนไฟ ทนความร้อน และมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส จึงถูกเรียกว่า เพอร์ไลต์ขยายตัว (Expanded perlite) หรือเรียกกันสั้นๆ ว่าเพอร์ไลต์

2.12 สรุป

คอนกรีตมวลเบาไม่ได้เป็นสิ่งที่ใหม่นักในสังคมอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย อย่างไรก็ตามในสังคมนี้ ยังเป็นสังคมผู้บริโภคคอนกรีตมวลเบาที่ขาดความเข้าใจถึงพฤติกรรมเป็นส่วนใหญ่ ผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาเองก็เป็นผู้บริโภคเทคโนโลยีการผลิตจากต่างประเทศทั้งสิ้น ปัจจุบันโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาขาดองค์ความรู้ในการใช้งานวัสดุก่อสร้งประเภทนี้ มีการตรวจพบว่ามีปัญหาการรั่วของโครงสร้างเสมอจนน้ำไหลซึมผ่านได้ เมื่อการใช้คอนกรีตงานคอนกรีตมวลเบาเป็นผนังที่มี

วัตถุประสงค์เป็นฉนวนความร้อน สาเหตุเหล่านี้ทำให้การใช้งานคอนกรีตมวลเบาในประเทศ ได้รับความนิยมในวงที่จำกัด

นอกจากปัญหาที่ได้กล่าวมา ยังมีปัญหาอื่นๆ ของคอนกรีตมวลเบาที่ทั่วโลกได้พยายามวิจัย เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้งานคอนกรีตมวลเบามากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความคงทนของคอนกรีตมวลเบาในสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่นการเผชิญกับน้ำทะเล และซัลเฟต คอนกรีตมวลเบาจะทนต่อสภาพแวดล้อมในลักษณะนี้ได้น้อยกว่าคอนกรีตปกติ [7-8] ปัญหาของคอนกรีตมวลเบายังได้รับความสนใจในปัจจุบัน และถือได้ว่าเป็นเรื่องที่ทันสมัยเสมอ ในปี ค.ศ. 2006 ที่ผ่านมามีความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตให้มีคุณสมบัติที่ไหลได้ดี เทเข้าแบบได้ง่าย แต่ยังคงมีกำลังอัดที่สูง และคุณสมบัติด้านอื่นๆ ที่เทียบเท่าคอนกรีตปกติ [9] นอกจากนี้ในปีเดียวกัน มีงานวิจัยในประเทศอังกฤษที่พยายามที่จะใช้เถ้าก้นเตาจากการเผาขยะ เป็นมวลรวมในการทำคอนกรีตมวลเบาเพื่อลดต้นทุนในการผลิต [10-11] รวมทั้งยังมีงานวิจัยอีกมากมายที่ตีพิมพ์ในเรื่องการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตมวลเบา เช่น Nambiar และคณะ [12] ก็ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC ซึ่งเป็นระบบเดียวกันกับโรงงานอุตสาหกรรมมีส่วนร่วมในโครงการนี้ ในขณะเดียวกัน นักวิจัยหลายท่านได้ให้ความสนใจในการศึกษาเรื่องกำลังอัด ความทนทาน และการทำนายพฤติกรรมของกำลังของคอนกรีตมวลเบา [13-17]

สำหรับปัญหาหลักที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ ซึ่งเป็นปัญหาที่ภาคอุตสาหกรรมกำลังเผชิญอยู่ คือปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตมวลเบา หรือความเสถียรเชิงปริมาตร หรือเชิงมิติของคอนกรีตมวลเบานั้นเอง งานวิจัยในต่างประเทศก็แสดงให้เห็นถึงการมีปัญหาดังกล่าวอยู่ทั่วโลก มีความพยายามที่จะแก้ปัญหานี้โดยการเส้นใยแก้วมายึดรั้งการหดตัว ซึ่งก็ประสบความสำเร็จด้วยดีแต่ยังคงมีต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน [18] ในปี 2006 Gesoglu และคณะ [19] ได้ปรับปรุงงานวิจัยของเขาและพบว่าการใช้สารผสมเพิ่มบางชนิดสามารถยืดระยะเวลาการแตกร้าวออกไปได้ ซึ่งส่งผลให้ขนาดของการร้าวเล็กลง

การลดการแตกร้าวของปูนฉาบ/ปูนก่อสามารถทำได้โดยการเพิ่มสารผสมเพิ่ม สารเคมีผสมเพิ่มหรือวัสดุผงอื่น เช่น เถ้าลอยก็สามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของปูนฉาบได้ [7] .

งานวิจัยนี้จึงพยายามจะลดปัญหาการร้าวของการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาในระบบคอนกรีตมวล การวิจัยจะนำไปสู่การส่งเสริมให้มีการใช้งานคอนกรีตมวลเบาในอุตสาหกรรมก่อสร้างมากขึ้นและลดปัญหาการซ่อมแซม ซึ่งนำไปสู่การประหยัดพลังงานภายในอาคารมากขึ้นเช่นกัน

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

รายละเอียดขั้นตอนการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน ได้แก่ การทดลองด้านหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา และการพัฒนามอร์ตาร์ปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา ขั้นตอนการทดลองส่วนใหญ่จะนำเสนอในบทนี้ แต่เนื่องจากการทดลองประกอบด้วยหลายส่วน ดังนั้นรายละเอียดขั้นตอนการทดลองที่จำเพาะจะได้นำเสนอไว้ในแต่ละบทด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถเข้าใจการทดลองต่างๆ ได้ง่ายขึ้น

3.1 แผนการทดสอบ

ในการดำเนินงานนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. การทดลองเพื่อลดการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา ได้กำหนดการทดสอบเฉพาะคอนกรีตมวลเบาแบบผสมโฟม โดยใช้สารเพิ่มฟองที่ได้จากบริษัท สารลดการหดตัวเป็นสารเคมีโพรพิลีนไกลคอล (PG) ไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) สารไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ (Dipropylene glycol tert-butyl ethers, DTBE) และสารลดการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage reducing agent, SR) ในปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยใช้ค่า k-factor เท่ากับ 0.5 โดยใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เท่ากันแทนที่ทราย และใช้สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer, SP) ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

2. การพัฒนามอร์ตาร์ปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบา ได้กำหนดการทดสอบเฉพาะส่วนผสมของปูนฉาบใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อทราย(รวมเพอร์ไลต์เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยเช่นกัน)เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยใช้เป็นสารปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน เพอร์ไลต์เป็นวัสดุเฉื่อยใช้แทนที่ทรายในอัตราส่วนเพอร์ไลต์ต่อทรายเท่ากับ 0.1:2.9 และ 0.2:2.8 โดยน้ำหนัก สารมอร์ตาร์พลาสติไซเซอร์ใช้ในปริมาณร้อยละ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1

3.2 วัสดุ

ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ถ้าวางจากแม่แบบ เพอร์ไลต์ขยายตัวที่ขายทั่วไป ทราายแม่น้ำที่หลายความละเอียด น้ำประปา สารมอร์ตาร์ทพลาสติกไซเซอร์ที่ขายทั่วไป สารเพิ่มฟองจากบริษัท สารเคมีโพรพิลีนไกลคอล (PG) ไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) สารไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ (Dipropylene glycol tert-butyl ethers) และสารลดการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage reducing agent, SR) ที่ขายทั่วไป

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ้าวาง และเพอร์ไลต์ขยายตัว ทำโดยวิธี X-ray fluorescent ผลการทดสอบให้ไว้ในตารางที่ 7.1 ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าวาง และเพอร์ไลต์ ตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement ทดสอบความละเอียดวิธีเบลนตามมาตรฐาน ASTM C 204-96 Standard Test Method for Density of Portland Cement by Air Permeability Apparatus ทดสอบร้อยละค่าบดตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C204-07 Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus และทดสอบค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดย Particle sizer analysis ผลการทดสอบให้ไว้ในตารางที่ 7.2

ขนาดโมดูลัสความละเอียดของทราย ทำตามมาตรฐาน ASTM C136-95a Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates และทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C128-93 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Aggregate และปรับส่วนผสมของทรายให้มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.75 และมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C144-93 Standard Specification for Aggregate for masonry mortar

3.3 การเตรียมสารก่อโฟม

ใช้สารทำให้เกิดโฟมต่อน้ำ 1:40 ส่วน โดยน้ำหนัก ใช้ถังโฟมอัดอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.1 ความดันของอากาศ 5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โฟมมีความหนาแน่น 45-50 กรัม/ลิตร มีลักษณะเป็นฟองขนาดเล็ก ละเอียด ไม่แตกง่ายเมื่อสัมผัส หรือตีด้วยเครื่องผสมดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ถังโฟมอัดอากาศ



รูปที่ 3.2 ลักษณะโฟมที่มีเนื้อละเอียดประกอบด้วยฟองขนาดเล็ก

3.4 การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

ทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน ASTM C567-05a Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete ทดสอบการดูดน้ำของคอนกรีตมวลเบาอิงมาตรฐาน ASTM C642-06 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete โดยคอนกรีตที่ใช้ทดสอบจะถูกปล่อยให้แห้งในห้องทดลองและจะแช่ให้ดูดน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ตามมาตรฐาน BS EN 12390-3:2009 โดยคอนกรีตที่ใช้ทดสอบกำลังอัดจะบ่มขึ้น จนครบอายุการทดสอบ ทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาโดยอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596-01 “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement” โดยใช้แท่งทดสอบขนาด 7.62×7.62×25.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร (3×3×10 ลูกบาศก์นิ้ว) ทำการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการแกะแบบ แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้นำไปทดสอบการหดตัว โดยนำไปบ่มในห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส วัดระยะการหดตัวดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 คอนกรีตมวลเบาภายใต้การรับแรงอัด



รูปที่ 3.4 การวัดระยะการหดตัว

3.5 การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

ทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนฉาบทั้งในสภาพสด เหลวปั้นได้ และในสภาพที่แข็งตัวแล้ว คุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนฉาบในสภาพสดที่ทำการทดสอบประกอบด้วย ทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์โดยใช้โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ (Flow Table Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C230-90 Standard Specification for Flow Table for Use in Test of Hydraulic Cement ทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1506-03 Standard Test Method for Water Retention of Hydraulic Cement-based Mortars and Plasters ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1506-03

ทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกมอร์ตาร์ ที่อายุครบ 3, 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109-95 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar ทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469-94 Standard Test Method for Statics Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression

ในขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบการฉาบจริงโดยการขึ้นแผงผนังบล็อกมวลเบาขนาด 1x1 ตารางเมตร ฉาบหนา 1 เซนติเมตร ก่อนฉาบปูนได้พ่นน้ำผนังบล็อกให้พอหมาด เมื่อปูนฉาบแข็งตัวดีแล้ว พิจารณาสีและรอยแตกร้าว

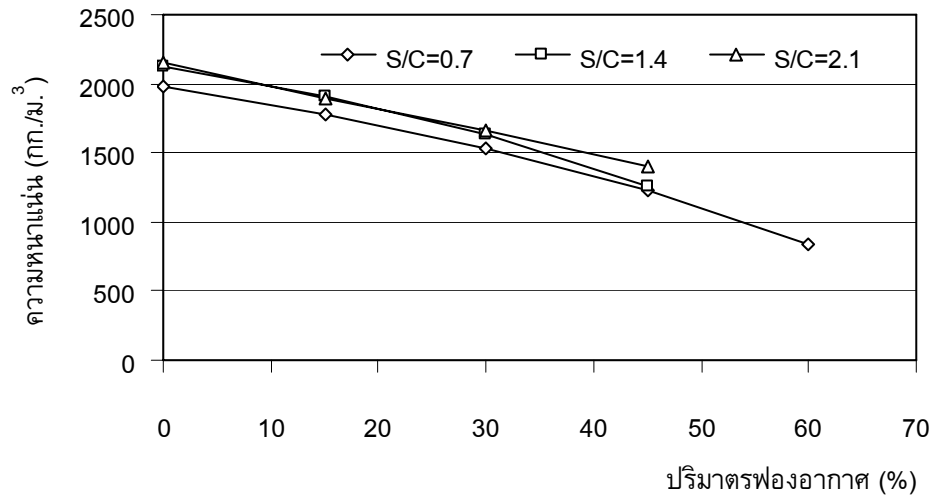
คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบา

ในการศึกษาการลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา ผู้วิจัยได้ทดลองทำคอนกรีตมวลเบาหลายอัตราส่วนผสม รวมถึงส่วนผสมจากการแนะนำโดยผู้ประกอบการ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาแบบนี้ และเพื่อที่จะสามารถเลือกส่วนผสมสำหรับการศึกษาต่อไปได้อย่างเหมาะสม

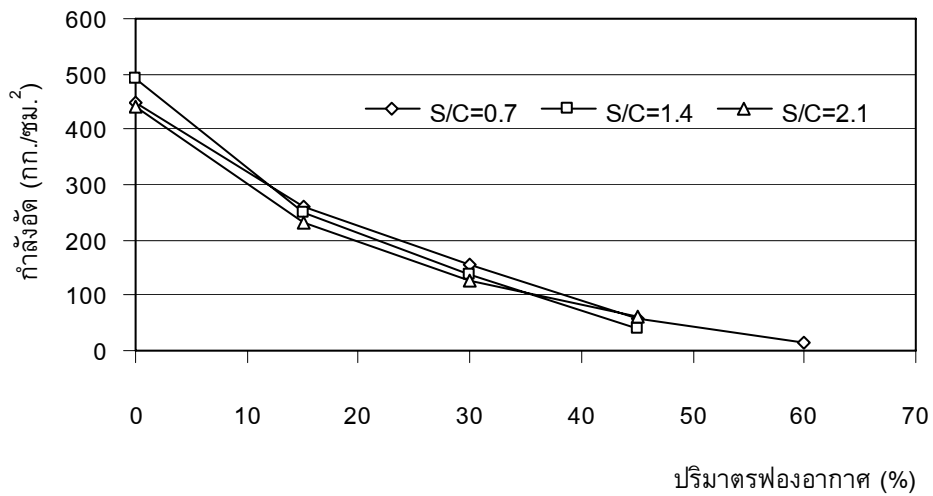
4.1 ผลของปริมาณโฟมต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

ปริมาณของโฟมหรือฟองอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำ มีความเบา ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน มีค่าระหว่าง 840-2,160 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่วนกำลังอัดมีค่าระหว่าง 14-490 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) 0.7-2.1 โดยการเพิ่มปริมาณโฟมในส่วนผสมจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำลง หรือเบา แต่ทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเป็นอย่างมาก เช่นการเพิ่มปริมาณโฟมร้อยละ 15 โดยปริมาตรของคอนกรีตทำให้ความหนาแน่นคอนกรีตลดลงจาก 2200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็น 1900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ค่ากำลังอัดลดลงจาก 450 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็น 250 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณโฟมในส่วนผสม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณทรายและโฟมในส่วนผสม พบว่าปริมาณทรายมีผลต่อกำลังอัดเช่นกัน ค่ากำลังอัดและความหนาแน่นมีความแตกต่างกันเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) ต่างกัน แต่ปริมาณโฟมมีอิทธิพลต่อกำลังอัดและความหนาแน่นมากกว่า ดังนั้นในการพัฒนาส่วนผสมของมวลเบาควรให้ความสำคัญต่อปริมาณฟองอากาศและอัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C)

อัตราส่วน S/C มักจะเหมาะสมกับส่วนผสมที่มีความหนาแน่นสูง ที่ความหนาแน่นต่ำอัตราส่วน S/C สูงจะส่งผลให้ส่วนผสมเข้ากันได้ยากขึ้น อีกทั้งมีความหนืดมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ปริมาตรฟองอากาศในส่วนผสมมีค่ามากขึ้นเกินกว่าร้อยละ 45 โดยปริมาตรแล้วการผสมให้เข้ากันทำได้ยากส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ปริมาณฟองอากาศเกินกว่าร้อยละ 45 โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบว่าที่ความหนาแน่นต่ำ อัตราส่วน S/C ที่ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 0.7 ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นสูงควรใช้อัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์สูง และ ควรปรับลดอัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์ลงเมื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำลง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบา
ที่อายุ 28 วัน



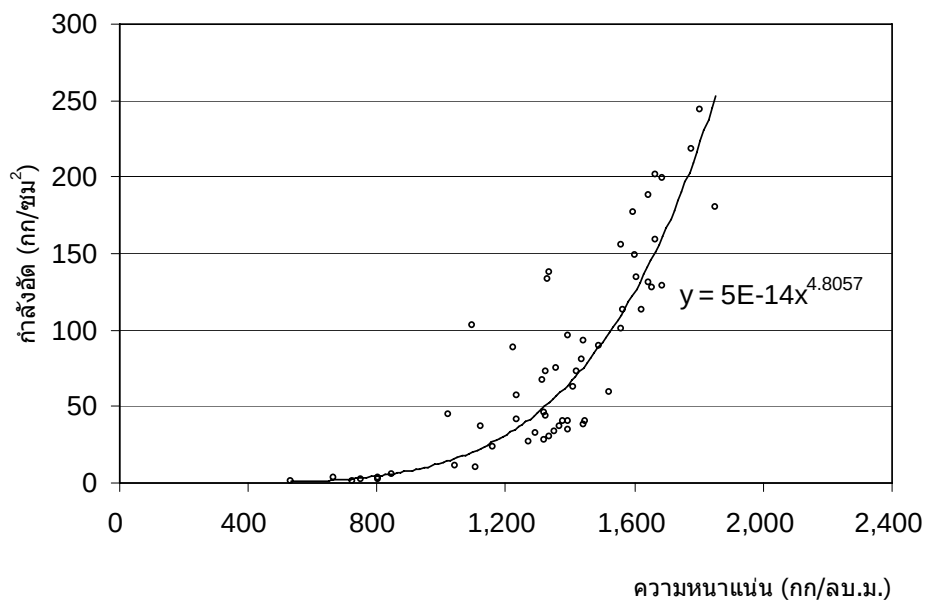
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบา
ที่อายุ 28 วัน (เมื่อใช้อัตราส่วน W/C = 0.51)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (มอก. 1505-2541) ในการผลิตบล็อกคอนกรีตมวลเบาผลิตโดยระบบไอน้ำความดัน (Autoclaved aerated concrete, AAC) สำหรับคอนกรีตมวลเบาชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.8 โดยมีค่ากำลังอัดระหว่าง 4-5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ($\cong 40-50$ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ย 710-800 กิโลกรัม/

ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นในการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้โฟมเป็นส่วนผสม จึงต้องมีการคำนวณและออกแบบให้ถูกต้อง เพื่อสามารถทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นที่ไม่สูงมากนัก และให้กำลังอัดใกล้เคียงกัน จากการผลิตจะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาแบบใช้โฟมเป็นส่วนผสม มีขั้นตอนการผลิตที่ง่าย เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผลิตโดยระบบไอน้ำความดัน

4.2 กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา

จากการผสมคอนกรีตมวลเบา หลายอัตราส่วนแล้วทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน แสดงได้ในรูป 4.3



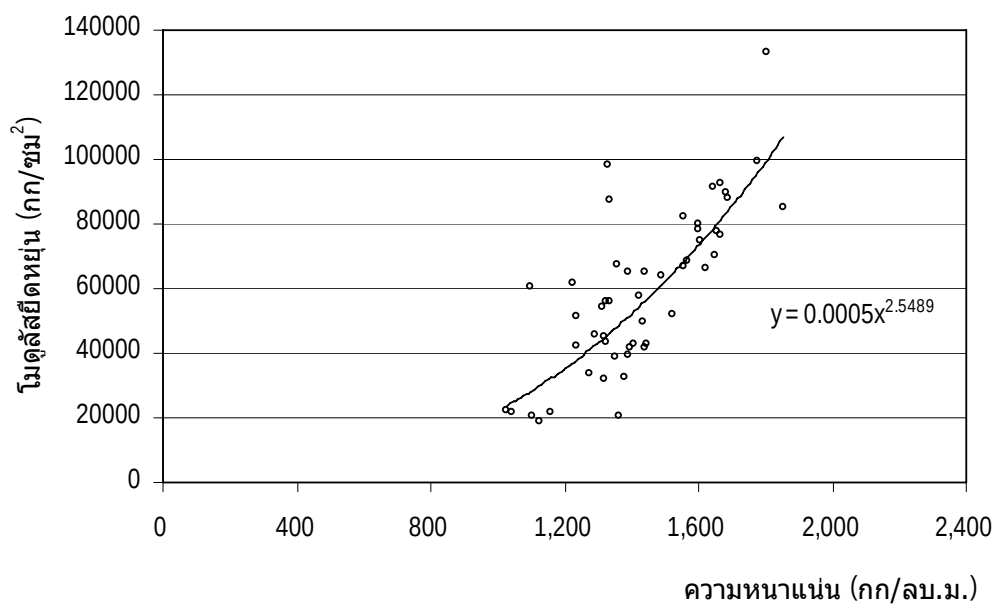
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นสูงจะสามารถรับแรงได้มาก เนื่องจากมีช่องว่างหรือรูพรุนที่เกิดจากฟองอากาศน้อย โดยช่วงความหนาแน่นต่ำกว่า 800-1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร คอนกรีตจะรับกำลังได้น้อย ในขณะที่การเพิ่มความหนาแน่นในช่วง 1200 - 1,800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความชันของกราฟความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงของค่ากำลังอัดสูงสุด (Upper bound) เพิ่มจากประมาณ 80 ถึง 200 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งหากปรับปรุงส่วนผสมในช่วงความหนาแน่นนี้ จะทำให้มวลเบาสามารถรับกำลังอัดที่สูงขึ้นได้ โดยมีข้อสังเกตคือส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงเป็นที่น่าสนใจในช่วงนี้จะมีค่าปริมาณน้ำสูงและจะทำให้การผสมทำได้ง่าย การเทเข้าแบบก็ทำได้ง่ายด้วย

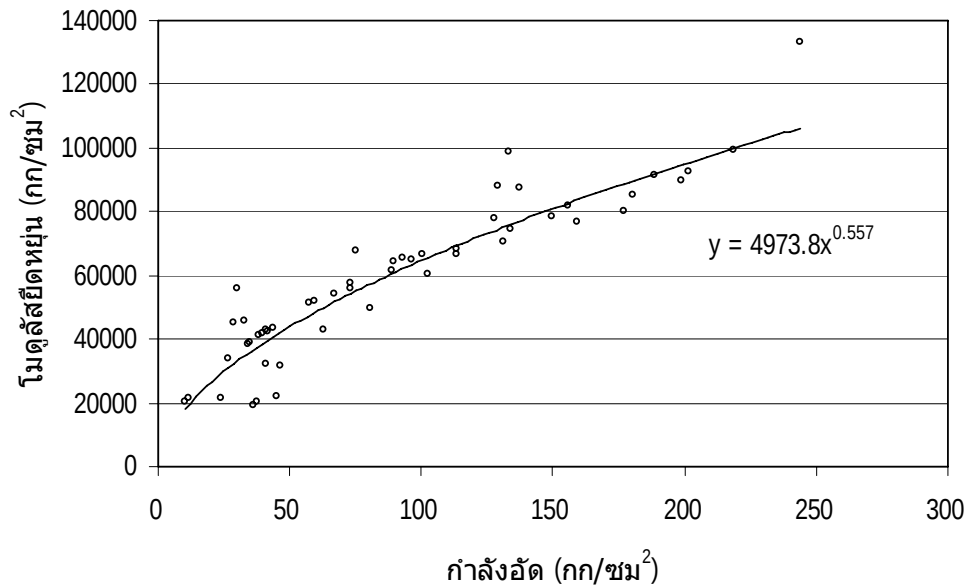
นอกจากนี้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็มีผลต่อกำลังอัด เมื่อต้องการคอนกรีตมวลเบาที่รับกำลังอัดได้สูง สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม และลดปริมาณทราย อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงราคาต้นทุน และกำลังอัดที่ต้องการด้วย ซึ่งตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบา ต้องมีกำลังอัดต่ำสุดที่ประมาณ 35 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาจำหน่ายทั่วไปมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ประมาณ 40 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

4.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบา

จากการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5, และ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาแน่น



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัด

จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสมีกำลังลดลงเมื่อความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสจะแปรผันตามกำลังอัด โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงตามการลดลงของกำลังอัด คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ทดสอบมีค่าความหนาแน่นระหว่าง 900 – 1800 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังอัดประลัย 15-250 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 20000-135000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

เราอาจทำนายค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = 4974f'_c{}^{0.557} \quad (4.1)$$

หรือ $E = 0.0005w^{2.55} \quad (4.2)$

โดย E = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบา (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร.)

f'_c = กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร.)

W = ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

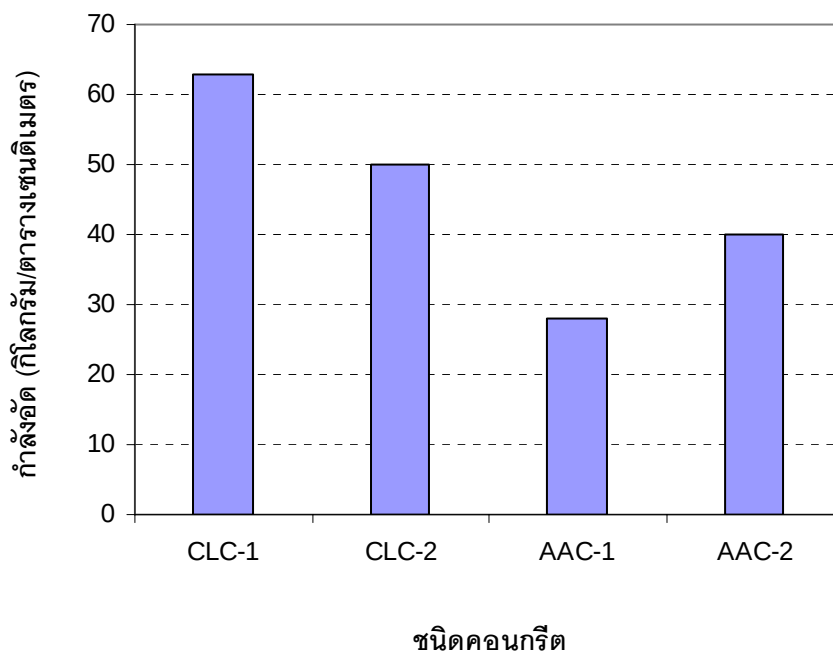
ACI 318 ได้แนะนำสมการของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาทั่วไป ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาดังนี้

$$E = 0.043w^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (4.3)$$

4.4 การสำรวจการใช้งานคอนกรีตมวลเบาในภาคสนาม

จากการสำรวจสถานที่ก่อสร้างโดยวิธีการสอบถามและสังเกต จากสถานที่ก่อสร้าง 25 โครงการ พบว่าในงานก่อผนังมวลเบา ใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยระบบเซลลูโลส (Cellular Lightweight Concrete, CLC) จำนวน 2 โครงการ และผลิตภัณฑ์บ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูง (Autoclaved Aerated Concrete, AAC) จำนวน 23 โครงการ ในงานฉาบใช้ปูนฉาบสำเร็จในการฉาบทุกโครงการ

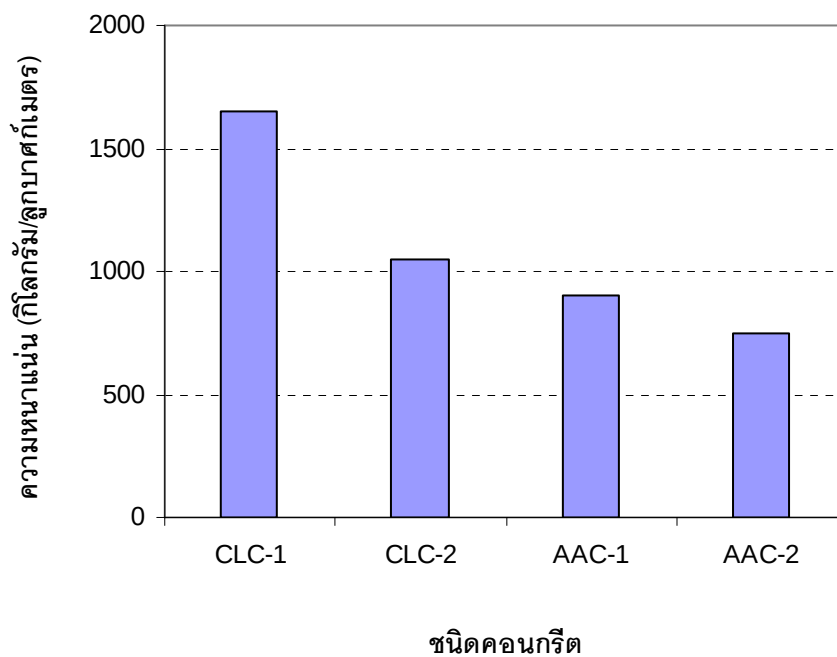
ทำการสุ่มเลือกคอนกรีตบล็อกในท้องตลาด 4 ชนิดๆ ละ 5 ตัวอย่าง ประกอบด้วย ชนิดที่ 1 (CLC-1) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยระบบเซลลูโลส ใช้สำหรับโครงสร้างกำแพงภายนอกองค์อาคาร ชนิดที่ 2 (CLC-2) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยระบบเซลลูโลส ใช้สำหรับโครงสร้างผนังภายในองค์อาคาร ส่วนชนิดที่ 3 (AAC-1) และชนิดที่ 4 (AAC-2) เป็นผลิตภัณฑ์ด้วยไอน้ำที่แรงดันสูง โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทดสอบกำลังอัด เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ ได้ค่ากำลังอัดดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาในท้องตลาด

จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่จำหน่ายในท้องตลาดพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาชนิด CLC-1 มีค่าเท่ากับ 62 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาชนิด CLC-2 มีค่าเท่ากับ 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาชนิด AAC-1 มีค่าเท่ากับ 28 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาชนิด AAC-2 มีค่าเท่ากับ 40

กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 1620, 1030, 890 และ 750 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากผลการทดสอบพบว่าส่วนใหญ่การผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยระบบไอน้ำที่แรงดันสูง (AAC) จะได้หน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่าการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยระบบเซลลูโลส (CLC) ส่วนกำลังอัดนั้นขึ้นอยู่กับชั้นคุณภาพของผู้ผลิตจะทำการผลิตตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาในท้องตลาด

4.5 การศึกษาเบื้องต้นการฉาบคอนกรีตมวลเบาในสถานที่ก่อสร้าง

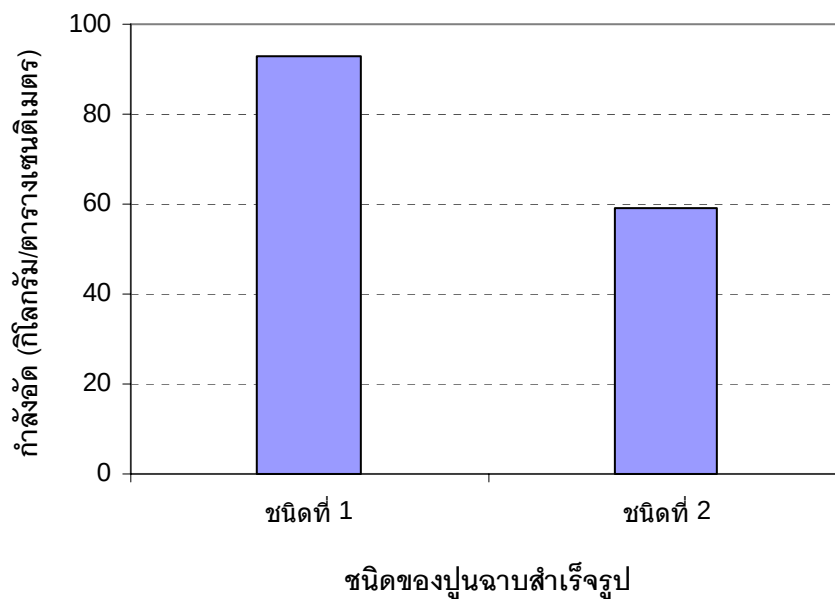
ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นโดยเก็บตัวอย่างปูนฉาบสำเร็จรูปจากสถานที่ก่อสร้างที่มีการฉาบคอนกรีตมวลเบา ใช้สำหรับโครงสร้างผนังขององค์อาคาร โดยเลือกจากสถานที่ก่อสร้างที่มีการควบคุมอย่างดีจากผู้ควบคุมงาน ทุกส่วนผสมในการสำรวจทำการผสมโดยช่างผู้ชำนาญงานจากโครงการที่สำรวจดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 โดยหาค่าการไหลแผ่ และกำลังอัดของปูนฉาบที่ใช้งานจริงจากสถานที่ก่อสร้าง 2 ที่ จากการศึกษพบว่าโครงการทั้ง 2 ใช้ปูนฉาบสำเร็จรูปแต่ต่างชนิดกัน ปูนฉาบสำเร็จรูปถึงแม้ราคาแพงกว่าแต่สามารถลดปัญหาการแตกร้าว และทำให้สามารถส่งมอบงานได้ ค่าการไหลแผ่ที่ใช้มีค่าเท่ากับร้อยละ 75-85 เก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัด ที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 60

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า กำลังอัดที่เวลา 7 วัน ของปูนฉาบสำเร็จรูป ชนิดที่ 1 และ 2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 93 และ 59 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร จะเห็นได้ว่าปูนฉาบสำเร็จรูปชนิดที่ 1 มีกำลังอัดสูงกว่า ชนิดที่ 2 สูงถึงร้อยละ 36.6 และจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 การการพัฒนาของกำลังอัดของปูนฉาบสำเร็จรูปชนิดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 93, 96.8 และ 103.2 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่เวลา 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

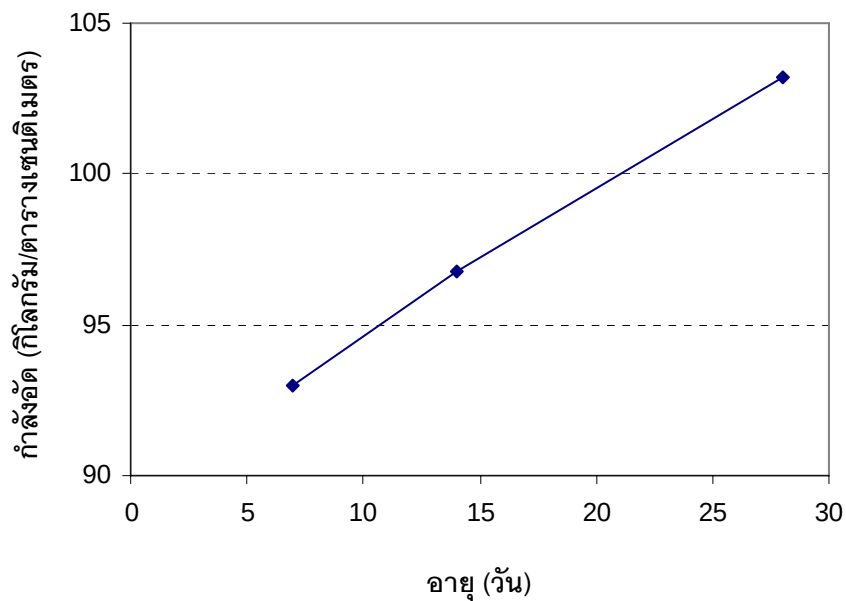
จากการศึกษาเบื้องต้นทำให้ทราบลักษณะการฉาบคอนกรีตมวลเบา ปูนฉาบที่ใช้ และได้ค่าการไหลแผ่ของปูนฉาบที่ใช้ร้อยละ 75-85 และค่ากำลังอัดที่เวลา 7 วันในช่วง 59- 93 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร สำหรับการนำไปศึกษาคุณสมบัติของปูนฉาบที่จะทดลองต่อไป



รูปที่ 4.9 การผสมปูนฉาบสำเร็จรูปในท้องตลาดที่ภาคสนามโครงการก่อสร้าง



รูปที่ 4.10 กำลังอัดของปูนฉาบสำเร็จรูปที่เวลา 7 วัน



รูปที่ 4.11 การพัฒนาของกําลังอัดของปูนฉาบสำเร็จรูปชนิดที่ 1

4.6 การศึกษาการยึดเกาะระหว่างปูนฉาบสำเร็จรูปและคอนกรีตมวลเบา

ได้ทำการศึกษาการยึดเกาะระหว่างปูนฉาบสำเร็จรูปและคอนกรีตมวลเบา โดยใช้การทดลองแบบ Indirect bond strength แบบ shear ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยตัดคอนกรีตมวลเบาให้ได้ผิวหน้าเอียง 45 องศา และหล่อปูนฉาบสำเร็จรูปเพื่อให้ได้ตัวอย่างสำหรับการทดสอบที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบแสดงว่าโดยภาพรวมแล้วในกรณีคอนกรีตบล็อกที่ใช้สำหรับโครงสร้างผนังภายในองค์อาคาร จะมีกําลังอัดต่ำกว่าปูนฉาบสำเร็จรูป ดังนั้นรูปแบบของการวิบัติของระนาบของหน้าตัดรับแรงเฉือนจึงขนานกับหน้าตัดสัมผัสระหว่างคอนกรีตบล็อกและปูนฉาบสำเร็จรูปเป็นมุม 45 องศา โดยรอยแตกส่วนใหญ่อยู่ในคอนกรีตบล็อกดังแสดงในรูป รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การทดสอบการยึดเกาะระหว่างปูนฉาบสำเร็จรูปและคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผิวหน้าที่วิบัติจากการทดสอบการยืดเกาะของคอนกรีตบล็อกและปูนฉาบ
สำเร็จรูป

4.7 การศึกษาข้อมูลอุณหภูมิของผิวผนังคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉาบ

ปัจจัยของการแตกร้าวของปูนฉาบที่สำคัญอันหนึ่งคืออุณหภูมิของผิวผนังคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉาบ ที่อุณหภูมิสูงการสูญเสียน้ำจะสูงและจะทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ นอกจากนี้ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวันจะทำให้ปูนฉาบที่อายุน้อยที่ยังมีกำลังต่ำแตกร้าวได้เช่นกัน ได้ทำการวัดอุณหภูมิของผิวผนังคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉาบ และวัดความชื้นบริเวณนั้น โดยใช้เครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 4.14

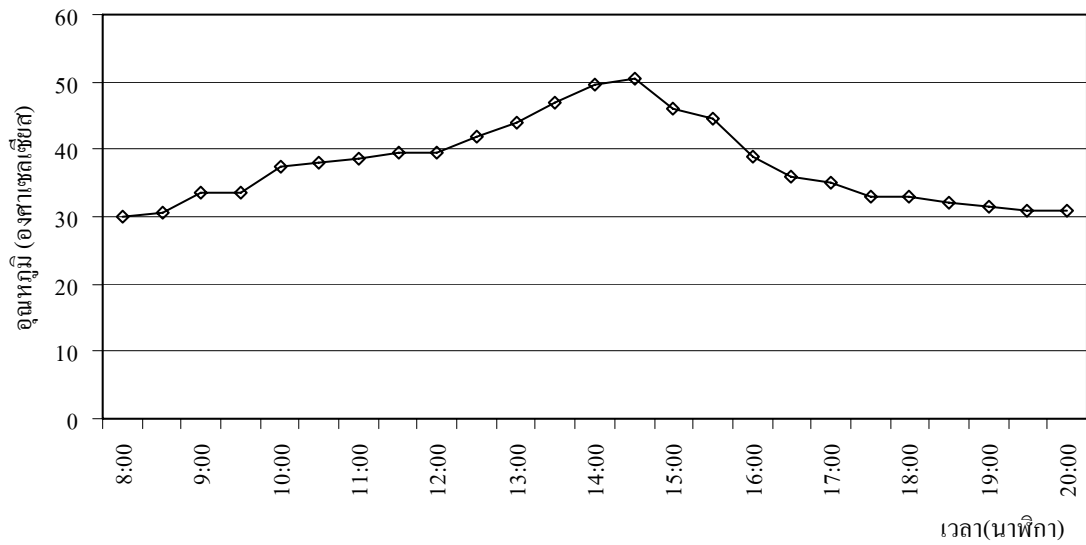


ก. เครื่องวัดความชื้น

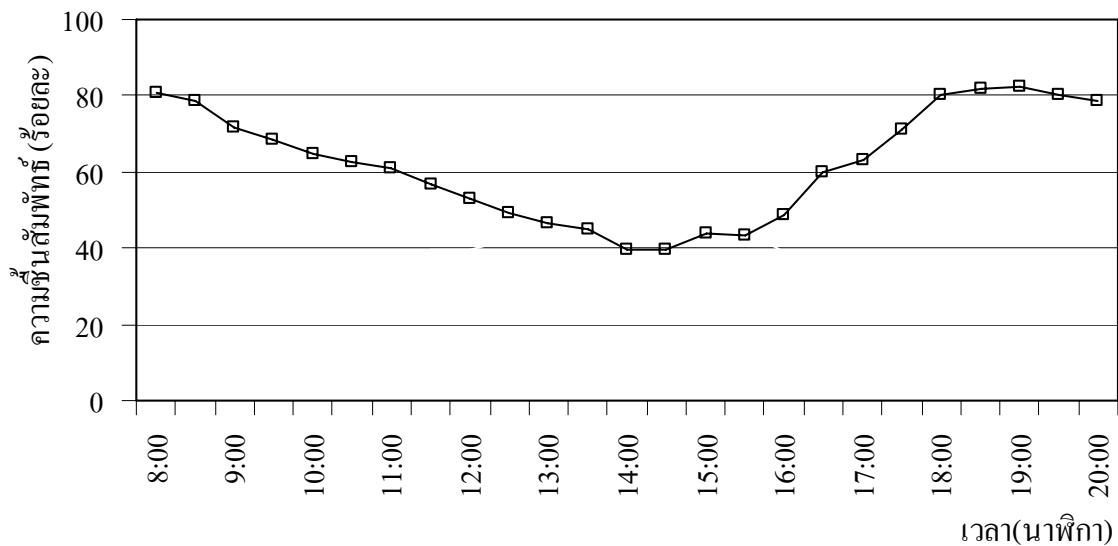


ข. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์

รูปที่ 4.14 เครื่องมือการวัดอุณหภูมิและความชื้น



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิที่ผิวของผนังคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.16 ความชื้นสัมพัทธ์ที่บริเวณผนังคอนกรีตมวลเบา

รูปที่ 4.15 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวผนังคอนกรีตมวลเบาในวันที่อากาศดี กลางแดดร้อนปกติ อุณหภูมิที่ผิวผนังคอนกรีตมวลเบาที่ถูกแสงแดดโดยตรงจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส และมีความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.16 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ที่บริเวณผนังคอนกรีตมวลเบา ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 80 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 40 ดังนั้นในการขบปูนจึงต้องมีการบังแดดและลมเพื่อลดการสูญเสียน้ำและความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส และมีการให้ความชื้นกับปูนฉาบ

การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง

ในบทนี้กล่าวถึงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่น 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่วนผสมเป็นส่วนผสมที่ทางบริษัทแนะนำ และทางผู้วิจัยได้พิจารณาและทำการทดลองผสมเบื้องต้นแล้วพบว่าเป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดพอใช้งานได้ เหมาะสำหรับการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต โดยอิทธิพลของสารเคมีผสมเพิ่มแต่ละตัวต่อการลดการหดตัวจะสามารถเปรียบเทียบกันได้ง่าย ส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม ททราย 1023 กิโลกรัม น้ำ 161 กิโลกรัม และสารเพิ่มฟอง (Foaming agent) 16.9 กิโลกรัม โดยทำการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต กำลังอัด และค่าการดูดซึมน้ำ ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

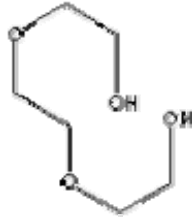
5.1 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบา

ในการทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา จะอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596-01 “Standard test method for drying shrinkage of mortar containing hydraulic cement” โดยวัดการลดลงของความยาวตัวอย่างทดสอบ ความยาวที่ลดลงหรือการหดตัวเกิดจากหลายปัจจัย ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นควบคุม ทำการเปรียบเทียบค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมสารผสมเพิ่มประเภทต่างๆ กับคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมสารผสมเพิ่ม

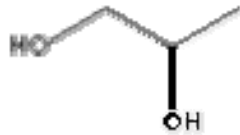
งานวิจัยนี้ใช้โพรพิลีนไกลคอล (PG) ไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) สารไดโพรพิลีนไกลคอลเทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ (Dipropylene glycol tert-butyl ethers) และสารลดการหดตัวที่หาซื้อได้ (SR) ปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาผลของสารเคมีดังกล่าวต่อการหดตัวและคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตมวลเบาที่มีขนาด $7.62 \times 7.62 \times 25.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ($3 \times 3 \times 10$ ลูกบาศก์นิ้ว) นอกจากนี้ยังใช้แก้วลอยที่ร้อยละ 15 และร้อยละ 30 แทนที่ปูนซีเมนต์ มาใช้ประโยชน์มากขึ้น เพื่อลดปริมาณของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมคือแก้วลอย ซึ่งเป็นการลดของเสียที่จะปล่อยออกสู่ชุมชนและสิ่งแวดล้อม ทั้งยังเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ โดยผลที่ได้คาดหวังจะทำให้ผู้บริโภคมีความมั่นใจในคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากโฟมอากาศ (Cellular lightweight concrete) มากขึ้น

สูตรโครงสร้างและสูตรโมเลกุลของสารผสมเพิ่มที่ใช้เป็นดังต่อไปนี้

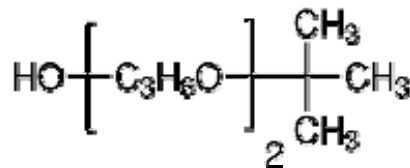
- ไตรเอทิลีนไกลคอล ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) มีมวลโมเลกุล = 150.17 กรัม/โมล



- โพรพิลีนไกลคอล ($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH}$) มีมวลโมเลกุล = 76.09 กรัม/โมล



- ไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ ($\text{C}_{10}\text{H}_{22}\text{O}_3$) มีมวลโมเลกุล = 190.28 กรัม/โมล



5.1.1 คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

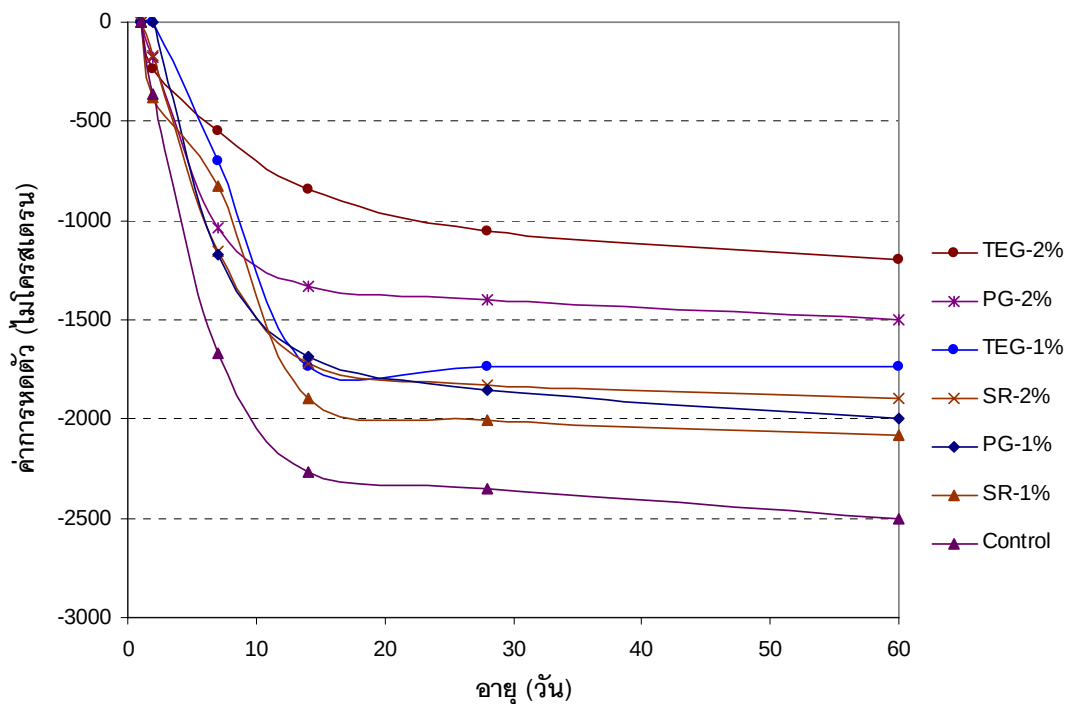
การศึกษาการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาขนาด $7.62 \times 7.62 \times 25.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ($3 \times 3 \times 10$ ลูกบาศก์นิ้ว) ที่ไม่มีการผสมเถ้าลอย และมีการเติมสารผสมเพิ่มทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยทำการวัดค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุการบ่มที่ 1, 2, 7, 14, 28 และ 60 วัน ค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาได้ผลดังตารางที่ 5.1 และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.1 ส่วนไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ทำให้โฟมยุบตัว คอนกรีตจับตัวกันเป็นก้อนและเนื้อคอนกรีตแข็งเร็ว จนไม่สามารถเทลงแบบได้ ดังนั้นจึงไม่รายงานค่าการหดตัวของคอนกรีตผสมสารดังกล่าว

ตารางที่ 5.1 ค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมสารผสมเพิ่มเพื่อลดการหดตัว ในอัตราร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ส่วนผสม	ค่าการหดตัว (ไมโครสเตรน)					
	1 วัน	2 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
PG-1%	0	0	-1175	-1688	-1850	-2000
PG-2%	0	-180	-1034	-1334	-1400	-1500
TEG-1%	0	0	-700	-1740	-1740	-1740
TEG-2%	0	-240	-550	-840	-1050	-1200
SR-1%	0	-383	-827	-1899	-2004	-2084
SR-2%	0	-166	-1155	-1718	-1829	-1900
Control	0	-362	-1666	-2268	-2348	-2500

จากการศึกษาผลของการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอย ที่แสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าคอนกรีตที่ควบคุม คือ ไม่ใส่สารลดการหดตัว มีการหดตัวสูงที่อายุการบ่ม 60 วัน คือมีการหดตัวที่ 2500 ไมโครสเตรน (0.0025 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร หรือเท่ากับ การหดตัวที่ร้อยละ 0.25) เมื่อใช้ปริมาณไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ การหดตัวลดลงเป็น 1,740 ไมโครสเตรน ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่ผสมไตรเอทิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2 นั้นมีค่าการหดตัวน้อยที่สุดคือที่ 1200 ไมโครสเตรน

ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่ผสมโพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 1 ให้ค่าการหดตัวที่ 2000 ไมโครสเตรน เมื่อเพิ่มโพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2 พบว่าค่าการหดตัวลดลงเหลือ 1500 ไมโครสเตรน โดยค่าการหดตัวเริ่มคงที่ที่อายุคอนกรีต 28 วัน หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5.1 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบา (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) : ไม่ผสมเถ้าลอย

ส่วนสารลดการหดตัวที่ใช้กับคอนกรีตทั่วไป (SR) ที่ปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของ ปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการหดตัวลดลงเมื่อใช้ในปริมาณมากขึ้น คือมีค่า 2080 และ 1900 ไมโครสเตรน ตามลำดับ การใช้สารลดการหดตัวที่ใช้กับคอนกรีตทั่วไปมีผลเสียต่อฟองอากาศที่ใช้ผสมคอนกรีต เนื่องจากสารนี้ทำให้ฟองอากาศยุบตัว ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมมากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ เพื่อให้คอนกรีตมีความหนาแน่นตามที่กำหนด ดังนั้นสารชนิดนี้จึงไม่เหมาะสำหรับคอนกรีตมวลเบา

จากผลการทดสอบค่าการหดตัวพบว่าการใช้ปริมาณสารผสมเพิ่มที่มากขึ้น คือที่ร้อยละ 2 โดย น้ำหนักปูนซีเมนต์ ช่วยลดการหดตัวได้มากกว่าเมื่อใช้ในปริมาณน้อย ส่วนไตรเอทิลีนไกลคอลมีผล ต่อการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ดีกว่า SR กับโพรพิลีนไกลคอล ซึ่งมีสาเหตุจากไตรเอทิลีน ไกลคอล TEG เป็นโมเลกุลสายยาว มีมวลโมเลกุล 150.17 กรัม/โมล ในขณะที่สารลดการหดตัว SR เป็นสารผสมที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า TEG โดยหมู่ไกลคอลของสารทั้งสองช่วยให้ดูดซับน้ำในส่วนผสม แต่สารที่มีโมเลกุลสายยาว มีคุณสมบัติละลายน้ำ (ละลายน้ำได้น้อยกว่าโพรพิลีนไกลคอล) เมื่อผสม กับปูนซีเมนต์และน้ำจะช่วยลดแรงดึงผิวของคอนกรีต หรือเข้าไปแทนที่น้ำในโพรงคอนกรีต ทำให้

คอนกรีตหัดตัวต่ำ SR ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า TEG จึงมีความเป็นไปได้ว่ามีคุณสมบัติในการลดแรงดึงผิวของคอนกรีตได้น้อยกว่า TEG จึงให้ค่าการหัดตัวที่สูงกว่า

ในขณะที่โพรพิลีนไกลคอล PG เป็นสารผสมเพิ่มที่มีความเป็นขั้วสูง มีมวลโมเลกุล 76.09 กรัม/โมล ละลายน้ำได้ดี สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำได้ดี ดังนั้นโพรพิลีนไกลคอลสามารถดึงโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น และดึงโมเลกุลน้ำส่วนเกินในรูพรุนของคอนกรีตที่แข็งตัว จึงลดแรงดึงผิวที่ผิวหน้าได้ไม่มาก ทำให้สามารถลดการหัดตัวได้ต่ำกว่าไตรเอทิลีนไกลคอล

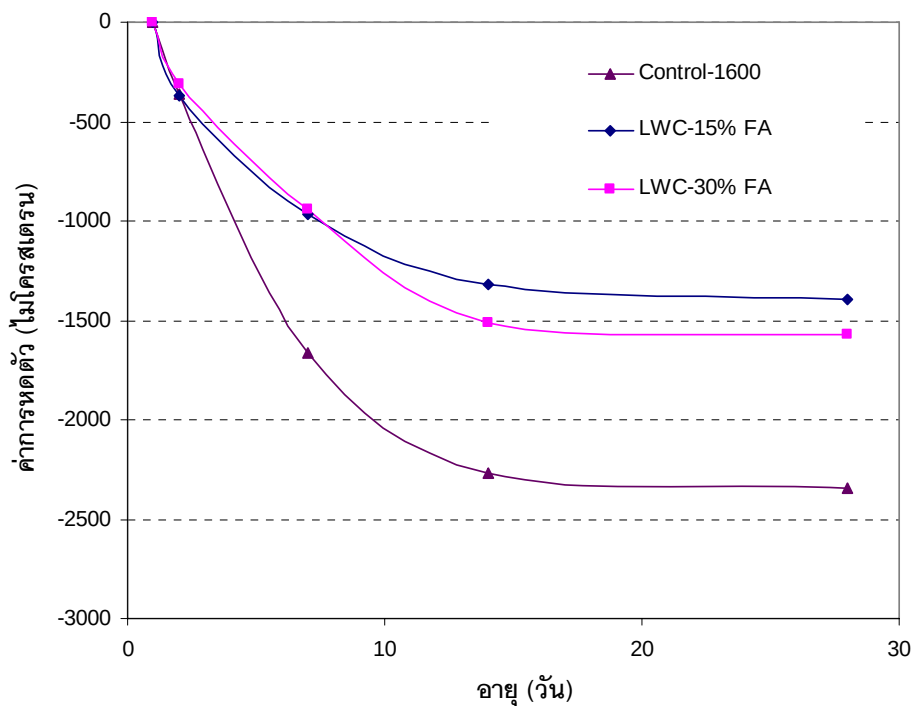
5.1.2 คอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย

การศึกษาการหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาขนาด $7.6 \times 7.6 \times 25.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ($3 \times 3 \times 10$ ลูกบาศก์นิ้ว) ผสมเถ้าลอยเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยใช้ค่า k-factor เท่ากับร้อยละ 50 ในการออกแบบส่วนผสม เพื่อใช้เถ้าลอยส่วนหนึ่งเป็นสารปอชโซลานและอีกส่วนหนึ่งทำหน้าที่แทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา ได้ค่าการหัดตัวดังตารางที่ 5.2 และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าการหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอย

ส่วนผสม	ค่าการหัดตัว (ไมโครสเตรน)					
	1 วัน	2 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
Control-1600	0	-362	-1666	-2268	-2348	-2500
LWC-15% FA	0	-373	-968	-1319	-1398	-1400
LWC-30% FA	0	-308	-941	-1512	-1571	-1770

จากการศึกษาผลของการหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 ที่แสดงในรูปที่ 5.2 การผสมเถ้าลอยในคอนกรีตช่วยลดการหัดตัวเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยเมื่อผสมด้วยเถ้าลอยที่ปริมาณร้อยละ 15 ทำให้การหัดตัวลดลงจาก 2500 ไมโครสเตรน เหลือ 1400 ไมโครสเตรน เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นร้อยละ 30 พบว่าการหัดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็น 1770 ไมโครสเตรน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมโพรพิลีนไกลคอลร้อยละ 2 (ที่เถ้าลอยร้อยละ 15) และไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1 (ที่เถ้าลอยร้อยละ 30) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าลอยสามารถลดการหัดตัวและใช้แทนสารผสมเพิ่มได้ ซึ่งทำให้ผู้ผลิตลดต้นทุนการผลิตและเป็นการใช้เถ้าให้เกิดประโยชน์ หากต้องการให้คอนกรีตหัดตัวลดลงสามารถผสมเถ้าลอยและสารเคมีร่วมกันได้



รูปที่ 5.2 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบา (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ที่ผสมเถ้าลอย

จากผลการทดสอบค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเถ้าลอยมีผลทำให้การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่เติมสารผสมเพิ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) ประเภทหนึ่ง มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกาและอลูมินา ซึ่งเมื่อนำไปใช้ผสมกับซีเมนต์จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ปฏิกิริยาปอซโซลานนั้นจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีการผสมเถ้าลอยมีค่าการหดตัวที่ลดลง

5.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

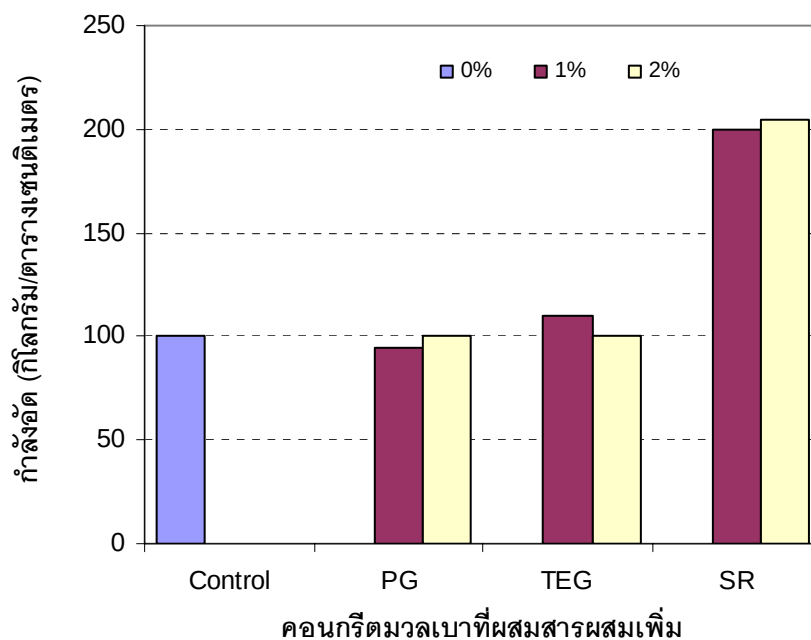
5.2.1 คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ไม่ผสมเถ้าลอย และมีการเติมสารผสมเพิ่มคือโพรพิลีนไกลคอล ไตรเอทิลีนไกลคอล และสารลดการหดตัวของ

คอนกรีต ในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบค่ากำลังอัด ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน โดยผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาได้ผลดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมสารลดการหดตัว

ส่วนผสม	กำลังอัดเฉลี่ย (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) ที่อายุ 28 วัน
PG-0F-1	95
PG-0F-2	100
TEG-0F-1	110
TEG-0F-2	100
SR-0F-1	200
SR-0F-2	205
CON-0F	100



รูปที่ 5.3 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) : ไม่ผสมเถ้าลอย

จากการศึกษาผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 แสดงในรูปที่ 5.3 โดยคอนกรีตที่ควบคุมคือที่ไม่ใส่สารลดการหดตัว มีค่ากำลังอัดที่ 100 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่ผสมโพรฟิไลน์ไกลคอลเพิ่มในอัตราร้อยละ 1 นั้นมีค่ากำลังลดลงเล็กน้อย

เหลือ 95 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มโพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่า ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับคอนกรีตควบคุม คอนกรีตมวลเบาที่ผสมไตรเอทิลีนไกลคอลเพิ่มในอัตราร้อยละ 1 นั้นมีค่ากำลังที่ 110 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มไตรเอทิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่า ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับคอนกรีตควบคุมเช่นเดียวกับการใช้โพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2

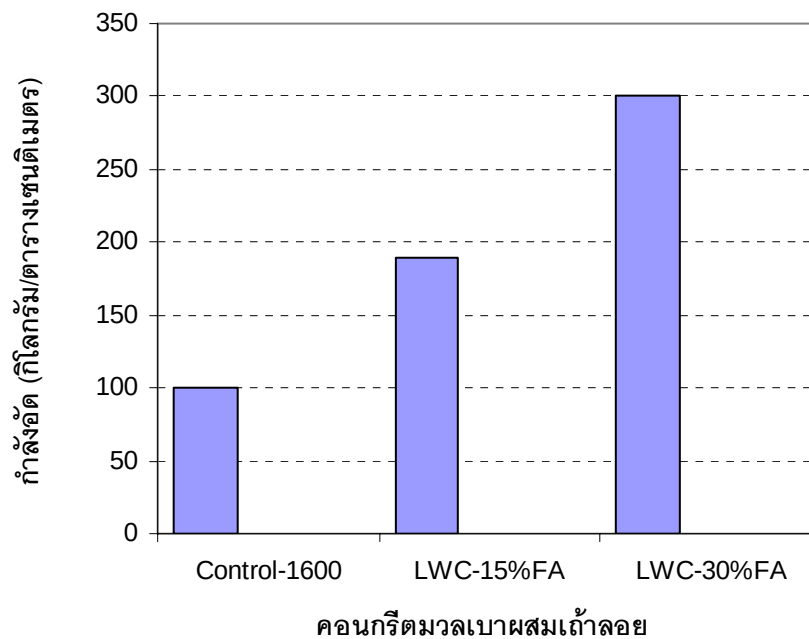
ส่วนผลการทดสอบที่ใช้กับคอนกรีตทั่วไป SR ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดที่สูง การเติม SR ร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาณปูนซีเมนต์ ให้ค่ากำลังอัดที่ 200 และ 205 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดในส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย โพรพิลีนไกลคอลและไตรเอทิลีนไกลคอลไม่มีผลต่อค่ากำลังอัด แต่มีผลอย่างมากต่อการหดตัว ในขณะที่ SR ในผลต่อการกำลังอัดอย่างมาก เนื่องจาก SR ทำให้โฟมยุบตัวคอนกรีตจึงแน่น และมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตควบคุม กำลังอัดจึงมีค่าสูง

5.2.2 คอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย

การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผสมเถ้าลอยเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยใช้ค่า k-factor เท่ากับร้อยละ 50 ในการออกแบบส่วนผสม เพื่อให้เถ้าลอยส่วนหนึ่งเป็นสารปอลิไซรอนและอีกส่วนหนึ่งทำหน้าที่แทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา ได้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย

ส่วนผสม	กำลังอัดเฉลี่ย (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) ที่อายุ 28 วัน
Control-1600	100
LWC-15% FA	190
LWC-30% FA	300



รูปที่ 5.4 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) : ผสมเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน

จากการศึกษาผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม คือมีค่า 190 และ 300 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่มากทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การใช้เถ้าลอยทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น พองอากาศที่ใช้ผสมยุบตัว ความหนาแน่นจึงสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเช่นเดียวกับที่พบในกรณีของคอนกรีตมวลเบาผสม SR เพื่อให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงจึงต้องเพิ่มปริมาณพองอากาศในส่วนผสม ในบางครั้งพองอากาศที่เพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อค่ากำลังอัด

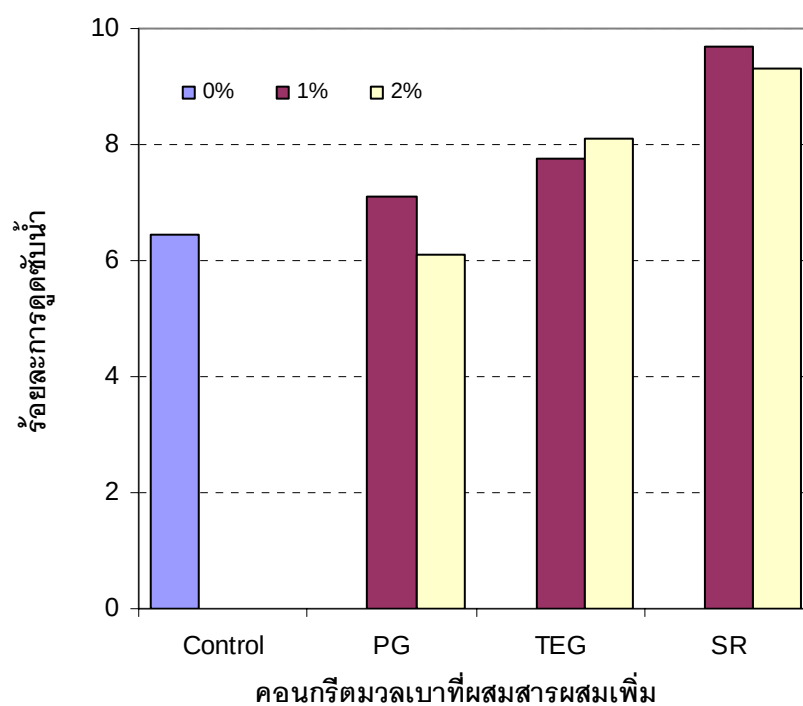
5.3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

5.3.1 คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

การศึกษาการดูดซับน้ำในคอนกรีตมวลเบาขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ไม่ผสมเถ้าลอย และมีการเติมสารผสมเพิ่มคือโพรพิลีนไกลคอล ไตรเอทิลีนไกลคอล และสารลดการหดตัวของคอนกรีต ในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบการดูดซับน้ำ ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน โดยแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าการทดสอบการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาได้ผลดังตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ร้อยละการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

ส่วนผสม	ร้อยละการดูดซับน้ำ
PG-0F-1	7.1
PG-0F-2	6.1
TEG-0F-1	7.8
TEG-0F-2	8.1
SR-0F-1	9.7
SR-0F-2	9.3
CON-0F	6.4



รูปที่ 5.5 ร้อยละการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบา : ไม่ผสมเถ้าลอย

จากการศึกษาผลของการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าลอย พบว่าคอนกรีตที่ควบคุมมีค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 6.4 คอนกรีตมวลเบาที่ผสมโพรพิลีนไกลคอลเพิ่มในอัตราร้อยละ 1 นั้นให้ค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 7.1 เมื่อเพิ่มโพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่า ให้ค่าการดูดซับน้ำร้อยละ 6.1 คอนกรีตมวลเบาที่ผสมไตรเอทิลีนไกลคอลเพิ่มในอัตราร้อยละ 1 นั้นให้ค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 7.8 เมื่อเพิ่มไตรเอทิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่า ให้ค่าการดูดซับน้ำร้อยละ 8.1

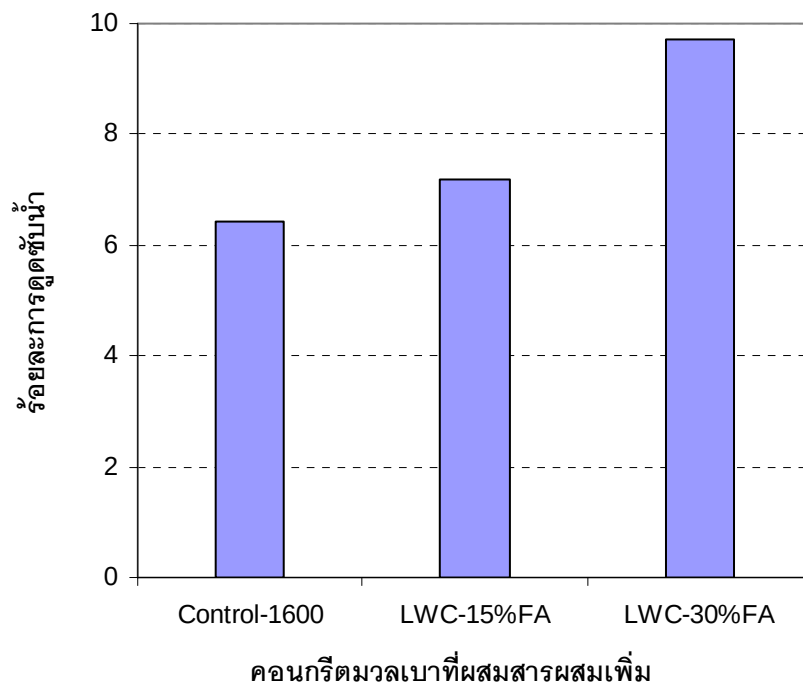
ส่วนผลการทดสอบที่ให้กับคอนกรีตทั่วไป SR การเติม SR ร้อยละ 1 โดยปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 9.7 เมื่อเพิ่มปริมาณ SR เป็นร้อยละ 2 พบว่าได้ค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 9.3 :ซึ่งการเติมสารผสมเพิ่มทุกตัวทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าเนื้อคอนกรีตมีปริมาณโพรงมากขึ้น

5.3.2 คอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย

การศึกษาการดูดซับน้ำในคอนกรีตมวลเบาขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบการดูดซับน้ำ ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน โดยแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าการทดสอบการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาได้ผลดังตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ร้อยละการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย

ส่วนผสม	ร้อยละการดูดซับน้ำ
Control-1600	6.4
LWC-15% FA	7.2
LWC-30% FA	9.7



รูปที่ 5.6 ร้อยละการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย

จากการศึกษาผลของการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าร้อยละ 7.2 และ 9.7 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม สาเหตุมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอยในส่วนผสมเพิ่มปริมาณเพสต์ในคอนกรีต อีกทั้งเถ้าลอยมีโพรงในอนุภาค จึงมีการดูดซับสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

5.4 สรุป

สารผสมเพิ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา โดยไตรเอทิลีนไกลคอล (ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์) สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาได้มากที่สุด รองลงมาคือโพรพิลีนไกลคอล (ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

ส่วนการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตได้เช่นกันและการใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ให้ผลการหดตัวเทียบเท่ากับการใช้โพรพิลีนไกลคอลร้อยละ 2 ส่วนการใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ให้ผลการหดตัวเทียบเท่ากับการใช้ไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1

จากผลของกำลังอัด พบว่าสารผสมเพิ่มไม่มีผลต่อกำลังอัด ยกเว้นสารลดการหดตัวสำหรับคอนกรีตทั่วไป SR ที่ให้ค่ากำลังอัดที่สูง เนื่องจากสารดังกล่าวทำให้โฟมยุบตัว และเนื้อคอนกรีตแน่น เช่นเดียวกับกรณีของเถ้าลอย แต่เถ้าลอยยังช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเปลี่ยนสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเพิ่มค่ากำลังอัดแก่คอนกรีต

บทที่ 6

การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์

ในบทนี้กล่าวถึงหดตัวของของคอนกรีตมวลเบา ที่ผสมสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ (Superplasticizer, SP) ทดสอบกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่น 1200 และ 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นส่วนผสมที่ทางผู้วิจัยได้ศึกษาและทำการทดลองผสมเบื้องต้นแล้วพบว่าการผสมสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ ทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่ทำงานได้ดีและให้กำลังอัดที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาธรรมดา เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน โดยได้ศึกษาอิทธิพลของสารเคมีผสมเพิ่มเติมแต่ละตัวต่อการลดการหดตัว ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่มีความหนาแน่น 1,200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม ททราย 600 กิโลกรัม น้ำ 152.5 กิโลกรัม สารเพิ่มฟอง (Foaming agent) 0.58 กิโลกรัม น้ำผสมสารเพิ่มฟอง 22.9 กิโลกรัม และสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ร้อยละ 1 ของปูนซีเมนต์ ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่มีความหนาแน่น 1,600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม ททราย 1000 กิโลกรัม น้ำ 182 กิโลกรัม สารเพิ่มฟอง (Foaming agent) 0.34 กิโลกรัม น้ำผสมสารเพิ่มฟอง 13.6 กิโลกรัม และสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์ร้อยละ 1 ของปูนซีเมนต์ โดยทำการทดสอบ กำลังอัด ความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ

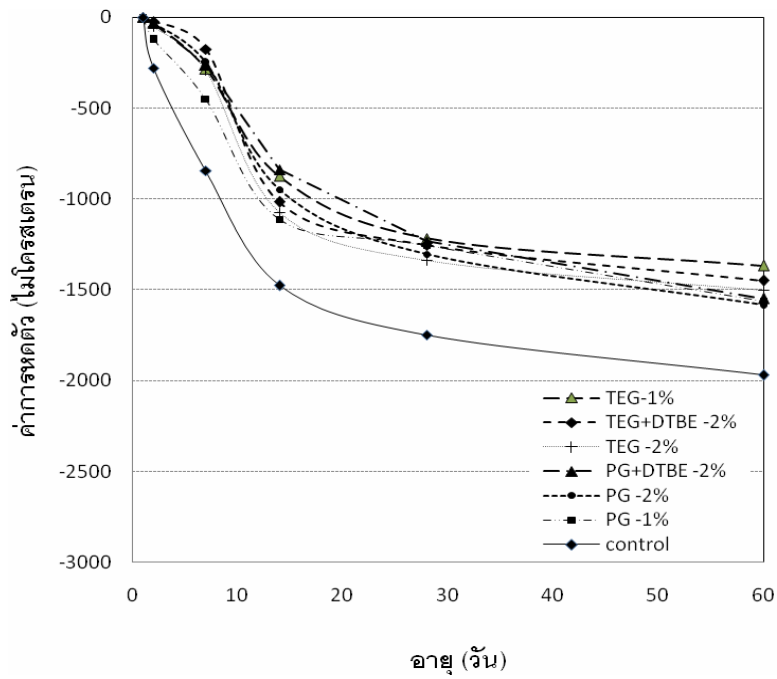
จากข้อมูลในบทที่ 5 งานวิจัยนี้ใช้โพรพิลีนไกลคอล (PG) และไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) ปริมาณร้อยละ 1 และ 2 ส่วนไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิล อีเทอร์ (DTBE) ทำให้โฟมยุบตัว คอนกรีตจับตัวกันเป็นก้อนและเนื้อคอนกรีตแข็งเร็ว จึงมีการปรับลดปริมาณของไดโพรพิลีนไกลคอล เทอร์ท-บิวทิลอีเทอร์ (DTBE) และใช้ PG ผสมกับ DTBE ในอัตราส่วน 0.8:0.2 และ TEG ผสมกับ DTBE ในอัตราส่วน 0.8:0.2 เช่นกันและใช้ปริมาณรวมร้อยละ 2 ของปูนซีเมนต์

6.1 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมสารซูเปอร์พลาสติคไซเซอร์

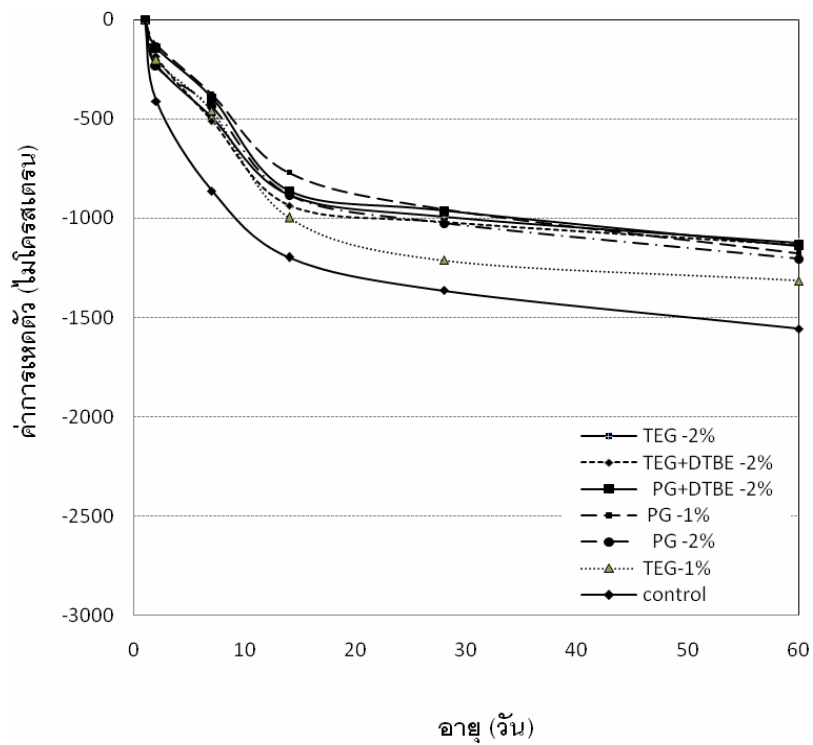
ในการทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบา จะอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596-01 “Standard test method for drying shrinkage of mortar containing hydraulic cement” ทำการเปรียบเทียบค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมสารผสมเพิ่มประเภทต่างๆ กับคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมสารผสมเพิ่ม ค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาได้ผลดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมสารซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร

ส่วนผสม	ค่าการหดตัว (ไมโครสเตรน)					
	1 วัน	2 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
1200 กก./ลบ.ม.						
Control	0	280	844	1476	1749	1970
PG-1%	0	124	450	1114	1254	1562
TEG-1%	0	32	286	874	1216	1368
PG-2%	0	29	250	947	1304	1584
TEG-2%	0	48	290	1074	1340	1500
PG+DTBE -2%	0	29	260	837	1232	1547
TEG+DTBE -2%	0	22	176	1016	1254	1450
1600 กก./ลบ.ม.						
Control	0	410	864	1197	1364	1556
PG-1%	0	126	376	770	954	1176
TEG-1%	0	204	460	998	1212	1314
PG-2%	0	234	440	884	1026	1204
TEG-2%	0	224	492	884	994	1124
PG+DTBE -2%	0	143	396	864	964	1139
TEG+DTBE -2%	0	188	512	936	1021	1136



รูปที่ 6.1 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสม SP (1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 6.2 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสม SP (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

6.1.1 การหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาผสม SP ที่ความหนาแน่น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ผลของการหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ได้แสดงในรูปที่ 6.1 คอนกรีตที่ควบคุมมีการหัตถ์สูงที่อายุการบ่ม 60 วัน คือมีการหัตถ์ ที่ 1,970 ไมโครสเตรน เมื่อใช้ปริมาณไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ การหัตถ์ลดลงเป็น 1368 และ 1500 ไมโครสเตรน ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่ผสมโพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ให้ค่าการหัตถ์ที่ 1562 และ 1584 ไมโครสเตรน

ส่วนสารลดการหัตถ์ PGผสมกับ DTBE และ TEG ผสมกับ DTBE ที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการหัตถ์ลดลงเช่นกัน คือมีค่าลดลงเป็น 1574 และ 1450 ไมโครสเตรนตามลำดับ การใช้ DTBE ในปริมาณที่จำกัดยังคงมีผลเสียต่อฟองอากาศที่ใช้ผสมคอนกรีต แต่ทั้งนี้การช่วยลดการหัตถ์ยังไม่ปรากฏชัดเจน นอกจากนี้การใช้สารเคมีหลายตัวยังทำให้ต้องจัดหาและยุ่งยากในการใช้งาน

ในภาพรวมแล้วจะเห็นได้ว่าการใช้สารเคมีลดการหัตถ์ร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะสามารถลดการหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรได้โดยการหัตถ์ดังกล่าวจะลดลงและเกาะกลุ่มกันในช่วง 1368 -1584 ไมโครสเตรน

6.1.2 การหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาผสม SP ที่ความหนาแน่น 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ผลของการหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ได้แสดงในรูปที่ 6.2 คอนกรีตที่ควบคุมมีการหัตถ์สูงที่อายุการบ่ม 60 วัน คือมีการหัตถ์ ที่ 1556 ไมโครสเตรน ซึ่งต่ำกว่าการหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่อายุเดียวกัน คือมีการหัตถ์ ที่ 1970 ไมโครสเตรน ค่าที่ต่ำกว่าเป็นเพราะคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรมีปริมาณของทราย 1000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สูงกว่าปริมาณของทราย 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เมื่อใช้ปริมาณไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ การหัตถ์ลดลงเป็น 1314 และ 1124 ไมโครสเตรน ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่ผสมโพรพิลีนไกลคอลในอัตราร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ให้ค่าการหัตถ์ที่ 1176 และ 1204 ไมโครสเตรน

ส่วนสารลดการหดตัว PGผสมกับ DTBE และ TEGผสมกับ DTBE ที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการหดตัวลดลงเช่นกัน คือมีค่าลดลงเป็น 1139 และ 1136 ไมโครสเตรนตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าการใช้สารเคมีลดการหดตัวร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะสามารถลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรได้โดยการหดตัวดังกล่าวจะลดลงและเกาะกลุ่มกันในช่วงแคบ 1124 -1204 ไมโครสเตรน ยกเว้นส่วนผสมเดียวที่มีปริมาณไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่มีการหดตัวสูงกว่ากลุ่มเล็กน้อยคือลดลงเป็น 1314 ไมโครสเตรน

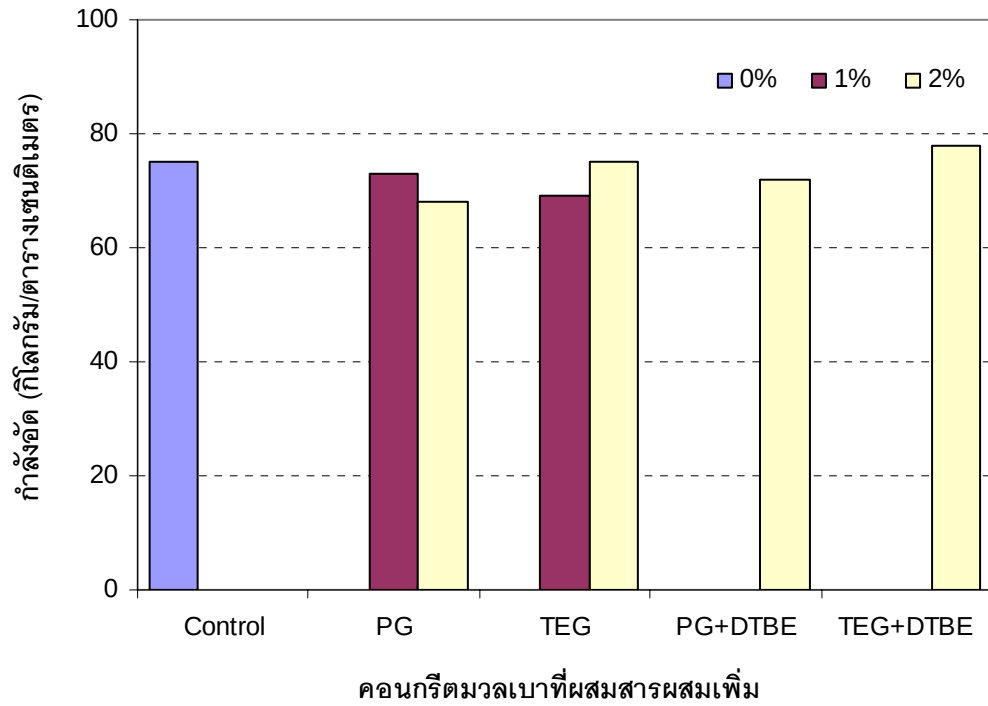
6.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ได้ผลดังตารางที่ 6.2 ผลค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1200 และ 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 วันแสดงในรูปที่ 6.3 และ 6.4 โดยคอนกรีตที่ควบคุมคือที่ไม่ใส่สารลดการหดตัวมีค่ากำลังอัด 75 และ 180 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร มีความหนาแน่น 1150 และ 1550 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลของคอนกรีตมวลเบาธรรมดาไม่ใส่สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์สามารถทำให้ปูนซีเมนต์มีการกระจายตัว (Disperse) ได้ดีและทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น การผสมสารเคมีลดการหดตัวทุกประเภทที่ทดสอบมีผลต่อกำลังอัดไม่มาก เนื่องจากกำลังของคอนกรีตมวลเบาควบคุมที่สูงอยู่แล้ว

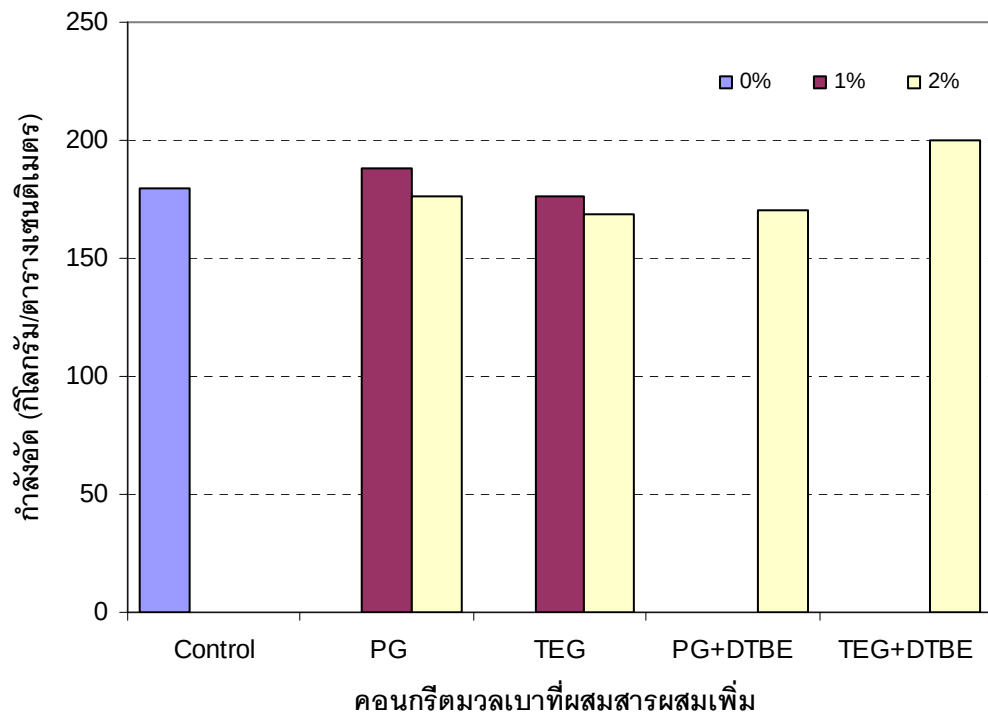
จากตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบามีความหนาแน่น 1108-1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 68-76 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และส่วนคอนกรีตมวลเบามีความหนาแน่น 1510-1590 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 169-200 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง เป็นส่วนผสมที่มี DTBE ผสมอยู่ ซึ่งส่งผลเสียต่อฟองอากาศที่ใช้ผสมคอนกรีต

ตารางที่ 6.2 กำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซับน้ำ ที่อายุ 28 วันของคอนกรีตมวลเบาผสม SP

ส่วนผสม	กำลังอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	การดูดซับน้ำ (%)
1200 กก./ลบ.ม.			
Control	75	1150	19.5
PG-1%	73	1147	20.3
TEG-1%	69	1146	21.9
PG-2%	68	1123	23.9
TEG-2%	75	1108	24.6
PG+DTBE -2%	72	1200	21.3
TEG+DTBE -2%	76	1186	19.2
1600 กก./ลบ.ม.			
Control	180	1550	5.0
PG-1%	188	1510	7.9
TEG-1%	176	1520	9.7
PG-2%	176	1510	6.3
TEG-2%	169	1530	9.0
PG+DTBE -2%	170	1520	9.5
TEG+DTBE -2%	200	1590	8.2



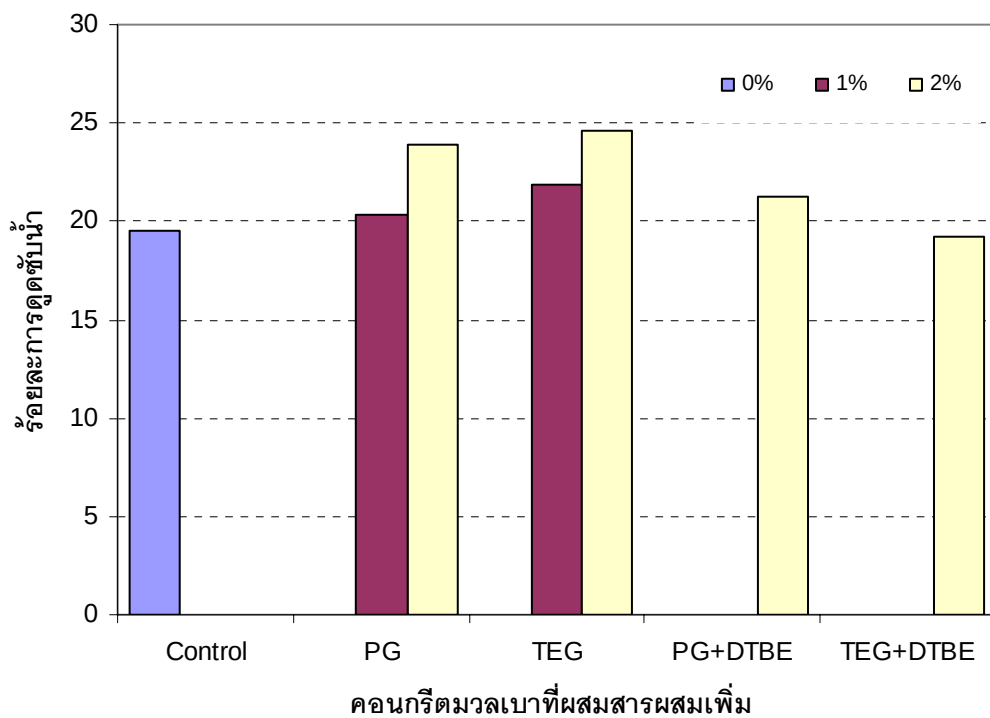
รูปที่ 6.3 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสม SP ที่อายุ 28 วัน (1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)



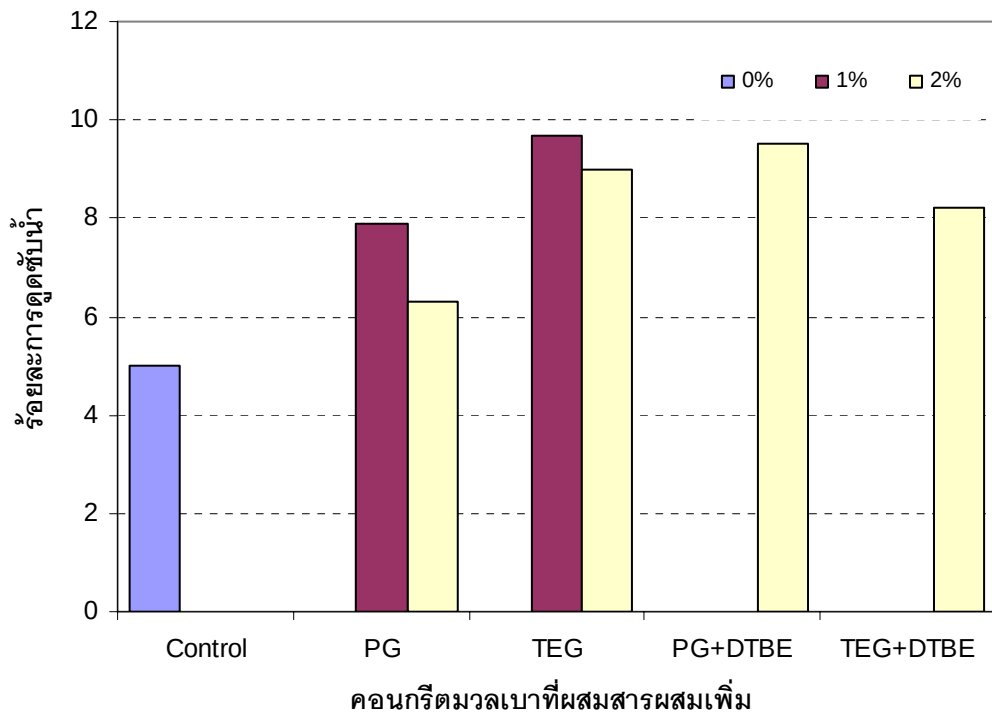
รูปที่ 6.4 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสม SP ที่อายุ 28 วัน (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

6.3 การดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบา

ค่าการทดสอบการดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสม SP ได้ผลดังตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 คอนกรีตผสม SP ที่ควบคุมที่ความหนาแน่น 1200 และ 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 19.5 และ 5.0 ค่าการดูดซับน้ำของคอนกรีตที่ความหนาแน่น 1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรสูงกว่าค่าการดูดซับน้ำของคอนกรีตที่ความหนาแน่น 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากปริมาณฟองและความหนาแน่นที่ต่างกัน ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่ผสมสารเคมีลดการหดตัวให้ค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่าการดูดซับน้ำของคอนกรีตที่ควบคุม โดยค่าการดูดซับน้ำของคอนกรีตที่ผสมสารเคมีลดการหดตัวที่ความหนาแน่น 1200 และ 1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 19.2-24.6 และ 6.3-9.5 ค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่าแสดงว่าส่วนผสมที่ผสมสารเคมีลดการหดตัวมีโพรงเพิ่มขึ้นหรือมีโพรงที่มีความต่อเนื่องมากขึ้น จากข้อมูลการหดตัวที่ต่ำลงแสดงว่ามีการปรับปรุงขนาดของโพรง



รูปที่ 6.5 การดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสม SP ที่อายุ 28 วัน (1200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 6.6 การดูดซับน้ำของคอนกรีตมวลเบาเบาผสม SP ที่อายุ 28 วัน (1600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

6.4 สรุป

สารเคมีลดการหดตัวมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizer, SP) แต่ไม่มากเท่ากับผลต่อการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ใส่สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาผสมซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์มีคุณสมบัติที่ดีและมีกำลังอัดดี

การใช้ PG, TEG ร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และ PG ผสมกับ DTBE และ TEG ผสมกับ DTBE ที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ได้ใกล้เคียงกัน การลดการหดตัวเกิดจากการปรับปรุงขนาดของโพรง

บทที่ 7

การพัฒนาปูนฉาบ

ได้ทำการพัฒนาปูนฉาบสำหรับฉาบผิวคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC) เถ้าลอย (Fly ash, FA) เพอร์ไลต์ (Expanded perlite) ทราย และสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ (Mortar plasticizer, MP) โดยใช้ความสามารถทำงานได้เป็นตัวกำหนด ซึ่งค่าการไหลแผ่ของปูนฉาบสำหรับรูปที่ได้จากการสำรวจเท่ากับร้อยละ 75-95 และจากการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ [7] ค่าการไหลแผ่ของปูนฉาบที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 100-110 ขึ้นอยู่กับวัสดุและส่วนผสม จากการทดลองผสมโดยช่างสำหรับวัสดุที่จะทดสอบ พบว่าค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมของปูนฉาบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย เถ้าลอย เพอร์ไลต์ และสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ (Mortar plasticizer) เท่ากับร้อยละ 95 $\pm$ 5 ซึ่งเป็นค่าการไหลแผ่ที่ใช้สำหรับการทดสอบนี้

7.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเพอร์ไลต์ แสดงไว้ใน ตารางที่ 7.1 และ ตารางที่ 7.2 ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเพอร์ไลต์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 20.54, 38.72 และ 71.32 โดยน้ำหนักตามลำดับ อะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.46, 20.76 และ 10.73 โดยน้ำหนักตามลำดับ แคลเซียมออกไซด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 64.62, 16.55 และ 1.86 โดยน้ำหนักตามลำดับ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 7.1 นอกจากนี้คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเพอร์ไลต์ กล่าวคือค่าความละเอียดวิธีเบลนมีค่าเท่ากับ 3600, 2800 และ 4200 ตารางเซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15, 65 และ 29 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 3.15, 2.21 และ 0.93 ตามลำดับ รายละเอียดอื่นๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเพอร์ไลต์

วัสดุผง	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃
OPC	20.54	5.46	3	64.62	0.21	0.78	0.32	2.8
FA	38.72	20.76	15.28	16.55	1.19	1.49	2.69	0.78
EP	71.32	10.73	2.58	1.86	-	-	8.35	-

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเพอร์ไลต์

วัสดุผง	ค่าความละเอียด วิธีเบลน (cm ² /g)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย (μm.)	ร้อยละค้ำบน ตะแกรง เบอร์ 325	ความ ถ่วงจำเพาะ (SG.)	การสูญเสีย น้ำหนัก (LOI) (%)
OPC	3,600	15	-	3.15	1.15
FA	2,800	65	66.67	2.21	0.1
EP	4,200	29	40.2	0.93	1.25

7.2 ส่วนผสมของปูนฉาบ

ส่วนผสมของปูนฉาบใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อทราย(รวมเพอร์ไลต์ เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยเช่นกัน)เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยใช้เป็นสารปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน เพอร์ไลต์เป็นวัสดุเฉื่อยใช้แทนที่ทรายในอัตราส่วนเพอร์ไลต์ต่อทรายเท่ากับ 0.1:2.9 และ 0.2:2.8 โดยน้ำหนัก สารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ใช้ในปริมาณร้อยละ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ตารางที่ 7.3 แสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนฉาบผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์ สำหรับฉาบผิวคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 7.3 สัดส่วนโดยน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนฉาบผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์

ส่วนผสม	ชุด	สัดส่วนโดยน้ำหนัก					MP (% of binder)
		OPC	FA	EP	Sand	W/B	
0FA	A	1	0	0	3.0	0.65	0
20FA		0.8	0.2	0	3.0	0.64	0
20FA01EP		0.8	0.2	0.1	2.9	0.84	0
20FA02EP		0.8	0.2	0.2	2.8	1.04	0
40FA		0.6	0.4	0	3.0	0.63	0
40FA01EP		0.6	0.4	0.1	2.9	0.83	0
40FA02EP		0.6	0.4	0.2	2.8	1.00	0
0FA	B	1	0	0	3.0	0.55	0.1
20FA		0.8	0.2	0	3.0	0.54	0.1
20FA01EP		0.8	0.2	0.1	2.9	0.77	0.1
20FA02EP		0.8	0.2	0.2	2.8	0.99	0.1
40FA		0.6	0.4	0	3.0	0.53	0.1
40FA01EP		0.6	0.4	0.1	2.9	0.80	0.1
40FA02EP		0.6	0.4	0.2	2.8	0.96	0.1
0FA	C	1	0	0	3.0	0.54	0.2
20FA		0.8	0.2	0	3.0	0.53	0.2
20FA01EP		0.8	0.2	0.1	2.9	0.76	0.2
20FA02EP		0.8	0.2	0.2	2.8	0.98	0.2
40FA		0.6	0.4	0	3.0	0.52	0.2
40FA01EP		0.6	0.4	0.1	2.9	0.75	0.2
40FA02EP		0.6	0.4	0.2	2.8	0.93	0.2

หมายเหตุ: 20FA01EP หมายถึงสัดส่วนที่มีเถ้าลอย ร้อยละ 20 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

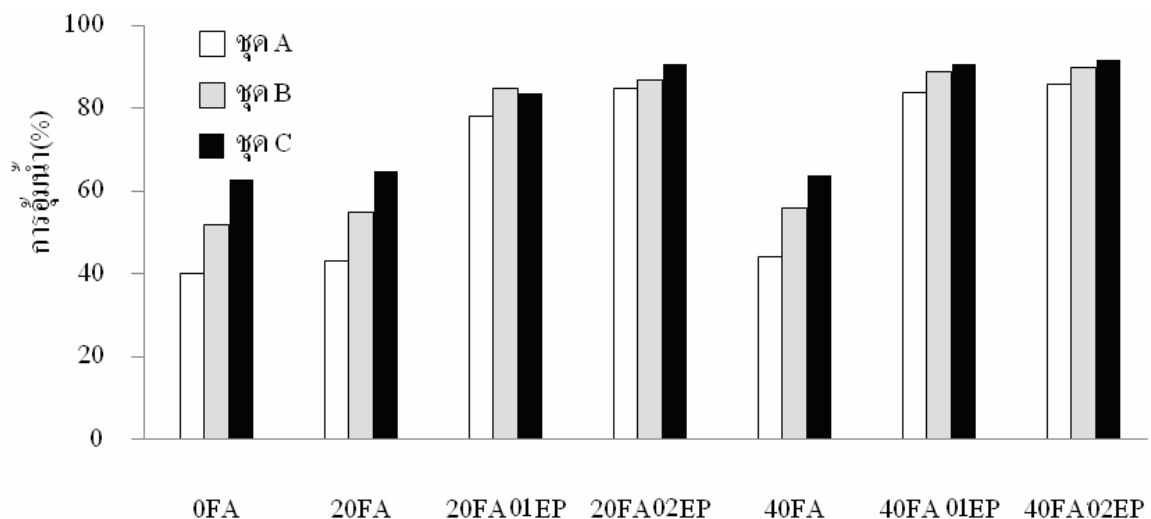
ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน และอัตราส่วนเพอร์ไลต์ต่อทรายโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.1:2.9

7.3 ผลการทดสอบมอร์ตาร์

7.3.1 ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์แสดงในรูปที่ 7.1 แบ่งผลการทดสอบเป็น 3 ชุด ประกอบด้วย

ชุด A เป็นส่วนผสมที่ไม่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ ผลการทดลองแสดงเมื่อทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 40, 43 และ 44 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 43, 78 และ 85 เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 44, 84 และ 86 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมจะส่งผลให้ ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



ชนิดส่วนผสม

รูปที่ 7.1 ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์ สำหรับฉาบผิวคอนกรีตมวลเบา

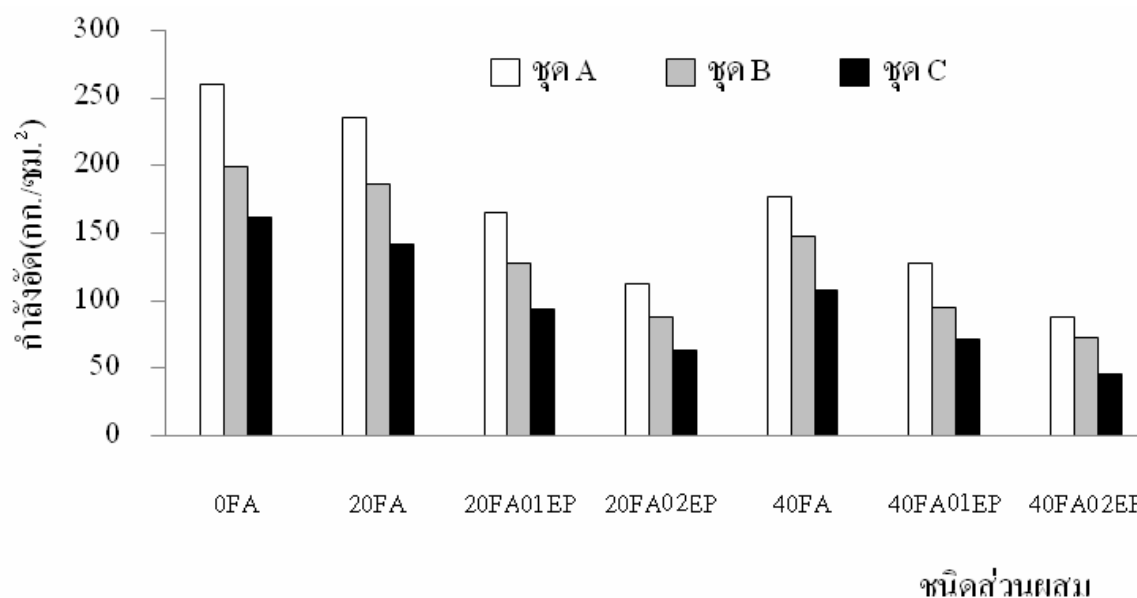
ชุด B เป็นส่วนผสมที่มีสารมอร์ตาร์ทพลาสติกไฮเซอรในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสัดส่วน เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ทมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 52, 55 และ 56 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ทมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ทมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 55, 85 และ 87 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ทมีค่าเท่ากับร้อยละ 56, 89 และ 90 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณสารมอร์ตาร์ทพลาสติกไฮเซอรและเพอร์ไลต์ในสัดส่วนผสมจะส่งผลให้ ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ทมีค่าเพิ่มขึ้น

ชุด C เป็นส่วนผสมที่มีสารมอร์ตาร์ทพลาสติกไฮเซอรในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน จากผลการทดลองพบว่า ผลการทดสอบค่าการอุ้มน้ำมีแนวโน้มคล้ายกับชุด B กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำของมอร์ตาร์ทมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าการอุ้มน้ำจะสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากมีสารมอร์ตาร์ทพลาสติกไฮเซอรในปริมาณที่สูงกว่า

มาตรฐาน ASTM C91 ระบุค่าการอุ้มน้ำต่ำสุดที่ร้อยละ 70 จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่เป็นไปตามมาตรฐานเป็นส่วนผสมที่มีเพอร์ไลต์ ส่วนผสมที่ไม่มีเพอร์ไลต์และให้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ได้แก่ส่วนผสมที่มีมอร์ตาร์ทพลาสติกไฮเซอรในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

7.3.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 แบ่งผลการทดสอบเป็น 3 ชุด ประกอบด้วย



รูปที่ 7.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์ ที่เวลา 28 วัน

ชุด A เป็นส่วนผสมที่ไม่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสัดส่วน เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 260, 235 และ 177 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 260, 162 และ 113 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนักพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 177, 128 และ 88 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงอย่างชัดเจน

ชุด B เป็นส่วนผสมที่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอร์ในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน จากการทดลองพบว่าเมื่อทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใน

ปริมาณสัดส่วน เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 199, 186 และ 147 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนักพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 186, 128 และ 88 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนักพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 147, 95 และ 73 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์และสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรีในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง

ชุด C เป็นส่วนผสมที่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรีในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน จากผลการทดลองพบว่า ผลการทดสอบกำลังอัดจะมีแนวโน้มคล้ายกับ ชุด B กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง แต่กำลังจะต่ำกว่าเนื่องจากมีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรีในปริมาณที่สูงกว่า

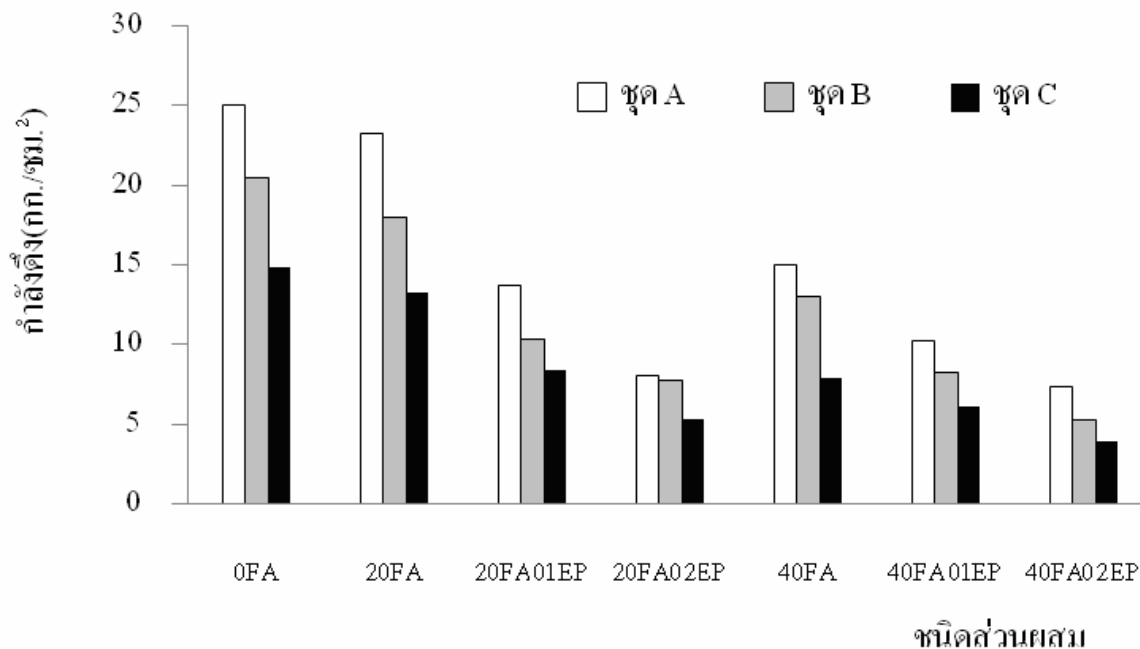
มาตรฐาน ASTM C 91 ระบุกำลังอัดที่เวลา 28 วันต่ำสุด 62, 145 และ 200 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร สำหรับ ปูนก่อและปูนฉาบประเภท N, S และ M ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีเพียงส่วนผสมในชุด C ส่วนผสมเดียวเท่านั้นที่ต่ำกว่ามาตรฐาน เป็นส่วนผสมที่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรีในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเท่ากับ 0.2 ให้ค่ากำลังอัดที่เวลา 28 วันเท่ากับ 46 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

7.3.3 ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 7.3 แบ่งผลการทดสอบเป็น 3 ชุด

สำหรับส่วนผสมที่ไม่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรี ชุด A จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสัดส่วน เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 25, 23.2 และ 15 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดย

น้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 23.2, 13.7 และ 8.0 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 15.0, 10.2 และ 7.3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลง



รูปที่ 7.3 กำลังดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และเพอร์ไลต์ ที่เวลา 28 วัน

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเพอร์ไลต์ ชุด B แสดงว่า เมื่อทดแทนเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสัดส่วน เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 20.5, 18.0 และ 13.0 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 18.0, 10.3 และ 7.7 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนัก

ระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 13.0, 8.2 และ 5.3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลง

ชุด C เป็นส่วนผสมที่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไฮเซอรินปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน จากผลการทดลองพบว่า ผลการทดสอบกำลังดึงจะมีแนวโน้มคล้ายกับ ชุด B กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ากำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลง แต่กำลังจะต่ำกว่าเนื่องจากมีสารมอร์ตาร์พลาสติกไฮเซอรินในปริมาณที่สูงกว่า

ผลการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ความหนาแน่น กำลังอัด ยังไม่ดูลึกลับ และของมอร์ตาร์ผสมเกล็ดลอย และเพอร์ไลต์ที่เวลา 28 วัน ชุด A ส่วนผสมที่ไม่มีสารมอร์ตาร์พลาสติกไฮเซอริน จากผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 7.3 พบว่า เมื่อทดแทนเกล็ดลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสัดส่วน เท่ากับ 0, 0.2 และ 0.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 260, 235 และ 177 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่ายังโมดูลัส มีค่าเท่ากับ 230, 218 และ 192×10^3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 2100, 2020 และ 1900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65, 0.64 และ 0.63 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเกล็ดลอยทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะส่งผลให้ค่ายังโมดูลัสและความหนาแน่นมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.8:0.2 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 235, 165 และ 113 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่ายังโมดูลัส มีค่าเท่ากับ 218, 138 และ 72.5×10^3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 2020, 1750 และ 1530 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64, 0.84 และ 1.04 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ายังโมดูลัสและความหนาแน่นมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง OPC:FA เท่ากับ 0.6:0.4 และเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสมเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0, 0.1 และ 0.2 โดยน้ำหนักพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 177, 128 และ 88 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่ายังโมดูลัส มีค่าเท่ากับ 192, 128 และ 59×10^3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 1900, 1630 และ 1580 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.63, 0.83 และ 1.00 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้ค่ายังโมดูลัสและความหนาแน่นมีค่าลดลง ดังรายละเอียดผลการทดสอบชุด B และ C ที่แสดงในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(W/B) ความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดึง ยังโมดูลัส ของ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและเพอร์ไลต์ ที่เวลา 28 วัน

ส่วนผสม	ชุด	W/B	ความหนาแน่น (กก./ม. ³)	กำลังอัด (กก./ซม ²)	กำลังดึง (กก./ซม ²)	ยังโมดูลัส ($\times 10^3$ กก./ซม ²)
0FA	A	0.65	2100	260	25.0	230
20FA		0.64	2020	235	23.2	218
20FA01EP		0.84	1750	165	13.7	138
20FA02EP		1.04	1530	113	8.0	72.5
40FA		0.63	1900	177	15.0	192
40FA01EP		0.83	1630	128	10.2	128
40FA02EP		1.00	1580	88	7.3	59
0FA	B	0.55	1980	199	20.5	172
20FA		0.54	1860	186	18.0	167
20FA01EP		0.77	1700	128	10.3	88
20FA02EP		0.99	1500	88	7.7	49
40FA		0.53	1820	147	13.0	123
40FA10EP		0.80	1600	95	8.2	68
40FA20EP		0.96	1530	73	5.3	42
0FA	C	0.54	1860	162	14.8	122
20FA		0.53	1720	142	13.2	108
20FA01EP		0.76	1650	93	8.3	46
20FA02EP		0.98	1470	64	5.3	30
40FA		0.52	1750	108	7.8	98
40FA01EP		0.75	1570	72	6.0	42
40FA02EP		0.93	1490	46	3.9	19

7.4 ผลการทดสอบการฉาบจริง

มาตรฐาน ASTM C91 ระบุค่าการอุ้มน้ำต่ำสุดที่ร้อยละ 70 จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่เป็นไปตามมาตรฐานเป็นส่วนผสมที่มีเพอร์ไลต์ ส่วนผสมที่ไม่มีเพอร์ไลต์และให้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ได้แก่ส่วนผสมที่มีมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรืในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน แต่ทั้งนี้ ส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยจะไม่เหนียวและทำงานยากกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอย ดังนั้นจึงเลือกส่วนผสมที่มีเพอร์ไลต์ และส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและมีมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรืในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับการทดลองฉาบจริงดังแสดงในรูปที่ 7.4

การทดสอบการฉาบจริงเป็นการนำเอาส่วนผสมตัวอย่างไปทำการฉาบจริงเพื่อให้มั่นใจว่าส่วนผสมที่ได้พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้งานได้ ได้เลือกส่วนผสมจาก 3 ชุด ๆ ละ 2 ส่วนผสมรวมเป็น 6 ส่วนผสม 20FA02EP และ 40FA01EP จากชุด A ส่วนผสม 20FA01EP และ 40FA01EP จากชุด B และ ส่วนผสม 40FA และ 40FA01EP จากชุด B



รูปที่ 7.4 การทดสอบการฉาบจริงไม่มีรอยแตกร้าว

จากการทดสอบการฉาบจริงพบว่าส่วนผสมที่มีการอุ้มน้ำสูงคือส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและเพอร์ไลต์ และส่วนผสมที่มีเถ้าลอย เพอร์ไลต์ และมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรืมีความเหนียวและเกาะกันดีสามารถฉาบได้ง่าย และสามารถฉาบเป็นชั้นที่บางได้สะดวก เมื่อแห้งแล้วไม่ปรากฏรอยแตกร้าวให้เห็น และจะมีสีออกนวลขึ้น สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและมีมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรืในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ส่วนผสมมีความเหนียวและเกาะกันดีเช่นกัน ถึงแม้ว่าความสามารถทำงานได้จะลดลงเล็กน้อย แต่สามารถฉาบได้ดี เมื่อแห้งแล้วไม่ปรากฏรอยแตกร้าวให้เห็นเช่นกัน

จากข้อมูลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่เป็นไปตามมาตรฐานเป็นส่วนผสมที่มีถั่วลยและเพอร์ไลต์และอาจใส่มอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรด้วย เป็นส่วนผสมที่มีความเหนียวและเกาะกันดี สามารถฉาบได้ง่าย และสามารถฉาบเป็นชั้นที่บางได้สะดวก เหมาะกับการฉาบภายในอาคาร และยังมีคุณสมบัติที่ดีในด้าน การทนไฟและการลดการสะท้อนเสียง สำหรับส่วนผสมที่มีถั่วลยและมีมอร์ตาร์พลาสติกไซเซอรในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ถึงแม้ว่าความสามารถทำงานได้จะลดลงเล็กน้อย แต่สามารถฉาบได้ดี เหมาะกับการฉาบภายนอกอาคารเนื่องจากคุณสมบัติด้านการทึบน้ำ

บทที่ 8

สรุปผล

สารผสมเพิ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา โดยไตรเอทิลีนไกลคอล (ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์) สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาได้มากที่สุด รองลงมาคือโพรพิลีนไกลคอล (ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)

ส่วนการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา สามารถลดการหดตัวของคอนกรีตได้เช่นกันและการใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ให้ผลการหดตัวเทียบเท่ากับการใช้โพรพิลีนไกลคอลร้อยละ 2 ส่วนการใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ให้ผลการหดตัวเทียบเท่ากับการใช้ไตรเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 1

จากผลของกำลังอัด พบว่าสารผสมเพิ่มไม่มีผลต่อกำลังอัด ยกเว้นสารลดการหดตัวสำหรับคอนกรีตทั่วไป SR ที่ให้ค่ากำลังอัดที่สูง เนื่องจากสารดังกล่าวทำให้โฟมยุบตัว และเนื้อคอนกรีตแน่นเช่นเดียวกับกรณีของเถ้าลอย แต่เถ้าลอยยังช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเปลี่ยนสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเพิ่มค่ากำลังอัดแก่คอนกรีต

ส่วนการใช้ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer, SP) ร่วมกับสารเคมีลดการหดตัวมีผลทำให้การหดตัวลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ผสมแต่สารเคมีลดการหดตัว แต่ค่ากำลังอัดสูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาผสมซูเปอร์พลาสติไซเซอร์มีคุณสมบัติที่ดีและช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ส่วนในเรื่องการฉาบจะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่เป็นไปตามมาตรฐานเป็นส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและเพอร์ไลต์และอาจใส่มอร์ตาร์พลาสติไซเซอร์ด้วย เป็นส่วนผสมที่มีความเหนียวและเกาะกันดีสามารถฉาบได้ง่าย และสามารถฉาบเป็นชั้นที่บางได้สะดวก เหมาะกับการฉาบภายในอาคาร และยังมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการทนไฟและการลดการสะท้อนเสียง สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยและมีมอร์ตาร์พลาสติไซเซอร์ในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ถึงแม้ว่าความสามารถทำงานได้จะลดลงเล็กน้อย แต่สามารถฉาบได้ดี เหมาะกับการฉาบภายนอกอาคารเนื่องจากคุณสมบัติด้านการทึบน้ำ

บรรณานุกรม

- [1] มั่น ศรีเรือนทอง. (2537). คอนกรีตเบา = Light weight concrete. วิศวกรรมศาสตร์ ฉบับ ว.ส.ท. เทคโนโลยี 47(5), 42-45.
- [2] บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชันโปรดักส์ จำกัด (มหาชน). (2549). คอนกรีตมวลเบา ช่วยประหยัดพลังงานลดค่าไฟได้อย่างไร. Engineering Today 4(48), 135-136.
- [3] ปริญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2548). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต, (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.
- [4] Grace (2002). Eclipse shrinkage Reducing Admixture. Engineering Bulletin 1, GRACE Construction Product.
- [5] Austin GT (1985). Shreve's chemical process industries, fifth ed., McGraw-Hill, Singapore, 1985.
- [6] Hewlett PC, (1988). Cement admixtures: uses and applications, Longman
- [7] Chindaprasirt P, Buapa N, Cao HT (2005) Mixed Cement Containing Fly Ash for Masonry and Plastering Work, Construction and Building Materials 19(8), 612-618.
- [8] Haque MN, Al-Khaiat H, Kayali O (2004) Strength and durability of lightweight concrete, Cement concrete and Composites 26, 307-314.
- [9] Haque MN, Al-Khaiat H, Kayali O (2007) Long-term strength and durability parameters of lightweight concrete in hot regime: importance of initial curing, Building and Environment 42(8), 3086-3092.
- [10] Choi YW, Kim YJ, Shin HC, Moon HY (2006) An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 36(9), 1595-1602.
- [11] Qiao XC, Nga BR, Tyrer M, Poon CS, Cheeseman CR (2008) Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash, Construction and Building Materials 22(4), 473-480.
- [12] Nambiar EKK, Ramamurthy K (2007) Sorption characteristics of foam concrete, Cement and Concrete Research 37(9), 1341-1347.

- [13] Topcu IB, Uygunoglu T (2007) Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete, *Building and Environment* 42(12), 4108-4116.
- [14] Lo TY, Tang WC, Nadeem A (2008) Comparison of carbonation of lightweight concrete with normal weight concrete at similar strength levels, *Construction and Building Materials* 22(8), 1648-1655.
- [15] Miled K, Sab K, Le Roy R (2007) Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling, *Mechanics of Materials* 39(3), 222-240.
- [16] Demirdag S, Gunduz L (2008) Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units, *Construction and Building Materials* 22(3), 135-142.
- [17] Lo TY, Cui HZ, Nadeem A, Li ZG (2006) The effects of air content on permeability of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research* 36(10), 1874-1878.
- [18] Mirza FA, Soroushian P (2002) Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites* 24(2), 223-227.
- [19] Gesoglu M, Ozturan T, Guneyisi E (2006) Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes, *Cement and Concrete Composites* 28(7), 598-605.
- [20] กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม,
http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=611&filename=min1

Output ที่ได้จากโครงการ

จากงานวิจัยนี้สามารถผลิต 2 ลิทธิบัตร ดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวต่ำ

กล่าวถึงการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง และการใช้เถ้าลอยเพื่อลดการหดตัวและเพิ่มค่ากำลังอัดแก่มวลเบา

2. มอร์ตาร์ที่มีการอุ้มน้ำสูงสำหรับงานปูนฉาบ

กล่าวถึงการใช้เถ้าลอยและเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมของปูนฉาบที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวสามารถฉาบได้ง่าย และคุณสมบัติด้านการทึบน้ำที่ดี