การใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมซิงค์ออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

นางสาวจิตวิกา สมใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต
แขนงวิชาสาธารณสุขศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
พ.ศ. 2552

Utilization of Waste from Zinc Oxide Industry as Raw Material for Block Concrete Production

Miss Jitwika Somjai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Public Health in Industrial Environment Management

School of Health Science

Sukhothai Thammathirat Open University

2009

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมซิงค์ออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

ชื่อและนามสกุล นางสาวจิตวิกา สมใจ

แขนงวิชา สาธารณสุขศาสตร์

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

อาจารย์ที่ปรึกษา 1. รองศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ

2. รองศาสตราจารย์ปิติ พูนไชยศรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา อยู่สุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ปิติ พูนไชยศรี)

คณะกรรมการบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต แขนงวิชาสาธารณสุขศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

..... ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุจินต์ วิศวธีรานนท์)

วันที่ 2 เดือน กันยายน พ.ศ. 2553

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมซิงค์ออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

ผู้วิจัย นางสาวจิตวิกา สมใจ **ปริญญา** สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม) **อาจารย์ที่ปรึกษา** (1) รองศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ (2) รองศาสตราจารย์ปิติพูนไชยศรี **ปีการศึกษา** 2552

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา (1) ปริมาณและลักษณะของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ (2) สัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์แทนที่ปูนซีเมนต์ เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค และ (3) ค่าใช้จ่ายในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยการใช้ขี้เถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตบล๊อค ขี้เถ้าที่ใช้ในการทดลองได้มาจากโรงงานเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด ขนาดตัวอย่างคอนกรีตบล๊อคที่ใช้ในการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร ความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำมีขนาด 50x50x50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ขณะที่ขนาดตัวอย่างคอนกรีตบล๊อคที่ใช้ในการทดสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวมีขนาด 20x60x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ปริมาณขี้เถ้าที่ใช้ในการแทนที่ในซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 0 10 20และ30 และความหนาแน่นของคอนกรีตบล๊อคที่ผลิตขึ้นมี 3 ระดับคือ 600, 700 และ800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ผลการวิจัยพบว่า (1) ขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ประมาณวันละ 1,000-1,200 กิโลกรัม มีสีค่อนไปทางสีเทาเข้มคล้ายสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง เป็นผงละเอียด (2) สัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ขี้เถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ คอนกรีตบล๊อคที่มีความหนาแน่น 700 และ 800 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรซึ่งมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าร้อยละ 10 เมื่อนำมาเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก.1505-2541พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (3) เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล๊อคนี้กับคอนกรีตบล๊อคที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม มอก.1505-2541และจำหน่ายในท้องตลาดโดยทั่วไป พบว่า มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าคอนกรีตบล๊อกตามท้องตลาดดังกล่าว

คำสำคัญ อุตสาหกรรมซิงค์อ๊อกไซด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้า คอนกรีตบล๊อค คุณสมบัติเชิงกล

Thesis title: Utilization of Waste from Zinc Oxide Industry as Raw Material for Block Concrete Production
Researcher: Miss Jitwika Somjai; **Degree:** Master of Public Health (Industrial Environment Management) ; **Thesis advisors:** (1) Dr.jakkris Sivadechathep, Associate Professor (2) Peeti Bhoonchaisri, Associate Professor;
Academic year: 2009

Abstract

The purposes of this research were to : (1) study amount and type of waste ash from zinc oxide (ZnO) production process; (2) study the optimal proportion or the waste ash replacing cement as the mixing proportion of concrete block production; and (3) find the cost of using the waste ash as the mixing proportion of concrete block production.

This experimental research was conducted by replacing the waste ash for cement in concrete block production process. The waste ash used in this project was from the Met Oxide Factory (Thailand) Company., Limited. The sample size of concrete block used in testing of volume density, pressure resistant and absorption rate of water was 50x50x50 mm^3 whereas the sample size used in testing of changing rate of length was 20x60x10 cm^3. The studied variables were amount of the waste ash replacing cement from 0%, 10%, 20% to 30%. Moreover, 3 levels of concrete density including 600, 700 and 800 kg/m^3 were produced.

The results from this research were found that : (1) the waste ash from zinc oxide production was about 1,000-12,000 kg/day. It had dark grey color like portland cement type 1 and was solid particles of tiny powder; (2) the optimal proportion of the waste ash replacing cement as the concrete block with density of 700 and 800 kg/m^3 was 10%. When comparing with the Industrial Standard of the Autoclaved Aerated Light Weight Concrete Elements 1505-2541, the produced concrete blocks were under the Standard; and (3) when comparing the unit cost of the produced concrete block with other concrete blocks under the Standard in general market, this concrete block had lower unit cost.

Keywords Zinc oxide industry, Portland cement, Ash, Concrete block, Mechanical qualification

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่องการใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมซิงค์ออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตบล็อคฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ และรองศาสตราจารย์ปิติ พูนไชยศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณผู้บริหารบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด และขอขอบคุณ คุณศักดิ์ชัย โภควรรณวิทย์ (ผู้อำนวยการโรงงาน) บริษัทไทยไลท์บล็อกแอนด์แพเนล จำกัด ตลอดจนพนักงานฝ่ายต่างๆ ของบริษัท ที่อำนวยความสะดวกและได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล, วัตถุดิบ และเครื่องมือ- อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ และให้สถานที่สำหรับดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ทำให้มีโอกาสได้ศึกษาต่อ ตลอดจนผู้มีพระคุณ ครู-อาจารย์ ผู้ให้โอกาสประสิทธิ์ประศาสตร์วิชาความรู้ รวมถึงบรรดาเพื่อน พี่ และน้อง ของผู้วิจัยหลายท่านซึ่งไม่สามารถระบุนามในที่นี้ที่ได้กรุณาช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

จิตวิกา สมใจ

มิถุนายน 2553

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย 1

วัตถุประสงค์การวิจัย 2

กรอบแนวคิดในการวิจัย 2

สมมติฐานการวิจัย 5

ขอบเขตของการวิจัย 5

นิยามศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย 6

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 6

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 7

คอนกรีตมวลเบา 7

ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ 24

การทดสอบ 34

การนำเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และเถ้าชีวมวลอื่นๆ มาใช้ในงานก่อสร้าง 38

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 47

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 50

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 50

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 51

วิธีการศึกษา 51

การทดสอบ 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ข้อมูล 60
ปริมาณ ลักษณะทางกายภาพของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวน
การผลิตซิงค์ออกไซด์ 60
องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวน
การผลิตซิงค์ออกไซด์ 61
ผลการทดลองและการทดสอบของคอนกรีตบล๊อค 61
บทที่ 5 สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ 73
สรุปการวิจัย 73
ข้อเสนอแนะ 74
บรรณานุกรม 75
ภาคผนวก 79
ก ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 80
ข ผลการทดสอบคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้า
ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ 87
ค มาตรฐานผลอตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา
แบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก. 1505-2541 90
ประวัติผู้วิจัย 108

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตเบาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป 8
ตารางที่ 2.2 แสดงการจำแนกประเภทของคอนกรีตมวลเบาตามลักษณะการนำไปใช้งาน 8
ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นร้อยละ 80 ของ
สารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด 13
ตารางที่ 2.4 ประเภทและคุณสมบัติของมวลผสมเบา 15
ตารางที่ 2.5 ข้อดีข้อเสียของคอนกรีตมวลเบา 20
ตารางที่ 2.6 ค่าทั่วไปของการเป็นตัวนำความร้อนสำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา 22
ตารางที่ 2.7 ค่าทั่วไปของกำลังอัดสำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา 22
ตารางที่ 2.8 ค่าทั่วไปของการหดตัวเมื่อแห้ง 23
ตารางที่ 2.9 ตารางแสดงข้อกำหนดการรับกำลังอัดแบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์ 27
ตารางที่ 2.10 การแบ่งชนิดและชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ 27
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของสารประกอบหลักต่อปูนซีเมนต์ 28
ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารประกอบหลักที่รวมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททต่าง 29
ตารางที่ 2.13 เปรียบเทียบกำลังอัดของปูนซีเมนต์ ทั้ง 5 ประเภท 30
ตารางที่ 2.14 สารประกอบของปูนขาว 32
ตารางที่ 2.15 สารประกอบของยิปซั่ม 33
ตารางที่ 2.16 สารประกอบของทราย 33
ตารางที่ 2.17 อัตราเพิ่มแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา 37
ตารางที่ 2.18 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-94a
(ASTM C618-94a, 1995) 40
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล๊อค 53
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Dry Density) 62
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) 64
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Water Absorption) 66
ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปผลการเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Change) 68
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบา 72
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา 72

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย 3
ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนการดำเนินการตลอดโครงการ 4
ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต 11
ภาพที่ 2.2 แสดงการสรุปขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบา 24
ภาพที่ 2.3 Flow Chart กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ 26
ภาพที่ 3.1 การกวนวัตถุดิบ 54
ภาพที่ 3.2 เทส่วนผสมลงในแบบหล่อในสัดส่วน 3/4 ของปริมาตรแบบหล่อ ขั้นตอนที่ 8 เมื่อส่วนผสมในแบบหล่อตัวอย่างแข็งตัวจนได้ที่ (ใช้เวลาประมาณ 8-12 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบออก) เมื่อทำการถอดแบบหล่อออกแล้วนำคอนกรีตบล๊อคที่ได้มาจัดวางไว้เพื่อเตรียมที่จะอบไอน้ำ 55
ภาพที่ 3.3 ทำการถอดแบบหล่อออกและนำเข้าตู้อบไอน้ำ 55
ภาพที่ 3.4 การทดสอบ ขนาด 56
ภาพที่ 3.5 การทดสอบ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 57
ภาพที่ 3.5 การทดสอบ อัตราการดูดกลืนน้ำ 58
ภาพที่ 3.6 การทดสอบ ความต้านแรงอัด 59
ภาพที่ 3.7 การทดสอบ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว 59
ภาพที่ 4.1 แสดงสีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้า 60
ภาพที่ 4.2 ผลทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร 63
ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบการรับกำลังอัด 65
ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ 67
ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว 71

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

การพัฒนาประเทศตามแผนเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติตั้งแต่ฉบับที่ 1 จนถึงฉบับที่ 10 ดำเนินภายใต้แนวคิดการพัฒนาที่มุ่งเน้นความเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจเป็นสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงแผนเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2530 -2534) เศรษฐกิจโลกและภูมิภาครวมทั้งประเทศไทยมีอัตราการเจิญเติบโตอย่างต่อเนื่อง รัฐบาลยุคนั้นได้รับนโยบายทางเศรษฐกิจใหม่โดยใช้การพัฒนาการท่องเที่ยว และอุตสาหกรรมส่งออกเป็นกลยุทธ์ในการพัฒนาประเทศ ในส่วนภาคอุตสาหกรรมมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างค่อนข้างมาก ทั้งในด้านการผลิตและการส่งออก ต้องปรับตัวและนำเทคโนโลยีสะอาดมาใช้ มีการแปรสภาพวัตถุดิบที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมซิงค์ออกไซด์ของ บริษัท เมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด ได้นำมาตรฐานระบบบริหารจัดการด้านคุณภาพ หรือ ISO 9001 : 2000 และเทคโนโลยีสะอาด หรือ Clean Technology (CT) มาใช้เป็นแนวทางในการจัดการเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าในกระบวนการผลิต ซึ่งปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตบางส่วนก็สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้และบางส่วนไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ต้องส่งกำจัดโดยวิธีที่เหมาะสมต่อไป ดังนั้นการหาวิธีนำกากของเสียบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์นำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นหนทางที่ดีและทางออกที่ดีอีกทางหนึ่งในจัดการกากของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษา การนำกากของเสียที่เกิดขึ้น จากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ คือ ขี้เถ้า มาใช้เป็นส่วนผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตบล๊อค ซึ่งเป็นการนำเอากากของเสียจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องในด้านองค์ความรู้ที่เหมาะสมสำหรับการนำขี้เถ้าจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์มาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดการกากของเสียและป้องกันปัญหามลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม และยังได้ประโยชน์ในเชิงเศรษฐศาสตร์อีกด้วย ซึ่งการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลองโดยมุ่งศึกษาคุณสมบัติและคุณภาพที่เหมาะสมเบื้องต้นของคอนกรีตบล๊อคที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้

โดยทำการวัดขนาด ความหนาแน่นเชิงปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการสนับสนุนการจัดการกากของเสียจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ (ขี้เถ้า) ของบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด และขยายผลไปสู่อุตสาหกรรมผลิตซิงค์ออกไซด์ทั่วประเทศ ซึ่งจะเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยแก้ไขปัญหาการจัดการกากของเสียซึ่งอาจก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมให้ลดน้อยลงได้

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

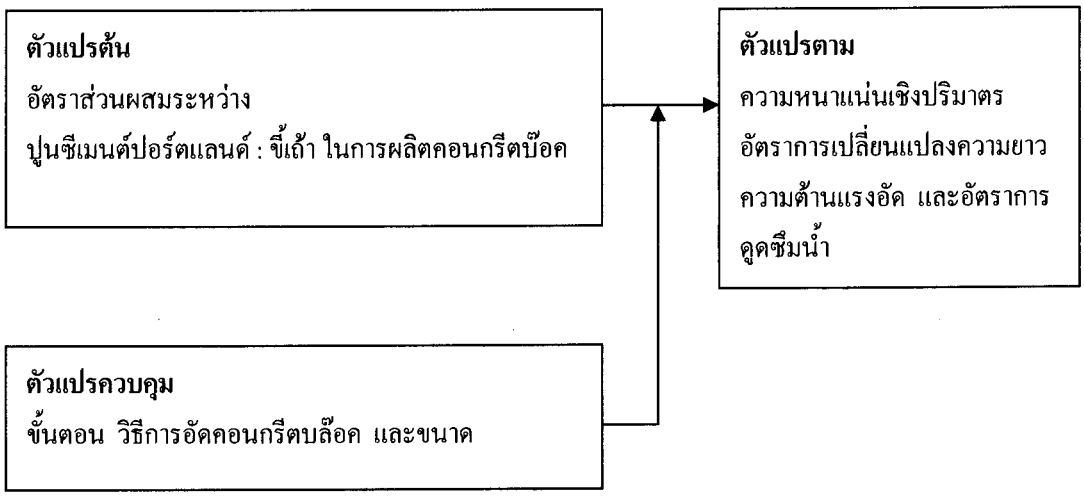
2.1 เพื่อศึกษาปริมาณและลักษณะของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

2.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์แทนที่ปูนซีเมนต์ เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

2.3 เพื่อศึกษาค่าใช้จ่ายในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

3. กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมุ่งศึกษาปริมาณและลักษณะของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ โดยมีแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเสียชนิดขี้เถ้า ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเบื้องต้นถึงสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค โดยทำการวัดขนาด ความหนาแน่นเชิงปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ เทียบกับมาตรฐานคอนกรีตบล๊อคเชิงตันแบบไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 และศึกษาค่าใช้จ่ายในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

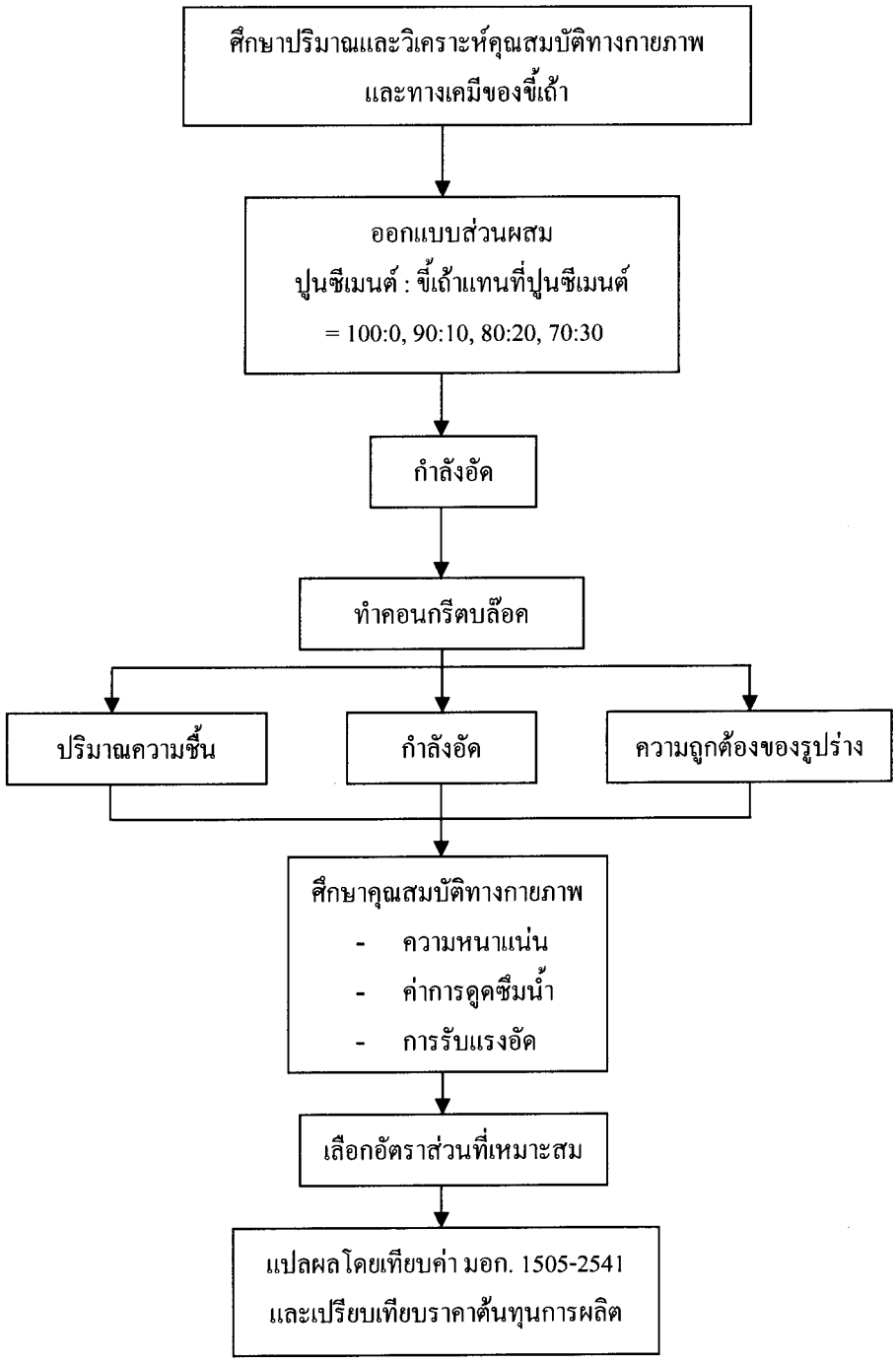


ภาพที่ 1.1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย

3.1 ตัวแปรต้น คือ อัตราส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้า และน้ำประปาในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

3.2 ตัวแปรควบคุม คือ ขั้นตอน วิธีการอัดคอนกรีตบล๊อค และขนาด

3.3 ตัวแปรตาม คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ เทียบกับมาตรฐานคอนกรีตบล๊อคเชิงตันแบบไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541



ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนการดำเนินการตลอดโครงการ

4. สมมติฐานการวิจัย

4.1 ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์สำเร็จรูปในสัดส่วนที่มากขึ้นจะส่งผลให้การรับแรงอัดของคอนกรีตบล๊อคที่ได้มีประสิทธิภาพลดลง

4.2 คอนกรีตบล๊อคที่มีส่วนผสมของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสมมีคุณสมบัติเชิงกล เทียบเท่ามาตรฐาน มอก. 1505-2541

4.3 คอนกรีตบล๊อคที่มีส่วนผสมของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์เป็นคอนกรีตบล๊อคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ

5. ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยการทำคอนกรีตบล๊อคผสมของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ศึกษาปริมาณและลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ของ บริษัท เมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด

5.2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม มอก. 15 เล่ม 1

5.3 ขี้เถ้าที่ใช้ในการวิจัยเป็นขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ของบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด

5.4 คอนกรีตบล๊อคตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยเป็นคอนกรีตบล๊อคมวลเบาขนาด 20 x 60 x 10 ซม.

5.5 การวัดขนาด ความหนาแน่นเชิงปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ความต้าน แรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541

5.6 ศึกษาการทดสอบความคงทนกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และน้ำหนัก ของคอนกรีตบล๊อคที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 100, 90, 80 และ 70 โดยน้ำหนัก และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

6. นิยามศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย

6.1 ปูนซีเมนต์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

6.2 ขี้เถ้า หมายถึง อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของก้อนซิงค์

6.3 คอนกรีตบล๊อค หมายถึง ก้อนคอนกรีตบล๊อคที่ได้จากการนำของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ ผลิตซิงค์ออกไซด์ ผสมกับปูนซีเมนต์สำเร็จรูปในอัตราส่วนต่างๆ

6.4 คุณสมบัติเชิงกล หมายถึง ความสามารถในการคงทนกำลังอัด การดูดซึมน้ำและน้ำหนัก ของคอนกรีตบล๊อคตามมาตรฐานมอก. 1505-2541

7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

7.1 ทราบถึงปริมาณและลักษณะของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ของ บริษัท เมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด

7.2 ทราบถึงสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ในการผลิตคอนกรีตบล๊อคมวลเบา

7.3 ทราบถึงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตบล๊อคมวลเบาที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

7.4 เป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ที่ไม่สามารถนำ กลับมาใช้ในกระบวนการผลิตให้สามารถใช้และมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอื่นๆ

7.5 เป็นการช่วยลดปัญหาในการกำจัดทิ้งของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ให้แก่บริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด

7.6 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ทำคอนกรีตบล๊อค ที่ผลิตจากของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้งานวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยความเรียบร้อยและมีประสิทธิผล ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เคยได้มีผู้เคยศึกษามาในเรื่องต่างๆ ดังนี้

1. ความรู้เกี่ยวกับคอนกรีตมวลเบาและคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ
2. ความรู้เกี่ยวกับปูนซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซั่ม ทราย และผงอลูมิเนียม
3. การทดสอบคอนกรีตบล๊อคมวลเบา
4. การนำเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และเถ้าชีวมวลอื่นๆ มาใช้ในงานก่อสร้าง
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งจากการศึกษาในเรื่องต่างๆข้างต้น จะช่วยในการพิจารณากำหนดแนวทางในการนำขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์มาพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง วิธีการดำเนินการวิจัย และการกำหนดคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

1. คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสมที่เหมาะสมชนิดต่างๆ เช่น ทราย กรวด หินย่อย และจะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ นำมาอัดเข้าแบบมาตรฐานเป็นรูปบล็อคต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนส่วนประกอบของโครงสร้างเป็นผลทำให้ขนาดของโครงสร้างลดลงและรวมถึงลดแรงงานก่อสร้างด้วย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและเก็บเสียงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงเป็นที่นิยมใช้ทั่วไป เพราะมีราคาถูก แข็งแรงและทนทาน มีน้ำหนักเบา ทนไฟและระบายความร้อนได้ดีดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ยังง่ายและสะดวกต่อการวางแผนงาน ก่อง่ายและใช้เวลาน้อยกว่าอิฐมาก จึงทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความสวยงามได้อย่างเพียงพอโดยไม่ต้องฉาบ

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตเบาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป

คุณสมบัติ	หน่วย	คอนกรีตมวลเบา	คอนกรีตทั่วไป
ความหนาแน่น	กก./ลบ.ม.	400 – 1,400	2,350
กำลังอัดที่ 28 วัน	กก./ตร.ซม.	10 – 140	240
โมดูลัสความยืดหยุ่น	กก./ตร.ซม.	$42 \times 10^3 - 98 \times 10^3$	150×10^3
สภาพนำความร้อน	Watt/mK	0.17 – 0.55	1.20 – 1.70
สภาการดูดซึมน้ำ	% โดยปริมาตร	20 – 45	3 – 1
การหดตัว	%	0.15 – 0.50	0.035

คอนกรีตมวลเบาสามารถจำแนกตามลักษณะการนำไปใช้งานได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 แสดงการจำแนกประเภทของคอนกรีตมวลเบาตามลักษณะการนำไปใช้งาน

ประเภท	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก./ ตร.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)
คอนกรีตเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural Lightweight Concete)	180 – 480	1,400 – 1,800
คอนกรีตสำหรับงานก่อ (Masonry Concete)	100 – 180	500 – 800
คอนกรีตสำหรับงานฉนวนความร้อน (Insulating Concrete)	10 - 100	น้อยกว่า 800

จาก เอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ พ.ศ. 2537 บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัดมหาชน

1.1 มวลรวมและสารผสมเพิ่มในคอนกรีต

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Fine & Coarse Aggregate) คือ วัสดุเฉื่อย ได้แก่ ทราย หิน และกรวด ที่ผสมในคอนกรีตเพื่อช่วยรับน้ำหนักกดบนคอนกรีต ลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้

คอนกรีตมีความคงทนและปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก มวลรวมสามารถแบ่งตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนัก ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300 – 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. มวลรวมปกติ (Normal Light Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400 – 3,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3. มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.1.1 เมื่อแบ่งมวลรวมตามขนาด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไปหรือค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

1.1.2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ดี

1) ความแข็งแกร่ง (Strength) มวลรวมที่ต้องมีความสามารถในการรับแรงกดไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ โดยทั่วไปมวลรวมจะสามารถรับแรงกดได้ 700 – 3,500 กก./ตร.ซม. ซึ่งสูงกว่าคอนกรีต

2) ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance) มวลรวมควรมีความแข็งแรง เนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่มเป็นรูพรุนหรือแตกหักง่าย โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตต้องถูกกระทำจากการกระแทกหรือการขัดสี เช่น งานถนน พื้นโรงงาน เป็นต้น

3) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemicel Stability) มวลรวมไม่ต้องทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์หรือสิ่งแวดล้อมภายนอก

4) รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface Texture) มวลรวมที่มีผิวหยาบหรือมีรูปร่างแบนยาวจะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลม หรืออเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเทได้เดียวกัน ลักษณะผิวของมวลรวมจะมีผลโดยตรงกับแรงยึดเหนี่ยว เมื่อมีผิวหยาบหรือมีรูพรุนมากจะทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวดีแต่จะใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากขึ้น

1.1.3 ขนาดคละของมวลรวม (Gradation)

ขนาดคละของมวลรวม คือ การกระจายของขนาดต่างๆ ของอนุภาค นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณของเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการสำหรับคอนกรีตสด คอนกรีตจะมีราคาประหยัดเมื่อใช้เนื้อซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุดในการผลิตคอนกรีต โดยที่คุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความสามารถในการเทได้ การทำให้แน่น กำลังอัดและความทนทานยังเป็นไปตามกำหนด

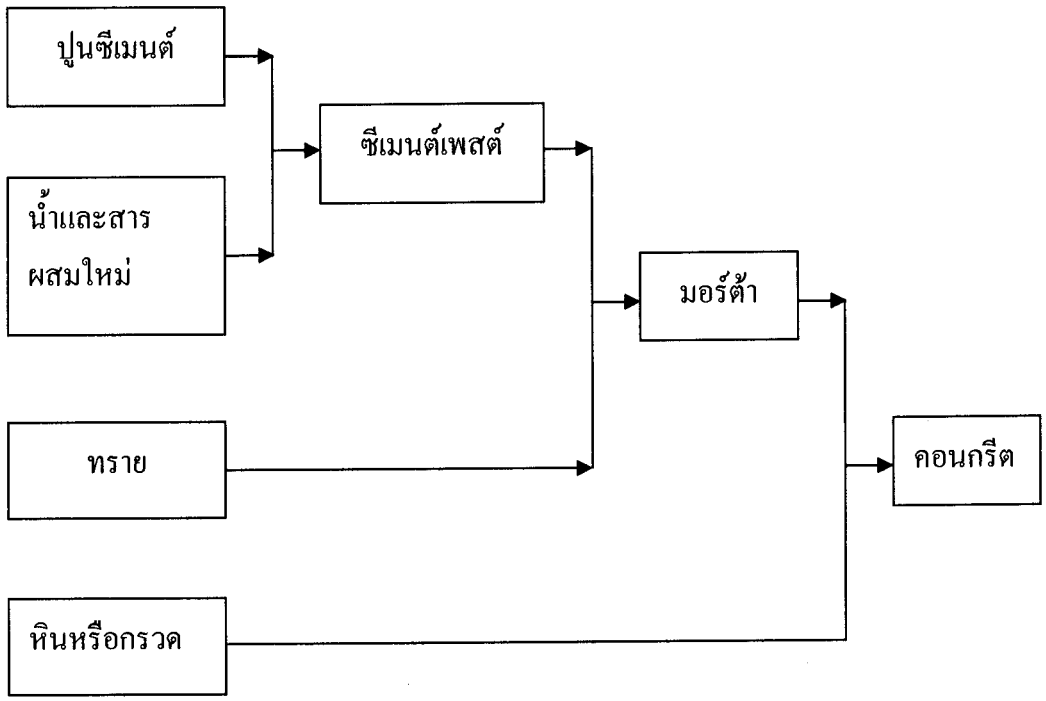
คอนกรีตที่ดีจะมีขนาดคละของมวลรวมเป็นขนาดคละแบบต่อเนื่อง คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดกระจายทั่วกันในเนื้อคอนกรีต

การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมจะทำได้โดยการใช้ตะแกรงร่อนที่มีขนาดช่องเปิดต่างกัน ปริมาณของวัสดุที่ผ่านตะแกรงร่อนจะนำมาวิเคราะห์และเขียนเป็นแผนภูมิคละ

โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) คือตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม ค่าโมดูลัสความละเอียดมากมวลรวมจะมีความหยาบมากโดยที่โมดูลัส

ความละเอียด = $\frac{1}{100}$ (ผลบวกของร้อยละสะสมของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน)

ทรายที่ใช้ในงานคอนกรีตควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดตั้งแต่ 2.3 – 3.2 ทรายที่มีค่าความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทได้เท่าๆ กัน มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคขนาดกลางขนาดใดขนาดหนึ่งหรือหลายขนาดจะมีผลต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต

1.2 น้ำ (Water)

คุณภาพของน้ำมีความสำคัญต่องานคอนกรีต คือ สารปนเปื้อนในน้ำอาจมีผลต่อผลกระทบต่อเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ กำลังรับแรงของคอนกรีต สีของคอนกรีต และอาจรวมไปถึงการกัดกร่อนเหล็กเสริมด้วยเหตุนี้ เราจึงต้องคำนึงถึงคุณภาพของน้ำที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผสม, การบ่มคอนกรีต และการทำความสะอาดมวลรวมและหน้าที่ของน้ำในการงานคอนกรีตมีดังนี้

1. ในการผสมคอนกรีต ช่วยเคลือบหินและทรายเพื่อที่ปูนซีเมนต์สามารถแข็งตัวยึดติดกันได้

2. ทำให้ส่วนผสมไหลลื่น มีความข้นเหลว ช่วยให้เทเข้าแบบหล่อเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย

3. ทำหน้าที่ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดชั่นซึ่งจะเกิดความร้อน (Heat of hydartion) ทำให้ผงซีเมนตต์มีสภาพที่เหนียวซึ่งเป็นตัวประสานผิวระหว่างมวลรวมให้ยึดเกาะกันแน่นเมื่อแข็งตัว

4. ในการบ่มคอนกรีต น้ำมีหน้าที่ รักษาปริมาณน้ำให้เพียงพอต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งน้ำบางส่วนจะหายไปจากการระเหย การดูดซับน้ำของมวลรวม และไม้แบบ หากมีการ

สูญเสียน้ำจนทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตลดลงต่ำกว่า 30% ปฏิกิริยาจะหยุดลงมีผลให้การเพิ่มกำลังรับของคอนกรีตลดลง การบ่มจะทำตั้งแต่ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งตัว (ประมาณ 24 ชม. หรือหลังจากถอดแบบ)

5. ใช้ในการทำความสะอาดมวลรวมให้สะอาด น้ำที่ใช้จึงจำเป็นต้องสะอาดทั้งนี้เพราะน้ำที่ใช้ล้างนั้นจะเกาะติดมวลรวมและเข้าไปผสมกับคอนกรีตได้การล้างนี้เพื่อให้มวลรวมปราศจากฝุ่น เกลือ หรือสารอินทรีย์ต่างๆ เนื่องจากสารอินทรีย์มีผลในการลดกำลังรับแรงของคอนกรีต

1.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นเมื่อนำปูนซีเมนต์มาผสมกับน้ำ ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นซีเมนต์เพสท์จะค่อยๆ แข็งตัวจนแข็งตัวเต็มที่ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิเกตและอลูมิเนตที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์

ในสภาวะเริ่มแรกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต 2 ตัว คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก่อนอย่างรวดเร็วแล้วค่อยๆ ลดลงในเวลาต่อมา ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) จะได้เจลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) และน้ำปูน ($Ca(OH)_2$) แยกออกมา สำหรับไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะเกิดปฏิกิริยาคล้ายกันแต่จะได้น้ำปูนน้อยกว่า โดยจะเขียน $C_3S_2H_3$ ในรูป C-S-H ซึ่งเรียกว่า โทเบอร์โมไลท์เจล

เมื่อแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะทำให้เกิดน้ำปูน ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต($C_3S_2H_3$) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน น้ำปูนที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะทำให้ซีเมนต์เพสท์มีคุณสมบัติเป็นด่าง (pH ประมาณ 12.5) ซึ่งสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็ก

สมการการเกิดปฏิกิริยาไอเดรชั่น มีดังต่อไปนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

สำหรับไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$) หรือ C_3A แม้จะมีจำนวนน้อยแต่ก็เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างเฉียบพลัน ดังนั้นจึงต้องเติมยิปซั่มลงไปแก้ไขผลึกที่ได้จากไฮเดรชั่นของ C_3A เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมและมีเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นห่อหุ้มไว้สมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

$$3CaO.Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

และเมื่อใส่ยิปซั่มในขั้นตอนบดเม็ดปูน จะได้สมการดังนี้

$$C_3A + CaSO_4.2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.3lH_2O$$

1.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาไอเดรชั่นโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) อายุของซีเมนต์เพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงเริ่มแรก หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2) องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละตัวในปูนซีเมนต์จะแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3

3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มาก มีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงเริ่มต้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะลดลง และถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยจะมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต้องไม่ทำให้ซีเมนต์เพสต์แห้งตัวมากเกินไป

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นร้อยละ 80 ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด

สารประกอบหลัก	**ระยะเวลา (วัน)**
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ หรือ C_3S)	10
ไดแคลเซียมซิลิเกต ($CaO.SiO_2$ หรือ C_2S)	100
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_2$ หรือ C_3A)	6
เตตราแคลเซียมอลูมิเนตโนเฟอร์ไรท์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ หรือ C_4AF)	50

(วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

1.3 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่ม คือ วิธีการที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยการป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีตและรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

1.3.1 วัตถุประสงค์ของการบ่มคอนกรีต

1) เพื่อให้คอนกรีตที่ได้มีความแข็งแรงทนทาน

2) เพื่อลดการแตกร้าวของคอนกรีต โดยการรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมและลดการระเหยของน้ำ การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้อุณหภูมิสูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจทำให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว

1.4 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา

1.4.1 คอนกรีตมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete) เป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบาแทนที่มวลรวมปกติซึ่งได้จากการผสมมวลรวมเบาที่มีความพรุนทำให้ความถ่วงจำเพาะลดลง ซึ่งมวลรวมเบา(Lightweight Aggregate) มีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 60 – 1,000 กก./ลบ.ม. เทียบกับ 1,100 – 1,750 กก./ลบ.ม. ของมวลรวมปกติ หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเบาแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และสามารถจำแนกมวลรวมเบาออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

1) มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินรุน และหินละลายชนิดเบาที่ได้จากเถ้าถ่านภูเขาไฟ เช่น หิน Vermiculite, Perlite, Pumice และ Scoia ซึ่งเป็นหินที่เกิดขึ้นเวลาภูเขาไฟระเบิด ใช้ผสมทำคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงมากนัก และมวลรวมจะดูดซึมน้ำมาก คอนกรีตเบาที่ทำจากหินพรุนจะมีหน่วยน้ำหนัก 710 -1,420 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2) มวลรวมเบาที่ได้จากขบวนการผลิตเป็นมวลรวมเบาที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมากที่สุด สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท

(1) Expanded Clay Aggregate ได้จากการนำดินเหนียวมาผสมกับสารที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ และนำไปเผาที่หม้อเผา (Rotary Kiln) ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้จะมีการขยายตัว เนื่องจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์เกิดเป็นฟองอากาศอยู่ในเนื้อหิน ลักษณะของหินพวกนี้มีรูปร่างกลม แข็ง ผิวเรียบแน่น แต่เนื้อภายในเป็นโพรงอากาศ

(2) Expanded Shale Aggregate ได้จากการนำดินดาน (shale) มาผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส วัตถุดิบจะถูกหลอมรวมกันและจะมีฟองอากาศถูกกักไว้ภายในเนื้อหินลักษณะจะเป็นหินที่มีความแข็งมาก หลังจากที่เผามวล

รวมทั้ง 2 นี้ได้ที่แล้วจะนำมวลเบาที่ได้ไปย่อยให้ได้ขนาดที่ต้องการ มวลรวมเบาชนิดนี้จะมีความแข็งแรงค่อนข้างดี จึงเป็นที่นิยมใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา

(3) Sintered Fly Ash ได้จากการนำเอา Fly Ash หรือ SFA ที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินไปทำให้เป็นเม็ดก่อนแล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้อนุภาคของ Ash จะเกาะกัน โดยผิวของมวลรวมเบาชนิดนี้ค่อนข้างเรียบ

3) มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ แกลบ ขี้เลื่อย ขี้กลบ หรือพลาสติก ฯลฯ มาใส่ผสมเข้าไปในคอนกรีต

4) มวลรวมเบาที่ได้จากของเหลือของขบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าก้นเตา (Furnace Bottom Ash) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง และ Slag ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมหลอมเหล็ก เป็นการพ่นน้ำลงไปบน Slag ที่หลอมเหลวอันจะก่อให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อ Slag ที่แข็งตัว หลังจากนั้นนำไปย่อยให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ส่วนใหญ่จะได้จากการล้างเตาหลอมเหล็ก

ตารางที่ 2.4 ประเภทและคุณสมบัติของมวลผสมเบา

วัสดุ	หน่วยน้ำหนักมวลรวมเบา (กก./ลบ.ม.)	แหล่งกำเนิด	หน่วยน้ำหนักคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)	การดูดซึมน้ำ (%)
Expanded Clay, Expanded Shale	550-1050	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	1,100-1,850	180-450	5-15
Foamed Slag	650-900	สังเคราะห์	1,100-1,850	180-450	5-25
Sintered Fly Ash	600-1,000	สังเคราะห์	1,350-1,900	180-450	14-24
Vermiculite	65-200	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	400-950	8-35	20-35
Perlite	65-200	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	550-800	7-42	10-50

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วัสดุ	หน่วยน้ำหนักมวลรวมเบา (กก./ลบ.ม.)	แหล่งกำเนิด	หน่วยน้ำหนักคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)	การดูดซึมน้ำ (%)
Pumice	-	ธรรมชาติ	800-1,300	50-60	สูงมาก
Crushed Stone	1,450-1,750	ธรรมชาติ	2,250-2,400	240-550	0.5-2.0

จาก เอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ พ.ศ. 2537 บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัดมหาชน

คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมเบา

1. หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นอยู่ประมาณ 300 – 1,800 กก./ลบ.ม.
2. กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ 4 – 480 กก./ตร.ซม.
3. ปริมาณซีเมนต์ใช้เท่ากับคอนกรีตปกติ จนถึงสูงกว่าปกปกติถึงร้อยละ 70
4. ในปริมาณความสามารถเทได้เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบาจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป
5. การนำความร้อนต่ำ เหมาะที่จะนำไปใช้ทำฉนวนความร้อน รวมทั้งยังมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำด้วย
6. การดูดซึมน้ำสูง
7. ค่า Modulus of Elasticity ต่ำ
8. ความสามารถทนไฟได้ดี
9. กำลังและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กต่ำ
10. Tensile Strain มากกว่าคอนกรีตปกติ
11. Creep จะเหมือนกับคอนกรีตทั่วไป

ข้อควรระวังในการใช้งาน

1. การแยกตัว คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา ถ้าส่วนผสมมีค่าการยุบตัวมากหรือมีการจี้เขย่ามากเกินไป จะทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวโดยมวลรวมเบาจะลอยตัวสู่บริเวณผิวบน การแต่งผิวหน้าจึงทำได้อยาก

2. การดูดซึมน้ำ มวลรวมเบาจะดูดซึมน้ำมากดังนั้นผู้ออกแบบส่วนผสมต้องนำปัจจัยนี้มาพิจารณาและเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสม รวมทั้งควรกำหนดวิธีผสมและเลือกประเภทน้ำยาผสมคอนกรีตที่เหมาะสม ซึ่งจะเป็นการขจัดปัญหาเรื่องการดูดซึมน้ำของคอนกรีตประเภทนี้

3. การผสม การผสมที่ไม่ถูกวิธีหรือใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้มวลรวมเบาแตก

4. ความทนทาน ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผู้ออกแบบต้องระมัดระวังเรื่องการกัดกร่อนเหล็กเสริม เนื่องจากความลึกที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยา Carbonation จะสูงเป็นสองเท่าของคอนกรีตปกติ

1.4.2 คอนกรีตพรุนหรือโฟมคอนกรีต (Aerated or Foam Concrete) เป็นคอนกรีตเบาชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้มีน้ำหนักเบาด้วยการทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต โดยที่คอนกรีตพรุนจะไม่ใช้มวลรวมหยาบในการผลิต แต่จะใช้ทรายละเอียดแทน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศอยู่ประมาณ 0.1 – 1 ซึ่งจะทำให้คอนกรีตนั้นมีความพรุนหรือช่องว่างในตัวตอนกรีตขึ้นดังนั้นในอเมริกาและอังกฤษจึงเรียกว่า Aerated Motar ตามลักษณะของเนื้อคอนกรีต ส่วนในยุโรปจะเรียกว่า Foam Conarete หรือ Gas Concrete การผสมคอนกรีตสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) การผสมสารเคมีใส่ลงในมอร์ต้าหรือซีเมนต์เพสต์ แล้วทำการผสมหรือกวนจนเกิดฟองอากาศกระจายในส่วนผสมของมอร์ต้าที่ยังอยู่ในสภาพลาสติก จากนั้นปล่อยให้แข็งตัว

2) ทำให้เกิดฟองอากาศก่อนแล้วจึงค่อยทำการผสมลงในมอร์ต้าหรือซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดคอนกรีตพรุน (Aerated Concrete) ได้ โดยการใช้สารเคมี ซึ่งได้แก่ ผงอลูมิเนียม (Aluminium Powder) จะเป็นการทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ จำนวนมากในเนื้อคอนกรีต และในการผสมโดยใช้ผงอลูมิเนียมนี้จะใส่ในปริมารร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดฟองของไฮโดรเจนในคอนกรีต

คอนกรีตพรุน (Aerated Concrete) สามารถที่จะทำการผสมโดยที่ไม่ต้องใช้ทรายมาเป็นวัสดุผสม ซึ่งจะนำไปใช้ในการทำเป็นฉนวนป้องกันความร้อน โดยส่วนใหญ่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตประเภทนี้จะอยู่ที่ประมาณ 200 – 300 กก./ลบ.ม. และส่วนในกรณีที่ใช้ทรายมาเป็นส่วนผสมก็จะมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 500 – 1,100 กก./ลบ.ม

คุณสมบัติที่สำคัญของโฟมคอนกรีต

1. กำลังอัดและความสามารถนำความร้อนจะผันแปรโดยตรงต่อหน่วยน้ำหนัก
2. กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นถ้าการบ่มโดยวิธีอบไอน้ำที่มีความดันสูง
3. มีความสามารถทนไฟได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ
4. การดูดซึมน้ำสูง
5. สามารถเลื่อยหรือตอกตะปูได้ดี

1.4.3 คอนกรีตไร้มวลละเอียด (No - Fines Aggregate Concrete) คอนกรีตประเภทนี้ได้จากการไม่ใส่มวลรวมละเอียดลงในส่วนผสมนั่นเอง คือ มีเพียงมวลรวมหยาบซึ่งจะถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพสต์จะมีความหนาประมาณ 1 – 3 มม. ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ในเนื้อคอนกรีตทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตลดลง น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด จะขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมหยาบที่ใช้และขนาดคละของมวลรวมเป็นหลัก ซึ่งมวลรวมที่มีขนาดเดียวกันจะมีความหนาแน่นน้อยกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละประมาณร้อยละ 10

โดยทั่วไปคอนกรีตไร้มวลรวมละเอียดจะมีความหนาแน่นประมาณ 1,600 – 2,000 กก./ลบ.ม. แต่ถ้าใช้มวลรวมเบาทำสามารถทำหน่วยน้ำหนักอาจเหลือเพียง 640 กก./ลบ.ม. การใช้งานคอนกรีตประเภทนี้ควรจี้เขย่าอัดคอนกรีตเข้าแบบเพียงเล็กน้อย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาน้ำปูนไหลออกจากหิน เราสามารถวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีตประเภทนี้โดยการตรวจสอบด้วยสายตาว่าน้ำปูนเคลือบผิวหินอย่างทั่วถึงหรือไม่ ซึ่งถือเป็นการเพียงพอแล้วรวมทั้งคอนกรีตประเภทนี้ไม่มีการแยกตัวจึงสามารถเทได้ทุกความสูงของแบบ

กำลังอัดของคอนกรีตไร้มวลรวมละเอียดนี้จะรับได้ประมาณ 18 – 180 กก./ตร.ซม. ขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ ส่วนค่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.38 – 0.52 เนื่องจากคอนกรีตนี้มีการยึดเกาะกันเพียงเล็กน้อย จึงควรทิ้งคอนกรีตไว้นานพอสมควรเพื่อให้คอนกรีตพัฒนากำลังอัด

คอนกรีตที่ไร้มวลรวมละเอียดนี้ มักไม่ใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ถ้าต้องการใช้ควรที่จะเคลือบเหล็กเสริมด้วยน้ำปูนให้หนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะและป้องกันการกัดกร่อน วิธีที่ง่ายที่สุดในการเคลือบเหล็กเสริมคือ การใช้วิธีพ่น (Shotcreting) โดยทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 70 -130 กก./ลบ.ม. ดังนั้นราคาของคอนกรีตประเภทนี้จึงต่ำมาก

1.5 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

1.5.1 ความแข็งแรง

ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาจะมีค่าประมาณ 10 – 140 กก./ตร.ซม. ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับโครงสร้าง ซึ่งมีค่ากำลังอัด 100 – 240 กก./ตร.ซม. สำหรับค่ากำลังอัดของคอนกรีตเบาทั่วไปอาจทำให้สูงขึ้นโดยการใช้ทรายธรรมชาติแทนมวลรวมน้ำหนักเบา แต่อาจทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า

ค่าสัมประสิทธิ์แตกหัก (Modulus of rupture) ของคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาทั่วๆ ไปจะสูงกว่าคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักมากที่มีกำลังอัดเท่ากัน

ค่าพิกัดความยืดหยุ่น หรือค่า E (Modulus of elasticity) ของคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยค่า E ของมวลรวมคอนกีตมวลเบาจะอยู่ระหว่าง 1/3 ถึง 2/3 ของคอนกรีตธรรมดา และค่า E ของคอนกรีตพรุนจะมีค่าต่ำกว่า และค่า Poisson's Ratio ของคอนกรีตเบาจะเท่ากับคอนกรีตธรรมดา

1.5.2 ความคงทน

คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไป ไม่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตสูงปนอยู่หรือดินชื้น และการกระทบกระแทกจากแรงภายนอก เนื่องจากคอนกรีตมวลเบานั้นมีความพรุนมาก

ความเค้นทางกายภาพมีผลต่อคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบามีค่าอยู่ระหว่าง 7×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} ต่อองศาเซนติเกรด ดังนั้นการหดตัวเมื่อแห้ง และการเปลี่ยนแปลงความชื้นในคอนกรีตมวลเบาบางกรณีอาจมีค่าสูง

การแตกหักของคอนกรีต เนื่องจากแรงภายนอกอาจจะมีผลมาจากการขัดสี การกระแทกและการรับน้ำหนักมากเกินไป ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของคอนกรีตเกิดการเสียหายได้

1.5.3 การหดตัวเมื่อแห้ง และการคืบตัว

โดยปกติแล้วคอนกรีตมวลเบาจะมีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดา และจะมีค่าการหดตัวอยู่ประมาณร้อยละ 5 – 40 ส่วนคอนกรีตพรุนจะมีค่าการหดตัวมากกว่าคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา 5 – 10 เท่าในบางครั้ง ค่าการหดตัวเหล่านี้จึงจำเป็นสำหรับการนำมาคำนวณออกแบบ เพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าว

การคืบตัวหรือการล้าของคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปแล้ว จะมีการคืบตัวและยืดตัวตามความชื้นมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งการคืบตัวมากๆ จะสามารถช่วยลดความเค้นดึงเนื่องจากการหดตัวอีกทั้งยังช่วยลดภัยจากการแตกร้าวได้

1.5.4 การป้องกันไฟ

คอนกรีตมวลเบานั้นมีความต้านทานเพลิงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี บางครั้งจึงนิยมใช้คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุหุ้มโครงสร้างเหล็กกล้าเพื่อป้องกันเหล็กเวลาเกิดพลิงไหม้ ซึ่งจะช่วยให้เหล็กไม่เสียคุณสมบัติ ทั้งนี้การต้านทานไฟนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของคอนกรีตมวลเบาด้วย

1.5.5 การเป็นฉนวนกันความร้อนและการเก็บเสียงสะท้อนเสียง

คอนกรีตมวลเบานั้นเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี เนื่องจากการมีความพรุนมากในเนื้อคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมวลเบามีการนำความร้อนต่ำ และคอนกรีตมวลเบายัง

สามารถเก็บเสียงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ถ้าทำการปรับแต่งผิวหน้าของคอนกรีตโดยการฉาบเรียบเสียใหม่ คอนกรีตมวลเบายังสามารถสะท้อนเสียงได้สูงมากด้วย

ตารางที่ 2.5 ข้อดีข้อเสียของคอนกรีตมวลเบา

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เป็นฉนวนความร้อนที่ดี	1. ราคาสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป
2. ลดน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้าง	2. ต้องใส่ใจอย่างมากในด้านการผสม การลำเลียง และการเทลงแบบมากกว่าคอนกรีตทั่วไป
3. ลดจขนาดของฐานราก เนื่องจากน้ำหนักรวมของสิ่งก่อสร้างลดลง	3. จะมีการดูดซึมน้ำมาก และก่อให้เกิดการหดตัว (Drying Shrinkage) สูง
4. แรงดันที่เกิดขึ้นกับไม้แบบลดลง	
5. น้ำหนักของคอนกรีตลดลง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง	

จากเอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ พ.ศ. 2537 บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัดมหาชน

1.6 ประโยชน์ของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบามีคุณสมบัติเด่นหลายประการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดี เช่น มีน้ำหนักเบา ป้องกันความร้อน รวมทั้งป้องกันเสียสะท้อนได้ดีอีกด้วย อย่างไรก็ตามเราสามารถจะนำมาประยุกต์การใช้งานได้ดังนี้

1.6.1 ใช้ทำวัสดุสำเร็จรูป เช่น อิฐบล็อค (Masonry Block) กำแพงสำเร็จรูปใช้สำหรับกำแพงประเภทที่รับน้ำหนักหรือไม่รับน้ำหนัก (Load - Bearing of Nonload - Bearing Wall) คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาและคอนกรีตฟองอากาศหล่อสำเร็จนิยมใช้กันมาก สำหรับทำคอนกรีตบล็อค บล็อคเหล่านี้อาจทำเป็นแบบกลวงหรือเนื้อเต็มก็ได้ และสามารถผลิตได้ง่ายมากในขนาดต่างๆหลายขนาด คุณสมบัติต่างๆ กล่าวคือความหนาแน่น ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีตและวิธีการผลิต สำหรับการใช้คอนกรีตเบาทำกำแพงเพื่อรับน้ำหนักกำแพงควรหนาไม่น้อยกว่า 3 นิ้ว กำแพงที่สร้างด้วยคอนกรีตเบานี้เป็นที่นิยมแพร่หลายในต่างประเทศเนื่องจากเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีน้ำหนักเบา จนสามารถลดขนาดของคานและเสาได้เป็นอย่างดีอีกทั้งยังมีความสม่ำเสมอในด้านขนาดและคุณสมบัติทางกายภาพ

1.6.2 ใช้คอนกรีตน้ำหนักเบาเสริมเหล็ก คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสามารถนำไปใช้กับองค์โครงสร้างสำคัญๆ เช่น เสาและคานได้ถ้าได้รับการบดอัดเป็นอย่างดี สำหรับกรณี

ที่ความเข็งแรงมีความสำคัญน้อยกว่าการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาที่ใช้อาจจะไม่ต้องอัดแน่นมากก็ได้ การให้ส่วนผสมที่ถูกต้องและการอัดแน่นที่ดี การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตนี้มักจะตามมาด้วยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น กำลังดึงและพิกัดค่าแห่งความยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาส่วนใหญ่สามารถใช้งานคอนกรีตเสริมเหล็กและกระทั่งงานคอนกรีตอัดแรงได้ แต่ต้องนำคุณสมบัติเศษต่างๆ ของวัสดุมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างด้วยคอนกรีตเบาเสริมเหล็กใช้เป็นส่วนใหญ่ในชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักประเภท Flexural Member ตั้งแต่ Span สั้นๆ จนถึง 15 ฟุต อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนของกำแพงรับน้ำหนัก (Load Bearing Wallunit) มักจะสูงเท่ากับความสูงของชั้น (Store - high) และเป็นพื้นที่แคบๆ (Narrow Slaps) และเชื่อมเข้ากันตรงมุมด้านตั้ง โดยใช้มอร์ต้าเทเชื่อมในสถานที่ก่อสร้างอีกครั้ง แต่สำหรับกำแพงที่ไม่รับน้ำหนัก ชิ้นส่วนของกำแพงอาจทำในแนวนอน โดยประกอบระหว่างเสารับด้วย ซึ่งมีใช้ทั้งในบ้านพักอาศัยและโรงงาน แต่ถ้าใช้กับตึกหลายชั้นกำแพงแต่ละชั้นจะมีเสารับด้วย นอกจากนี้คอนกรีตพรุนหล่อสำเร็จก็สามารถใช้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กได้ด้วยถ้ามีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กอย่างดี

1.6.3 ใช้คอนกรีตรองพื้น น้ำหนักของหลังคาแบบเรียบและคอนกรีตของอาคารสามารถทำให้ลดลงได้มาก ถ้าใช้คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาประเภทอัดแน่นบางส่วนหรือคอนกรีตฟองอากาศแบบหล่อในที่เป็นวัสดุรองพื้น นอกจากจะลดน้ำหนักของอาคารลงแล้ว คอนกรีตรองพื้นน้ำหนักเบานี้ยังเป็นฉนวนกันความร้อนอย่างดีอีกด้วย การรองพื้นนี้มักจะต้องเททับด้วยปูนซีเมนต์ผสมทรายละเอียดหรือมวลรวมละเอียดอื่นๆ ในอัตราส่วน 1 : 4 ก่อนการปูพื้นด้วยกระเบื้องหลังคาหรือการตบแต่งพื้นความหนาของคอนกรีตนี้ไม่ควรต่ำกว่า 40 มม. แต่เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนของหลังคาความหนาต้องมากกว่านี้ ชนิดของคอนกรีตน้ำหนักเบาที่นำมาใช้ในงาน มีดังต่อไปนี้ วกเพอร์ไลต์พองตัวหรือเวอร์มิคูไลต์พองตัว และคอนกรีตฟองอากาศ ซึ่งจะทำให้มีน้ำหนักเบาเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี แต่ถ้าต้องการให้คอนกรีตมีกำลังสูงด้วย ควรใช้วกตะกรันถลุงขี้เถ้าเชื้อเพลิงหรือดินเหนียวพองตัว หินเชลหรือหินกระดานชนวนพองตัว ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1 : 8 ถึง 1 : 1 นอกจากประโยชน์ที่กล่าวมาคอนกรีตเบายังมีประโยชน์อีกมากมาย และมีคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี รวมทั้งสามารถป้องกันเสียงได้อีกด้วย ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานจึงสามารถทำได้อย่างกว้างขวาง

ตารางที่ 2.6 ค่าทั่วไปของการเป็นตัวนำความร้อนสำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา

วัสดุ (Material)	ความหนาแน่นของคอนกรีต (Dry density of concrete)Kg/m^3	การเป็นตัวนำความร้อน (Thermal conductivity 'K' deg C)W/m - ^{o}C
Areated Concrete	400-800	0.30-0.20
Expanded Vermiculite and perlite	400-1,120	0.11-0.29
Pumice	720-1,280	0.14-0.36
Foamed slag	960-1,520	0.22-0.48
Expanded clay or shale	960-1,200	0.33-0.46
Clinker	1,040-1,520	0.35-0.58
Dense concrete	2,320	1.20-1.70

จากเอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ พ.ศ. 2537 บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด มหาชน

ตารางที่ 2.7 ค่าทั่วไปของกำลังอัดสำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา

ชนิดของคอนกรีต	**มวลรวม**	**ความหนาแน่นของมวลรวม (kg/m^3)**	**ความหนาแน่นของคอนกรีต (kg/m^3)**	**กำลังอัดลูกบาศก์เมื่ออายุ 28 วัน (kg/m^3)**
คอนกรีตฟองอากาศ (Areated concrete)			400-800	14-49
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาอัดแน่นบางส่วน (Partially compacted Lightweight aggregate concrete)	Expanded Vermiculite and Perlite	64-120	400-1,120	5-35
	Pumice	320-880	720-1,120	14-49
	Foamed slag	480-960	960-1,520	14-56
	Sintered pulverized-fuel ash	640-960	1,120-1,280	28-70
	Expanded clay or shale	560-1,040	960-1,520	56-84
	Clinker	720-1,040	1,040-1,520	21-70

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

ชนิดของคอนกรีต	มวลรวม	ความหนาแน่นของมวลรวม (kg/m^3)	ความหนาแน่นของคอนกรีต (kg/m^3)	กำลังอัดลูกบาศก์เมื่ออายุ 28 วัน (kg/m^3)
คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด	Natural aggregate	1,360-1,600	1,600-1,920	42-140
(No-fines concrete)	Lightweight aggregate	480-1,040	880-1,200	28-70
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา	Pumice	480-880	1,040-1,600	105-210
สำหรับโครงสร้าง	Foamed slag	480-960	1,680-2,080	105-420
(Structural Lightweight	Sintered pulverized-fuel ash	640-960	1,360-1,760	140-420
aggregate concrete)	Expanded clay or shale	560-1,040	1,360-1,840	140-420
คอนกรีตธรรมดา	Gravel	1,600	2,340	280
(Dense concrete)				

จากเอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ พ.ศ. 2537 บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัดมหาช

ตารางที่ 2.8 ค่าทั่วไปของการหดตัวเมื่อแห้ง

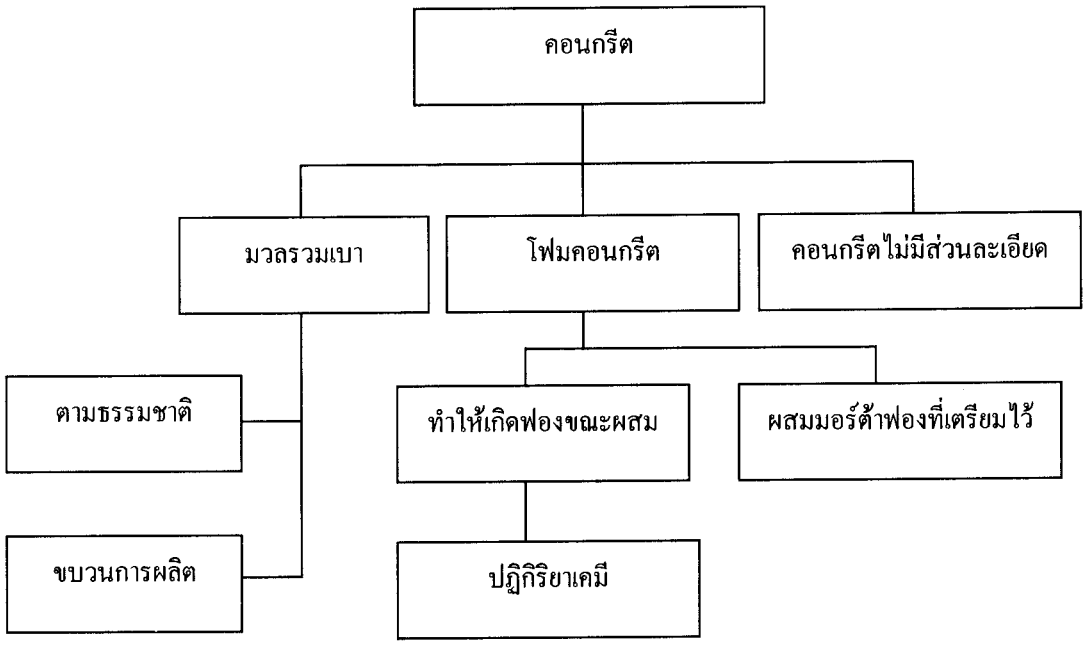
วัสดุ (Material)	การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage)
คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด (No-fines concrete)	
Natural aggregate	0.013
Lightweight aggregate	0.025
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete)	
Expanded Vermiculite	0.25-0.35
Pumice	0.04-0.10
Foamed slag	0.03-0.07
Sintered pulverized-fuel ash	0.04-0.07
Expanded clay	0.04-0.07
Clinker	0.04-0.08
คอนกรีตฟองอากาศ (Areated concrete)	
Precast	0.05
In-situ	0.5

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

วัสดุ (Material)	การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage)
คอนกรีตธรรมดา Dense gravel concrete	0.035

จากเอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ พ.ศ. 2537 บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด มหาชน

สรุปการผลิตคอนกรีตมวลเบา



ภาพที่ 2.2 แสดงการสรุปขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบา

2. ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete) เป็นวัสดุที่ได้มีการคิดค้นและพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1881 นายไมร์ลแชร์คริส ชาวสวีเดน ทำการคิดค้นวัสดุก่อสร้างเป็นครั่งแรกที่ใช้วิธีการบ่มด้วยไอน้ำ มีส่วนผสมที่ประกอบด้วย ทรายละเอียด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาว มาผสมให้เข้ากันแล้วนำไปอบไอน้ำ ต่อมาปี ค.ศ. 1914 นายแอลสวอร์ช ชาวอังกฤษ ได้พัฒนาต่อจากนายไมร์ลแชร์คริส ด้วยการเติมฟองอากาศโดยใช้ผงโลหะ (Metallic Powder) ให้ทำปฏิกิริยากับน้ำและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดก๊าซไฮโดรเจนจนเป็นฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในมอร์ต้าร์ เพื่อลดน้ำหนักในเนื้อของมอร์ต้าร์ ในเวลาต่อมาในปี ค.ศ. 1923 นายจอร์น เอ อีริคสันท์ ชาวสวีเดน คิดค้นและพัฒนาด้วยการเติมฟองอากาศบ่มด้วยไอน้ำ เพื่อทำให้วัสดุมีน้ำหนักเบาขึ้น โดยการวิเคราะห์หาส่วนผสม และกรรมวิธีการบ่มที่เหมาะสมที่สุด จนได้ข้อสรุปที่เกี่ยวกับการทำคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ในปี ค.ศ. 1929 ในประเทศเยอรมันนีได้นำเอาแนวคิดนี้มาพัฒนาระบบการผลิตด้วยเครื่องจักรระบบอัตโนมัติ สำหรับอิฐก่อผนังเพื่อใช้ในงานก่อสร้างบ้านเรือน ในช่วงที่ประเทศต้องใช้วัสดุก่อสร้างในการซ่อมแซมและก่อสร้างอาคารบ้านเรือน ที่เสียหายจากสงครามโลกตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา และเป็นอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายไปในหลายๆ ประเทศทั่วโลก เหตุที่คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศไทย จากคุณสมบัติที่เหนือกว่าวัสดุก่อผนังชนิดอื่นได้แก่ น้ำหนักเบา กันความร้อน (กักอุณหภูมิได้ดีกรณีที่เป็นเมืองหนาว) ป้องกันเสียงได้ดี แข็งแกร่ง ทำงานง่าย การผลิตและการขนส่งเป็นไปด้วยความสะดวกรวดเร็ว ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 Xella Meues Bauen ได้รวมบริษัทผู้เป็นเจ้าของลิขสิทธิ์จาก Hebel, Ytong, Silka ภายใต้เทคโนโลยีเดียวกันเข้าเป็นผู้ถือลิขสิทธิ์เดียวโดยใช้ชื่อ Xella ทั้งนี้มี WEHRAHN 1892 ไม่ได้เข้าร่วมเป็นควบโอนกิจการด้วย

คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ หมายถึง คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตทั่วไปที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยฟองอากาศเล็กๆ จะแทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แข็งแรงด้วยการบ่มอบไอน้ำ เหมาะสำหรับใช้ก่อผนัง ส่วนผสมที่ใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ประกอบด้วย ทรายละเอียด, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนขาว ยิปซั่ม น้ำ และผงอลูมิเนียม ผสมให้เข้ากันโดยเครื่องผสมให้ได้เวลาที่เหมาะสม จึงเทลงแบบหล่อที่ได้จัดเตรียมไว้ เมื่อปูนซีเมนต์ และปูนขาวทำปฏิกิริยากับน้ำพร้อมกับเพิ่มสารก่อฟองอากาศคือผงอลูมิเนียมตามลงไปกวนให้เข้ากันในระหว่างที่ทำการผสม เมื่อ

อลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และปูนขาวจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน ในช่วงที่บ่มในห้องกับอุณหภูมิและทำให้มวลของวัสดุขยายตัวหรือพองตัวเพิ่มจากปริมาตรเดิม 40% - 50% เรียกว่า "เค้ก" เมื่อเค้กแข็งจนได้ที่แล้ว จึงนำเข้าตู้อบไอน้ำแรงดันสูงควบคุมอุณหภูมิ 180 °C – 185 °C ใช้เวลาอบประมาณ 12 -14 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากเตาอบไอน้ำมาผึ่งให้แห้งในอากาศประมาณ 2 – 3 วัน คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จะมีความชื้นอยู่ภายในประมาณ 20% - 30% ทำให้มีน้ำหนักเมื่อแห้งและน้ำหนักที่ใช้งานเบา ข้อมูลของน้ำหนักที่ได้จะใช้สำหรับคำนวณน้ำหนักบรรทุกเวลาขนถ่ายสินค้าขึ้นรถขนส่งสินค้า เพื่อที่จะบริหารจัดการในธุรกิจต่อไป

2.1 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

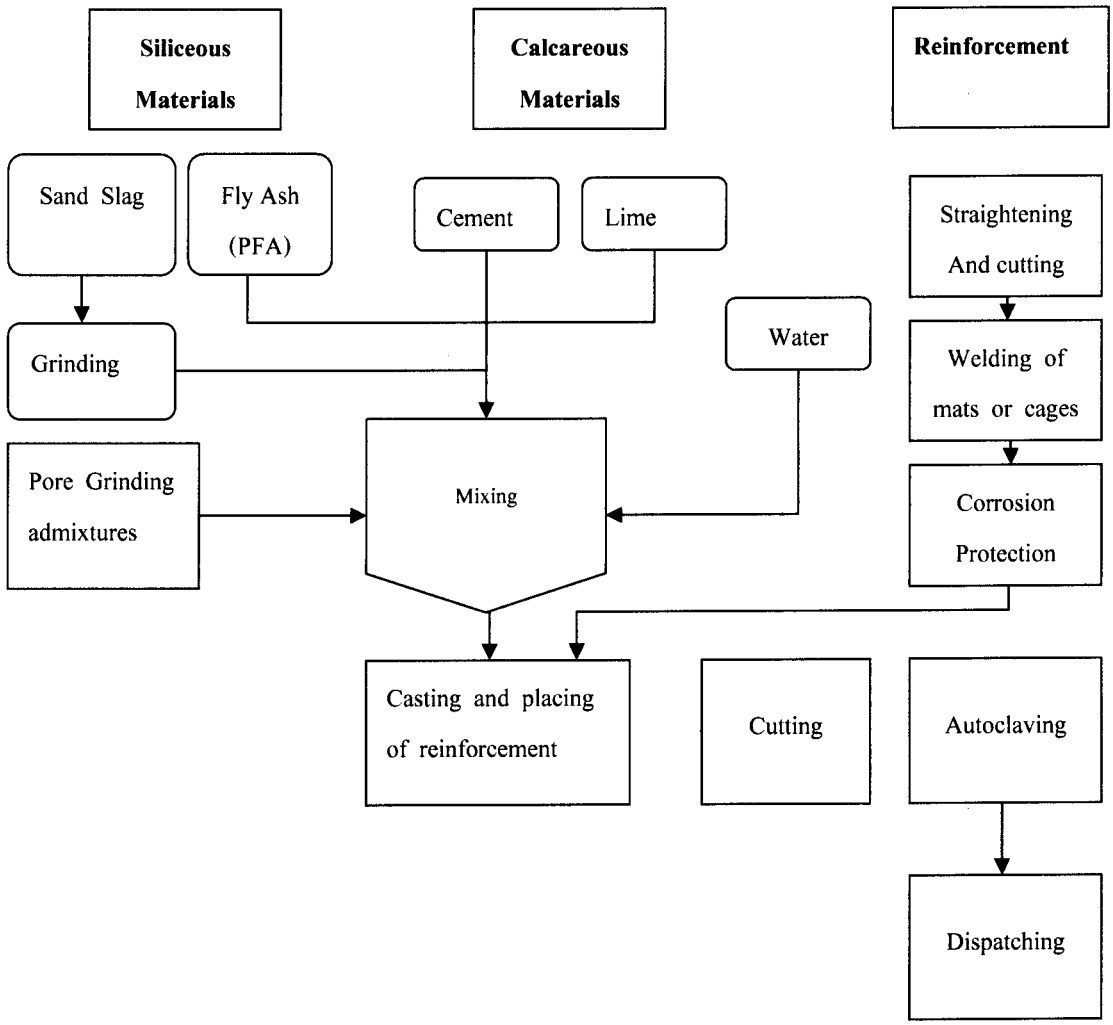
การผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มีองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ Siliceous Calcareous และ Reinforcement สามารถให้คำอธิบายได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 Siliceous ประกอบด้วย มวลรวมละเอียดเถ้าลอยและทรายละเอียด

ส่วนที่ 2 Calcareous ประกอบด้วย วัสดุประสาน คือ ปูนซีเมนต์และปูนขาว

ส่วนที่ 3 Reinforcement ประกอบด้วย เป็นการพัฒนากำลังในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ทั้ง 3 ส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กันในกระบวนการผลิตตั้งแต่ขั้นตอนการเริ่มผสมวัตถุดิบลงในถังผสมจนถึงขั้นตอนการถอดแบบหล่อออกเพื่อนำคอนกรีตมวลเบาที่ได้ไปเข้าตู้อบไอน้ำ ซึ่งการอบไอน้ำนั้นเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากซีเมนต์และปูนขาวผสมรวมกับซิลิก้า (SiO_2) เมื่อ คอนกรีตมวลเบาได้อายุประมาณ 12 -14 ชั่วโมง จะทำให้เพิ่มความแข็งแกร่งในช่วงเวลาสั้นๆ ดังแสดงใน Flow Chart ภาพที่ 5



ภาพที่ 2.3 Flow Chart กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

จากผังการผลิตจะเห็นได้ว่า การพัฒนากำลังในช่วงแรกจะเกิดขึ้นหลังจากเทวัสดุผสมลงในแบบหล่อเป็นการพัฒนากำลังในระยะที่ 1 ส่วนการพัฒนากำลังในระยะที่ 2 เกิดขึ้นหลังจากผ่านการอบไอน้ำซึ่งจะทำให้เกิดผลึกชนิดใหม่ที่เรียกว่า "ผลึกไคนไซด์" และข้อสำคัญอีกประการหนึ่งของการอบไอน้ำ คือการทำให้คอนกรีตมีความแข็งแกร่งสูง

จากผลผลิตที่เกิดขึ้นจะใช้ความหนาแน่นเป็นข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมเพื่อใช้ในการผลิตเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ สำหรับใช้ในการก่อสร้างโดยแสดงไว้ในตารางที่ 2.9 สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ และ กลุ่มของคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

ตารางที่ 2.9 ตารางแสดงข้อกำหนดการรับกำลังอัดแบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์

ชนิดของผลิตภัณฑ์	ค่าการรับกำลังอัดที่ใช้งาน (kcs.)		
	D0.45	D0.55	D0.65
ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ	$\leq$ 20	20-25	40-50
แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ	-	-	$\leq$60

บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

จากตารางที่ 2.9 จะสังเกตุเห็นได้ชัดว่าแผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ D0.65 ออกแบบผสมใช้ความหนาแน่นที่เท่ากัน แต่ยังต้องใช้ผลของการรับกำลังอัดมากกว่ามาตรฐานของชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะผลิตเป็นบล๊อคก่อผนัง สามารถดูข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบมาตรฐานที่แบ่งเป็นชั้นคุณภาพได้จากตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การแบ่งชนิดและชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

ชั้นคุณภาพ	ค่าการต้านกำลังอัดเฉลี่ย (kcs.)		ชนิด	ความหนาแน่น (kg/m3)
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด		
2	25	20	0.4	310-400
			0.5	410-500
4	50	40	0.6	510-600
			0.7	610-700
			0.8	710-800
6	75	60	0.7	610-700
			0.8	710-800
			0.9	810-900
8	100	80	0.9	810-900
			1.0	910-1,000

2.2 ปูนซีเมนต์

วิวัฒนาการของการผลิตปูนซีเมนต์ เริ่มตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณในสมัยนั้นได้มีการนำเอาปูนขาวมาเป็นปูนก่อ (Mortar) แต่ไม่สามารถก่อตัวเมื่ออยู่ในน้ำ ต่อมาจึงได้มีการเติมสารประกอบที่มีซิลิกา เช่น Volcanic Pozzolana หรือ ดิน Santorin ต่อมาได้มีการพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นได้มีการนำเอาวัสดุอื่นมาใช้ เช่นเอาหินปูนมาผสมกับหิน Shale แล้วนำไปเผาเกิดสารซีเมนต์ ซึ่งสามารถแข็งตัวในน้ำและไม่ละลายในน้ำเมื่อแข็งตัวแล้วมีสีคล้ายหินที่ได้มาจากเหมืองในเกาะ Portland จึงเรียกว่า "ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์"

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของสารประกอบหลักต่อปูนซีเมนต์

คุณสมบัติ	ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaOSiO_2$)	ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaOSiO_2$)	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaOAl_2O_3$)	เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$)
อัตราเร็วของปฏิกิริยา	ปานกลาง (ชม.)	ช้า (วัน)	เร็วมาก (ทันทีทันใด)	เร็ว
ความร้อนที่เกิดขึ้น	ปานกลาง	น้อย	มาก	ปานกลาง
ค่าการยึดเกาะ				
ช่วงแรก	ดี	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี
ช่วงหลัง	ดี	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (นาที)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังอัดประลัย	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ

วินิต ช่อวิเชียร (2529)

ตารางที่ 2.12 ปริมาณสารประกอบหลักที่รวมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททต่าง

ประเภท	จำนวนสารประกอบ				ความละเอียด*
	C3S	C2S	C3A	C3AF	ตร.ซม./กรัม
I	50	24	11	8	1,800
II	42	33	5	13	1,800
III	60	13	9	8	2,600
IV	26	50	5	12	1,900
V	40	40	4	4	1,900

ชยาทิตย์ วัฒนวิกย์กิจ (2539)

2.2.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ตามคุณสมบัติและความเหมาะสมกับลักษณะงาน ดังนี้

1) ประเภทที่หนึ่ง (Normal Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะกับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วๆ ไปที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น คาน เสา พื้น ถนน ค.ส.ล. เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่มีจำหน่ายได้แก่ ตราช้าง, ตราเพชร(เม็ดเดียว), ตราพญานาคเขียว, ตราTPI(แดง), ตราภูเขา และตราดาวเทียม

2) ประเภทที่สอง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดัดแปลงเพื่อให้สามารถต้านทานเกลือซัลเฟตได้ปานกลาง และจะเกิดความร้อนปานกลางในช่วงหล่อ เหมาะกับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อ สะพาน ท่าเทียบเรือ เขื่อนเป็นต้น ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่เคยมีจำหน่ายได้แก่ ตราพญานาคเจ็ดเศียร (ปัจจุบันเลิกผลิตแล้ว)

3) ประเภทที่สาม (High-early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่สามารถให้กำลังได้รวดเร็วในเวลาอันสั้น หลังจากเทแล้วสามารถใช้งานได้ภายใน 3-7 วัน เหมาะกับงานที่เร่งด่วน เช่น คอนกรีตอัดแรง เสาเข็ม พื้นถนนที่จราจรคับคั่ง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่มีจำหน่ายได้แก่ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราTPI(ดำ) และพญานาคแดง

4) ประเภทที่สี่ (Low-heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งส่งผลดีทำให้การขยายตัวน้อยช่วยลดการแตกร้าว เหมาะกับงานสร้างเขื่อนขนาดใหญ่ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตจำหน่าย

5) ประเภทที่ห้า (Sulfate-resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ทนต่อเกลือซัลเฟตได้สูงเหมาะกับงานก่อสร้างบริเวณดินเค็ม หรือใกล้กับทะเล ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่มีจำหน่ายได้แก่ ตราปลาฉลาม ตราTPI(ฟ้า) และตราช้างฟ้า(ปัจจุบันเลิกผลิตแล้ว)

ตารางที่ 2.13 เปรียบเทียบกำลังอัดของปูนซีเมนต์ ทั้ง 5 ประเภท

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	กำลังอัดเป็นเปอร์เซ็นเมื่อเทียบกับประเภท 1			
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
ประเภท 1	100	100	100	100
ประเภท 2	75	85	90	100
ประเภท 3	190	120	110	100
ประเภท 4	55	55	75	100
ประเภท 5	65	75	85	100

บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดอื่นๆ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน : สารปอซโซลาน คือ ซิลิกาและอลูมินาละเอียด โดยตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อรวมกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำจะทำให้มีโดยตัวของมันเองคุณสมบัติเชื่อมประสาน ซิลิกามีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารปอซโซลานทำให้เกิดความร้อนจากไฮเดรชั่นลดลงแต่กำลังลดแรงอัดช่วงแรกจะลดลง เพิ่มความสามารถทนต่อซัลเฟต ปริมาณของสารปอซโซลาน 15-40 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันถลุง : ปฏิกิริยาของตะกรันถลุงจะช้ากว่าดังนั้นกำลังรับแรงอัดในระยะแรกจะต่ำ และความร้อนจากการไฮเดชั่นจะต่ำกว่า การทนต่อซัลเฟตจะเพิ่มขึ้น นิยมมใช้งานโครงสร้างในทะเล สัดส่วนตะกรันถลุงอยู่ที่ 25-65 %

3) ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง : ทำจากการบดตะกรันเตาถลุงประมาณ 80-85 % และความร้อนจากการไฮเดรชั่นจะต่ำกว่า การทนต่อซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันถลุงเหมาะสำหรับงานที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น รางระบายน้ำทิ้ง

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กำลังระยะแรกสูงพิเศษ : ทำโดยการเพิ่มความละเอียดให้สูงถึง 7,000-9,000 ตร.ซม./กรัม ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วและความร้อนจากการไฮเดรชั่นสูงระยะแรก กำลังรับแรงอัดระยะแรกจะสูงด้วย

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็วพิเศษ : ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะเพิ่มสารเร่งปฏิกิริยาทำให้แข็งเร็วมากดังนั้นไม่ควรเก็บไว้นาน เหมาะในการทำคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำและต้องการกำลังระยะแรกสูง

6) ปูนซีเมนต์เมซอนรี : ได้จากการบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับหินปูน และสารกระจายฟองอากาศการหดตัวเมื่อแห้งลดลง แต่กำลังอัดต่ำ เหมาะสำหรับงานก่ออิฐ ห้ามนำไปทำงานคอนกรีตโครงสร้าง

7) ปูนซีเมนต์บ่อน้ำมัน : ใช้สำหรับบ่อน้ำมันเพื่อป้องกันน้ำใต้ดิน ปูนซีเมนต์จะก่อตัวช้าในอุณหภูมิและความดัน ทนต่อการกัดกร่อนสูง

8) ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบ : ประกอบด้วยเถ้าแกลบประมาณ 40-50 % ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประมาณ 50 % ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากเถ้าแกลบมีความละเอียดสูงมาก ซิลิกาในเถ้าแกลบจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ทนต่อความกัดกร่อนสูง

9) ปูนซีเมนต์อลูมินาสูง : มีปริมาณอลูมินาประมาณ 40 % ความร้อนจากปฏิกิริยาและกำลังอัดระยะแรกจะสูง นอกจากนั้นยังทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและกรด

10) ปูนซีเมนต์ซิลิกา : ปูนซีเมนต์ซิลิกาหรือปูนซีเมนต์ผสม เป็นปูนซีเมนต์ที่ผสมขึ้นโดยเติมวัสดุเฉื่อย (Inert Materails) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ เช่น ทราย หรือหินปูน และอื่นๆ ลงไปบดพร้อมกับการบดปูนเม็ด (Clinker) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประภทที่ 1 โดยมีวัสดุเฉื่อยประมาณร้อยละ 25-30 ของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลิตขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติง่ายต่อการใช้งาน และประหยัดเหมาะในการใช้งานก่อสร้างทั่วไป เช่น สร้างบ้านพักอาศัย ทางเท้า และใช้เป็นส่วนผสมทำปูนก่อปูนฉาบได้ดี ไม่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวแก่อาคารในส่วนที่ใช้ซีเมนต์ชนิดนี้ ปัจจุบันประเทศไทยมีปูนซีเมนต์ซิลิกา ที่อยู่ในมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราสือ ตรานกอินทรีย์ และตราทีพีไอเขียว เป็นต้น

11) ปูนซีเมนต์ขาว (White Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูนและวัตถุดิบอื่นๆที่มีปริมาณของแร่เหล็กน้อยกว่า 1% ลักษณะของผงสีปูนที่ได้จะเป็นสีขาว สามารถผสมกับสีฝุ่นเพื่อทำให้เป็นปูนซีเมนต์สีต่างๆ ตามต้องการ จึงนิยมใช้ในงานตกแต่งต่างๆ เพื่อความสวยงาม ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ผลิตในประเทศไทย ได้แก่ ตราช้างเผือก ตราเสือเผือกและ ตรามังกร

2.3 ปูนขาว (Lime)

ปูนขาวในประเทศไทยที่ผลิตอยู่จะมี 2 ชนิด คือ Sop Burn และ Hart Burn ข้อมูลของปูนขาวมีรายละเอียดในเบื้องต้นดังนี้

2.3.1 Sop Burn Lime เป็นปูนขาวที่ใช้ผสมในปูนฉาบและปูนก่อสำหรับการก่ออิฐ-ฉาบปูน หรือใช้ไว้เป็นวัสดุฝึกงานของนักศึกษาแผนกช่างก่อสร้าง เพราะว่าเมื่อผสมกับทราย

และน้ำแล้วหลังจากปล่อยให้แห้งก็สามารถรื้อกลับมาผสมเป็นปูนสำหรับฝึกก่อฉาบได้ดังเดิม จนกว่าคุณภาพจะถูกเจือจางตามจำนวนครั้งที่ใช้งาน หรือสามารถนำไปแก้ดินเค็ม, ดินเปรี้ยว สำหรับการเกษตรได้

2.3.2 Hart Burn Lime เป็นปูนขาวโดยมากจะเรียกว่า Quit Lime เป็นปูนขาวที่ให้อุณหภูมิสูงเมื่อผสมกับน้ำและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งการได้มาของปูนขาวชนิดนี้ได้จากที่เผาในอุณหภูมิสูงกว่า 1,500 °C จนค่า CaO ไม่เกินถึง 90 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งในแถบยุโรปหรือเมืองหนาวจะนิยมใช้กันมากเพราะเป็นวัสดุชนิดเดียวที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วงเวลา 120 วินาทีแรก เนื่องจากการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศอบ-ไอน้ำ สำหรับเมืองหนาวนั้นต้องการความร้อนเพื่อให้เกิด Heat Hydration ในเวลา 120 นาที เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ทราย, ยิปซั่ม, น้ำ และผงอลูมิเนียม หลังจากแข็งตัวแล้วยังสามารถนำมาตัดด้วยเส้นลวดได้โดยที่ตัวเค้กไม่เกิดรอยแตกร้าว องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวแสดงได้ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 2.14 สารประกอบของปูนขาว

ส่วนประกอบ	Lime (Quit Lime)
SiO_2	< 5 %
$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	< 2.5 %
CaO Total	> 90 %
CaO Active	> 85 %
MgO	< 2 %
NaO	< 1.5 %
SO_3	< 3 %
Loss on ignition	< 5 %

บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

2.4 ยิปซั่ม (Gypsum)

เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ โดยส่วนใหญ่ที่เลือกใช้มีอยู่ 2 สาเหตุ คือ ต้องการลดแรงตึงผิวของเค้กเพื่อลด Heat Hydration และต้องการทำให้ผิวของคอนกรีตมวลเบามีสีขาวหลังจากที่ทำการอบไอน้ำแล้ว

ตารางที่ 2.15 สารประกอบของยิปซั่ม

ส่วนประกอบ	ยิปซั่ม (Gypsum)
$CaSO_4$	>70%
MgO	< 2%
Chloride	< 0.05%
Preferbly ground residue 90 μm	10-15%

บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

2.5 ทราย (Fine Aggregate)

ทรายที่ใช้ในการผสมต้องเป็นทรายที่สะอาดผ่านการบดละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 230 เนื่องจากทรายเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในปริมาณมาก ซึ่งทรายที่จะนำมาผลิตนั้นสามารถใช้ทรายบกหรือทรายแม่น้ำก็ได้ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 สารประกอบของทราย

ส่วนประกอบ	Sand
SiO_2	> 70 %
Al_2O_3	< 10 %
Fe_2O_3	< 3 %
CaO	< 5 %
MgO	< 2 %
$NaO + K_2O$	< 2 %
SO_3	< 3 %
Loss on ignition	< 5 %
Chloride	< 0.05 %
Silt (Volume)	< 3 %

บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

2.6 ผงอลูมิเนียม

ผงอลูมิเนียมเป็นวัตถุชนิดเดียวที่ไม่มีผลิตในเมืองไทย โดยต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ มีคุณสมบัติต่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ เพราะเป็นตัวทำปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนหรือทำหน้าที่แทนผงฟูในเนื้อคอนกรีตมวลเบา และระหว่างที่

ปูนซีเมนต์และปูนขาวทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ (Heat Hydration) ทำให้เกิดเป็นช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมวลเบาที่เรียกว่า "โครงสร้างแบบรวงผึ้ง Cellular Structure" แล้วรอให้ส่วนผสมนั้นแห้งและแข็งตัวในระดับหนึ่งก่อนที่จะนำเข้าตู้อบไอน้ำ และผงอลลูมิเนียมสามารถจำแนกการผสมออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การผสมแบบแห้ง และ การผสมแบบเปียก

2.6.1 การผสมแบบแห้ง จะไม่นิยมใช้ในการผลิตเนื่องจากระหว่างที่การชั่งวัตถุดิบไม่สามารถควบคุมได้และต้องใช้เวลาในการกวนส่วนผสมนานมากทำให้เสียเวลาในการผสมประกอบกับการจัดเก็บอาจก่อให้เกิดอันตรายได้เนื่องจากมีปฏิกิริยาที่ไวต่อความร้อนและไฟประกอบกับมีอนุภาคที่เล็กมากซึ่งจะเป็นอันตรายเมื่อมีการสูดดมเข้าไปในปอด

2.6.2 การผสมแบบเปียก เป็นที่นิยมกันมาก เพราะจะนำไปกวนในน้ำก่อนที่จะผสมลงในขั้นตอนสุดท้ายทำให้เข้ากับส่วนผสมที่ผสมรอไว้ก่อนนี้ได้ดี ส่วนข้อมูลทางด้านเคมีไม่ได้ระบุไว้แต่กำหนดให้ใช้ในปริมาณไม่เกิน 0.14 % โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด

3. การทดสอบ

3.1 ขนาด

3.1.1 เครื่องมือ

1) เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร
2) เวอร์เนียร์ที่วัดได้ถึง 200 มิลลิเมตร
3) เหล็กฉากที่มีความยาวแต่ละด้านไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร

3.1.2 วิธีทดสอบ

1) ความกว้างและความยาว

ใช้เครื่องวัดตามข้อ 1 วัดความกว้างและความยาวของตัวอย่าง โดยวัดที่ตำแหน่งห่างจากขอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ด้านนั้นๆ

2) ความหนา

ใช้เวอร์เนียร์วัดความหนาของตัวอย่างที่ตำแหน่งห่างจากขอบด้านยาวของชิ้นทดสอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ของความยาว โดยสอดเวอร์เนียร์เข้าจนสุด

3) ความได้ฉาก

ทาบเหล็กฉากที่ด้านสั้นของตัวอย่าง จากนั้นวัดความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 300 มิลลิเมตรจากมุมของเหล็กฉาก

3.1.3 การรายงานผล

ให้รายงาน ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยที่วัดได้

3.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

3.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน $\pm$ 1 มิลลิเมตร

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

3.2.2 เครื่องมือ

1) เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึงง 1 มิลลิเมตร

2) เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม

3) ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส $\pm$ 5 องศาเซลเซียส

3.2.3 วิธีทดสอบ

ให้วัดปริมาตรและมวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ย จากสูตร

$$\text{ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ}}{\text{ปริมาตรของชิ้นทดสอบ}}$$

3.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว

3.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 40 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร x 160 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน $\pm$ 1 มิลลิเมตร และให้ด้านยาวของชิ้นทดสอบขนานกับด้านยาวของตัวอย่าง

3.3.2 เครื่องมือ

1) เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.005 มิลลิเมตร

2) เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม

3) อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 องศาเซลเซียส $\pm$ 2 องศาเซลเซียส

4) ห้องหรือภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 องศาเซลเซียส $\pm$ 2 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 43 $\pm$ ร้อยละ 2 ได้

5) ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส $\pm$ 5 องศาเซลเซียส

3.3.3 วิธีทดสอบ

1) นำชิ้นทดสอบเข้าอบในตู้อบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็น ชั่งมวลและวัดความยาวของชิ้นทดสอบถือเป็นมวลในสภาพแห้ง คำนวณหาค่ามวลที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40

2) นำชิ้นทดสอบไปแช่ในอ่างน้ำตามข้อ 3 โดยผิวบนของชิ้นทดสอบอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำ 3 เซนติเมตรเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นให้เก็บรักษาที่ห้องหรือภาชนะปิดตามข้อ 4 ชั่งมวลและวัดความยาวทุกวันจนมวลของชิ้นทดสอบมีค่าต่ำกว่าค่ามวลที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 ซึ่งคำนวณได้จากข้อ 1

3) วัดความยาวและชั่งมวลของชิ้นทดสอบทุก 3 วัน จนความยาวเข้าสู่สภาพสมดุลโดยชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยกว่า ร้อยละ 0.003 ต่อ 3 วัน

หมายเหตุ การรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในกรณีใช้ภาชนะปิดให้ทำโดยเก็บชิ้นทดสอบไว้เหนือสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ละลายอยู่ในสภาวะสมดุลกับน้ำในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิได้ และต้องมีการกวนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวของเกลือโพแทสเซียม หรือฝ้าที่ผิว

3.3.4 การรายงานผล

ให้รายงานอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวจากสูตร

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวร้อยละ (R)} = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100$$

เมื่อ l_1 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 เป็นมิลลิเมตร

l_2 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบเมื่อเข้าสู่สภาพสมดุล เป็นมิลลิเมตร

หมายเหตุ ความยาวของชิ้นทดสอบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 หาโดยการประมาณค่าจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความยาวที่ได้จากการทดสอบตามข้อ 1 กับข้อ 2

3.4 ความต้านแรงอัด

3.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่ตำแหน่ง ตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างของคอนกรีตมวลเบาให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน $\pm$ 1 มิลลิเมตร ทำเครื่องหมายแสดงด้านยาวของตัวอย่าง ทำการทดสอบเมื่อชิ้นทดสอบมีปริมาณความชื้นร้อยละ 10 $\pm$ ร้อยละ 2

กรณีชิ้นทดสอบมีความชื้นมากกว่าที่กำหนด ให้อบชิ้นทดสอบในตู้อบที่อุณหภูมิไม่เกิน 75 องศาเซลเซียสจนได้ความชื้นตามที่ต้องการ

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

3.4.2 เครื่องมือ

1) เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

2) เครื่องกดที่อ่านได้ละเอียดถึง 100 นิวตัน และสามารถควบคุมอัตราเพิ่มแรงอัดได้ระหว่าง 0.05 ถึง 0.20 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที

3) ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส $\pm$ 5 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส สำหรับการอบหาปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์ร้อยละ 10 $\pm$ ร้อยละ 2 ได้

3.4.3 วิธีทดสอบ

1) ให้กดชิ้นทดสอบด้วยวิธีตามระบุใน มอก. 109 โดยใช้อัตราเพิ่มแรงอัดตามตารางที่ 2.17 ในแนวตั้งฉากกับด้านยาวของชิ้นตัวอย่างจนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อชิ้นทดสอบแตกเสียหาย

2) วัดปริมาณความชื้นของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 2.17 อัตราเพิ่มแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

ชั้นคุณภาพ	อัตราเพิ่มแรงอัดนิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที
2	0.05
4	0.10
6	0.15
8	0.20

บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

3.4.4 การรายงานผล

ให้รายงานปริมาณความชื้น และค่าความต้านแรงอัดของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ย

3.5 อัตราการดูดกลืนน้ำ

3.5.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน $\pm$ 1 มิลลิเมตร

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

3.5.2 เครื่องมือ

1) เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

2) เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม

3) ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส $\pm$ 5 องศาเซลเซียส

3.5.3 วิธีทดสอบ

1) อบชิ้นทดสอบในตู้อบให้แห้งจนได้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส $\pm$ 5 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นวัดมวลและมิติของแต่ละก้อน

2) แช่ชิ้นทดสอบตามข้อ 1 ในน้ำสะอาดให้น้ำท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วยกออก ใช้ผ้าชุ่มน้ำเช็ดที่ผิวทีละก้อนแล้วชั่งใหม่ให้เสร็จภายใน 3 นาที น้ำหนักที่ชั่งได้นี้ถือเป็นน้ำหนักคอนกรีตมวลเบาที่ดูดกลืนน้ำ

กรณีตัวอย่างไม่ผ่านการทดสอบ ให้ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 โดยใช้ตัวอย่างเดิมกับน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง

3.5.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าเฉลี่ยการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาโดยคำนวณจากสัดส่วนน้ำหนักของน้ำที่ดูดกลืนต่อปริมาตรชิ้นทดสอบซึ่งคำนวณจากมิติ

4. การนำเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และเถ้าชีวมวลอื่นๆ มาใช้ในงานก่อสร้าง

การศึกษาคุณสมบัติและลักษณะการนำเถ้าชนิดต่างๆ มาใช้งาน จะช่วยในการกำหนดรูปแบบการนำไปใช้และอัตราส่วนผสมเบื้องต้น รวมไปถึงคุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีการผสมขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์ทั้งในการใช้เถ้าเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ การใช้ขี้เถ้าแทนที่มวลรวมและการใช้ขี้เถ้าเป็นวัสดุมวลรวม

เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีส่วนประกอบหลักในรูปของซิลิกาและอะลูมิน่า เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementious) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวช้า โดยเฉพาะในด้านความคงทน (Durability of Concrete) โดยที่คุณมสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

การวิจัยที่ผ่านมาของเถ้าถ่านหินในประเทศไทยเป็นการศึกษาคุณสมบัติของถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทบทั้งสิ้น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะใช้ถ่านหินลิกไนต์ประมาณวันละ 40,000 ตัน ซึ่งก่อให้เกิดขี้เถ้าประมาณ 10,000 ตันต่อวัน โดยประกอบด้วยเถ้าหนัก (Bottom Ash) ร้อยละ 20 และเถ้าลอย (Fly Ash) ร้อยละ 80 ก่อให้เกิดปัญหาในการจัดการฝังกลบ การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์และการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเถ้าลอยเริ่มเผยแพร่หลายในประเทศไทยอย่างเป็นระบบในปี พ.ศ. 2538 เมื่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตได้ก่อสร้างเขื่อนปากมูล ซึ่งใช้คอนกรีตบดอัด (Roller-Compacted Concrete) โดยมีส่วนผสมของซีเมนต์ 58 กิโลกรัม และเถ้าลอย 134 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร จากการศึกษาวิจัยพบว่า เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวให้คอนกรีต เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดเล็กละเอียดและมีทรงกลม ช่วยลดช่องว่างที่เป็นโพรงอากาศในคอนกรีต เพิ่มความสามารถในการเทการเกิดปฏิกิริยากับน้ำไม่คายความร้อนรุนแรง ลดการแตกร้าวในคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่มีความหนามากกว่า 1 เมตร คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีความทนทานต่อกรดและซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เหมาะกับงานก่อสร้างบริเวณใกล้ทะเล (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

นอกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแล้ว ในปัจจุบันประเทศไทยมีแหล่งผลิตถ่านหินเพิ่มขึ้นอีกหลายแห่ง เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหินในโรงงานขนาดเล็กหรือในนิคมอุตสาหกรรมแถบจังหวัดระยอง สมุทรสาครและกาญจนบุรี เป็นต้น เถ้าถ่านหินจากแหล่งอื่นๆ เหล่านี้เมื่อศึกษาคุณสมบัติโดยการใช้เถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในการผสมคอนกรีต พบว่าเถ้าถ่านหินที่ดีควรมีรูปร่างเป็นทรงกลมตัน เพื่อให้ใช้น้ำเป็นส่วนผสมน้อยกว่าและเพิ่มความสามารถเทได้ให้แก่งานคอนกรีต องค์ประกอบทางเคมีมีผลต่อกำลังอัดน้อยกว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหิน โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากจะให้กำลังอัดสูงกว่าเถ้าถ่าน

หินที่หยาบ เถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งผลิตสามารถนำไปใช้งานคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูงมากนักได้ เนื่องจากดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของคอนกรีตมาตรฐาน (ไกวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ, 2549)

เถ้าลอยสามารถแบ่งออกได้ 2 ชั้นคุณภาพตามมารตฐาน ASTM C618 (1995) ได้แก่ ชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีเป็นตัวกำหนดดังตาราง

ตารางที่ 2.18 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (ASTM C618-94a, 1995)

คุณสมบัติ	**ประเภทของเถ้าลอย**	
	ชั้นคุณภาพ F	**ชั้นคุณภาพ C**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (น้อยที่สุดร้อยละ)	70.0	50.0
SO_3 (มากที่สุดร้อยละ)	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น (มากที่สุดร้อยละ)	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (มากที่สุดร้อยละ)	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง (น้อยที่สุดร้อยละ)	75.0	75.0

ไกวุฒิ เกียรติโกมล และคณะ (2549)

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์และอะลูมิน่าออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยชั้นคุณภาพนี้เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซท์และบิทูมินัส เนื่องจากเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F นี้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นจึงเรียกว่าเถ้าลอยมีแคลเซียมต่ำ (Low Lime Fly Ash) ทำให้มีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์น้อยหรือแทบไม่มี แต่เถ้าลอยชั้นคุณภาพนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์และอะลูมิน่าออกไซด์มากกว่าร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยชั้นคุณภาพนี้เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัส เถ้าลอยชนิดนี้จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 15-23 โดยน้ำหนัก เรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (High Lime Fly Ash) ซึ่งจะมีทั้งคุณสมบัติของซีเมนต์และปอซโซลานในตัวเอง (สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย, 2542)

4.1 เถ้าลอยในฐานะสารเชื่อมประสาน

เมื่อผสมเถ้าลอยกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะ แคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิกอนออกไซด์และอะลูมิน่าออกไซด์ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ดังสมการที่ (1) และ (2)

$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow$ Calcium Silicate Hydrate (1)

$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow$ Calcium Aluminate Hydrate (2)

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งความแข็งแรงของสารเชื่อมประสานจะเพิ่มขึ้นตามอายุ ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจึงพัฒนาตามอายุเช่นเดียวกัน

4.2 บทบาทของเถ้าลอยในงานคอนกรีต (E.E. Berry and V.M. Malhotra, 1980)

4.2.1 สามารถทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน มีทั้งการทดแทนโดยน้ำหนักและโดยปริมาตร จากการทดลองพบว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:1 นั้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วง 3 เดือนแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่กำลังอัดเมื่ออายุหนึ่งปีจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

4.2.2 เป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มในคอนกรีต เปรียบเสมือนการเพิ่มสารเชื่อมประสานในคอนกรีตจะทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีอายุ 3 เดือนขึ้นไปมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.3 ทดแทนปูนซีเมนต์และเป็นมวลรวมละเอียดด้วย โดยปริมาณเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกันต้องมากกว่าปริมาณของปูนซีเมนนต์ในคอนกรีตธรรมดาจึงจะทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกเท่ากับคอนกรีตธรรมดา

4.3 ประโยชน์ของเถ้าลอยเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์บางส่วน

4.3.1 ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากกรดเมื่อปูนซีเมนต์ ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำจะทำให้เกิดสารเชื่อมประสานและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งหากคอนกรีตผสมกรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟูริก จะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริก ดังสมการที่ (3) และ (4) (สมชัย กกกำแหง, 2539)

$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4 + 2H_2O$ (3)

$HCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + 2H_2O$ (4)

สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต $CaSO_4$ นี้จะตกตะกอนกลายเป็นยิปซัมอยู่บนผิวคอนกรีตทำให้ถูกชะล้างได้ง่าย ส่วนสารประกอบแคลเซียมคลอไรด์ $CaCl_2$ จะกลายเป็นผลึกเกลือคลอไรด์สะสมอยู่ในโพรงของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทำให้เกลือดังกล่าวเกิดการละลายได้แม้จะไม่มากเท่ายิปซัม จากสาเหตุดังกล่าวเมื่อนำเถ้าลอยมาใช้ผสมในคอนกรีต ทำให้แคลเซียมไฮ

ดรอกไซด์ที่มีอยู่ลดน้อยลง จากปฏิกิริยาปอซโซลิกทำให้การเกิดยิปซัมและเกลือคลอไรด์ลดลง และมีผลให้การสึกกร่อนลดลงเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับกรดไฮดรอลิกหรือกรดซัลฟูริก นอกจากนั้น การที่ถ้าลอยนั้นแน่นขึ้นอันจะช่วยลดการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

4.3.2 ลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยจากแม่เมาะจะทำให้ความร้อนเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะลดลงด้วยเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ธรรมดา อีกทั้งอัตราการแผ่ความร้อนของเถ้าลอยแม่เมาะจะมีค่าต่ำกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทหนึ่งด้วย จึงเหมาะสมสำหรับในงานคอนกรีตหลัก (บุรฉัตร ฉัตรวี และพิชัย นิมิตยงสกุล, 2538)

4.3.3 เพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงปลาย ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยนั้น ถ้าเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4) นั้นคือการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ให้สารเชื่อมประสานนั้นจะเกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นกำลังอัดในช่วงปลายของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้น

4.3.4 เพิ่มความสามารถในการเทได้ เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะส่วนใหญ่มีรูปร่างทรงกลมขนาดระหว่าง 5-40 ไมครอน โดยความละเอียดของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับการบดถ่านหินที่จะนำไปเผาและชนิดของเครื่องบด (สมชัย กกกำแหง, 2539) ในขณะที่เม็ดปูนซีเมนต์บดเป็นรูปทรงที่มีเหลี่ยมคมและมีความละเอียดน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อนำเถ้าลอยผสมคอนกรีตจะช่วยทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น

4.4 เทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตมีดังนี้

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยคือเทคนิคการผสมเถ้าลอยในคอนกรีต (Berry, E.E and Malhotra, V.M., 1980) ซึ่งมีสามวิธีการดังนี้

4.4.1 ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยนั้นมีทั้งการทดแทนโดยน้ำหนักและทดแทนโดยปริมาตร จากการทดลองพบว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:1นั้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงสามเดือนแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่กำลังอัดเมื่ออายุหนึ่งปีจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

4.4.2 ใช้เป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มในคอนกรีต การใช้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มในคอนกรีตจะเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มสารเชื่อมประสานในคอนกรีตอันจะทำให้ค่ากำลังอัดตั้งแต่อายุสามเดือนขึ้นไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.4.3 ใช้ทั้งทดแทนปูนซีเมนต์และใช้เป็นมวลรวมละเอียดด้วย การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและใช้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดเพิ่มด้วยนี้ หากต้องการให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมมีกำลังอัดในช่วงแรกเท่ากับคอนกรีตธรรมดา ปริมาณของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยรวมกันจะต้องมากกว่าปริมาณของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตธรรมดา การวิจัยในครั้งนี้ได้นำเทคนิคการรผสมเถ้าลอยในวิธีที่ 2 มาใช้เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลดปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับคอนกรีตบล๊อค และศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตบล๊อคผสมขี้เถ้าที่ได้จากการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยขี้เถ้า

ในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในงานคอนกรีตมากขึ้น และมีการวิจัยเพื่อนำเถ้าลอยมาใช้ในการผลิตวัสดุก่อผนัง เช่น อิฐดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกำลังรับแรงอัด ความคงทนต่อการสึกกร่อน และความเหมาะสมด้านราคา พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 9 และปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก การพัฒนากำลังรับแรงอัดของอิฐซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในช่วงแรกจะช้าลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และในส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยจะทำให้อิฐดินซีเมนต์มีการสึกกร่อนมากขึ้น (ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุจ, 2546), อิฐคอนกรีตมวลเบาผสมสารกักกระจายฟองอากาศที่ใช้เถ้าถ่านหินลิกไนต์ทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยใช้สารกักกระจายฟองอากาศ 1 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม อิฐคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าถ่านหินที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,866.40 kg/m^3 กำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วันเท่ากับ 191.32 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยโมดูลัสแตกหักมีค่าประมาณร้อยละ 8-12 ของกำลังอัดประลัย อัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 7.56 หรือ 141.10 kg/m^3 โดยอิฐมวลเบาที่ได้จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ ข-1 และ ข-2 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐคอนกรีต ซึ่งใช้ได้ในงานทั่วไปเมื่อต้องการกำลังและความชื้นปานกลาง (ปกรณ์ แสนรวยเงิน และคณะ, 2544)

ในประเทศอินเดียที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินจำนวนมาก ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อนำเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเช่นกัน โดยวัสดุที่ได้มีการพัฒนาและนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารจริง เช่น บล็อกคอนกรีตพรุนผสมเถ้าลอย (Cellular Lightweight Concrete Block) เป็นคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และโฟม โดยผสมเถ้าลอยได้ตั้งแต่ร้อยละ 26-33 ปริมาณของเถ้าลอยจะส่งผลต่อความหนาแน่นของวัสดุ บล็อกคอนกรีตพรุนที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นระหว่าง 400-1,800 kg/m^3 วัสดุที่ได้มีน้ำหนักเบากว่าผนังก่ออิฐ มากกว่าร้อยละ 50 (G.B. Singh, 2006), อิฐ Fal-G (Fly ash-lime-Phosphogypsum) ผลิตจากเถ้าลอยผสมกับปูนขาวและยิปซั่มโดยอัตราส่วนของเถ้าลอย ปูนขาวและยิปซั่ม ที่ทำให้อิฐรับแรงอัดได้สูงสุด

คือ 40 : 20 : 20 ตามลำดับ โดยปริมาณของเถ้าลอยจะส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดของบล็อก เมื่อเถ้าลอยมากความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงเมื่ออายุครบ 120 วัน อิฐ Fal-G จะรับแรงอัดได้ตามมาตรฐานอินเดียสำหรับอิฐดินเผา คือ 3.5 MPa อัตราการดูดซึมน้ำจะมีค่าระหว่างร้อยละ 19.2-37.2 โดยน้ำหนัก และน้ำหนักของบล็อกจะลดลงประมาณร้อยละ 20-40 เมื่อเทียบกับอิฐดินเผากลวง เมื่อวัสดุมีอายุมากขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำจะลดลงและสามารถรับแรงอัดได้ดีขึ้น (Sunil Kumar, 2003), บล็อกประสานผสมเถ้าลอย โดยใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 35-60 ทรายหยาบร้อยละ 35-70 และวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนขาว ซีเมนต์หรือยิปซั่ม ร้อยละ 5-15 บล็อกที่ได้จะสามารถรับแรงอัดได้ 7-13 MPa โดยความสามารถในการรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานที่เลือกใช้ ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 12 (Hydarform, 2006) Tarun R. Naik (2006) ได้ทำการศึกาเพื่อหาวัสดุก่อผนังสำหรับบ้านพักอาศัยราคาถูก พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตอิฐก่อและอิฐบล็อก (Fly Ash Block) ในอัตราส่วนร้อยละ 30-50 พบว่าบล็อกผสมเถ้าลอยมีคุณสมบัติตามมาตรฐานวัสดุสำหรับบ้านพักราคาถูก และบล็อกจะสามารถรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวเมื่อครบ 2 ปี ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าลอย

ในประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลียได้มีผู้นำเถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐ โดยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 20-50 และเผาที่อุณหภูมิ 100 °C Obada Kayali (2004) ได้ศึกษาหาแนวทางในการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตอิฐเถ้าลอยทั้งหมด โดยผสมเถ้าลอยกับสารผสมเพิ่มและเผาที่อุณหภูมิ 1000-1300 °C เรียกว่า Flash Bricks พบว่าอิฐที่ได้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ โดยมีค่าการรับแรงอัด 43 MPa ความหนาแน่น 11,450 kg/m^3 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10

ในประเทศตุรกีมีการศึกษาเพื่อนำเถ้าลอยมาใช้ในการผลิตอิฐโดยใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 950 °C อิฐที่ได้จะรับแรงอัดได้ 70-100 kg/cm^2 ซึ่งรับแรงอัดได้น้อยกว่าอิฐที่ไม่ผสมเถ้าลอยประมาณ 4 เท่า และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 21 (Tutunlu Fatih and Atalay Umit, 2001)

จากงานวิจัยและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเถ้าลอย แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10-30 ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุก่อผนัง และเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุมวลรวมในอัตราส่วนร้อยละ 25-60 นอกจากนั้นเถ้าลอยยังใช้ในการผลิตอิฐที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 20-100 โดยวัสดุก่อผนังที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่าความหนาแน่นลดลงตามปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น การรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุประสานและปริมาณเถ้ามากความสามารถในการรับแรงอัด

จะลดลง ความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามอายุ เมื่อปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วย วัสดุที่ผสมเถ้าลอยจะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง

4.5 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตาเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ด เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาสูงเกินจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน ปริมาณของเถ้าก้นเตาจะอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด เถ้าก้นเตาจะมีอนุภาคขนาดใหญ่ คือมีอนุภาคเฉลี่ย 290 ไมโครเมตรหรือใหญ่กว่าเถ้าถ่านหิน 16 เท่า จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุปอซโซลาน แต่เมื่อบดให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6 ไมโครเมตร จะสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี (เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543)

เถ้าก้นเตาสามารถใช้ทดแทนมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้ เมื่อใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาทดแทนทรายเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ต้าลดลง (Patcharaporn Suwanvitaya and Prasert Suwanvitaya, 2006) เถ้าลอย เถ้าก้นเตาและไลแทก (Lytag) ซึ่งเป็นวัสดุมวลรวมที่เกิดจากการเผาเถ้าลอย ถูกใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และมวลรวมหยาบ ตามลำดับ เพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตน้ำหนักเบา (Lightweight Concrete) โดยใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ใช้เถ้าก้นเตาและไลแทกทดแทนทรายและมวลรวมหยาบทั้งหมมด คอนกรีตที่ได้จะมีความหนาแน่ 1,560-1,960 kg/m^3 และความสามารถในการรับแรงอัดมีค่า 200-400 kg/cm^2 ที่อายุ 28 วัน เถ้าก้นเตาจะส่งผลให้คอนกรีตมีการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น (Yun Bai and others, 2006) เถ้าก้นเตาสามารถใช้เป็นมวลรวมในการผลิตอิฐคอนกรีต (Concrete Masonry Unit) โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมเป็น 1 : 6 โดยมวลรวมได้จากการนำเถ้าลอย Class C หรือ Class F ผสมกับเถ้าก้นเตาในอัตราส่วน 30 : 70 พบว่าอิฐคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่ามาตรฐานคือสูงกว่า 82.55 kg/cm^2 ที่อายุ 3 วันและมีน้ำหนักน้อยกว่า 13.61 kg (Benjamin L. Phillips and others, 2005)

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าเถ้าก้นเตาสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดมากขึ้น นอกจากนั้นเถ้าก้นเตายังสามารถใช้เพื่อแทนที่ทรายหรือใช้เป็นมวลรวมละเอียดเพื่อใช้ผลิตคอนกรีตน้ำหนักเบาและอิฐคอนกรีตได้อีกด้วย วัสดุที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมจะมีน้ำหนักเบา เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.5 เถ้าที่ได้จากวัสดุธรรมชาติอื่นๆ

ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรหลายชนิดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มน้ำหรือเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก ทำให้เกิดเถ้าเป็นปริมาณสูงต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบและอาจก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงมมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำเถ้าจากวัสดุธรรมชาติเหล่านี้มาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งการนำมาใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนและใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุก่อสร้าง

เถ้าแกลบเป็นวัสดุที่เกิดจากการนำแกลบมาเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าวและโรงไฟฟ้า จากการศึกาพบว่า เถ้าแกลบลจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618-94a โดยจัดอยู่ใน Class N สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ โดยสามารถใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 คอนกรีตที่ได้จะมีความสามารถในการรับแรงอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ เมื่อนำเถ้าแกลบมาบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงจะสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้มากขึ้น โดยซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ร้อยละ 20 และใช้อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส จะพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มากุล, 2547) นอกจากการนำเถ้าแกลบมาเป็นวัสดุปอซโซลานแล้วยังมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบดำไม่บดจากโรงสีข้าวมาเป็นวัสดุผสมทดแทนมวลรวม (หินฝุ่น) เพื่อผลิตคอนกรีตบล็อก โดยคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าแกลบมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 58-2530 สำหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก โดยเมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่มวลรวมในอัตราส่วนร้อยละ 20 คอนกรีตบล็อกมีค่าของกำลังอัดเฉลี่ย 28 วัน เท่ากับ 30 kg/cm^2 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 18.16 และการหดตัวแบบแห้งเท่ากับร้อยละ 0.048 น้ำหนักของบล็อกจะลดลงประมาณร้อยละ 8-15 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน เมื่อร้อยละการแทนที่สูงขึ้น คอนกรีตบล็อกจะมีความต้องการน้ำการดูดซึมน้ำและการหดตัวแบบแห้งสูงขึ้น ประเทศไนจีเรียได้มีการวิจัยเพื่อนำเถ้าแกลบมาใช้ในการผลิตแซนด์กรีตบล็อกแบบกลวง (Hollow Sandcrete Block) ซึ่งผลิตโดยใช้วัสดุประสานคือซีเมนต์ 1 ส่วน ผสมกับทราย 8 ส่วน ปริมาณเถ้าที่เหมาะสมในการใช้ทดแทนปูนซีเมนต์คือร้อยละ 20 บล็อกที่ได้จะมีความหนาแน่น 500-2100 kg/m^3 และสามารถรับแรงอัดได้ 36.5 kg/cm^2 ที่อายุ 28 วัน ความสามารถในการรับแรงอัดจะพัฒนาตามอายุของการบ่ม ปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง ส่วนผสมจะต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น (E.B. Oyetola and M. Adullahii, 2006)

โรงไฟฟ้าบางแห่งในประเทศไทยจะใช้เชื้อเพลิงเป็นแกลบและเปลือกไม้ ซึ่งเถ้าดังกล่าวเมื่อนำมาบดเพื่อทำให้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 สามารถใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีตเพื่อปูพื้นได้โดยสามารถรับแรงอัดได้มากกว่า 500

กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เถ้าแกลบและเปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากจะทำให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย และกำลังอัดของอิฐคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าอีกด้วย คือเมื่อใช้เถ้าแกลบและเปลือกไม้มาก กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง (สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ และคณะ, 2546)

เถ้าขี้เลื่อย (Sawdust Ash) สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อทดแทนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยส่วนผสมดังกล่าวจะสามารถรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่วไป และเถ้าขี้เลื่อยจะช่วยพัฒนากำลังอัดของวัสดุที่อายุมากขึ้นด้วย (A.U. Elinwa and Y.A. Mahmood, 2002)

เถ้าขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubber Sawdust Ash) สามารถนำมาใช้งาน โดยการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ต้าในอัตราส่วนร้อยละ 10 พบว่ามอร์ต้าที่ได้มีค่าความสามารถในการรับแรงอัด 245 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใกล้เคียงกับมอร์ต้ามาตรฐาน เมื่อปริมาณเถ้าขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นจะทำให้เพสต์ของส่วนผสมต้องการน้ำมากขึ้น ค่าการรับแรงอัดและค่าการไหลของมอร์ต้าจะต่ำลง (จรูญ เจริญเนตรกุล, 2546)

เถ้ากะลามะพร้าว สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกโดยใช้เถ้ากะลามะพร้าวแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 เมื่อปริมาณเถ้ากะลามะพร้าวเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการดูดซึมน้ำของบล็อกเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนผสมจะเกิดรูพรุนและส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง (ชุติสรา ปะกิระตัง และพุทธวรรณ แซ่แต้, 2546)

จากการศึกษาเอกสารดังกล่าวมาข้างต้น พบว่าแนวทางที่น่าจะเป็นไปได้ในการนำขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์มาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างคือการนำมาเป็นส่วนผสมสำหรับคอนกรีตบล็อคมวลเบา โดยมีแนวทางในการนำไปใช้ใน 3 กรณี ได้แก่

1) การนำขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์มาใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์

2) การนำขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์มาใช้แทนที่มวลรวมบางส่วน

3) การนำขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์มาใช้เป็นมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight Aggregate)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พีระ ณ ถลาง (2541) ได้ศึกษาการนำเอา pumice กับ perlite ที่มีคุณสมบัติเบามากมาผสมลงในคอนกรีตเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา โดยนำมาใช้ผสมทำเป็นผนังคอนกรีตเบาสำเร็จรูปเพื่อช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างได้ และยังเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี แต่พบว่ามีการ

ดูดซึมน้ำมากเกินไปทำให้ต้องเสียค่าฉาบปูนเพิ่มมากขึ้น โดยใช้ pumice กับ perlite แทนที่ปริมาณทรายและใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ ปูนซีเมนต์ : ทราย : pumice : perlite ในสัดส่วย 1:0.80:2.40:0.80 โดยน้ำหนัก

ภัทรจิตรา รัตตชู (2543) ได้ศึกษาการนำเอาขี้เลื่อยที่เหลือใช้มาผสมลงในคอนกรีตบล็อคเพื่อให้ได้คอนกรีตบล็อคที่มีน้ำหนักเบา โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงอัด หน่วยแรงดึง หน่วยแรงดัดและความหนาแน่นกับปริมาณขี้เลื่อยใช้ที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 เทียบกับทรายโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อคธรรมดา แต่พบว่าค่าหน่วยแรงอัด หน่วยแรงดึง หน่วยแรงดัดและความหนาแน่นมีค่าสูงสุดเมื่อมีปริมาณขี้เลื่อยที่ร้อยละ 5 และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เลื่อยมากขึ้น ส่วนค่าการดูดซึมน้ำนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณขี้เลื่อยที่ผสมใช้งาน

วัชรินทร์ ผุดผ่อง และคณะ (2543) ทำการศึกษาคุณสมบัติอิฐดินซีเมนต์โดยใช้ขี้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 10%, 15% และ 20% ผลการศึกษาพบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ขี้เถ้าลอย 10% ดินตะกอนทราย 100% และทรายหยาบ 0% ที่อายุ 28 วัน ได้กำลังอัดเท่ากับ 22.98 กก./ตร.ซม. แต่ไม่สามารถนำไปทดสอบการดูดกลืนน้ำได้เนื่องจากอิฐที่ได้ไม่สามารถก่อตัวได้และเมื่อนำไปแช่น้ำอิฐมีลักษณะเปื่อยยุ่ย แล้วนำส่วนผสมดังกล่าวมาทำอิฐเพื่อไปทดสอบการรับน้ำหนักของอิฐก่อเต็มแผ่น โดยคิดน้ำหนักที่กระทำเท่ากับ 20 ตันได้หน่วยแรงอัดเท่ากับ 4.60 กก./ตร.ซม.โดยไม่วิบัติ

เกรียงไกร ทองเนื้อห้า (2544) ศึกษาการนำเอาพลาสติกประเภท PET ที่ใช้แล้วมาหมุนเวียนใช้ใหม่ในคอนกรีต โดยผสม PET แทนที่ทรายโดยน้ำหนัก เป็นร้อยละเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 ของน้ำหนักทราย ซึ่งพบว่าก้อนทดสอบที่ผสม PET ที่ร้อยละ 40 ที่อายุการบ่ม 3 วัน มีน้ำหนักน้อยที่สุด ที่อายุการบ่ม 21 วัน รับกำลังอัดได้มากที่สุด และยังพบอีกว่า PET ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เมื่อนำมาผสมเพื่อทดสอบนั้น สามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่า PET ที่มาจากโรงงานโดยตรง

ไชยยันต์ ชัยจักร และคณะ (2545) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันที่ได้จากอุตสาหกรรมการรีไซเคิลมาใช้ในการผสมทำคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ส่วนผสมที่ค่าร้อยละของมวลรวมเบาเท่ากับ 40, 55, และ 70 โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยในการแทนที่ในช่องว่าง 2 อัตราส่วนคือ 60 : 40 และ 40 : 60 ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมคือการแทนที่ส่วนผสมที่ร้อยละของช่องว่างเท่ากับ 70 โดย มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 40 :60 ส่วนผสมดังกล่าวให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 44.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 68.73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 3 และ 28 วันตามลำดับ นอกจากนี้ ส่วนผสมดังกล่าว มีค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ

10.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการดูดกลืนน้ำเท่ากับร้อยละ 37 มีความสามารถทนไฟได้มากกว่า 30 นาที และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.089 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส

ธนาพงษ์ หลานวงค์ และคณะ (2546) ทำการพัฒนาอัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ 10% ทราย 18% และดิน 72% โดยน้ำหนัก จากรายงานโครงการ C98-13 โดยการเพิ่มช่องว่าง 20%, 25%, และ 30% โดยปริมาตร ทำการบ่มในอากาศเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่าอิฐดินซีเมนต์ที่รับน้ำหนักได้ดีที่สุดคือ อิฐดินซีเมนต์ที่มีการลดปริมาตรลง 20% รับน้ำหนักได้ 5.06 เมกกะปาสคาล ซึ่งผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักและค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ

คำภี จิตชัยภูมิ และคณะ (2547) ศึกษาคุณสมบัติของอิฐบล็อกมวลเบา ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทราย และเถ้าแกลบบด ในอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.50 กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน และคุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ โมดูบัสการแตกหัก อัตราการดูดกลืนน้ำ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว และการนำความร้อน ตลอดจนการนำไปใช้งานจริง เช่น การก่อ การฉาบ ซึ่งพบว่าส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 544 : 320 : 40 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำอิฐบล็อกมวลเบา โดยพิจารณาจากค่ากำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เป็นอันดับแรก ซึ่งให้ค่ากำลังอัด 33 กก./ซม.^{2} อัตราการดูดกลืนน้ำ 430 กก./ม.^{3} อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวร้อยละ 0.00289 ความหนาแน่นแห้ง 904 กก./ม.^{3} โมดูลัสการแตกหัก 11.15 กก./ม.^{2} และค่าการนำความร้อน 0.3399 วัตต์/เมตร/เคลวิน

พัชราวรรณ เก๊อะเจริญ (2549) ศึกษาหาแนวทางในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาเป็นส่วนผสมของอิฐคอนกรีตสำหรับก่อผนังในงานสถาปัตยกรรม โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อิฐคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าอิฐดินเผาหรือวัสดุก่อผนังประเภทอื่นๆ พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตอิฐคอนกรีตที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม มีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเป็น 1 : 1 : 2 โดยน้ำหนักซึ่งง่ายต่อการจดจำ อิฐคอนกรีตที่ได้มีค่าความหนาแน่นประมาณ 766 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใกล้เคียงกับคอนกรีตบล็อก สามารถรับแรงอัดได้ประมาณ 90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 58-2530 มีค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 20 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ค่าการนำความร้อน 0.194 W/mK ซึ่งสามารถป้องกันความร้อนได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบา อิฐคอนกรีตที่ได้นี้มีราคาวัสดุรวมค่าแรงถูกกว่าคอนกรีตมวลเบาประมาณตารางเมตรละ 100 บาท

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ดำเนินการวิจัยโดยศึกษาปริมาณ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ของบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด และดำเนินการทดลองโดยการแทนที่ขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับในการผลิตคอนกรีตบล๊อค ตลอดจนทำการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่ใช้และการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีการทดสอบในแต่ละขั้นตอน ได้กำหนดรายละเอียดให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ได้ทดสอบแล้วว่า สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความปลอดภัยในการใช้งาน และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานอื่นที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Ter American Society for Testing and Materials (ASTM) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดแนวทางในการทดลองหาส่วนผสมดังต่อไปนี้

- เป็นส่วนผสมที่ให้กำลังแรงอัด (Compressive Strength) ไม่ต่ำกว่ามาตรฐานของคอนกรีตบล๊อค คือ 40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- เป็นส่วนผสมที่ลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้มาก
- เป็นส่วนผสมที่ง่ายต่อการจดจำไปใช้งาน
- เป็นส่วนผสมที่ง่ายต่อการผลิต ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนและมีราคาแพง
- เป็นส่วนผสมที่ทำให้ได้คอนกรีตบล๊อคที่มีน้ำหนักเบา

เพื่อให้การวิจัยเป็นไปตามแนวทางที่กำหนดข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้กำหนดกระบวนการวิจัยดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ยี่ห้อที่ใช้ คือ ปูนซีเมนต์ตราช้าง

1.2 ทราย เป็นทรายแม่น้ำล้างน้ำสะอาด ก่อนจะนำมาใช้จะผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดทรายจากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบา

1.3 ขี้เถ้า จากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์ บริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด

1.4 ปูนขาว (Lime) ชนิดให้อุณหภูมิได้เร็ว (Quit Lime) จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี

1.5 ยิปซั่มชนิดบดแห้ง จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี

1.6 ผงอลูมิเนียม จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี

1.7 น้ำประปาสะอาด

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- เครื่องผสมส่วนผสม
- แบบทำคอนกรีตบล๊อคมวลเบาขนาด 20 x 60 x 10 เซนติเมตร
- เครื่อง Universal Testing Machine
- ชุดทดสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือชุดทดสอบการหดตัว
- เครื่องชั่งน้ำหนัก (Balance)
- ตู้อบ
- กระบอกตวง (Measuring Cylinder)
- ตะแกรงร่อนทราย (Sieve)
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อชิ้นตัวอย่าง
- เกรียง
- ช้อนตัก

3. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

3.1 ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

เมื่อเลือกเก็บตัวอย่างขี้เถ้าได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือดำเนินการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของขี้เถ้า ได้แก่

3.1.1 สีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์และปูนซีเมนต์ ซึ่งจะส่งผลต่อสีของคอนกรีตบล๊อค การศึกษารูปร่างของอนุภาคขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์จะทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของอนุภาค รูปทรง รูพรุนที่อยู่บนอนุภาคของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ซึ่งลักษณะของอนุภาคจะส่งผลต่อความต้องการน้ำของคอนกรีตบล๊อคได้

3.1.2 ความถ่วงจำเพาะและการกระจายของขนาดอนุภาคขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะและการกระจายของขนาดอนุภาคของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์กับปูนซีเมนต์ โดยใช้เทคนิคการแทนที่ด้วยแก๊ส (Gas Displacement Technique) และเทคนิคการกระเจิงแสง (Light Scattering Technique) ตามลำดับ

การหาขนาดคละของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบหาการกระจายของอนุภาคซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ที่จะสามารถใช้แทนที่ซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีตบล๊อคได้ การหาขนาดคละจะใช้วิธีวิเคราะห์โดยการร่อนตะแกรง (Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C33

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

มีจุดประสงค์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ และคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 โดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer

3.2 ทำการทดลองหาอัตราส่วนของคอนกรีตบล๊อคที่ใช้ขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

มีจุดประสงค์เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตบล๊อคมวลเบาระหว่างปูนซีเมนต์ ขี้เถ้า ปูนขาว ทราย ผงอลูมิเนียม และน้ำ โดยมีกระบวนการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองส่วนผสมของคอนกรีตบล๊อคทั่วไป โดยการทดลองหาปริมาณการใช้ขี้เถ้าเพื่อแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยทดสอบหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์ ความหนาแน่น อัตราการดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงอัด เพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสินใจว่าส่วนผสมใดที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการทดลองนี้ ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกโดยใช้เกณฑ์ดังต่อไปนี้

1. มีกำลังรับอัดไม่ต่ำกว่า 40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2. ให้น้ำหนักเบา
3. การดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 20

หลังจากนั้นส่วนผสมที่ถูกเลือก จะนำไปวิเคราะห์หาราคาต้นทุนการผลิตเพื่อเปรียบเทียบกับราคาคอนกรีตบล๊อคมวลเบาทั่วไปตามท้องตลาด

3.2.1 อัตราส่วนผสมที่ใช้ขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน

ตารางที่ 19 แสดงอัตราส่วนของคอนกรีตบล๊อคมวลเบา ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบมี 3 ระดับ คือ 600 700 และ 800 โดยปริมาร

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล๊อค

ร้อยละการแทนที่	ความ	อัตราส่วนผสม (Kg)						Total
ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	หนาแน่น	Sand	Cement	Lime	Ash	Aluminum	Water	Solid (Kg)
0	600	5.00	1.60	0.66	-	0.009	5.60	12.869
	700	5.80	1.80	0.77	-	0.010	6.50	14.880
	800	6.60	2.00	0.90	-	0.012	7.40	16.912
10	600	5.00	1.40	0.66	0.20	0.009	5.60	12.869
	700	5.80	1.60	0.77	0.20	0.010	6.50	14.880
	800	6.60	1.80	0.90	0.20	0.012	7.40	16.912
20	600	5.00	1.30	0.66	0.30	0.009	5.60	12.869
	700	5.80	1.40	0.77	0.40	0.010	6.50	14.880
	800	6.60	1.60	0.90	0.40	0.012	7.40	16.912
30	600	5.00	1.10	0.66	0.50	0.009	5.60	12.869
	700	5.80	1.30	0.77	0.50	0.010	6.50	14.880
	800	6.60	1.40	0.90	0.60	0.012	7.40	16.912

3.2.2 วิธีการทดลอง

การดำเนินการวิจัยได้ปฏิบัติตามขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. การจัดเตรียมวัตถุดิบ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 เลือกใช้ปูนซีเมนต์ตราช้าง
- ทรายบดละเอียด จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี
- ปูนขาว (Lime) จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี
- ยิปซั่มชนิดบดแห้ง จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี
- ผงอลูมิเนียม จากโรงงานผู้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จ.ปทุมธานี
- น้ำประปาสะอาด

2. คำนวณส่วนผสมได้น้ำหนักของวัตถุดิบดังแสดงในตารางที่ 3.1

3. หลังจากจัดเตรียมวัตถุดิบแล้ว ทำการหล่อตัวอย่างทดสอบ ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำความสะอาดเครื่องผสมด้วยน้ำสะอาดให้สะอาดและทำให้แห้งสนิท

ขั้นตอนที่ 2 ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบที่จัดเตรียมไว้ ลงในถุงพลาสติก ตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้ดังตารางที่

ขั้นตอนที่ 3 นำเอาน้ำสะอาดเทลงไปในเครื่องผสมในอัตราส่วน 2/3 ส่วน

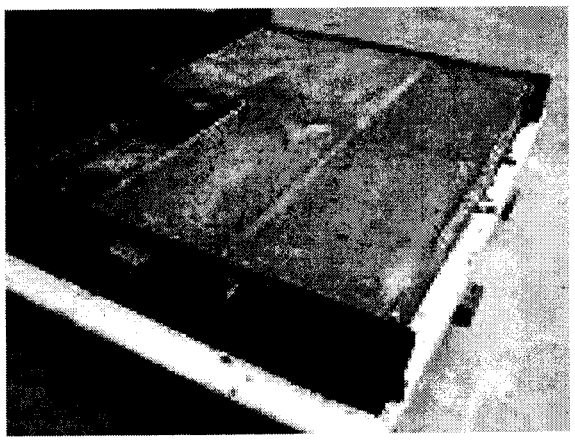
ขั้นตอนที่ 4 นำทรายละเอียด, ซีเมนต์, ปูนขาว,ยิปซั่ม และขี้เถ้า (ในกรณีที่ใช้ขี้เถ้าแทนที่ซีเมนต์) ที่จัดเตรียมไว้ใส่ลงไปในเรื่องผสม แล้วทำการกวนวัตถุดิบดังกล่าวให้เข้ากัน

ภาพที่ 3.1 การกวนวัตถุดิบ

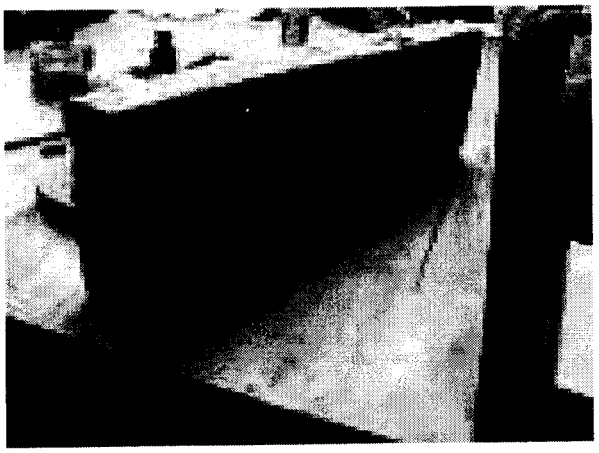
ขั้นตอนที่ 5 หลังจากที่วัตถุดิบผสมเข้ากันดีแล้ว ทำการเติมผงอลูมิเนียมพร้อมกับน้ำปริมาณที่เหลือลงไป แล้วรอเวลาให้ส่วนผสมกวนจนเข้ากันเป็นเวลาประมาณ 30-45 วินาที

ขั้นตอนที่ 6 ทำการวัดอุณหภูมิระหว่างผสม แล้วทำการบันทึกค่า

ขั้นตอนที่ 7 เทส่วนผสมที่ได้ลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ประมาณ 3/4 ของปริมาตรแบบหล่อ



ภาพที่ 3.2 เทส่วนผสมลงในแบบหล่อในสัดส่วน 3/4 ของปริมาตรแบบหล่อขั้นตอนที่ 8 เมื่อส่วนผสมในแบบหล่อตัวอย่างแข็งตัวจนได้ที่ (ใช้เวลาประมาณ 8-12 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบออก) เมื่อทำการถอดแบบหล่อออกแล้วนำคอนกรีตบล๊อคที่ได้มาจัดวางไว้เพื่อเตรียมที่จะอบไอน้ำ



ภาพที่ 3.3 ทำการถอดแบบหล่อออกและนำเข้าตู้อบไอน้ำ

ในการถอดแบบหล่อต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เนื่องจากตัวอย่างทดสอบยังไม่มีความแข็งแรงและนิ่มมาก อาจจะส่งผลให้เสียหายกับตัวอย่างทดสอบได้

ขั้นตอนที่ 9 นำตัวอย่างทดสอบที่ถอดแบบแล้วมาจัดเรียงในหม้ออบไอน้ำให้เรียบร้อย ปิดฝาหม้ออบไอน้ำ

ขั้นตอนที่ 10 เปิดสวิทช์หม้ออบไอน้ำ โดยเปิดวาล์วปล่อยแรงดันทิ้งไว้ก่อน เมื่อน้ำในหม้อเดือดจนมีไอน้ำจึงทำการปิดวาล์วสำหรับปล่อยแรงดัน

ขั้นตอนที่ 11 ทำการเพิ่มอุณหภูมิความร้อน เมื่อได้ความร้อนที่ 180 °C ทำการจับเวลาในการอบเป็นเวลา 12-14 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 12 เมื่ออบจนได้ตามเวลาที่กำหนด จึงทำการลดแรงดันในหม้ออบไอน้ำลงด้วยการปล่อยการปล่อยไอน้ำออกช้าๆ จนไม่มีแรงดันในหม้ออบไอน้ำ เสร็จแล้วจึงปล่อยหม้ออบไอน้ำเย็นตัวลง เปิดฝาแล้วนำตัวอย่างออกจากหม้ออบไอน้ำ เพื่อไปทดสอบหาคุณสมบัติ

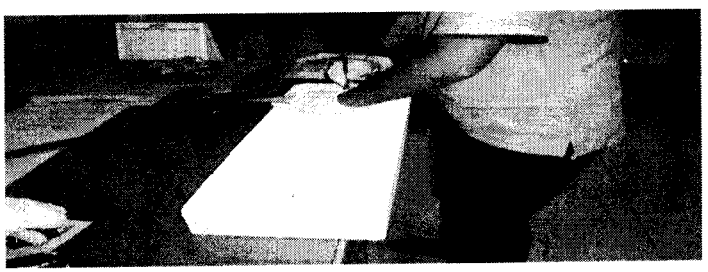
4. การทดสอบ

4.1 การทดสอบ ขนาด

ขั้นตอนที่ 1 ความกว้างและความยาว ใช้เครื่องมือวัดความกว้างและความยาวของตัวอย่าง โดยวัดที่ตำแหน่งห่างจากขอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ด้านนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 2 ความหนา ใช้เวอร์เนียร์วัดความหนาของตัวอย่างที่ตำแหน่งห่างจากขอบด้านยาวของชิ้นทดสอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ของความยาว โดยสอดเวอร์เนียร์เข้าจนสุด

ขั้นตอนที่ 3 ความได้ฉาก ทาบเหล็กฉากที่ด้านสั้นของตัวอย่าง จากนั้นวัดความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 300 มิลลิเมตรจากมุมของเหล็กฉาก



ภาพที่ 3.4 การทดสอบ ขนาด

4.2 การทดสอบ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

ขั้นตอนที่ 1 ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน $\pm$ 1 มิลลิเมตร

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

ขั้นตอนที่ 2 ให้วัดปริมาตรและมวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ภาพที่ 3.5 การทดสอบ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

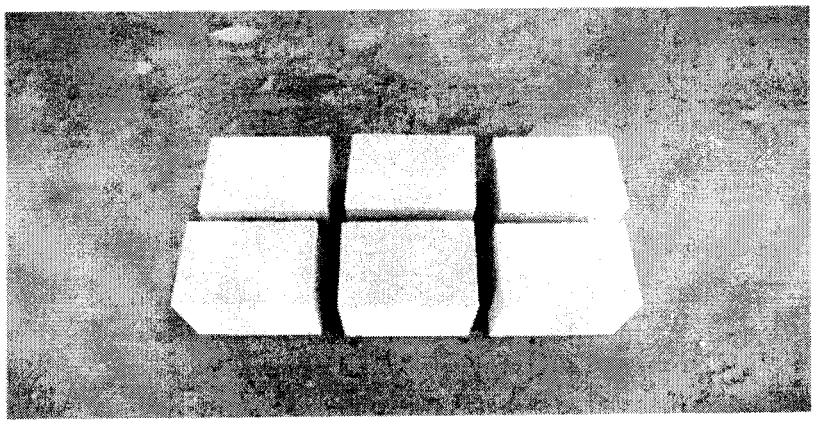
4.3 การทดสอบ อัตราการดูดกลืนน้ำ

อัตราการดูดกลืนน้ำของคอนครีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ เป็นสิ่งที่แสดงถึงความพรุนในเนื้อของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ เพราะการดูดกลืนน้ำในปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความทึบน้ำเนื้อผนังที่อยู่ระหว่างช่องโพรงอากาศในเนื้อของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 อบชิ้นทดสอบในตู้อบให้แห้งจนได้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส $\pm$ 5 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นวัดมวลและมิติของแต่ละก้อน

ขั้นตอนที่ 2 แช่ชิ้นทดสอบตามข้อ 1 ในน้ำสะอาดให้น้ำท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกออก ใช้ผ้าชุ่มน้ำเช็ดที่ผิวทีละก้อนแล้วชั่งใหม่ให้เสร็จภายใน 3 นาที น้ำหนักที่ชั่งได้นี้ถือเป็นน้ำหนักคอนกรีตมวลเบาที่ดูดกลืนน้ำ

กรณีตัวอย่างไม่ผ่านการทดสอบ ให้ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 โดยใช้ตัวอย่างเดิมกับน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง



ภาพที่ 3.6 การทดสอบ อัตราการดูดกลืนน้ำ

4.4 การทดสอบ ความต้านแรงอัด

อัตราการรับแรงอัดเป็นสิ่งที่แสดงถึงความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ถ้ารับกำลังอัดได้สูงก็แสดงว่า ปูนซีเมนต์นั้นมีคุณภาพดี ซึ่งในอาคารประเภทต่างๆจะให้ส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตนี้ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ ฉะนั้นความแข็งแรงของปูนซีเมนต์จึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาให้รับกำลังได้ตามที่กำหนดไว้ การทดสอบหาค่าการรับกำลังอัดในคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มีขั้นตอนดังนี้

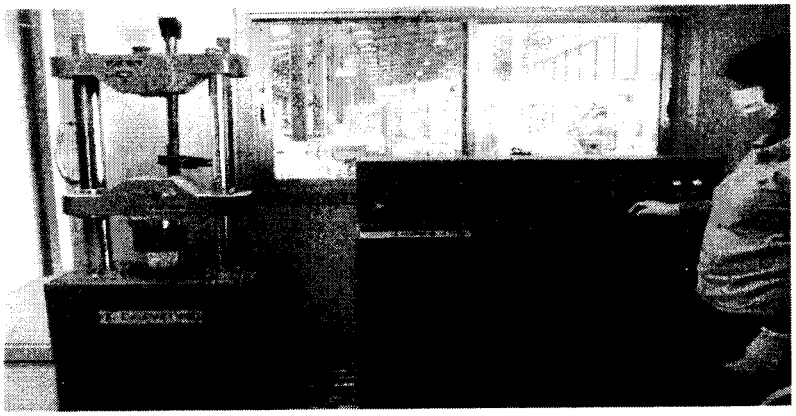
ขั้นตอนที่ 1 นำตัวอย่าทดมาอบเข้าตู้อบควบคุมอุณหภูมิ $\pm$ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 นำตัวอย่างทดสอบออกมาผึ่งในอากาศหลังจากที่ผ่านการอบแล้ว ไม่เกิน 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 นำตัวอย่างทดสอบเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด

ขั้นตอนที่ 4 ทำการบันทึกผลลงในตารางแล้วคำนวณการรับน้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองในบทที่ 4



ภาพที่ 3.6 การทดสอบ ความต้านแรงอัด

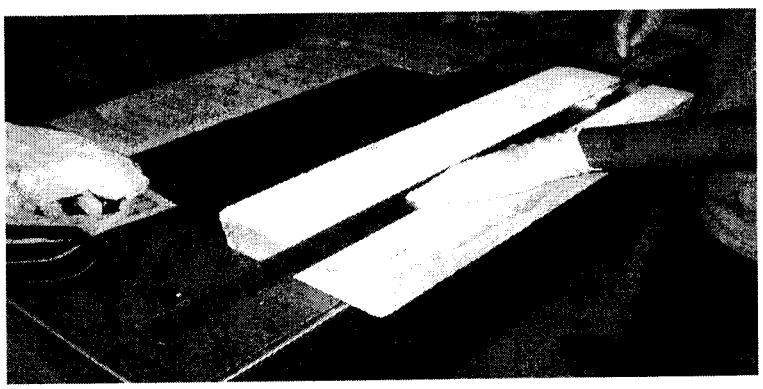
4.5 การทดสอบ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว

การทดสอบ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำชิ้นทดสอบเข้าอบในตู้อบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็น ชั่งมวลและวัดความยาวของชิ้นทดสอบถือเป็นมวลในสภาพแห้ง คำนวณหาค่ามวลที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40

ขั้นตอนที่ 2 นำชิ้นทดสอบไปแช่ในอ่างน้ำ โดยผิวบนของชิ้นทดสอบอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำ 3 เซนติเมตรเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นให้เก็บรักษาที่ห้องหรือภาชนะปิดตามข้อ 4 ชั่งมวลและวัดความยาวทุกวันจนมวลของชิ้นทดสอบมีค่าต่ำกว่าค่ามวลที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 ซึ่งคำนวนณได้จากขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 วัดความยาวและชั่งมวลของชิ้นทดสอบทุก 3 วัน จนความยาวเข้าสู่สภาพสมดุลโดยชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยกว่า ร้อยละ 0.003 ต่อ 3 วัน



ภาพที่ 3.7 การทดสอบ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว

บทที่ 4
ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์

บทนี้เป็นการกล่าวถึง ปริมาณ ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ ตลอดจนผลการทดสอบของคอนกรีตบล๊อคที่ได้ในอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ต่างๆ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่นเชิงปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว ความต้านแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง

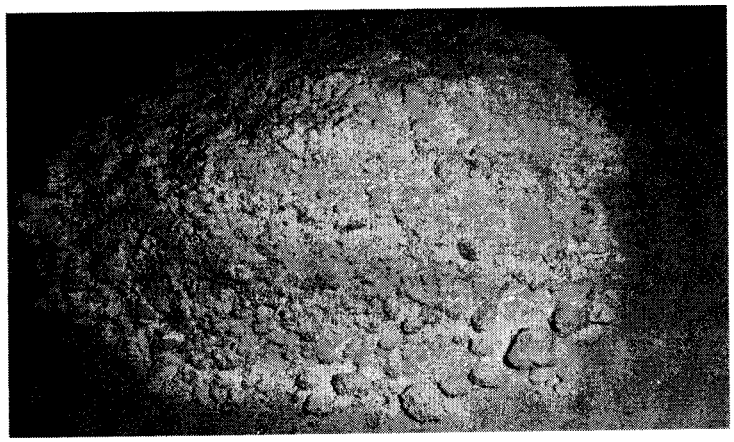
1. ปริมาณ ลักษณะทางกายภาพของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

1.1 ปริมาณของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ปัจจุบันปริมาณของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ของบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด มีปริมาณวันละ1,000-1,200 กิโลกรัม เนื่องจากมีการเพิ่มกำลังการผลิตและมีการผลิตตลอด 24 ชั่วโมง ส่งผลให้มีปริมาณของขี้เถ้าเพิ่มมากขึ้น

1.2 สีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ภาพที่ 4.14 แสดงสีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้า พบว่ามีสีค่อนไปทางสีเทาเข้ม คล้ายสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง เป็นผงละเอียด



ภาพที่ 4.1 แสดงสีและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้า

1.3 ความถ่วงจำเพาะและการกระจายของขนาดอนุภาคขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ความถ่วงจำเพาะของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ มีค่าความถ่วงจำเพาะค่อนข้างสูงโดยมีค่าเท่ากับ 5.0106 โดยความถ่วงจำเพาะที่สูงจะมีความละเอียดมากและมีความพรุนน้อย ดังนั้นเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตบล๊อคมวลเบาจะทำให้มีกำลังอัดสูง เนื่องจากทำให้คอนกรีตบล็อคมวลเบามีความต้องการน้ำลดลง และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว ส่วนการกระจายของขนาดอนุภาคขี้เถ้ามีขนาดที่หลากหลายกันออกไป ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากกราฟ (ตามภาคผนวก ข)

2. องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีปริมาณ ZnO สูงถึงร้อยละ 88.31 ส่วน CaO ของขี้เถ้ามีปริมาณขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 11.61 ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากผลการวิเคราะห์ (ตามภาคผนวก ข)

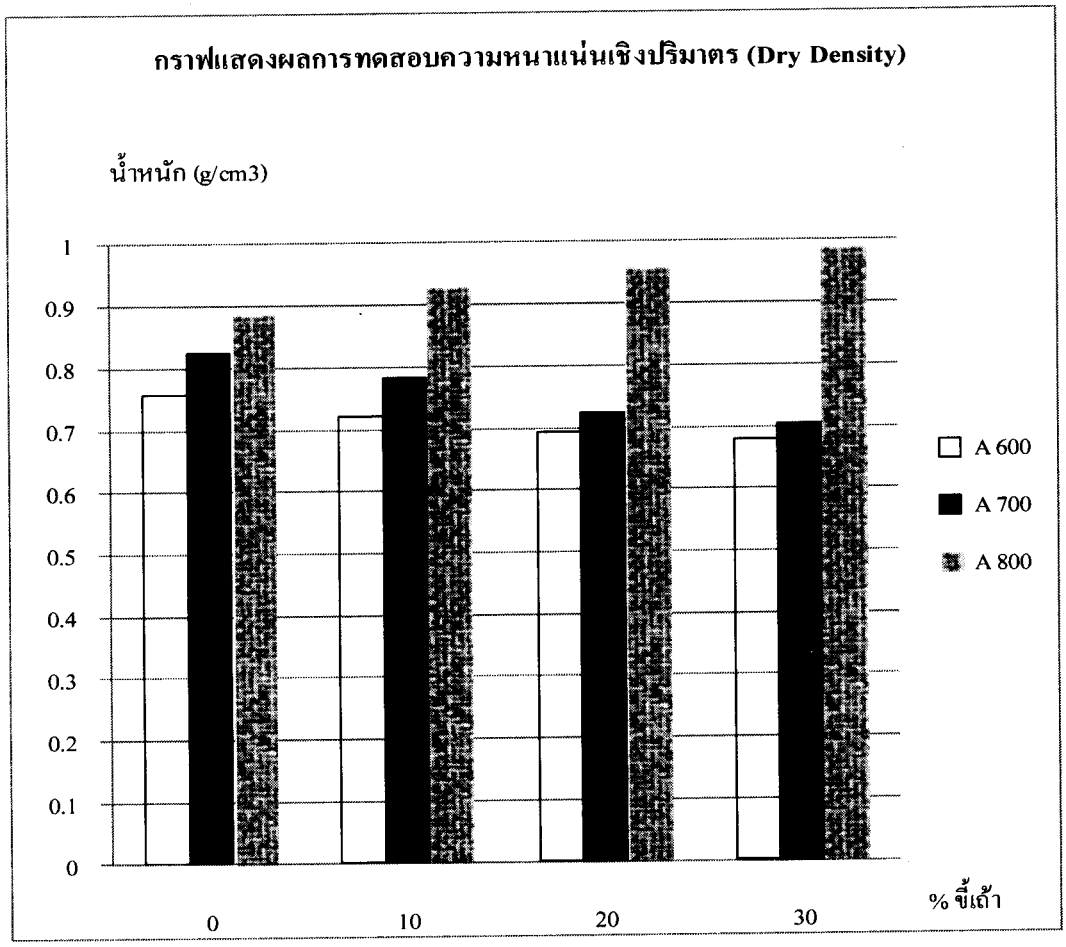
3. ผลการทดลองและการทดสอบของคอนกรีตบล๊อค

3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร

จากการทดสอบหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 20 และภาพที่ 15 ของส่วนผสมใน 3 ระดับ คือ ความหนาแน่น 600 kg/m^3 ,700 kg/m^3 และ 800 kg/m^3 พบว่าเมื่อแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ ใน A600 และ A700 ปริมาณความหนาแน่นปรับตัวลดลงในระดับหนึ่ง เมื่อปริมาณการแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ประมาณ 10% และหลังจากการแทนที่ขี้เถ้าซีเมนต์ 20% และ 30% พบว่ามีระดับของความหนาแน่นปรับตัวสูงขึ้นเล็กน้อยและอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันทั้ง A600 และ A700 เป็นผลมาจากความหนาแน่นที่น้อยเมื่อใช้ขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ส่งผลให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง ซึ่งต่างจาก A800 พบว่าเมื่อแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ในปริมาณที่ 20% และ 30% กลับทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรปรับตัวสูงขึ้น เป็นผลมาจากส่วนผสมที่มีเนื้อของวัสดุที่มีอยู่ในปริมาณมาก เมื่อถูกแทนที่ขี้เถ้าที่มีอนุภาคเล็กและละเอียดกว่าสามารถเข้าไปแทนที่ในเนื้อของคอนกรีตมวลเบาได้ดีขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่ปรับตัวสูงขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Dry Density)

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	Dry Density (g/cm^3)					
	A 600		A 700		A 800	
0	0.760	$\overline{X}$=0.759	0.826	$\overline{X}$=0.824	0.895	$\overline{X}$=0.889
	0.755	S.D.=0.0026	0.820	S.D.=0.0042	0.887	S.D.=0.0038
	0.762		0.824		0.885	
	0.758		0.820		0.890	
	0.758		0.830		0.888	
10	0.722	$\overline{X}$=0.722	0.780	$\overline{X}$=0.782	0.929	$\overline{X}$=0.930
	0.725	S.D.=0.0034	0.777	S.D.=0.0035	0.933	S.D.=0.0020
	0.725		0.784		0.931	
	0.720		0.786		0.928	
	0.717		0.783		0.929	
20	0.688	$\overline{X}$=0.693	0.718	$\overline{X}$=0.724	0.955	$\overline{X}$=0.958
	0.695	S.D.=0.0031	0.720	S.D.=0.0048	0.959	S.D.=0.0031
	0.692		0.728		0.963	
	0.696		0.727		0.956	
	0.694		0.728		0.959	
30	0.677	$\overline{X}$=0.680	0.702	$\overline{X}$=0.705	0.9991	$\overline{X}$=0.989
	0.682	S.D.=0.0036	0.708	S.D.=0.0021	0.988	S.D.=0.0015
	0.685		0.706		0.990	
	0.676		0.705		0.987	
	0.680		0.705		0.989	



ภาพที่ 4.2 ผลทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร

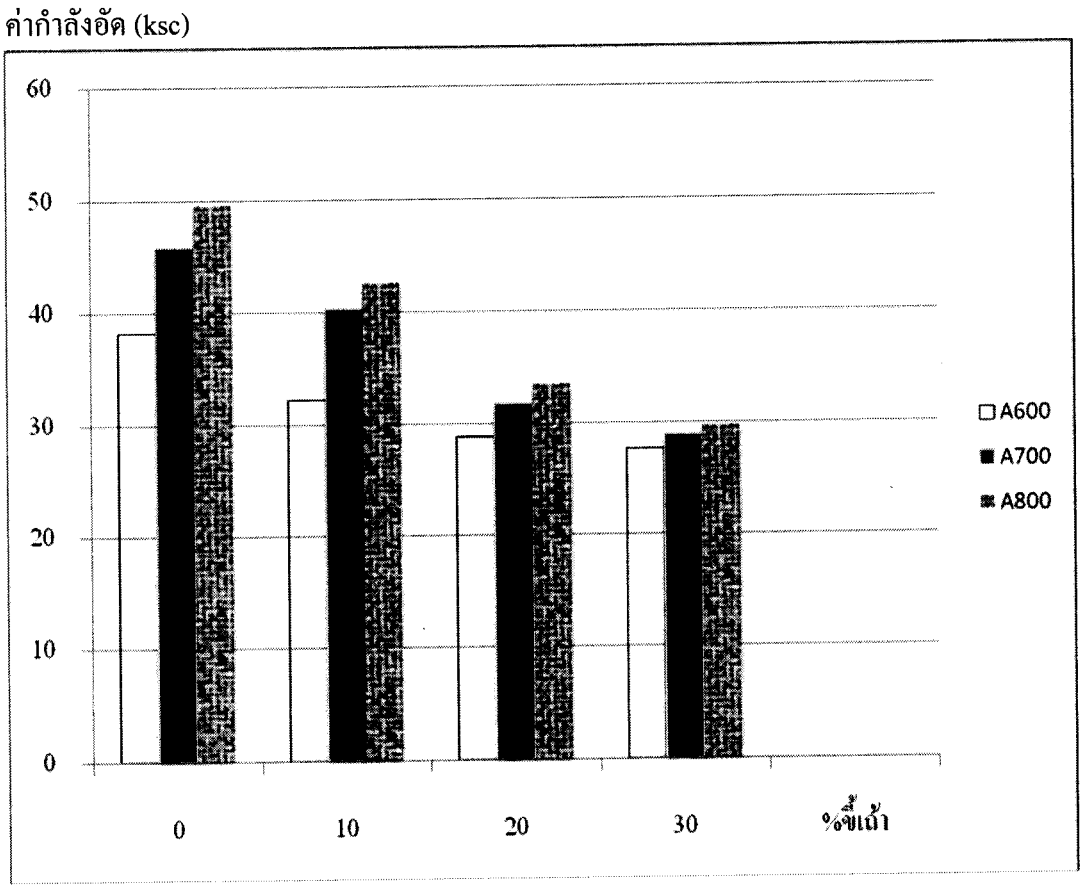
3.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัด

การทดสอบหาค่ากำลังอัดดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 16 ของส่วนผสมใน 3 ระดับ ตามความหนาแน่น พบว่าในส่วนผสมที่ไม่ได้ถูกขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ CT จะได้ผลของกำลังอัดสูงตามระดับของความหนาแน่นที่คิดไว้คือ A800 รับกำลังอัดได้ 49.84 ksc, A700 รับกำลังอัดได้ 45.77 ksc และA600 รับกำลังอัดได้ 38.28 ksc ตามลำดับ หลังจากถูกแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ ผลของกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบปรับตัวลดลงมากตามปริมาณของขี้เถ้าที่มากขึ้น จนกระทั่งการแทนที่ขี้เถ้าในซีเมนต์ในปริมาณ 30% การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกันของแต่ละระดับความหนาแน่น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	Compressive Strength (Kg/cm^3)					
	A 600		**A 700**		**A 800**	
0	38.15	$\overline{X}$=38.20	45.75	$\overline{X}$=45.77	49.66	$\overline{X}$=49.64
	38.18	S.D.=0.0339	45.80	S.D.=0.0251	49.65	S.D.=0.0291
	38.22		45.80		49.66	
	38.23		45.75		49.59	
	38.22		45.77		49.64	
10	32.13	$\overline{X}$=32.17	40.30	$\overline{X}$=40.29	42.62	$\overline{X}$=42.62
	32.21	S.D.=0.0380	40.26	S.D.=0.0244	42.65	S.D.=0.0187
	32.20		40.32		42.61	
	32.13		40.30		42.60	
	32.18		40.27		42.60	
20	28.78	$\overline{X}$=28.75	31.71	$\overline{X}$=31.74	33.50	$\overline{X}$=33.48
	28.72	S.D.=0.0223	31.75	S.D.=0.0277	33.45	S.D.=0.0212
	28.74		31.78		33.48	
	28.75		31.72		33.50	
	28.76		31.75		33.47	
30	27.63	$\overline{X}$=27.60	28.78	$\overline{X}$=28.81	29.62	$\overline{X}$=29.65
	27.60	S.D.=0.0255	28.82	S.D.=0.0300	29.65	S.D.=0.0187
	27.58		28.85		29.65	
	27.57		28.78		29.66	
	27.62		28.82		29.67	

กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)



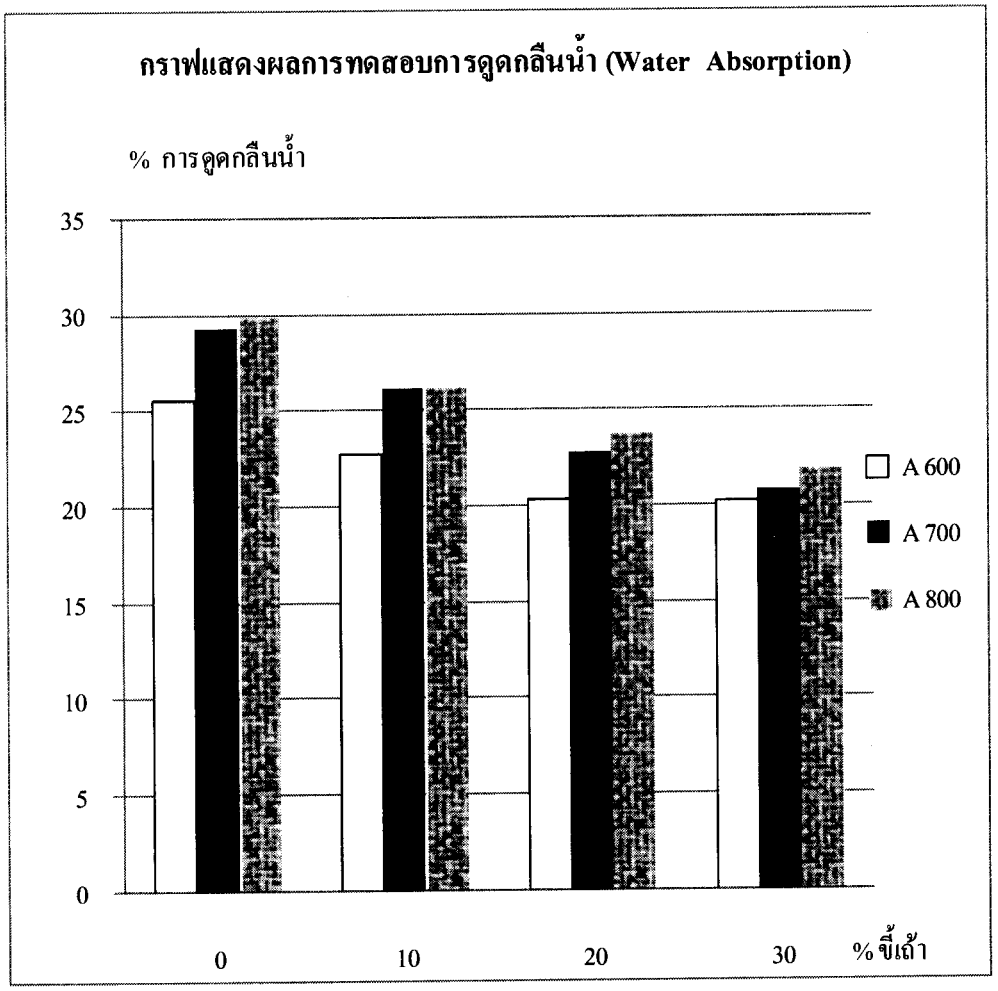
ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบการรับกำลังอัด

3.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ

การทดสอบหาค่าการดูดกลืนน้ำดังแสดงในตารางที่ 22 และภาพที่17 ซึ่งสังเกตุได้ว่าการแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การดูดกลืนน้ำ ของตัวอย่างทดสอบในแต่ละระดับลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีผลมาจากอนุภาคของขี้เถ้า เมื่อแทนที่ในซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความทึบน้ำในช่องว่างขนาดเล็ก (Micro Porous) จึงส่งผลให้อัตราการดูดกลืนน้ำต่ำลง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Water Absorption)

ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	Water Absorption (%)					
	A 600		A 700		A 800	
0	25.52%	$\overline{X}$=25.52%	29.22%	$\overline{X}$=29.25%	29.98%	$\overline{X}$=29.96%
	25.50%	S.D.=0.0114	29.25%	S.D.=0.0223	30.00%	S.D.=0.0316
	25.53%		29.28%		29.94%	
	25.51%		29.24%		29.92%	
	25.52%		29.26%		29.96%	
10	22.80%	$\overline{X}$=22.78%	26.10%	$\overline{X}$=26.10%	26.20%	$\overline{X}$=26.22
	22.81%	S.D.=0.0255	26.10%	S.D.=0.0122	26.20%	S.D.=0.0187
	22.76%		26.11%		26.23%	
	22.78%		26.11%		26.24%	
	22.75%		26.08%		26.23%	
20	20.35%	$\overline{X}$=20.34	22.80%	$\overline{X}$=22.78%	23.81%	$\overline{X}$=23.80%
	20.33%	S.D.=0.0295	22.81%	S.D.=0.0255	23.82%	S.D.=0.0234
	20.38%		22.76%		23.77%	
	20.35%		22.78%		23.82%	
	20.30%		22.75%		23.78%	
30	20.23%	$\overline{X}$=20.25%	20.85%	$\overline{X}$=20.83%	21.98%	$\overline{X}$=21.98%
	20.22%	S.D.=0.0311	20.82%	S.D.=0.0244	22.00%	S.D.=0.0122
	20.27%		20.80%		21.98%	
	20.26%		20.86%		21.97%	
	20.27%		20.82%		21.97%	



ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ

3.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว

การทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงความยาวดังแสดงในตารางที่ 23 และภาพที่18 ของส่วนผสมใน 3 ระดับ ตามความหนาแน่น A600 kg/m^3, A700 kg/m^3 และ A800 kg/m^3 พบว่าเกิดการหดตัวที่ตัวอย่างทดสอบ ในทุกระดับความหนาแน่น อันมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮร์เดรชั่นที่เหลืออยู่ เมื่ออยู่ในอุณหภูมิ 25 °C มีความชื้น 40% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นของการทดสอบ ในระดับความหนาแน่นระดับต่างๆมีดังนี้

1) ระดับความหนาแน่น A600 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 10% เกิดการหดตัวลดลง และหดตัวลงต่ำสุด เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ 30%

2) ระดับความหนาแน่น A700 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 10% เกิดการหดตัวลดลง และหดตัวลงต่ำสุด เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ 30%

4) ระดับความหนาแน่น A800 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 10% เกิดการหดตัวลดลง และหดตัวลงต่ำสุด เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่ในซีเมนต์ 30%

ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปผลการเปลี่ยนแปลงความยาว (Length Change)

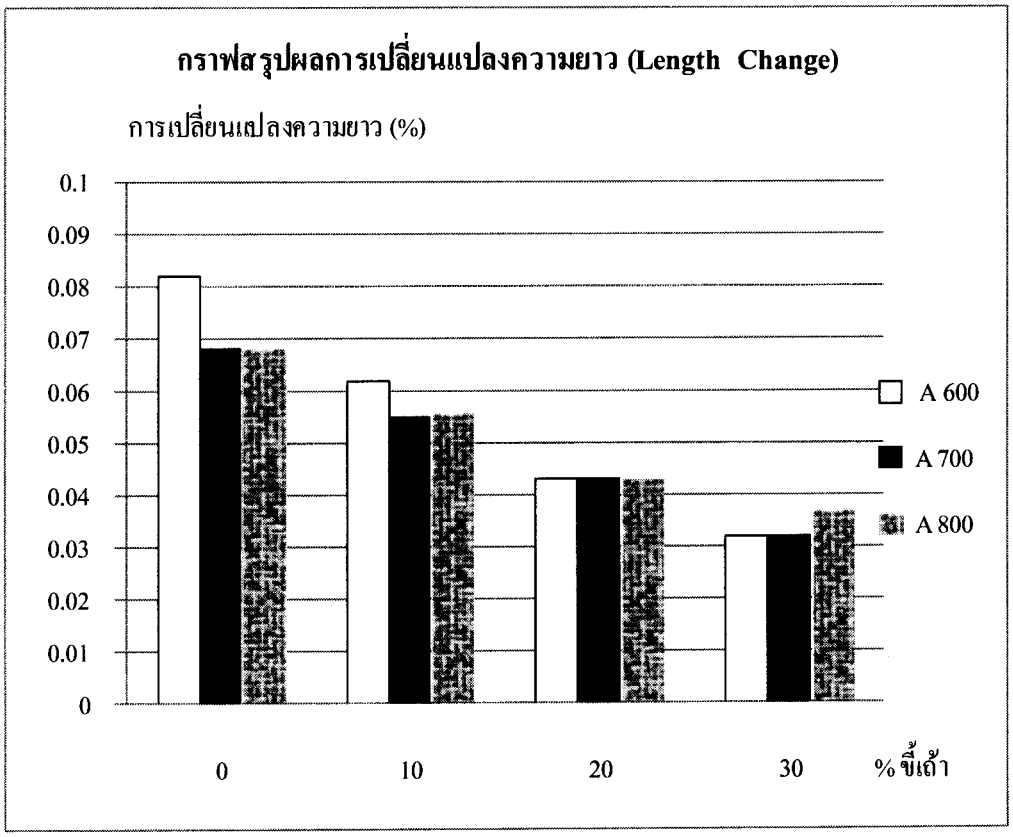
ความหนาแน่น	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	ความยาวของตัวอย่างทดสอบ (cm)				อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
		ความยาวปกติ	หลังจากผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิ 105 °C	หลังจากควบคุมอุณหภูมิ 25 °C	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง (cm)		
A 600	0	60 cm	59.474	59.500	0.026	0.078	$\overline{X}$=0.082
						0.085	S.D.=0.0030
						0.085	
						0.080	
						0.082	
	10	60 cm	59.481	59.530	0.049	0.061	$\overline{X}$=0.062
						0.060	S.D.=0.0018
						0.064	
						0.064	
						0.061	
	20	60 cm	59.462	59.488	0.26	0.043	$\overline{X}$=0.043
						0.042	S.D.=0.0012
						0.043	
						0.045	
						0.042	
	30	60 cm	59.461	59.480	0.019	0.033	$\overline{X}$=0.032
						0.033	S.D.=0.0012
						0.032	
						0.030	
						0.032	

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ความหนาแน่น	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	ความยาวของตัวอย่างทดสอบ (cm)				อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
		ความยาวปกติ	หลังจากผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิ 105 °C	หลังจากควบคุมอุณหภูมิ 25 °C	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง (cm)		
A 700	0	60 cm	59.455	59.496	0.41	0.070	$\overline{X}$=0.068
						0.068	S.D.=0.0025
						0.071	
						0.066	
						0.070	
	10	60 cm	59.451	59.484	0.33	0.054	$\overline{X}$=0.055
						0.055	S.D.=0.0018
						0.058	
						0.053	
						0.055	
	20	60 cm	59.484	59.510	0.26	0.045	$\overline{X}$=0.043
						0.045	S.D.=0.0023
						0.040	
						0.044	
						0.041	
	30	60 cm	59.476	59.495	0.019	0.030	$\overline{X}$=0.032
						0.033	S.D.=0.0014
						0.033	
						0.031	
						0.033	

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ความหนาแน่น	ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ของขี้เถ้า	ความยาวของตัวอย่างทดสอบ (cm)				อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)	
		ความยาวปกติ	หลังจากผ่านตู้อบแห้งอุณหภูมิ 105 °C	หลังจากควบคุมอุณหภูมิ 25 °C	ความยาวที่เปลี่ยนแปลง(cm)		
A 800	0	60 cm	59.459	59.500	0.041	0.065	$\overline{X}$=0.068
						0.068	S.D.=0.002
						0.071	5
						0.066	
						0.070	
	10	60 cm	59.463	59.500	0.037	0.059	$\overline{X}$=0.056
						0.056	S.D.=0.002
						0.057	2
						0.053	
						0.055	
	20	60 cm	59.464	59.498	0.034	0.042	$\overline{X}$=0.043
						0.045	S.D.=0.002
						0.043	1
						0.040	
						0.045	
	30	60 cm	59.467	59.489	0.022	0.037	$\overline{X}$=0.037
						0.036	S.D.=0.001
						0.038	0
						0.038	
						0.036	



ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาว

จากการทดสอบในหัวข้อนี้ สรุปได้ว่าการแทนที่ขี้เถ้าที่มีผลกระทบน้อยสุดมีดังนี้

1. ในระดับความหนาแน่น A600 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 30%
2. ในระดับความหนาแน่น A700 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 30%
3. ในระดับความหนาแน่น A800 kg/m^3 เมื่อแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณ 30%

ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอนุภาคเล็กและเป็นเม็ดกลม เข้าไปแทรกตัวที่เนื้อของคอนกรีตมวลเบาได้ดี เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงส่งผลให้การหดตัวน้อยในช่วงแรกของการทดสอบ ซึ่งเป็นผลดีต่อคอนกรีตมวลเบา

3.4 การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

จากตารางที่ 24 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดลองและผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1504-2541 ที่ความหนาแน่น 700 kg/m^3 และ 800kg/m^3 ซึ่งมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 10 และนำมาเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิตดังตารางที่ 25 การคิดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยนี้จะไม่รวมค่าอุปกรณ์ ค่าแรงงาน และค่าใช้จ่ายในการขนส่งขี้เถ้า พบว่าต้นทุนการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปที่วางขายตามท้องตลาดมีราคาอยู่ที่ 18 บาท/ก้อน

และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดลองและผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1504-2541 คือการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์อ๊อกไซด์ ร้อยละ 10 มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 10.24 บาท/ก้อนและ11.67 บาท/ก้อน

จากผลการทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าคอนกรีตบล๊อคมวลเบาที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตบล๊อคมวลเบาเพื่อใช้ในการก่อสร้างที่มีราคาถูกและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบา

คุณสมบัติทางกายภาพ	เกณฑ์มาตรฐาน	สถาบันที่รองรับ
ความหนาแน่น	600 - 700 กก./ลบ.ม.	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
กำลังอัด	ไม่น้อยกว่า 40 กก./ตร.ซม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อัตราการดูดกลืนน้ำ	ไม่เกิน 32 % โดยปริมาณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ค่าการยืดหดตัว	0.03 มิลลิเมตร	กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ที่มา : บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

วัตถุดิบ	ปริมาณที่ใช้ (กก.)		ราคา(บาท)	คิดเป็นเงิน (บาท)	
	A700	A800		A700	A800
ทราย	5.80	6.60	0.25	1.45	1.65
ซีเมนต์	1.60	1.80	2.1	3.36	3.78
ปูนขาว	0.77	0.90	3.1	2.38	2.79
ขี้เถ้า	0.20	0.20	-	-	-
ผงอลูมิเนียม	0.010	0.012	200	2	2.4
น้ำมันทาแบบ	0.03	0.03	35	1.05	1.05
			รวม	10.24	11.67

ที่มา : บริษัท ไทยไล้ท์บล๊อคแอนด์แพเนล จำกัด

บทที่ 5
สรุปการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาปริมาณ ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ และสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์แทนที่ปูนซีเมนต์ เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค คุณสมบัติของคอนกรีตบล๊อคมวลเบา คือ ความหนาแน่น กำลังอัด การดูดกลืนน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความยาว พร้อมทั้งศึกษาค่าใช้จ่ายในการใช้ของเสียชนิดขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ เป็นสัดส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล๊อค

1.1 ปริมาณ ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี

ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์ (ขี้เถ้า) ประมาณวันละ 1,000 – 1,200 กิโลกรัม ส่วนใหญ่ส่งกำจัดกับบริษัทเอกชน มีสีค่อนไปทางสีเทาเข้มคล้ายสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง เป็นผงละเอียดมีปริมาณ ZnO สูงถึงร้อยละ 88.31 ส่วน CaO ของขี้เถ้ามีปริมาณขี้เถ้าเท่ากับร้อยละ 11.61 สำหรับการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss On Ignition, LOI) พบว่ามีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.96

1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อคมวลเบา

1.2.1 ด้านความหนาแน่น การแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิระหว่างผสมลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคทำหน้าที่ในการชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตสด AAC

1.2.2 ด้านกำลังอัด การแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้กำลังอัดต่ำลดลง มีผลมาจากการพัฒนากำลังเป็นไปได้อย่างช้าๆ

1.2.3 ด้านการดูดกลืนน้ำ การแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้การดูดกลืนน้ำลดต่ำลง มีผลมาจากขี้เถ้าลอยที่มีอนุภาคเล็กและกลมแทรกตัวที่เนื้อของโพรงอากาศได้ดีเพิ่มความทึบน้ำใน AAC

1.2.4 ด้านการเปลี่ยนแปลงความยาว การแทนที่ขี้เถ้าในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้การหดตัวต่ำลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณขี้เถ้าลอยที่มีอนุภาคเล็กและเป็นเม็ดกลม เข้าไปแทรกตัวที่เนื้อของคอนกรีตมวลเบา AAC ได้ดี เมื่อปริมาณขี้เถ้าแทนที่อยู่ในระดับที่เหมาะสม จึงส่งผลให้

การหดตัวน้อยในช่วงแรกของการทดสอบ ซึ่งเป็นผลดีต่อคอนกรีตมวลเบา AAC หากใช้การแทนที่ขี้เถ้าในระดับที่เหมาะสม

1.2.5 ด้านต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยนี้จะไม่รวมค่าอุปกรณ์ ค่าแรงงาน และค่าใช้จ่ายในการขนส่งขี้เถ้า พบว่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปที่วางขายตามท้องตลาด

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ควรทำการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตมวลเบา AAC หากมีการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากขี้เถ้าที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีปริมาณ ZnO ค่อนข้างสูง หากมีการสัมผัสกับผิวหนังเป็นเวลานานสามารถทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรงซึ่งเรียกว่า โรคออกไซด์พ็อกซ์ (oxide pox) (ดร. สุพิณ แสงสุข)

2.2 หากต้องการเพิ่มคุณสมบัติการเป็นปอซโซลานของขี้เถ้าควรทำการปรับปรุงคุณภาพของขี้เถ้าโดยการบดก่อน ซึ่งขี้เถ้าที่บดละเอียดดังกล่าวจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ดี ขี้เถ้าที่ไม่ได้บดจะทำให้ความต้องการน้ำของส่วนผสมมากส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัวและทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง อย่างไรก็ดีหากต้องการนำขี้เถ้ามาใช้โดยไม่ปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำขี้เถ้ามาใช้งานควรผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ก่อน เพื่อคัดแยกสิ่งเจือปนและเถ้าที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และขี้เถ้าที่นำมาใช้ไม่ควรมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 20 ซึ่งจะส่งผลต่อความต้องการน้ำและคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา AAC

2.3 การวิจัยในครั้งนี้จำกัดเพียงขี้เถ้าที่มาจากบริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัดเท่านั้น บริษัทอื่นๆขี้เถ้าอาจมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากนี้ เนื่องจากวัตถุดิบและการเผาไหม้ไม่เหมือนกัน รวมไปถึงอุณหภูมิและเทคโนโลยีในการเผาที่แตกต่างกันก็จะส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าเปลี่ยนไปเช่นเดียวกัน

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร A600

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	1	1	1	1
Mean		.7586	.7218	.6930	.6800
Median		.7580	.7220	.6940	.6800
Mode		.76	.73	.69(a)	.68(a)
Std. Deviation		.00261	.00342	.00316	.00367
Minimum		.76	.72	.69	.68
Maximum		.76	.73	.70	.69

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร A700

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	1	1	1	1
Mean		.8240	.7820	.7242	.7052
Median		.8240	.7830	.7270	.7050
Mode		.82	.78(a)	.73	.71
Std. Deviation		.00424	.00354	.00482	.00217
Minimum		.82	.78	.72	.70
Maximum		.83	.79	.73	.71

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร A800

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	0	0	0	0
Mean		.8890	.9300	.9584	.9890
Median		.8880	.9290	.9590	.9890
Mode		.89(a)	.93	.96	.99(a)
Std. Deviation		.00381	.00200	.00313	.00158
Minimum		.89	.93	.96	.99
Maximum		.90	.93	.96	.99

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังอัด A600

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	1	1	1	1
Mean		38.2000	32.1700	28.7500	27.6000
Median		38.2200	32.1800	28.7500	27.6000
Mode		38.22	32.13	28.72(a)	27.57(a)
Std. Deviation		.03391	.03808	.02236	.02550
Minimum		38.15	32.13	28.72	27.57
Maximum		38.23	32.21	28.78	27.63

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังอัด A700

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	0	0	0	0
Mean		45.7740	40.2900	31.7420	28.7020
Median		45.7700	40.3000	31.7500	28.7800
Mode		45.75(a)	40.30	31.75	28.78
Std. Deviation		.02510	.02449	.02775	.23774
Minimum		45.75	40.26	31.71	28.28
Maximum		45.80	40.32	31.78	28.85

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังอัด A800

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	1	1	1	1
Mean		49.6400	42.6200	33.4800	29.6500
Median		49.6500	42.6200	33.4800	29.6500
Mode		49.66	42.62	33.50	29.65
Std. Deviation		.02915	.01871	.02121	.01871
Minimum		49.59	42.60	33.45	29.62
Maximum		49.66	42.65	33.50	29.67

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนน้ำ A600

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	0	0	0	0
Mean		25.5160	22.7800	20.3420	20.2380
Median		25.5200	22.7800	20.3500	20.2300
Mode		25.52	22.75(a)	20.35	20.27
Std. Deviation		.01140	.02550	.02950	.03114
Minimum		25.50	22.75	20.30	20.20
Maximum		25.53	22.81	20.38	20.27
Percentiles	25	25.5050	22.7550	20.3150	20.2100
	50	25.5200	22.7800	20.3500	20.2300
	75	25.5250	22.8050	20.3650	20.2700

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนน้ำ A700

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	0	0	0	0
Mean		29.2500	26.1000	22.7800	20.8300
Median		29.2500	26.1000	22.7800	20.8200
Mode		29.22(a)	26.10(a)	22.75(a)	20.82
Std. Deviation		.02236	.01225	.02550	.02449
Minimum		29.22	26.08	22.75	20.80
Maximum		29.28	26.11	22.81	20.86

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนน้ำ A800

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	0	0	0	0
Mean		29.9600	26.2200	23.8000	21.9800
Median		29.9600	26.2300	23.8100	21.9800
Mode		29.92(a)	26.20(a)	23.82	21.97(a)
Std. Deviation		.03162	.01871	.02345	.01225
Minimum		29.92	26.20	23.77	21.97
Maximum		30.00	26.24	23.82	22.00

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว A600

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	0	0	0	0
Mean		.0430	.0820	.0430	.0320
Median		.0430	.0820	.0430	.0320
Mode		.05	.09	.04(a)	.03(a)
Std. Deviation		.00212	.00308	.00122	.00122
Minimum		.04	.08	.04	.03
Maximum		.05	.09	.05	.03

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว A700

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	1	1	1	1
Mean		.0680	.0550	.0430	.0320
Median		.0680	.0550	.0440	.0330
Mode		.07(a)	.06	.05	.03
Std. Deviation		.00255	.00187	.00235	.00141
Minimum		.07	.05	.04	.03
Maximum		.07	.06	.05	.03

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว A800

Statistics

		ร้อยละ0	ร้อยละ10	ร้อยละ20	ร้อยละ30
N	Valid	5	5	5	5
	Missing	1	1	1	1
Mean		.0680	.0620	.0560	.0370
Median		.0680	.0610	.0560	.0370
Mode		.07(a)	.06(a)	.05(a)	.04(a)
Std. Deviation		.00255	.00187	.00224	.00100
Minimum		.07	.06	.05	.04
Maximum		.07	.06	.06	.04

a Multiple modes exist. The smallest value is shown

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจาก
กระบวนการผลิตซิงค์ออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ :

จากการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างด้วยเทคนิค X-ray fluorescence ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่พบในตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางข้างล่าง

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง

ธาตุ	ปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่าง (%wt)	ออกไซด์	ปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่าง (%wt)
	ขี้เถ้า		ขี้เถ้า
O	20.72		
Mg	<0.01	MgO	<0.01
Al	<0.01	Al_2O_3	<0.01
Si	0.03	SiO_2	0.07
S	<0.01	SO_3	<0.01
Cl	<0.01	Cl	<0.01
Ca	8.30	CaO	11.61
Zn	70.95	ZnO	88.31
Total	100.00	**Total**	100.00

Notes:
1. ปริมาณของแต่ละธาตุที่รายงานข้างต้นได้เทียบจากปริมาณรวมของธาตุที่พบด้วยเทคนิค XRF ทั้งหมดให้เป็น 100%
2. ปริมาณของธาตุที่เครื่องมือสามารถวัดได้ต่ำสุดคือ 0.01 wt% นอกจากจะแจ้งไว้นอกเหนือจากนั้น
3. ข้อจำกัดทางเทคนิค XRF คือไม่สามารถวัดส่วนประกอบที่เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่าเลขอะตอมของออกซิเจน (8) และที่มีเลขอะตอมสูงกว่าเลขอะตอมของยูเรเนียม (92)
4. ปริมาณสารประกอบที่รายงาน คำนวณจากปริมาณธาตุที่ตรวจสอบได้

ข้อคิดเห็น: -

เอกสารแนบ:

เอกสารแนบที่ 1.1-1.2: กราฟแสดงองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง ขี้เถ้า

MTEC
a member of NSTDA

QUANTACHROME CORPORATION
Ultrapycnometer 1000 Version 2.12
Analysis Report

Sample & User Parameters

Sample ID: ASH
Weight: 1.0766 grams
Analysis Temperature: 22.9 degC

Date: 07-21-09
Time: 13:23:36
User ID: NARIN

Analysis Parameters

Cell Size: Small
V added - Small: 13.2065 cc
V cell: 14.1192 cc
Target Pressure: 17.0 psi
Equilibrium Time: Auto
Flow Purge: 1:00 min.
Maximum Runs: 5
Number of Runs Averaged: 5

Results

Deviation Requested: 0.010 %
Average Volume: 0.2149 cc
Average Density: 5.0106 g/cc
Coefficient of Variation: 0.1959 %

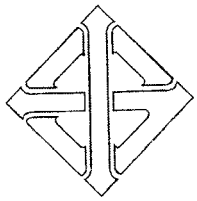
Deviation Achieved: +/- 0.0823 %
Std. Dev. : 0.0004 cc
Std. Dev. : 0.0098 g/cc

Tabular Data

RUN	VOLUME (cc)	DENSITY (g/cc)
1	0.2145	5.0184
2	0.2146	5.0158
3	0.2150	5.0082
4	0.2145	5.0183
5	0.2156	4.9925

ภาคผนวก ค

มาตรฐานผลอตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา
แบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก. 1505-2541



มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

THAI INDUSTRIAL STANDARD

มอก. 1505 – 2541

ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา แบบมีฟองอากาศ–อบไอน้ำ

AUTOCLAVED AERATED LIGHTWEIGHT CONCRETE ELEMENTS

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

ICS 91.100.99

ISBN 974-607-866-6

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา แบบมีฟองอากาศ–อบไอน้ำ

มอก. 1505 – 2541

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 2023300

ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 115 ตอนที่ 105ง
วันที่ 31 ธันวาคม พุทธศักราช 2541

คณะกรรมการวิชาการคณะที่ 873
มาตรฐานคอนกรีตมวลเบา

1. ผู้แทนกรมโยธาธิการ
2. ผู้แทนกรมวิทยาศาสตร์บริการ
3. ผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4. ผู้แทนการเคหะแห่งชาติ
5. ผู้แทนสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
6. ผู้แทนสมาคมธุรกิจบ้านจัดสรร
7. ผู้แทนบริษัท ซุปเปอร์บล็อก จำกัด
8. ผู้แทนบริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด
9. ผู้แทนบริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด
10. ผู้แทนสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม — กรรมการและเลขานุการ
11. ผู้แทนบริษัท โกลเด้น แพลน จำกัด — กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

ปัจจุบันมีการทำชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ สำหรับงานก่อสร้างภายในประเทศเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมประเภทนี้ จึงกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ชิ้น

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดขึ้นโดยใช้เอกสารต่อไปนี้เป็นแนวทาง

DIN 4165-1986	Autoclaved aerated concrete blocks and flat elements
DIN SFS prEN 991-1992	Determination of the dimensions of prefabricated reinforced components made of autoclaved aerated concrete or lightweight aggregate concrete with open structure
JIS A 5416-1995	Autoclaved lightweight aerated concrete panels
มอก.15 เล่ม 1-2532	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ
มอก.109-2517	วิธีชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อซึ่งทำด้วยคอนกรีต
มอก.319-2541	ปูนไลม์อุตสาหกรรม

คณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้พิจารณามาตรฐานนี้แล้ว เห็นสมควรเสนอรัฐมนตรีประกาศตามมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2411 (พ.ศ. 2541)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. 2511

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มาตรฐานเลขที่ มอก. 1505-2541 ไว้ ดังมีรายการละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ประกาศ ณ วันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2541

สมศักดิ์ เทพสุทิน

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มอก. 1505-2541

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา
แบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดรายละเอียดของชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ซึ่งเป็นวัสดุก่อผนังมวลเบา โดยมีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อคอนกรีต และอบด้วยไอน้ำ โดยกำหนดชั้นคุณภาพและชนิด ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน วัสดุและการทำ คุณลักษณะที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การเก็บคอนกรีตมวลเบา การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบ

1.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ครอบคลุมเฉพาะผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต และอบในเตาอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า "คอนกรีตมวลเบา" หมายถึง คอนกรีตที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตทั่วไปที่มีขนาดเดียวกัน โดยมีฟองอากาศเล็ก ๆ แทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แข็งด้วยการอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังด้วยวิธีก่อบาง ดูรูปที่ 1

2.2 วิธีก่อบาง หมายถึง วิธีก่อที่มีลักษณะปูนก่อบาง มีความหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร และจำเป็นต้องใช้ปูนก่อที่ทำขึ้นด้วยส่วนผสมพิเศษ ที่สามารถให้แรงยึดหน่วงมากเพียงพอเหมาะสมกับความหนา

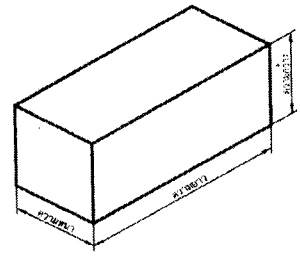
2.3 ร่องปูนก่อ หมายถึง ร่องที่ด้านข้างของคอนกรีตมวลเบาที่จะประกอบกันให้เป็นช่อง ใช้สำหรับใส่ปูนก่อขณะทำงานก่อผนัง

2.4 ร่อง หมายถึง ส่วนของคอนกรีตมวลเบาที่อยู่ต่ำกว่าพื้นผิวด้านข้าง สำหรับให้ลิ้นยื่นเข้ามาเพื่อการประสาน

2.5 ลิ้น หมายถึง ส่วนของคอนกรีตมวลเบาที่ยื่นเลยพื้นผิวส่วนอื่น สำหรับแทรกไปในร่องเพื่อการประสาน

2.6 ความหนาของคอนกรีตมวลเบา หมายถึง ความหนาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ก่อผนัง

2.7 ร่องมือจับ หมายถึง ร่องที่ด้านข้างของคอนกรีตมวลเบาที่อยู่ต่ำจากขอบบน ใช้สำหรับจับยกเพื่อทำงาน



รูปที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

(ข้อ 2.1)

3. ชั้นคุณภาพและชนิด

3.1 คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามความต้านแรงอัดออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ และแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรออกเป็น 7 ชนิด โดยชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบามีความสัมพันธ์กันตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา

(ข้อ 3.1)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัด นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตร เฉลี่ย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
2	2.5	2.0	0.4	0.31 ถึง 0.40
			0.5	0.41 ถึง 0.50
4	5.0	4.0	0.6	0.51 ถึง 0.60
			0.7	0.61 ถึง 0.70
			0.8	0.71 ถึง 0.80
6	7.5	6.0	0.7	0.61 ถึง 0.70
			0.8	0.71 ถึง 0.80
8	10.0	8.0	0.8	0.71 ถึง 0.80
			0.9	0.81 ถึง 0.90
			1.0	0.91 ถึง 1.00

4. ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

4.1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ขนาดของคอนกรีตมวลเบาที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานนี้ ออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามระบบการประสานทางพิกัดในงานก่อสร้างอาคาร ซึ่งได้กำหนดหน่วยพิกัดมูลฐาน (พ) ให้เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ขนาดของคอนกรีตมวลเบาเป็นไปตามตารางที่ 2 โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 2 มิลลิเมตร

ในกรณีมีร่องและลิ้นให้เพิ่มได้อีกมิติละ 9 มิลลิเมตร

การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 11.1

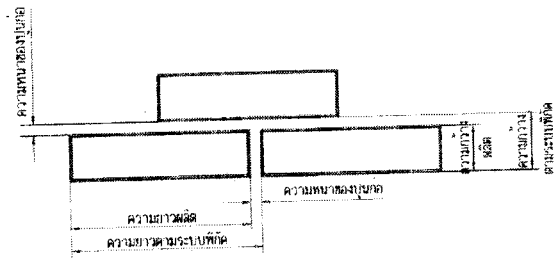
ตารางที่ 2 ขนาดคอนกรีตมวลเบา

(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความกว้าง	ความยาว	ความหนา
200	600	75
300		90
400		100
		125
		150
		175
		200
		250

หมายเหตุ *ความกว้างและความยาวตามตารางที่ 2 เป็นค่าที่รวมความหนาของปูนก่อ 3 มิลลิเมตรไว้แล้ว(ดูรูปที่ 2)*



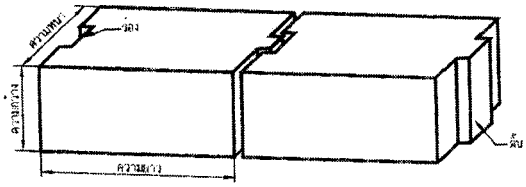
รูปที่ 2 ความหนาของปูนก่อตามระบบประสานทางพิกัด

4.2 ความได้ฉาก
คอนกรีตมวลเบา ที่ระยะ 300 มิลลิเมตร วัดจากมุมฉากจะคลาดเคลื่อนจากแนวฉากได้ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 11.1

4.3 ร่องและลิ้น (ถ้ามี) ดูรูปที่ 3
คอนกรีตมวลเบาอาจทำเป็นร่องและลิ้นในตัวได้ และให้เป็นดังนี้

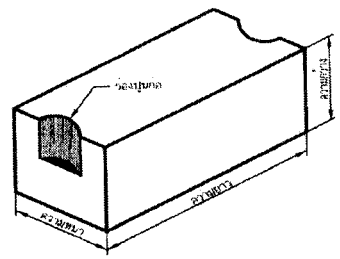
4.3.1 ขนาดของร่องและลิ้น ไม่ควรเล็กกว่าเศษหนึ่งส่วนเจ็ด และไม่ควรเกินเศษสองส่วนห้าของความหนาของคอนกรีตมวลเบา โดยในแต่ละด้านอาจมีร่องและลิ้นได้หลายแนว

4.3.2 ความกว้าง และความลึกของลิ้นในทุก ๆ ด้าน ควรเล็กกว่าความกว้างและความลึกของร่องระหว่าง 1 ถึง 2 มิลลิเมตร



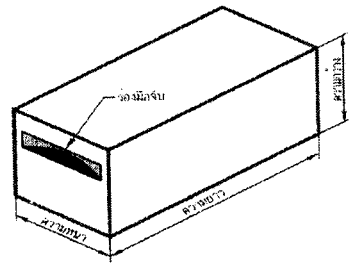
รูปที่ 3 ตัวอย่างร่องและลิ้นของคอนกรีตมวลเบา
(ข้อ 4.3)

4.4 ร่องปูนก่อ (ถ้ามี) ดูรูปที่ 4
ร่องปูนก่อที่ด้านข้างของคอนกรีตมวลเบาและมีขนาดเริ่มจากผิวบนลงมามีระยะ 1/4 ถึง 1/2 ของความกว้างของคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4 ตัวอย่างร่องปูนก่อสำหรับคอนกรีตมวลเบา
(ข้อ 4.4)

4.5 ร่องมือจับ (ถ้ามี) ดูรูปที่ 5
กรณีที่คอนกรีตมวลเบามีขนาดใหญ่ เพื่อความสะดวกในการทำงานอาจมีร่องสำหรับมือจับด้วย



รูปที่ 5 ตัวอย่างร่องมือจับสำหรับคอนกรีตมวลเบา
(ข้อ 4.5)

5. วัสดุและการทำ

5.1 วัสดุ

5.1.1 ปูนซีเมนต์ต้องเป็นปูนซีเมนต์ประเภท 1 ตาม มอก. 15 เล่ม 1

5.1.2 ปูนขาวต้องเป็นไปตาม มอก. 319

5.1.3 มวลผสมต้องเป็นวัสดุซิลิกา หรือทรายควอตซ์ หรือตะกรันจากเตาถลุงแบบพ่นลม หรือเถ้าถ่านหิน หรือวัสดุอื่นใดที่ไม่มีสาร เช่น โคลน ฝุ่น สารอินทรีย์ ในจำนวนที่อาจเป็นผลเสีย นำมาบดละเอียดโดยให้มีขนาดไม่ใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร

5.1.4 สารก่อฟองและสารผสมเพิ่ม (ถ้ามี) ต้องเป็นวัสดุทำให้เกิดฟองอากาศมีเสถียรภาพ และคุมเวลาแข็งตัวโดยต้องไม่ก่อให้เกิดผลเสียใด ๆ ต่อคุณภาพของคอนกรีตมวลเบา

5.2 การทำ

คอนกรีตมวลเบาต้องทำโดยผสมส่วนผสมตามที่ระบุในข้อ 5.1.1 ถึงข้อ 5.1.3 เข้าด้วยกันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นเติมน้ำจำนวนที่เหมาะสม สารก่อฟอง และสารผสมเพิ่ม (ถ้ามี) ให้มีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ แล้วเทลงในแบบนำไปบ่มจนแข็งพอที่จะแกะแบบเพื่อทำการตัดตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปอบด้วยไอน้ำเพื่อให้ได้ค่าความต้านแรงอัดตามที่กำหนดที่ความดันไม่ต่ำกว่า 1.0 เมกะพาสคัลและอุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ *ให้ตัดคอนกรีตมวลเบาในแนวที่ทำให้ด้านยาวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ*

6. คุณลักษณะที่ต้องการ

6.1 ลักษณะทั่วไป
ต้องไม่แตกร้าว ไม่บิดเบี้ยว ไม่แอ่นตัว และไม่มีตำหนิใด ๆ ที่เป็นผลเสียหายต่อการใช้งาน

6.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร
เมื่อทดสอบตามข้อ 11.2 แล้ว คอนกรีตมวลเบาต้องมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ยตามตารางที่ 1 โดยคอนกรีตมวลเบาแต่ละก้อนจะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนดได้ไม่เกิน ± 0.05 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

6.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว
เมื่อทดสอบตามข้อ 11.3 แล้ว อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวต้องไม่เกินร้อยละ 0.05

6.4 ความต้านแรงอัด
เมื่อทดสอบตามข้อ 11.4 แล้ว คอนกรีตมวลเบาต้องมีความต้านแรงอัดตามตารางที่ 1

6.5 อัตราการดูดกลืนน้ำ
เมื่อทดสอบตามข้อ 11.5 แล้ว อัตราการดูดกลืนน้ำต้องไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

7. การบรรจุ

7.1 เมื่อจะนำคอนกรีตมวลเบาออกจำหน่าย ผู้ทำต้องจัดเรียงคอนกรีตมวลเบาบนแผงรองรับที่เหมาะสม มีการป้องกันขอบไม่ให้แตกบิ่นเสียหายที่จะเป็นผลเสียต่อการใช้งานทั้งในการเก็บรักษาและขนส่ง รวมทั้งให้มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก

8. เครื่องหมายและฉลาก

8.1 ที่คอนกรีตมวลเบา อย่างน้อยทุก ๆ 10 ก้อน ต้องมีเลขอักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน และถาวร
(1) ชั้นคุณภาพ หรือความต้านแรงอัดต่ำสุด
(2) ชนิดของคอนกรีตมวลเบา
(3) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

8.2 ที่ภาชนะบรรจุคอนกรีตมวลเบา อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายและรายละเอียดต่อไปนี้
(1) ชั้นคุณภาพ หรือความต้านแรงอัดต่ำสุด
(2) ชนิดของคอนกรีตมวลเบา
(3) ความยาว ความกว้าง ความหนา เป็นมิลลิเมตร
(4) ปี เดือนที่ทำ
(5) จำนวนที่บรรจุในหีบห่อ
(6) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

9. การเก็บคอนกรีตมวลเบา

9.1 ต้องเก็บคอนกรีตมวลเบาไว้ที่แห้งมีอากาศถ่ายเทได้สะดวก และมีการป้องกันความชื้นไม่ให้เข้าถึงคอนกรีตมวลเบาได้ทุกฤดูกาล

9.2 ควรกองเก็บคอนกรีตมวลเบาให้สามารถนำคอนกรีตมวลเบารุ่นที่มาถึงก่อนไปใช้ได้ก่อน

10. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

10.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง คอนกรีตมวลเบาชั้นคุณภาพเดียวกัน ส่วนผสมเดียวกัน จำนวนไม่เกิน 1 000 ลูกบาศก์เมตร ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

10.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

10.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาดและลักษณะทั่วไป

10.2.1.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 ก้อน

10.2.1.2 ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4 และข้อ 6.1 จึงจะถือว่าคอนกรีตมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

10.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบความต้านแรงอัด

10.2.2.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากคอนกรีตมวลเบาที่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดข้อ 10.2.1 เพื่อนำมาทำเป็นชิ้นทดสอบจำนวน 9 ชิ้น

10.2.2.2 ชิ้นทดสอบทุกชิ้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.4 จึงจะถือว่าคอนกรีตมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

10.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรและอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว

10.2.3.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันจำนวน 3 ก้อน เพื่อนำมาทำเป็นชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร 3 ชิ้น และอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว 3 ชิ้น

10.2.3.2 ชิ้นทดสอบทุกชิ้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.2 และ 6.3 ในแต่ละรายการ จึงจะถือว่าคอนกรีตมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

10.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบอัตราการดูดกลืนน้ำ

10.2.4.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันจำนวน 3 ก้อน เพื่อนำมาทำเป็นชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น

10.2.4.2 ชิ้นทดสอบทุกชิ้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.5 จึงจะถือว่าคอนกรีตมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

10.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาต้องเป็นไปตามข้อ 10.2.1.2 ข้อ 10.2.2.2 ข้อ 10.2.3.2 และข้อ 10.2.4.2 ทุกข้อ จึงจะถือว่าคอนกรีตมวลเบารุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

11. การทดสอบ

11.1 ขนาด

11.1.1 เครื่องมือ

11.1.1.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

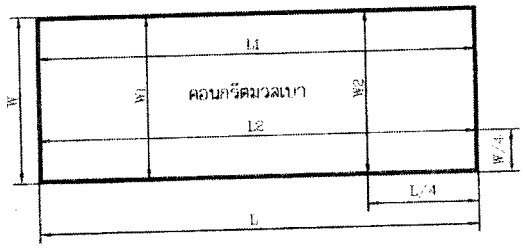
11.1.1.2 เวอร์เนียร์ที่วัดได้ถึง 200 มิลลิเมตร

11.1.1.3 เหล็กฉากที่มีความยาวแต่ละด้านไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร

11.1.2 วิธีทดสอบ

11.1.2.1 ความกว้างและความยาว

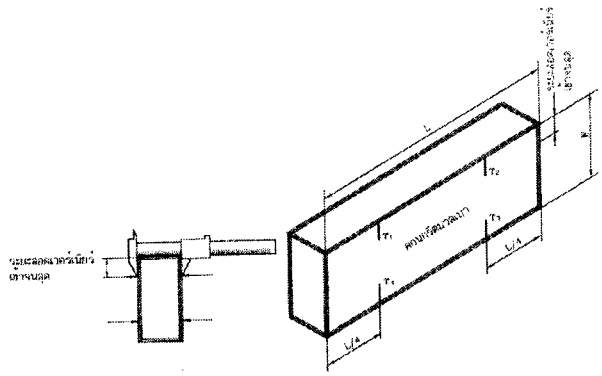
ใช้เครื่องวัดตามข้อ 11.1.1.1 วัดความกว้างและความยาวของตัวอย่าง โดยวัดที่ตำแหน่งห่างจากขอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ของด้านนั้น ๆ ดูรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตำแหน่งวัดความกว้าง และความยาว
(ข้อ 11.1.2.1)

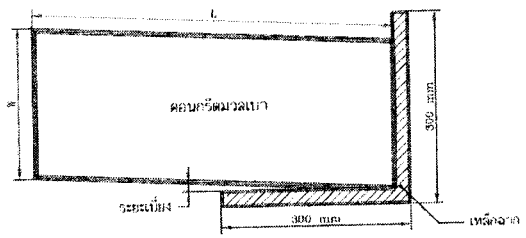
11.1.2.2 ความหนา

ใช้เวอร์เนียร์วัดความหนาของตัวอย่างที่ตำแหน่งห่างจากขอบด้านยาวของชิ้นทดสอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ของความยาว โดยสอดเวอร์เนียร์เข้าจนสุด ดูรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตำแหน่งวัดความหนา
(ข้อ 11.1.2.2)

11.1.2.3 ความโค้งฉาก
ทาบเหล็กฉากที่ด้านสั้นของตัวอย่าง จากนั้นวัดความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 300 มิลลิเมตรจากมุมของเหล็กฉาก ดูรูปที่ 8



รูปที่ 8 การวัดความโค้งฉาก
(ข้อ 11.1.2.3)

11.1.3 การรายงานผล

ให้รายงาน ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยที่วัดได้

11.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

11.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตร

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

11.2.2 เครื่องมือ

11.2.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

11.2.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม

11.2.2.3 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส ± 5 องศาเซลเซียส

11.2.3 วิธีทดสอบ

ให้วัดปริมาตรและมวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

11.2.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ย จากสูตร

$$\text{ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ}}{\text{ปริมาตรของชิ้นทดสอบ}}$$

11.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว

11.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 40 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร x 160 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตร และให้ด้านยาวของชิ้นทดสอบขนานกับด้านยาวของตัวอย่าง

11.3.2 เครื่องมือ

11.3.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.005 มิลลิเมตร

11.3.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม

11.3.2.3 อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 องศาเซลเซียส ± 2 องศาเซลเซียส

11.3.2.4 ห้องหรือภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 องศาเซลเซียส ± 2 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 43 ± ร้อยละ 2 ได้

11.3.2.5 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105 องศาเซลเซียส ± 5 องศาเซลเซียส

11.3.3 วิธีทดสอบ

11.3.3.1 นำชิ้นทดสอบเข้าอบในตู้อบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็น ชั่งมวลและวัดความยาวของชิ้นทดสอบถือเป็นมวลในสภาพแห้ง คำนวณหาค่ามวลที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40

11.3.3.2 นำชิ้นทดสอบไปแช่ในอ่างน้ำตามข้อ 11.3.2.3 โดยผิวบนของชิ้นทดสอบอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำ 3 เซนติเมตรเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นให้เก็บรักษาที่ห้องหรือภาชนะปิดตามข้อ 11.3.2.4 ชั่งมวลและวัดความยาวทุกวันจนมวลของชิ้นทดสอบมีค่าต่ำกว่าค่ามวลที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 ซึ่งคำนวณได้จากข้อ 11.3.3.1

11.3.3.3 วัดความยาวและชั่งมวลของชิ้นทดสอบทุก 3 วัน จนความยาวเข้าสู่สภาพสมดุล โดยชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยกว่า ร้อยละ 0.003 ต่อ 3 วัน

หมายเหตุ *การรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในกรณีใช้ภาชนะปิด ให้ทำโดยเก็บชิ้นทดสอบไว้เหนือสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่ละลายอยู่ในภาวะสมดุลกับน้ำในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิได้ และต้องมีการกวนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวของเกลือโพแทสเซียม หรือฝ้าที่ผิว*

11.3.4 การรายงานผล

ให้รายงานอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวจากสูตร

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวร้อยละ } (R) = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100$$

เมื่อ l_1 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 เป็นมิลลิเมตร

l_2 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบเมื่อเข้าสู่สภาพสมดุล เป็นมิลลิเมตร

หมายเหตุ *ความยาวของชิ้นทดสอบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40 หาโดยการประมาณค่าจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความยาวที่ได้จากการทดสอบตามข้อ 11.3.3.1 กับข้อ 11.3.3.2*

11.4 ความต้านแรงอัด

11.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่ตำแหน่ง ตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างของคอนกรีตมวลเบาให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน + 1 มิลลิเมตร ทำเครื่องหมายแสดงด้านยาวของตัวอย่าง ทำการทดสอบเมื่อชิ้นทดสอบมีปริมาณความชื้นร้อยละ 10 + ร้อยละ 2

กรณีชิ้นทดสอบมีความชื้นมากกว่าที่กำหนด ให้อบชิ้นทดสอบในตู้อบที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 75 องศาเซลเซียสจนได้ความชื้นตามที่ต้องการ

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

11.4.2 เครื่องมือ

11.4.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

11.4.2.2 เครื่องกดที่อ่านได้ละเอียดถึง 100 นิวตัน และสามารถควบคุมอัตราเพิ่มแรงอัดได้ระหว่าง 0.05 ถึง 0.20 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที

11.4.2.3 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105 องศาเซลเซียส + 5 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 75 องศาเซลเซียส สำหรับการอบหาปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์ร้อยละ 10 + ร้อยละ 2 ได้

11.4.3 วิธีทดสอบ

11.4.3.1 ให้กดชิ้นทดสอบด้วยวิธีตามที่ระบุใน มอก.109 โดยใช้อัตราเพิ่มแรงอัดตามตารางที่ 4 ในแนวตั้งฉากกับด้านยาวของชิ้นตัวอย่างจนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อชิ้นทดสอบแตกเสียหาย

11.4.3.2 วัดปริมาณความชื้นของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 4 อัตราเพิ่มแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

(ข้อ 11.4.3.1)

ชั้นคุณภาพ	อัตราเพิ่มแรงอัด นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที
2	0.05
4	0.10
6	0.15
8	0.20

11.4.4 การรายงานผล

ให้รายงานปริมาณความชื้น และค่าความต้านแรงอัดของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ย

11.5 อัตราการดูดกลืนน้ำ

11.5.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตร

กรณีชิ้นทดสอบมีความหนาน้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้อนุโลมใช้รูปทรงลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา

11.5.2 เครื่องมือ

11.5.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร

11.5.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม

11.5.2.3 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105 องศาเซลเซียส ± 5 องศาเซลเซียส

11.5.3 วิธีทดสอบ

11.5.3.1 อบชิ้นทดสอบในตู้อบให้แห้งจนได้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ± 5 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นวัดมวลและมิติของแต่ละก้อน

11.5.3.2 แช่ชิ้นทดสอบตามข้อ 11.5.3.1 ในน้ำสะอาดให้น้ำท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วยกออก ใช้ผ้าชุ่มน้ำเช็ดที่ผิวทีละก้อนแล้วชั่งใหม่ให้เสร็จภายใน 3 นาที น้ำหนักที่ชั่งได้นี้ถือเป็นน้ำหนักคอนกรีตมวลเบาที่ดูดกลืนน้ำ

กรณีตัวอย่างไม่ผ่านการทดสอบ ให้ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 11.5.3.1 โดยใช้ตัวอย่างเดิมกับน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง

11.5.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าเฉลี่ยการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา โดยคำนวณจากสัดส่วนน้ำหนักของน้ำที่ดูดกลืนต่อปริมาตรชิ้นทดสอบซึ่งคำนวณจากมิติ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ (2549) *การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต* (ออนไลน์) จาก
http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.htm/

กฤษณะ เพิ่มชาติ (2548) "การใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าลอย (ขี้เถ้าแกลบ) ในการผลิตอิฐมวลเบา" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

เกรียงไกร ทองเนื้อห้า (2544) "การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาพลาสติกประเภท PET ที่ใช้แล้วมาหมุนเวียนใช้ใหม่ในคอนกรีตบล็อค" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ (2547) *การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต* พิมพ์ครั้งที่ 2 คณะกรรมการวิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูประถัมภ์ พิมพ์ครั้งที่ 2

คำภี จิตชัยภูมิ และ ชัยชาญ โชติถนอม (2547) "ศึกษาคุณสมบัติของอิฐบล็อกมวลเบาที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทราย และเถ้าแกลบบด" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

จักรกริช กิตติปาลกุล, ธีรเดช ทิพยวรธรรม และนันทนิษฎ์ วงศ์วัฒนา (2540) "คอนกรีพรุนโดยวิธีอบไอน้ำความดันสูง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชลดล พึงธรรมจิตต์ (2549) "ผลกระทบของการแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศขอบไอน้ำ" ปริญญาครุศาสตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชัชวาล เศรษฐบุตร (2540) *คอนกรีตเทคโนโลยี* พิมพ์ครั้งที่ 4 ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2540) "การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะมาทำคอนกรีตกำลังอัดสูง" ใน *เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4* วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูประถัมภ์ จังหวัดภูเก็ตหน้า 206-215

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2543) "การพัฒนาเพื่อนำเถ้าถ่านหินบดจากแม่เมาะไปใช้ในงานคอนกรีต รายงานฉบับสมบูรณ์" ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชุติสรา ปะกิระตัง และพุทธวรรณ แซ่แต้ (2546) "การพัฒนาคอนกรีตบล็อกโดยใช้เถ้ามะพร้าว" (ออนไลน์) จาก http://www.tecno.msu.ac.th

ไชยันต์ เจริญพร และคณะ (2542) "การศึกษาคุณสมบัติของ Cellular Concrete เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลเบา" รายงานฉบับที่ วพ.172 ศูนย์วิจัยและพัฒนางาน, หน้า 5-50

ไชยยันต์ ชัยจักร และคณะ (2545) "คอนกรีตมวลเบาจากกากอุตสาหกรรมการรีไซเคิล" ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ

ธนพล พูนคล้าย, วีรศักดิ์ ละอองจันทร์ และสถาพร เทียนรุ่งศรี (2540) "คอนกรีตพรุนโดยวิธีบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บริษัทปูนซีเมนต์ไทย อุตสาหกรร จำกัด (2548) *ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้ในงาน* ปูนซีเมนต์ไทย อุตสาหกรรม

บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ณรงค์ศักดิ์ มมากุล และบัณฑิต รักษาดี (2547) *การใช้เถ้าแกลบไม่บดในการผลิตคอนกรีตบล็อก* (ออนไลน์) จาก http://www.eit.ro.th/article/show.asp

พัชราวรรณ เก๊อะเจริญ (2549) "การพัฒนาอิฐคอนกรีตน้ำหนักเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน" สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พีระ ณ ถลาง (2541) "ผนังคอนกรีตเบาสำเร็จรูป" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ

ภัทรจิตรา รัตตชู (2543) "คอนกรีตบล็อคผสมขี้เลื่อย" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ

วินิต ช่อวิเชียร (2529) *คอนกรีตเทคโนโลยี* พิมพ์ครั้งที่ 8 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิริยะ ธารพันธุ์ (2549) "การนำโคลนปูนจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบา" ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และคณะ (2546) "วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน" วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 459-473

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2541) *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม* มอก.1505-2541 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

_____. (2541) *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม* ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน มอก.894-2532 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

Q-CON (2009) from www.qcon.co.th/property/contrast Available : 2009.

SUPERBLOCK (2009) from www.suberblock.co.th/aboutus Available : 2009.

E.B. Oyetola and M. Adullahi (2006) "The use of rice husk ash in low-cost sandcrete block production" Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies 8:58-70.

F.H.WITTMANN (1993) "RILEM Recommended Practice Autoclaved Aerated Concrete Properties Testing and Desing, First edition" pp 3-321.

_____. (1993) "Production and Structure of the Material" RILEM Recommended Practice Autoclaved Aerated Concrete Properties Testing and Desing, First edition, pp 5-11.

G.B. Singh (2004) "Relevance of fly ash based cellular lightweight concrete for greener building and environment" (Online) Available:http://www.systembuilding.com/sb/download/Bejing%20conference%20Paper.pdf.

Naaville, A.M. (1995) "Popertise of Concrete" Longman House, Harlow, England, pp1-56.

Patcharaporn Suwanvitaya and Prasert Suwanvitaya, 2006, "Utilization of Mae Moh bottom ash as fine aggregate replacement in mortar" International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer khon kaen, Thailand May 24-25, pp 127-132.

Sunil Kumar (2003) "Fly ahs-lime-phosphogyphum hollow blocks for walls and Partitions" Builaing and Environment, 38:291-295.

Yun Bai, Ratiyah Ibrahim and P.A. Muhammed Basheer (2006) "Properties of lightweight concrete manufactured wit fly ash, furnace bottom ash, and lytag" International Warkshop on Sustainable Development and Concrete Technology.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวจิตวิกา สมใจ
วัน เดือน ปีเกิด	16 มิถุนายน 2526
สถานที่เกิด	น่าน
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
สถานที่ทำงาน	บริษัทเมทอ๊อกไซด์ ประเทศไทย จำกัด
ตำแหน่ง	ผู้จัดการแผนกควบคุมคุณภาพ