ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตสดที่นำกลับมาใช้ใหม่

FACTORS INFLUENCING ON PHYSICAL PROPERTIES OF RECYCLED FRESH CONCRETE

ธนพนธ์ เลิศวิภาภัทร

วิภู กรอบบาง

สันต์ภพ รักทองสุข

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตสดที่นำกลับมาใช้ใหม่

FACTORS INFLUENCING ON PHYSICAL PROPERTIES OF RECYCLED FRESH CONCRETE

ธนพนธ์ เลิศวิภาภัทร

วิภู กรอบบาง

สันต์ภพ รักทองสุข

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FACTORS INFLUENCING ON PHYSICAL PROPERTIES OF RECYCLED FRESH CONCRETE

THANAPON LERTWIPAPAT
VIPHU GROBBANG
SANPOB RUCKTHONGSUK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตสดที่นำกลับมาใช้ใหม่
Factors influencing on physical properties of recycled fresh concrete

นักศึกษา	นายธนพนธ์	เลิศวิภาภัทร	รหัสนักศึกษา 58010499
	นายวิภู	กรอบบาง	รหัสนักศึกษา 58011159
	นายสันต์ภพ	รักทองสุข	รหัสนักศึกษา 58011290

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชดชนก อัฑฒพงศ์

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชดชนก	อัฑฒพงศ์	
รศ.ดร.อุมา	สีบุญเรือง	
ดร.ไตรรัตน์	เมืองทองอ่อน	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตสดที่นำกลับมาใช้ใหม่

นายธนพนธ์ เลิศวิภาภัทร รหัสนักศึกษา 58010499
นายวิภู กรอบบาง รหัสนักศึกษา 58011159
นายสันต์ภพ รักทองสุข รหัสนักศึกษา 58011290
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชดชนก อัฑฒพงศ์
ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันของเสียในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะคอนกรีตสดซึ่งเหลือทิ้งจากการสั่งคอนกรีตมาเกินปริมาณใช้งานของการก่อสร้าง จึงมีการศึกษาการนำคอนกรีตสดกลับมาใช้ใหม่ โดยวัตถุประสงค์ของโครงงานนี้คือ เพื่อศึกษาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ของปูนซีเมนต์ที่เหลือใช้จากการก่อสร้าง เพื่อศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ และเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่มี 4 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของซีเมนต์ ขนาดคละของทราย เวลาของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและสารผสมเพิ่มและเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ศึกษากับปูนซีเมนต์ปกติที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป ซึ่งจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ประกอบด้วย ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสท์ ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์ ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ต้าร์ กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปกติ โดยจากการทดลองพบว่าจากตัวอย่างที่นำมาศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยใส่สารผสมเพิ่มและมีอายุ 1 และ 3 ชั่วโมงจะให้กำลังรับแรงอัดและระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติมากที่สุดและที่ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมงแบบใช้ขนาดคละที่ต่างกันพบว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ขนาดคละ Fineness Modulus 2.75 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 และพบว่าปูนปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 แบบนำกลับมาใช้ใหม่ มีกำลังรับแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์มากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด และเมื่อเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 กับปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่พบว่ายิ่งเวลาผ่านไปมากเท่าไหร่ ความแตกต่างของกำลังแรงอัดจะยิ่งมากขึ้น ซึ่งปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่น้อยที่สุดคือ ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง จะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 19.06% แต่เมื่อใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D จะส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดมีความใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มากกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบไม่ใส่สารผสมเพิ่มที่เวลาเดียวกัน ผลที่ได้จากการศึกษาโครงงานนี้ สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษากระบวนการและเทคโนโลยีสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ของคอนกรีตสดได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Factors influencing on physical properties of recycled fresh concrete

Mr. Tanapon Lerswipapatr Student ID. 58010499
Mr. Viphu Grobbang Student ID. 58011159
Mr. Sanpob Ruckthongsuk Student ID. 58011290
Advisor: Asst. Prof. Dr. Chodchanok Attaphong
Academic Year 2018

ABSTRACT

Currently, waste from construction industry has continuously increased, especially fresh concrete waste generated from the over-ordered concrete. Therefore, recycling of fresh concrete waste has been studied. The objectives of this project were to study four factors (i.e., type of cement, sand size, hydration reaction time and admixture) influencing on physical properties of recycled fresh concrete, and to compare the properties of recycled cement with those of ordinary cement. Physical properties of various types of recycled cement, which are the consistency of cement paste, setting time of cement paste, consistency of cement mortar, and compressive strength of cement mortar, were investigated in concrete testing laboratory following to the ASTM standard and were compared to those of ordinary cement. The results showed that physical properties of 1 and 3-hr recycled Portland cement type1 with admixture were not significantly different from those of ordinary cement. Compressive strength of the samples with 2.75 fineness modulus was higher than that with sand passing through sieve number 50 but remaining on sieve number 100. Compressive strength of recycled Portland cement type1 was higher than that of recycled hybrid cement. The results of this project can provide useful information as a guideline for further method and technology of fresh concrete waste recycling.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ชดชนก อัฑฒพงศ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงงาน รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธานี้ตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ธนพนธ์ เลิศวิภาภัทร
วิภู กรอบบาง
สันต์ภพ รักทองสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VII

สารบัญรูป..... VIII

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 2

1.4 วิธีการวิจัย..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... 4

2.1 ปูนซีเมนต์..... 4

2.1.1 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์..... 5

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี..... 8

2.1.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น..... 12

2.1.4 ปฏิกิริยา Pozzolanic 13

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น..... 14

2.1.6 การก่อตัวและการแข็งตัว..... 15

2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 17

2.2.1 คอนกรีต..... 18

2.3 สารผสมเพิ่ม..... 21

2.3.1 สารกักกระจายฟองอากาศ (Organic surfactants) 22

2.3.2 สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical admixture) 24

2.3.3 สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral admixture) 34

2.3.4 สารผสมเพิ่มอื่นๆ..... 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 คอนกรีตสด 38
2.4.1 ความสามารถเทได้ (Workability) 38
2.4.2 การแยกตัว (Segregation) 38
2.4.3 การเยิ้มน้ำ (Bleeding) 38
2.4.4 ปริมาณฟองอากาศ (Air Entrainment) 38
2.4.5 การก่อตัว (Setting) 39
2.5 ของเสียในอุตสาหกรรมก่อสร้าง 39
2.5.1 ประเภทของคอนกรีตเหลือใช้ 40
2.5.2 การจัดการคอนกรีตเหลือใช้ 40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงงาน 42
3.1 การนำกลับมาใช้ใหม่ของปูนซีเมนต์ 42
3.2 กระบวนการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ 44
3.2.1 การอบซีเมนต์เพสต์ 44
3.2.2 การบดซีเมนต์เพสต์ 44
3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผงปูนซีเมนต์ 45
3.3.1 การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ 45
3.3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ 47
3.3.3 การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ 49
3.3.4 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ 50
3.3.5 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ขนาดคละ Fineness Modulus 2.75 53
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงงาน 55
4.1 ชนิดปูนซีเมนต์ 56
4.1.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ 56
4.1.2 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ 57
4.2 ขนาดคละ 58
4.2.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกัน 58
4.2.2 กำลังอัดของมอร์ต้าแบบขนาดคละที่แตกต่างกัน 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 เวลาที่เกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น 61

4.3.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ 61

4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ 62

4.3.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ 63

4.3.4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ 64

4.4 Admixture 67

4.4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ 67

4.4.2 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ไม่ใส่สารผสมเพิ่มและใส่สารผสมเพิ่ม 69

4.4.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ 70

4.5 ค่าใช้จ่าย 72

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ 73

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 73

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ 73

5.3 ข้อเสนอแนะ 74

เอกสารอ้างอิง 75

ภาคผนวก 76

ประวัติผู้เขียน 107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนออกไซด์หลักที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 8

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนออกไซด์รองที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 9

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 9

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 10

ตารางที่ 2.5 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ... 14

ตารางที่ 2.6 สารเจือปนในน้ำและผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต..... 20

ตารางที่ 2.7 สรุปคุณสมบัติของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่างๆ ตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน..... 33

ตารางที่ 2.8 ผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต..... 37

ตารางที่ 4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง..... 57

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง..... 58

ตารางที่ 4.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกันที่ได้จากการทดลอง..... 59

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละขนาดคละที่ได้จากการทดลอง... 61

ตารางที่ 4.5 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง. 62

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง..... 63

ตารางที่ 4.7 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง..... 64

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง..... 65

ตารางที่ 4.9 ค่าความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติ..... 66

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติ..... 67

ตารางที่ 4.11 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง 70
ตารางที่ 4.13 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง..... 71
ตารางที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำมอร์ต้า 3 ก้อนจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ชนิดที่ 1 และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่..... 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียกและแห้ง 5

รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก 11

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการก่อตัวละแข็งตัวของคอนกรีต 16

รูปที่ 2.4 ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 18

รูปที่ 2.5 ผลของการกกักระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน 23

รูปที่ 2.6 ประโยชน์การใช้สารลดปริมาณน้ำ 25

รูปที่ 2.7 คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป 26

รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ 27

รูปที่ 2.9 a) อนุภาคของซีเมนต์จะจับอยู่เป็นกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ 28
b) การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ

รูปที่ 2.10 การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม 36

รูปที่ 2.11 ช่วงการก่อตัวของซีเมนต์ 39

รูปที่ 2.12 กระบวนการต่างๆในการนำขยะคอนกรีตกลับมาใช้ประโยชน์ 41

รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือไวแคท 46

รูปที่ 3.2 โต๊ะการไหล 49

รูปที่ 3.3 แบบหล่อก้อนทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 มม. 51

รูปที่ 4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิด 56

รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด 57

รูปที่ 4.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกัน 59

รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละขนาดคละ 60

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มและกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ 65

รูปที่ 4.6 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มที่ได้จากการทดลอง 68

รูปที่ 4.7 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง 69

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มและกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา มีการเพิ่มขึ้นของอาคารบ้านพักอาศัย และโครงสร้างพื้นฐานเช่น ถนน กำแพงกันดิน อาคารสูงและบ้านพักอาศัย ส่งผลให้มีอุตสาหกรรมการก่อสร้างเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญในการก่อสร้างและทุกการก่อสร้างจะเหลือคอนกรีตสดที่ติดค้างในโม่หรือคอนกรีตสดที่หมดอายุเนื่องจากการจัดการเวลาเทคอนกรีตไม่ดีพอ ทำให้คอนกรีตหมดอายุก่อนการเทคอนกรีต ดังนั้นจึงมีการศึกษาการนำคอนกรีตที่หมดอายุหรือคอนกรีตที่ตกค้างอยู่ในรถโม่คอนกรีตซึ่งถือเป็นของเสียจากการก่อสร้างและยากต่อการกำจัด การนำกลับมาใช้ใหม่เป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียและเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด

ซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ (cement) เป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตมีส่วนผสมหลักคือ หินปูน ซึ่งเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดซึ่งได้จากการเจาะและระเบิดภูเขา เป็นการทำลายระบบนิเวศ และสามารถหมดไปได้ ถ้าเราใช้ปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเปลืองโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่ตามมาหินปูนจะหมดไปจากประเทศไทย ดังนั้นการนำคอนกรีตสดที่หมดอายุนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยชะลอการใช้หินปูนจากธรรมชาติ และสามารถทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปได้

ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อของคุณสมบัติของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ โดยแบ่งออกเป็น 4 ปัจจัย ได้แก่ชนิดของซีเมนต์ ขนาดคละของทราย เวลาของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก่อนจะนำกลับมาใช้ใหม่ และสารผสมเพิ่มชนิด A และ D ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มที่ทำหน้าที่หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและลดการใช้น้ำ โดยจะศึกษาว่าทั้ง 4 ปัจจัยส่งผลต่อซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อย่างไร

ทั้งนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้าและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของของเสียจากอุตสาหกรรมการก่อสร้างโดยเจาะจงไปที่ของเสียที่เกิดจากการใช้คอนกรีต ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการที่จะทำลายคอนกรีตสดที่เหลือจากการใช้ ส่งผลเสียต่อร่างกายมนุษย์เป็นอย่างมากและส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ถ้าหากสามารถนำคอนกรีตที่เหลือจากการใช้งานนั้นนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะเป็นประโยชน์ในหลายๆด้าน ทั้งลดขยะจากการก่อสร้างและลดมลพิษที่เกิดจากการทำลายคอนกรีต (ปริญญา. 2548) จากการศึกษาและทดลองหาคุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่พบว่าคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้น มีคุณสมบัติในด้านของความถ่วงจำเพาะ ความข้นเหลวที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นและกำลังรับแรงอัดซึ่งใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของปูนได้ชัดเจนเมื่อนำไปใช้งานจริง โดยเมื่อแยกพิจารณาปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ออกเป็น 2 ชนิดซึ่งก็คือปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่กับปูนซีเมนต์ที่นำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับมาใช้ใหม่โดยมีการผสมกับสารผสมเพิ่มชนิด A และ D พบว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีการผสมกับสารผสมเพิ่มชนิด A และ D นั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์แบบปกติมากกว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่แต่ไม่ได้ใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D โดยสามารถแยกคุณสมบัติที่เห็นได้ชัดเจน (Salesa. 2017) ได้ศึกษาการนำคอนกรีตสดที่เหลือจากการใช้นำกลับมาใช้ใหม่โดยการปล่อยให้คอนกรีตสดแห้งและแยกหิน แยกทราย แล้วจึงนำแต่ผงซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ การนำผงปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ไปผสมกับปูนซีเมนต์ใหม่ที่ยังไม่เคยใช้งานในอัตราส่วนต่างๆพบว่าผงซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่นั้นเมื่อนำไปผสมน้ำและทำการทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดแล้วได้ค่าที่พึ่งพอใจเพราะมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งเทียบกับมาตรฐาน ASTM (Letelier. 2017)

ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D ว่าจะส่งผลต่อการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ว่าจะมีคุณสมบัติที่เพียงพอจะใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้หรือไม่ และศึกษาเกี่ยวกับชนิดปูนที่มาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเนื่องจากปูนซีเมนต์แต่ละชนิดมีลักษณะของการใช้งานที่ต่างกันจึงอาจส่งผลต่อปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ ได้มีการศึกษางานวิจัยว่าถ้าหากมีขนาดคละที่เหมาะสมหรือขนาดคละที่แตกต่างกันอย่างพอเหมาะจะทำให้สามารถควบคุมคุณภาพคอนกรีตได้ตามต้องการ

จากวรรณกรรมข้างต้นพบว่า มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาและให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของคอนกรีตที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นของเสียที่เหลือจากการก่อสร้างและพยายามหาวิธีการกำจัด การลดปริมาณการใช้งานและการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยพบว่ามีนักวิจัยที่ศึกษาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ไม่มากนัก ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงเห็นความสำคัญของการนำของเสียจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง กลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ของปูนซีเมนต์ที่เหลือใช้จากการก่อสร้าง

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่มี 4 ปัจจัยได้แก่ ชนิดของซีเมนต์ ขนาดคละของทราย เวลาของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและสารผสมเพิ่ม

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของปูนซีเมนนำกลับมาใช้ใหม่กับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับมาใช้ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่1 โดยการหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับมาใช้ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่1โดยใส่สารผสมเพิ่มคุณสมบัติเทียบเท่า ASTM C494-81 Type A และ D โดยการหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหลังจากผสมที่ 1, 3และที่ 5 ชั่วโมง

1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาวิทยานิพนธ์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มที่จะนำมาใช้

1.4.3 ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้า เพื่อหาตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ตามมาตรฐาน ASTM

1.4.4 ศึกษาวิธีการทดสอบคุณภาพคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ต้าในห้องปฏิบัติการ

(1)การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิล มีดังต่อไปนี้

(2) การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

(3) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์

(4) การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

(5) การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อหาความเป็นไปได้ของการนำไปใช้จริงในงานก่อสร้าง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ลดต้นทุนในการซื้อวัสดุใหม่

1.5.2 ลดปริมาณคอนกรีตที่เหลือใช้ซึ่งจัดเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

1.5.3 ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียจากอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

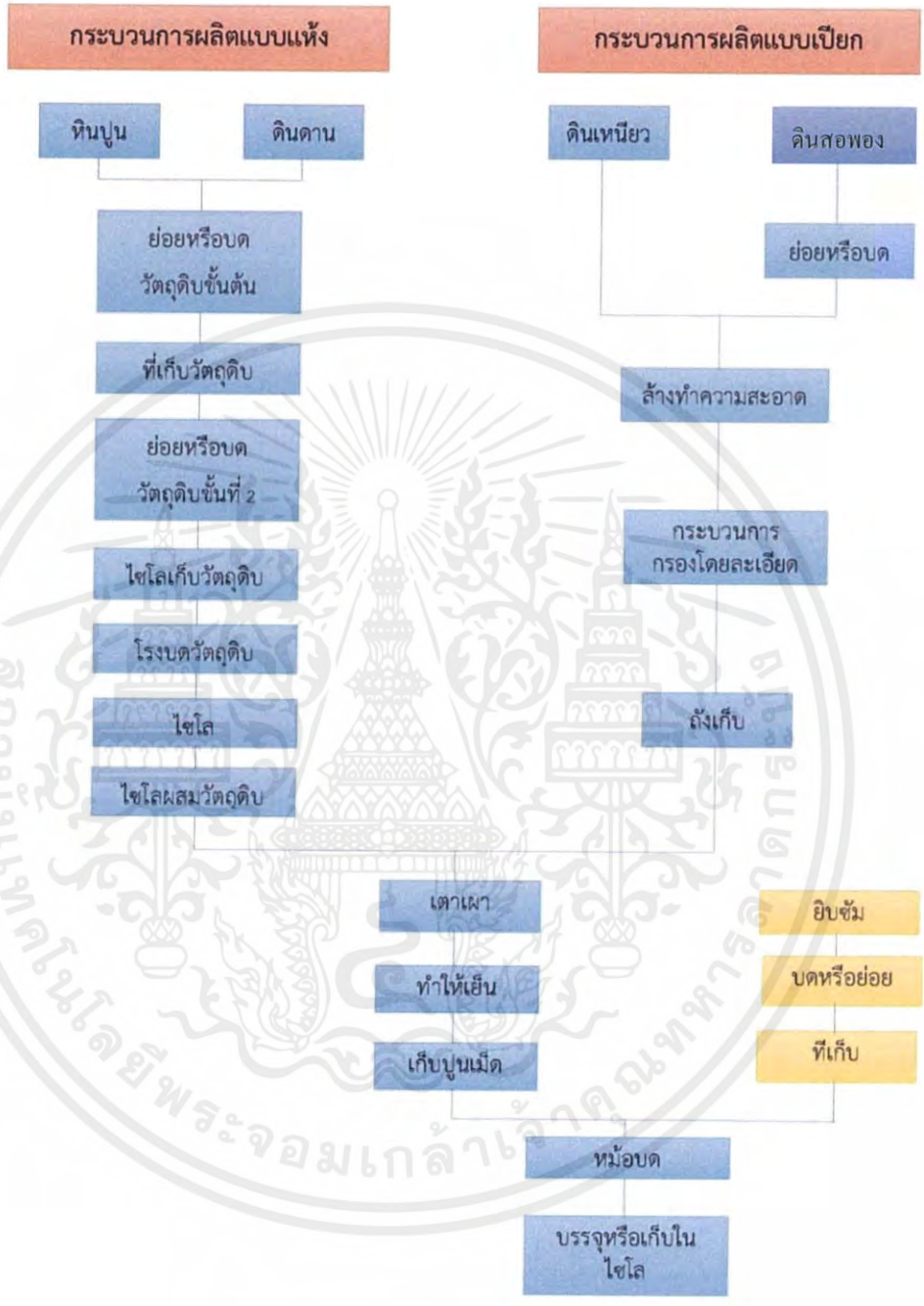
2.1. ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หินปูน หรือ ดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือ หินดาน) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดีมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิค (Hydraulic cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและปริมาณความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว ปูนซีเมนต์ที่เรียกกันในทางวิชาการว่า “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)” ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปคิน โดยในปี ค.ศ. 1824 นายโจเซฟได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ของวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่ง ซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว เมื่อนำมาบดจะได้ผงปูนซีเมนต์ หลังจากผสมรวมกับน้ำแล้ว เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลือง - เทา คล้ายกับหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ประเทศอังกฤษ นายโจเซฟจึงตั้งชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ในขณะนั้นมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมใช้ความร้อนต่ำส่งผลทำให้หินปูนกับดินเหนียวรวมตัวกันไม่ดี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงาน ก่ออิฐ หิน หรืองานปูนฉาบ เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับ หิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีตได้แก่ ฐานรากตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้น และ ถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพาน อาคาร และอุโมงค์ (วินิต. 2529)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland Cement)



รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียกและแห้ง (จักราวุธ. 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์จำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

1) ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ $CaCo_3$ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอร์ค (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)

2) ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการอยู่ในปริมาณที่น้อย หรือมีปริมาณของธาตุอื่นมากเกินความจำเป็น จึงจำเป็นต้องปรับส่วนผสมให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามความต้องการ เช่น

ก) เพิ่มปริมาณแร่เหล็ก (Iron ore) มีอยู่มากในศิลาแลง (Laterite) เมื่อหินเชลหรือดินเหนียวที่ใช้มีปริมาณของเหล็กต่ำ

ข) เลือกใช้วัตถุดิบที่มีธาตุเหล็กน้อยลง เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ขาว

ค) เติมยิปซั่ม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัว โดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผาเป็นต้น

2.1.1.2 กรรมวิธีการผลิต

กรรมวิธีในการผลิตสามารถแบ่งเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry process) และการผลิตแบบเปียก (Wet process) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1 กล่าวคือ วัตถุดิบก่อนการเผาอาจให้ผ่านกระบวนการแห้งหรือเปียก ในกระบวนการแห้งวัตถุดิบหลักได้แก่ หินปูน ดินดาน แร่เหล็ก ได้รับการทำให้แห้งก่อนการบดและการผสม ส่วนในกระบวนการเปียกวัตถุหลักได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว ได้รับการบด และการผสมเปียก การเลือกกระบวนการผลิตต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่ใช้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งไฟฟ้า วิธีการเก็บผงปูนซีเมนต์ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติ หรือมีความชื้นอยู่น้อยก็ควรทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผา แล้วจึงนำไปบดและผสมกันในภาวะแห้งได้ โดยมีราคาการผลิตต่ำ ซึ่งในกระบวนการผลิตแบบแห้งจะมีค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ตามหากส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียก ค่าใช้จ่ายในการทำให้วัตถุดิบแห้งในกระบวนการผลิตแบบแห้งจะเพิ่มขึ้นและอาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตแบบเปียก ในด้านการควบคุมส่วนประกอบของวัตถุดิบทางเคมีกระบวนการทั้งสองจะไม่แตกต่างกันนัก กระบวนการผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่าแต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ ในกระบวนการผลิตแบบแห้งจะสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้วส่วนผสมนี้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) เตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุดทำงานตลอด 24 ชั่วโมง เตาเผาส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50 - 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 - 4 เมตร ภายในบุด้วยอิฐทนไฟเพื่อเก็บความร้อนไว้ภายใน หมุนรอบตัวในแนวเอียงประมาณนาทีละ 1.3 รอบ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1400 - 1600 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่ผสมรวมกันและถูกเผาที่อุณหภูมิสูง จะทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆเรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา โดยปริมาณออกไซด์หลักของธาตุต่างๆที่มีในปูนเม็ด จะมีปริมาณรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณทั้งหมด สีและรูปร่างของปูนเม็ดจะแสดงถึงการเผาเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ถ้าเผาได้ที่ดีปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุดๆก้อนใหญ่ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ปูนเม็ดที่ยังเผาไม่ได้ที่จะมีสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆไม่เป็นมันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว ปูนเม็ดที่เผาจนเกินพอจะมีสีน้ำตาลเข้มเป็นหย่อมๆ การเผาจนเกินพอจะไม่ส่งผลเสียหายแต่อย่างใด เพียงแต่จะสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ด ทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอจะมีความแข็งมาก ปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผาจะร้อนมากต้องได้รับการลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนนำไปบด การลดอุณหภูมิทำได้โดยพ่นลมหรือน้ำเข้าไปในยุ้งลดความเย็น (Clinker cooler) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหมุน (Rotary cooler) หรือแบบตะแกรง การจะทำให้ปูนเม็ดเย็นลงต้องมีการควบคุมอย่างดีเพราะจะส่งผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นตัวเร็วจะบดง่ายและความแข็งแรงภายใน 7 วันดีขึ้น แต่ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ ความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น ปูนเม็ดที่เย็นตัวแล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Grinding mill) หากปูนเม็ดมีปริมาณของยิปซั่มผสมอยู่น้อย ก็ต้องใส่ยิปซั่มเพิ่มเข้าไปด้วย โดยให้มีปริมาณของยิปซั่มผสมรวมอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้เกือบหมด การผสมยิปซั่มลงไปด้วยเพื่อทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวช้าลงเมื่อผสมกับน้ำ เพราะถ้าไม่มียิปซั่มปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำจะก่อตัวอย่างเร็วเกินไปจนไม่มีเวลานานพอที่จะนำไปเทลงแบบได้ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่าจะทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวแล้วให้กำลังรับแรงได้เร็วกว่าส่วนปูนซีเมนต์ที่หยาบอาจทำให้เกิดการการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด ผงปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้นี้จะถูกปั้มโดยลมนำไปเก็บไว้ในยุ่งเก็บปูนซีเมนต์ (Bulk storage) ซึ่งเป็นถังทรงกระบอกใหญ่ตั้งมีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้นเพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป ในประเทศไทยจะบรรจุถุงมีเนื้อปูนจริง 50 กิโลกรัม (วินิต. 2529)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบต่างๆถูกเผาในหม้อเผาปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพองเหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง,ซิลิก้า ,อลูมิน่าและเหล็กออกไซด์จากดินดำหรือดินเหนียวและดินดาน

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆและตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO_2, Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na_2O, TiO_2 , P_2O_5 และยิปซั่ม

โดยสัดส่วนออกไซด์ของธาตุหลักในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2.1 และสัดส่วนออกไซด์รองที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนออกไซด์หลักที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต. 2529)

ออกไซด์ของธาตุต่างๆ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปูนขาว (CaO)	60 – 65
ซิลิก้า (SiO_2)	20 - 24
อลูมิน่า (Al_2O_3)	4 - 8
เหล็ก (Fe_2O_3)	2 – 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนออกไซด์รองที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต. 2529)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
MgO	0.1-5.5
Na_2O+K_2O	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2
SO_3	1-3

ออกไซค์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต. 2529)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate)	$3CaO\ SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate)	$2CaO\ SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate)	$3CaO\ AL_2O_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite)	$4CaO\ Al_2O_3\ Fe_2O_3$	C_4AF

2.1.2.1 สารประกอบหลัก

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 - 3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35 - 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลมโดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบมี เพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะมีการพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15 - 35

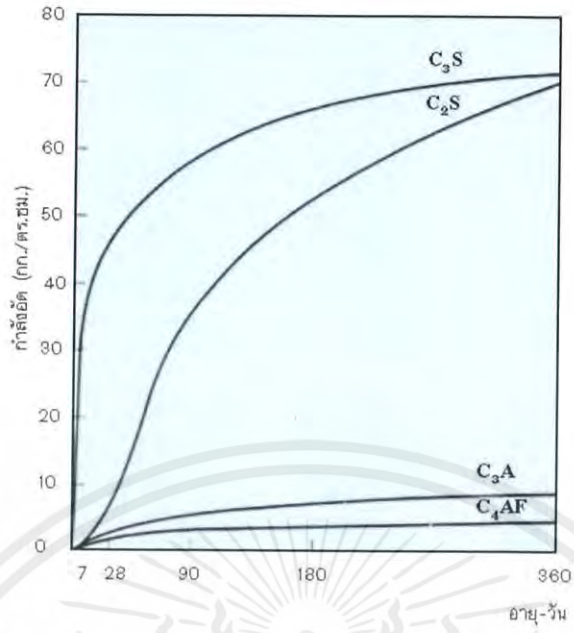
3) ไตรคุณซียมอลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมสีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1 - 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7 - 15

4) เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณร้อยละ 5 - 10 คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด (เรืองรุชดิ์. 2558) สรุปได้ดังตารางที่ 2.4 และลักษณะการพัฒนากำลังของสารประกอบหลักแสดงดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เรืองรุชดิ์. 2558)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1.อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก(นาที)
2.การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (ชม.)	ช้า(อาทิตย์)	เร็วมาก(วันเดียว)	เร็วมาก(วันเดียว)
3.กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4.ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5.คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก (เรืองรุชดิ์. 2558)

2.1.2.2 สารประกอบรอง

1) ยิปซั่ม ($CaSO_4\ 2H_2O$) ยิปซั่มถูกใส่เข้าไปในระหว่างการบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุด และเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ อัลคาไลน์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O ,ปริมาณ C_3A และ ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2) Free Lime (CaO) เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้ทั้งหมด

กรณีที่ 2 ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่จะทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่างๆไม่สมบูรณ์ Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้วซึ่งอาจก่อให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่าซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัว ให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเหมือนกับ CaO คือปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์

- ขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมากๆจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

4) อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O , K_2O) อัลคาไลน์ออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลน์ต่ำ (เรืองรุชดิ์. 2558)

2.1.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะก่อให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์โดยปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นจะสามารถเกิดขึ้นมีอยู่ 2 ลักษณะคือ (วินิต. 2539; ธันวา. 2541;เทิดศักดิ์และคณะ. 2542 และ Capp and Speneer. 1970)

1) เกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยสารละลายซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออน (Ions) ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่บริเวณผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid state reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดโดยเริ่มจากการอาศัยสารละลายก่อน แล้วตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาสารประกอบมีหลายชนิดซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดจะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆที่อาจเกิดขึ้นทำให้เราสามารถแยกการเกิดปฏิกริยาของสารประกอบแต่ละชนิดได้ดังสมการต่อไปนี้

(ก) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate (CSH)) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

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

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

(ข) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าปฏิกิริยาเกิดเร็วมากเกินไปจะส่งผลเสียเราจึงต้องหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

$$3CaO.Al_2O_3 + CaSO_4 + 2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.6H_2O$$

การเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำเมื่อมียิปซั่ม จะเกิดขึ้นรวดเร็วมากและก่อให้เกิด Ettringite เมื่ออิออนของซัลเฟตเพียงพอจะทำให้ Ettringite สามารถช่วยหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้น้อยลง

(ค) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงแรกโดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + CaSO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO(Al_2O_3\ ,\ Fe_2O_3).3CaSO_4$$

หรือ C_4AF + Gypsum + $Ca(OH)_2$ ⟶ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้ากว่า และ มีความร้อนน้อยกว่า ซึ่งสารประกอบเหล็กออกไซด์จะทำปฏิกิริยาคล้ายกับอลูมิเนียมออกไซด์สามารถแทนที่กันได้

2.1.4 ปฏิกิริยา Pozzolanic

ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่สุดใน Pozzolanic reactions ก็คือปฏิกิริยาระหว่างซิลิก้าไฮดรอกไซด์ กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลผลิตที่ได้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และปฏิกิริยาระหว่างอลูมินาไตรออกไซด์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ดังสมการต่อไปนี้

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

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

ซึ่งขบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ซิลิก้าไฮดรอกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักใน Fly Ash จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ เรียกว่าเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ขึ้นได้ผลผลิตเป็น 2 อย่าง คือ สารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) หรือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) หรือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_2$) และ น้ำ (H_2O) หลังจากนั้นผลผลิตจากปฏิกิริยา Pozzolanic ทั้ง 2 จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกันไปในทันที ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานขึ้น เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮ-เดรชั่น จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่ออัตรการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ได้แก่

1) อายุของซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 2.5 จะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดในอัตราที่รวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยเฉลี่ยและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะลดและเพิ่มอัตราการเกิดตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ (วินิต. 2529)

สารประกอบ	ประเภทหนึ่ง	ประเภทสอง	ประเภทสาม	ประเภทสี่	ประเภทห้า
ไทรแคลเซียมซิลิเกต : C_3S	49	46	56	30	43
ไตแคลเซียมซิลิเกต : C_2S	25	29	15	46	36
ไทรแคลเซียมอลูมิเนต : C_3A	12	6	12	5	4
เทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ : C_4AF	8	12	8	13	12

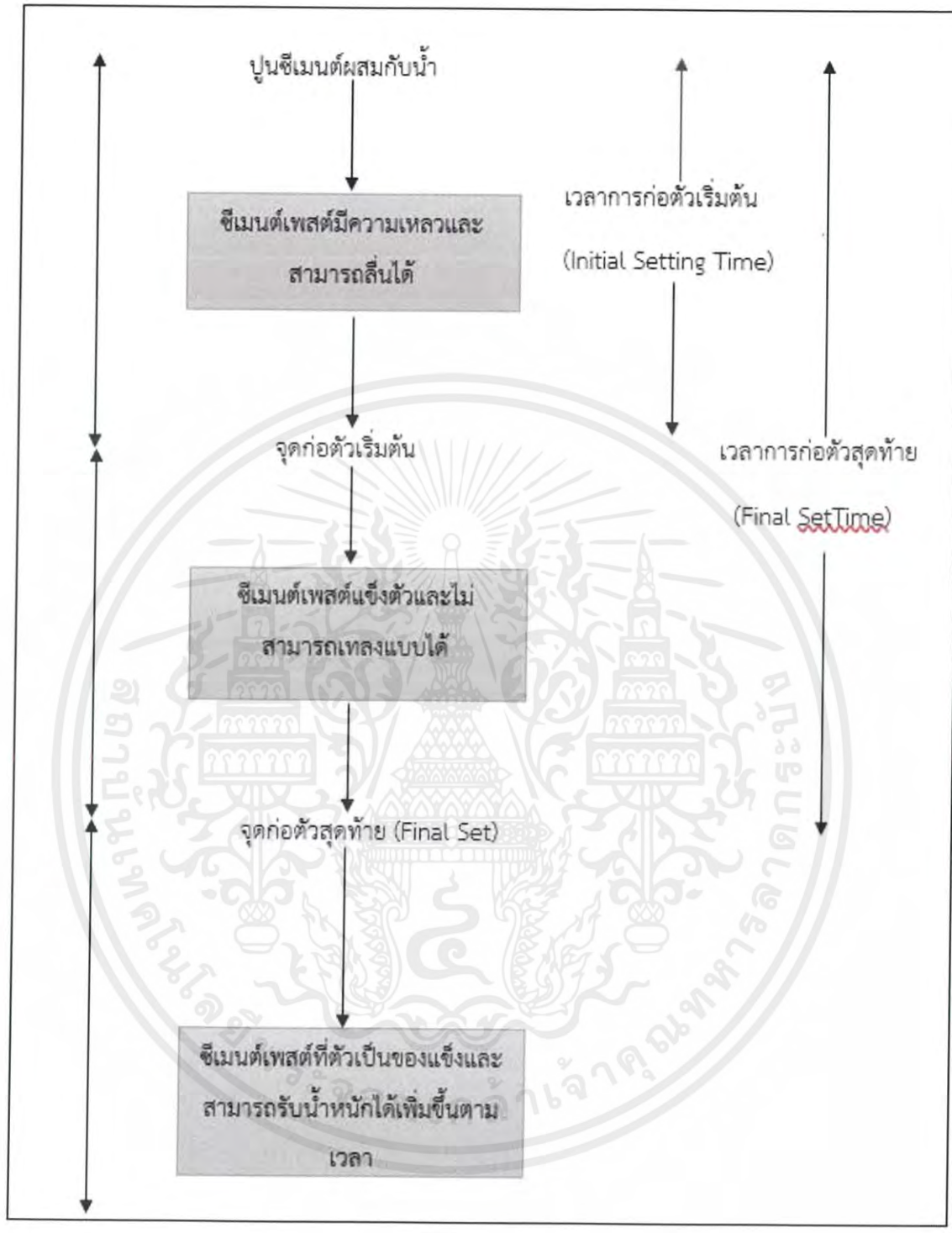
หมายเหตุ หน่วยเป็นร้อยละ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่ม แข็งตัวถึงแม้ว่ามันยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า “จุดก่อตัวเริ่มต้น” (Initial set) ระยะเวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้นเรียกว่า “เวลาการก่อตัวเริ่มต้น” (Initial setting time) การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ “จุดก่อตัวสุดท้าย” (Final set) และเวลาที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า ”เวลาการก่อตัวสุดท้าย” (Final setting time) ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไปและสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เราเรียกว่า “การแข็งตัว” (Hardening) ขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการก่อตัวละแข็งตัวของคอนกรีต (วินิต. 2529)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM C 150) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ม.อ.ก.15) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปที่ไม่มีอยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนตอนกรีต กำแพงกันดินหนาๆ หล่อท่อนคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High-early strength Portland cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงสูงในระยะแรกเร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตโดยการเปลี่ยนสัดส่วนผสม (เพิ่ม C_3S และลด C_2S) หรือโดยการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ ต้องการจะใช้งานเร็วหรือรื้อแบบเร็ว เช่น เสาเข็ม คอนกรีตถนน พื้นและคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังเหมาะกับการทำคอนกรีตในอากาศหนาว คอนกรีตที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ประเภทนี้เพียง 3 วัน จะมีกำลังเท่ากับคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ธรรมดาที่หล่อได้ 28 วัน

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-heat Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ให้ความร้อนต่ำสุด อัตราการเกิดกำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้าๆ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหลา เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะก่อตัวและแข็งตัว

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulphate – resistance Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ (มี C_3A ต่ำสุด) สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง (วินิต. 2529)

จากตารางที่ 2.5 เมื่อนำปริมาณสารประกอบมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นความแตกต่างของปริมาณสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภท ดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและสาม มีปริมาณของอลูมิเนตและเฟอร์ไรท์เท่ากัน แต่ปูนซีเมนต์ประเภทสามใช้ปริมาณ C_3S มากกว่า แต่ใช้ปริมาณ C_2S น้อยกว่าประเภทหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสองและห้า มีปริมาณ C_3A น้อย ทำให้มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้สูง ส่วนปริมาณ C_3S จะถูกลดลง โดยเพิ่มปริมาณ C_2S มากขึ้นทำให้การก่อตัวและแข็งตัวดำเนินไปอย่างช้าๆ (ช้ากว่าประเภทหนึ่ง)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสี่ ซึ่งเป็นประเภทเกิดความร้อนต่ำ มีปริมาณของ C_3S กับ C_3A น้อยกว่าประเภทอื่น การเกิดแรงอัดในระยะแรกจึงช้ากว่าปูนประเภทหนึ่ง

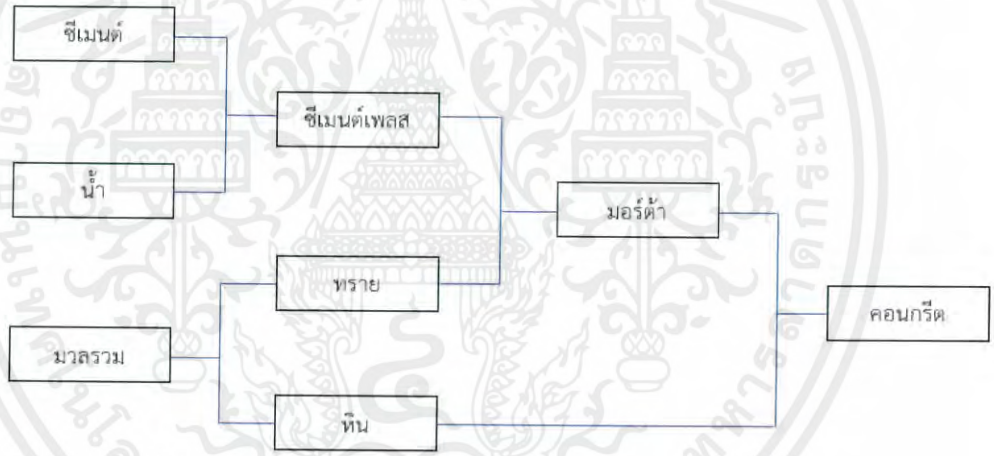
ซึ่งเมื่อนำปูนซีเมนต์มาผสมกับวัสดุต่าง ๆจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

1) ซีเมนต์เพสตต์ (cement paste) เกิดจากปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีตทำหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหรือหล่อ ให้กำลังแก่คอนกรีตและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

2) มอร์ตาร์ (mortar) เกิดจากซีเมนต์เพสต์ต์ผสมกับทราย ใช้ในงานก่อหรือฉาบ

3) คอนกรีต (concrete) เกิดจากมอร์ตาร์ผสมกับหินหรือกรวด ใช้ในงานโครงสร้าง

โดยมีส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะแสดงส่วนผสมของปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.4 ส่วนผสมของปูนซีเมนต์

2.2.1 คอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วยส่วนผสมของวัสดุต่าง ๆ คือ ปูนซีเมนต์ มวลรวม น้ำ และสารเคมีผสมเพิ่มต่าง ๆ เมื่อผสมกันแล้วจะมีสภาพเหลวอยู่ช่วงหนึ่ง สามารถเทลงแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อสร้างได้ และจะแข็งตัวในเวลาถัดมา สามารถรับน้ำหนักหรือแรงกดได้มากตามการออกแบบของส่วนผสม ส่วนประกอบของคอนกรีตประกอบด้วย

ก) ปูนซีเมนต์ (cement)

ซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนียวเกาะ มีลักษณะเป็นตัวเชื่อมประสาน ให้วัสดุและส่วนต่างๆให้เป็นเนื้อเดียวกันหรือโครงสร้างเดียวกัน ซึ่งปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะมีหน้าที่และการใช้งานในโครงสร้างหรืองานต่าง ๆ ตามการเลือกใช้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.2

ข) มวลรวม (aggregate)

มวลรวมเป็นวัสดุที่ใช้ลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ช่วยเสริมกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีต การป้องกันการยืดหดตัว และเพื่อทดทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ในการใช้งาน ซึ่งมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตมีหลายขนาด ตั้ง 1/10 มิลลิเมตร ไปจนถึงหลักเซนติเมตร โดยสามารถแบ่งออกตามขนาดได้ดังนี้ (วินิต. 2539)

- มวลรวมละเอียด (fine aggregates) เป็นมวลรวมขนาดเล็ก ที่มีขนาดตั้งแต่ 75 มิลลิเมตร ถึง 4.75 มิลลิเมตร เช่น ทราย ดินเหนียว

- มวลรวมหยาบ (coarse aggregates) เป็นมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไป เช่น หิน กรวด

คุณสมบัติของมวลรวม

- ความแข็งแกร่ง (strength) วัสดุผสมต้องมีความสามารถรับกำลังได้ไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีต

- ความทนทานต่อการกัดกร่อน (abrasion resistance) วัสดุต้องมีความคงทนต่อแรงกระแทกและการเสียดสี

- ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับความพรุนและคุณสมบัติการดูดซึมของวัสดุ วัสดุต้องมีความพรุนเพื่อดูดซึมน้ำ ให้สามารถหดหรือขยายตัวในสภาพต่างๆ

- ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี (chemical stability) วัสดุต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์

- ลักษณะรูปร่างและผิว (particle shape and surface texture) วัสดุต้องมีผิวหยาบ มีเหลี่ยม คม เพื่อช่วยในการยึดเหนี่ยว และยังมีผลต่อความสามารถในการเท

- ความสะอาด (cleanliness) วัสดุต้องสะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปน

- ส่วนขนาดคละ (gradation) วัสดุต้องมีหลายขนาดคละกัน เพื่อช่วยในการจัดเรียงและลดช่องว่าง

ค) น้ำ (Water)

น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตคอนกรีต โดยทำหน้าที่เป็น น้ำผสมคอนกรีต น้ำล้างมวลรวม และน้ำบ่มคอนกรีต ซึ่งคุณภาพและปริมาณของน้ำยังมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น การก่อตัว กำลัง ความคงทนของคอนกรีต ดังนั้นน้ำจะต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm ปราศจากกรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม หน้าที่ของน้ำสำหรับงานคอนกรีตมีดังนี้

น้ำผสมคอนกรีต

- ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมีผลต่อกำลัง ความคงทนของคอนกรีต และความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสด
- ใช้เคลือบผิวของมวลรวมให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์สามารถยึดเกาะและแข็งตัว
- ใช้หล่อลื่นวัสดุต่างๆ ให้มีความเหลว สามารถเทหรือลงแบบได้

น้ำล้างมวลรวม

- ใช้ล้างมวลรวมให้มีความสะอาดพอที่จะนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้

น้ำบ่มคอนกรีต

- ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้น และ ป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากการสูญเสียน้ำของคอนกรีต

สารเจือปนในน้ำ เช่น ฝุ่น น้ำมัน กรด ด่างและสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งถ้าในน้ำมีสารเจือปนเหล่านี้ในปริมาณที่มากเกินไป อาจมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ในคอนกรีตได้ โดยสารเจือปนในน้ำแต่ละชนิดซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตแสดงใน ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สารเจือปนในน้ำและผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต (ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2548)

สารเจือปน	รายละเอียด
เกลือคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต	ปริมาณการเจือปน จะทำให้คอนกรีตก่อตัวเร็วขึ้นหรือช้าลง ถ้ามีมากกว่า 0.01% จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดต่ำลง
เกลือแร่เหล็ก	ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง
เกลือของแมงกานีส	ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวช้าลง และกำลังของคอนกรีตก็จะลดลง
เกลือโซเดียมคลอไรด์ และซัลเฟต	ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง
น้ำทะเล	- ทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น - ทำให้กำลังในช่วงแรกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ในระยะยาวกำลังจะลดลง เนื่องจากเกลือซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของ Ettringite ช้าลง - ไอออนของคลอไรด์มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม - ไม่ควรใช้น้ำทะเลในการก่อสร้างเนื่องจากจะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดและด่าง	มีผลต่อกำลังและการก่อตัวของคอนกรีต
น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำโสโครก	อาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง
น้ำตาล	ถ้ามีปริมาณน้ำตาลตั้งแต่ 300-1500 มิลลิกรัม จะทำให้การก่อตัวช้าลง แต่ถ้ามีปริมาณมากกว่า 2000 มิลลิกรัม/ลิตร จะทำให้คอนกรีตก่อตัวเร็วขึ้น
ฝุ่นหรือผง	ไม่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต แต่อาจจะมีผลต่อคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีต
น้ำมัน	ทำให้คุณภาพและกำลังของคอนกรีตลดลง
ตะไคร่น้ำ	- ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง - การยึดเหนี่ยวของคอนกรีตลดลง - เกิดช่องว่างและรูพรุนในคอนกรีต

2.3 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอมกรีต (Concrete admixture) หมายถึงสารนอกเหนือไปจาก น้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย ใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอกรีตขณะยังเหลวอยู่ หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณภาพตามที่ต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ สิ่งแวดล้อม และสภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตก็คือ ปรับปรุงความสามารถเทได้ เร่และหน่วงเวลาการก่อตัว ควบคุมหรือดัดแปลงการพัฒนากำลังอัด ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน การทนต่อกรดและซัลเฟต เป็นต้น หรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง แต่ว่าสารผสมเพิ่มไม่ได้มีการแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดีหรือการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง

ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้สารผสมเพิ่มไปทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ คือใช้ปูนซีเมนต์ทั่วๆไป ผสมกับสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการ สารผสมเพิ่มที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของเหลวแต่บางชนิดเป็นผงซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุพื้นฐาน วัสดุเหล่านี้จะต้องไม่ทำลายคุณภาพของคอนกรีต รวมทั้งต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ แร่ธาตุในมวลรวม และต่อเหล็กเสริม ดังนั้นก่อนที่จะมีการใช้น้ำยาผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีต ควรมีการศึกษาข้อจำกัดการใช้สาร การตรวจสอบคุณภาพและทดสอบประสิทธิภาพ รวมทั้งควรใช้ตามข้อแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด มิฉะนั้นอาจจะก่อให้เกิดผลเสียหายได้ (The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

ประเภทของสารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มที่ผลิตออกจำหน่ายทั่วๆไปมีหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆได้ 4 กลุ่ม คือ

2.3.1 สารกักกระจายฟองอากาศเป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิว (Organic surfactants) โดยก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณที่สามารถควบคุมได้ในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่สม่ำเสมอและคงตัว โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 - 1 มิลลิเมตร

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้ (Entrain air) แตกต่างจากโพรงอากาษ (Entrapped air) ซึ่งมีขนาดใหญ่และจะเกิดในบางบริเวณอันเนื่องจากการจี้เขย่าคอนกรีตไม่ดีพอ สารกักกระจายฟองอากาศนี้ช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการแข็งตัวของน้ำ (Frost) หรือเกลือที่ทำให้น้ำแข็งละลาย (De-icing salts) นอกจากนี้ยังช่วยเสริมความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดด้วย (The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

ก) วัตถุดิบ สารกักกระจายฟองอากาศผลิตขึ้นจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมทำการดาษ น้ำมัน และอาหารสำเร็จรูปจากสัตว์ วัตถุดิบที่สำคัญได้แก่ ยางไม้ ไขมัน หรือน้ำมันสัตว์และพืช หรือจากกรดซึ่งได้มาจากยางไม้หรือจากไขมันของสัตว์และพืช เป็นต้น

ข) ลักษณะการทำงาน สารกักกระจายฟองอากาศประกอบด้วยตัวเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบนผิวของอนุภาคซึ่งมักรวมกันอยู่ระหว่างผิดน้ำและอากาศ ส่งผลให้แรงตึงผิวของน้ำลดลง ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต โดยฟองอากาศนี้จะถูกทำให้อยู่ตัวด้วย

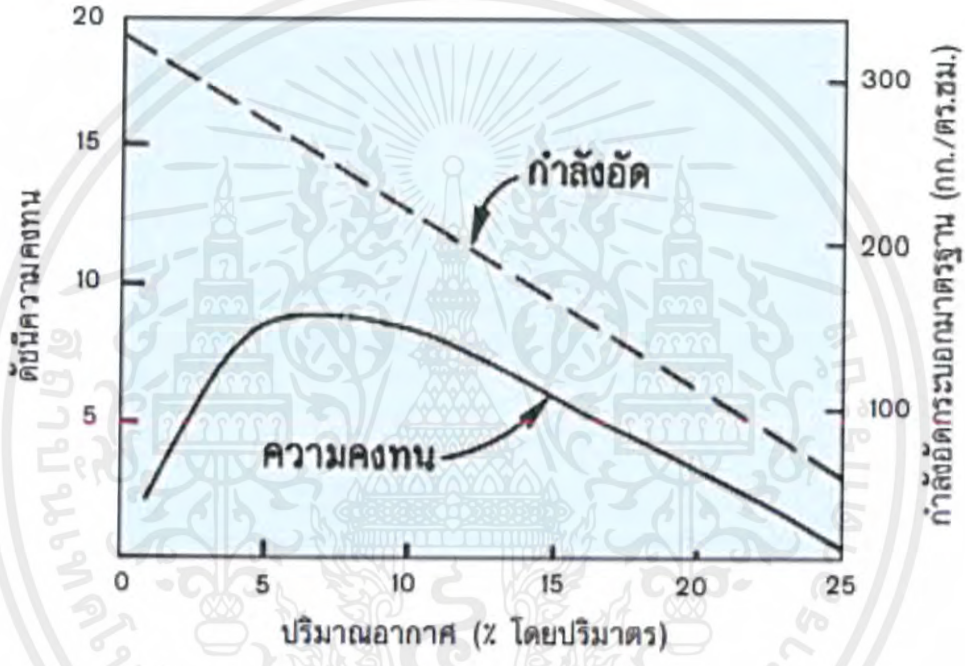
ค) ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อคอนกรีตสด การกักกระจายฟองอากาศมีผลดีต่อความสามารถในการใช้งานและการเกาะตัวของคอนกรีตเหลว โดยลดการแยกตัวและการเยิ้ม ไม่ว่าจะมีค่ายุบตัวมากหรือน้อยก็ตาม ในคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเดียวกัน คอนกรีตที่มีฟองอากาศจะใช้งานได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา เพราะเทลงแบบและบดอัดได้ง่านกว่า หรือมีความสามารถในการเทที่มากกว่า ในส่วนผสมที่เหลว ฟองอากาศจะช่วยลดการแยกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการใช้งาน

การเพิ่มปริมาณอากาศร้อยละ 5 จะทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 15 - 50 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณเพสท์คงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะฟองอากาศขนาดเล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นมวลรวมละเอียดขนาดเล็กซึ่งยืดหยุ่นได้และมีแรงเสียดทานต่ำ จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งภายในเนื้อคอนกรีตเหลว คอนกรีตจึงมีลักษณะคล้ายกับว่ามีทรายมาก คุณสมบัตินี้มีผลดีเมื่อส่วนผสมที่ขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคขนาดเล็ก ตามปกติจะไม่ใช้สารกักกระจายฟองอากาศเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว แต่ใช้เพื่อลดปริมาณทรายและน้ำสำหรับค่ายุบตัวหนึ่งๆการเพิ่มปริมาณอากาศร้อยละ 5 สามารถทำให้ลดปริมาณน้ำได้ 20 - 30 ลิตร/ลูกบาศ์กเมตร ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น และเป็นส่วนหนึ่งที่ทดแทนกำลังอัดที่ลดลงเพราะปริมาณอากาศที่สูงขึ้น

ง) ผลของสารกักกระจายอากาศต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ปริมาณฟองอากาศภายในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นมีผลเสียต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติคอนกรีตที่มีฟองอากาศกำลังอัดจะลดลงร้อยละ 5 ทุกๆการเพิ่มขึ้นของฟองอากาศร้อยละ 1 โดยรูปที่ 2.5 แสดงผลให้เห็นว่าปริมาณอากาศที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตลดลง



รูปที่ 2.5 ผลของการกกักระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน (The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

จะเห็นได้ว่าสารกักกระจายฟองอากาศจะมีผลกระทบต่อความสามารถการเทได้ กำลังอัดและปริมาตรของคอนกรีต ดังนั้นผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตต้องนำปัจจัยนี้มาพิจารณาด้วย

จ) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกักกระจายฟองอากาศ

- ส่วนผสมที่มีความละเอียด เช่น ทรายละเอียด หรือปริมณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ

- ปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นโดยลดขนาดของหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัดส่วนของทรายมีความสำคัญต่อปริมาณฟองอากาศการเพิ่มทรายขนาด 300 - 600 ไมโครเมตร จะก่อให้เกิดปริมาณฟองอากาศมากขึ้น แต่ถ้ามีทรายที่ละเอียดมาก โดยเฉพาะทรายที่ได้ตากการบดหินจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ

- น้ำที่เหมาะสำหรับคอนกรีตไม่มีผลต่อปริมาณฟองที่เกิดขึ้น แต่น้ำกระด้างจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ ดังนั้นจึงต้องใส่ปริมาณสารกักฟองอากาศเพิ่มขึ้น

- การใช้สารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆร่วมกับสารกักกระจายฟองอากาศจะต้องทำอย่างระมัดระวังในบางกรณีอาจจะยับยั้งการเกิดฟองอากาศ หรือในบางกรณีอาจจะต้องใส่สารผสมอื่นๆ หลังจากที่ฟองอากาศเกิดขึ้นก่อนแล้ว เป็นต้น

- ปริมาณฟองอากาศจะถูกกระทบด้วย ชนิด อัตราและเวลาที่ใช้ในการผสม รวมทั้งปริมาณคอนกรีตที่ถูกผสม การยืดเวลา การผสมจะส่งผลให้ฟองอากาศลดลง

- คอนกรีตที่มีความสามารถเทได้ต่ำมาก จะก่อให้เกิด ฟองอากาศได้ยากมาก และปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อสามารถเทได้มากขึ้น ตลอดช่วงค่ายุบตัว 25 - 150 มิลลิเมตร

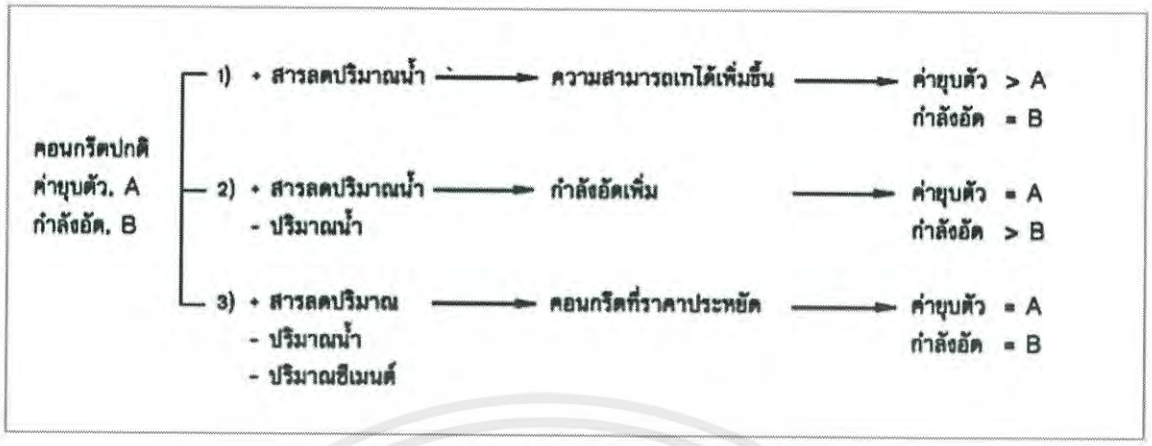
- การจี้เขย่าคอนกรีตมากเกินจะส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศต่ำลง

- ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตจะมีค่าผกผันกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 10°C เป็น 32°C ปริมาณฟองอากาศจะลดลงประมาณร้อยละ 50

2.3.2 สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical admixture) สารเคมีผสมคอนกรีต คือ สารละลายเคมีชนิดต่างๆที่ใส่ผสมลงในคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C494 แบ่งสารเคมีผสมเพิ่มออกเป็น 7 ประเภท คือ

ก) ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water reducing) สารลดปริมาณน้ำหรือที่รู้จักในชื่อ Plasticizer หมายถึง สารผสมเพิ่มที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ในการผสมโดยได้ความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศหรือเวลาการก่อตัวของคอนกรีต การใช้สารลดปริมาณน้ำให้เกิดประโยชน์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ประโยชน์การใช้สารลดปริมาณน้ำ
(The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

กรณีที่ 1 ใช้เพื่อช่วยให้งานเทคอนกรีตที่ทำได้ยาก เช่น โครงสร้างที่บางหรือมีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตนี้จะมีความสามารถเทได้ดี ง่ายต่อการจี้เหย่าเข้าแบบ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำและซีเมนต์

กรณีที่ 2 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการโดยใช้ปริมาณน้ำลดลงในขณะที่ปริมาณซีเมนต์คงที่ คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดลง ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้น การต้านทายนการซึมผ่านของน้ำและความคงทนสูงขึ้นหรืออาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังอัดโดยไม่สามารถเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพราะจเกิดปัญหาด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือเกิดการหดตัวที่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าว โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากแผ่ เป็นต้น

กรณีที่ 3 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คือ เราสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้

- วัตถุดิบ สารลดปริมาณน้ำได้มาจากสารประกอบหลัก 3 ชนิด คือ เกลือและสารประกอบของ Lignosulphonate , เกลือและสารประกอบของ Hydroxycarboxylic acid และ Polymer เช่น Hydroxylated Polymers สารลดปริมาณน้ำนี้ทั่วๆไปจะทำมาจากสารประกอบ 2 ชนิดแรก

- สาเหตุที่ต้องลดปริมาณน้ำ การลดปริมาณน้ำในส่วนผสมเป็นสิ่งที่สำคัญมาก สำหรับงานคอนกรีตจะพบว่าสารเคมีผสมคอนกรีต 5 ใน 7 ชนิด จะมีคุณสมบัติลดปริมาณน้ำ ซึ่งควรพิจารณาถึงหน้าที่ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเข้าใจมากขึ้น น้ำจะทำหน้าที่หลัก 3 อย่างคือ

1) เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2) ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียกเพื่อซีเมนต์จะเข้าเกาะและแข็งติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทำหน้าที่หล่อลื่นให้หิน ทราย ซีเมนต์ อยู่ในสภาพเหลวสามารถไหลเข้าแบบได้ง่าย

น้ำจำนวนพอดีที่จำทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือ ประมาณ 28±1% ของน้ำหนักซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) = 0.28±0.01 แต่คอนกรีตทั่วไปใช้อันตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.35 น้ำที่เกินนี้จะเข้าไปทำหน้าที่ในข้อ (2) และ (3) ส่งผลให้คอนกรีตเหลว ทำงานได้สะดวกขึ้น น้ำส่วนนี้จะเรียกว่า "น้ำส่วนเกิน" น้ำส่วนเกินหากมีมากเกินไปจะส่งผลต่อคอนกรีต คือ เกิดการเยิ้มของน้ำขึ้นมาที่ผิวหน้ามาก (Bleeding), เกิดการแยกตัว, กำลังอัดต่ำลง, เกิดการหดตัว, และทำให้เกิดรู้พรุน มีผลทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน โดยลักษณะของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7

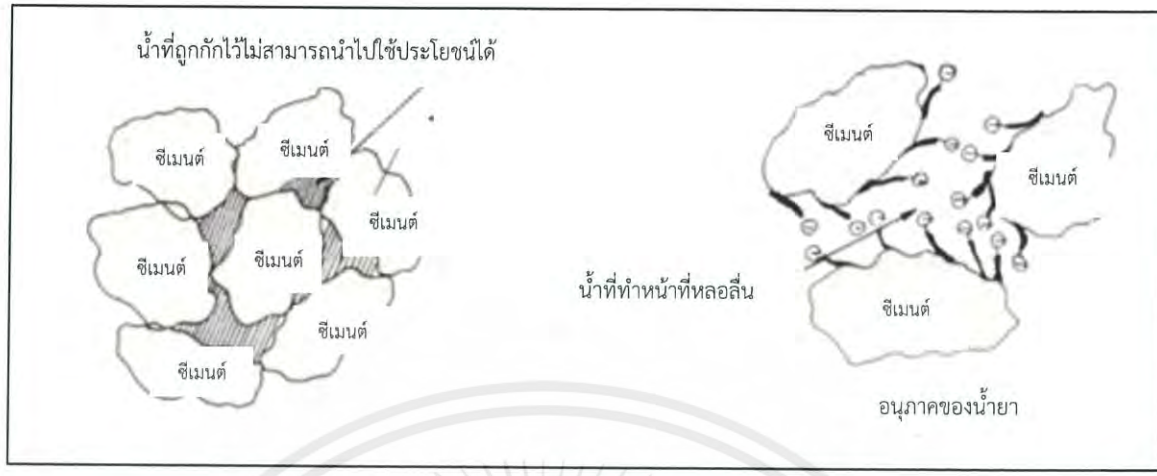
รูปที่ 2.7 คอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป

(The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

จากรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะคอนกรีตที่ใช้น้ำมากเกินไปน้ำสวนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หินและบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งคือการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแอ่งน้ำดังกล่าว จะกลายเป็นโพรงอากาศทำให้ความทนทานและกำลังอัดคอนกรีตลดลง

- ลักษณะการทำงาน สารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต เพราะมีคุณสมบัติในการช่วยเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวต่อระหว่างของแข็งและน้ำในคอนกรีต ปกติอนุภาคซีเมนต์ต่างๆในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว ซึ่งอาจเป็นขั้นบวกหรือลบก็ได้ อนุภาคซึ่งมีประจุต่างกันจะดูดรวมกันเป็นกลุ่ม (Flocculate) ซึ่งสามารถดูดน้ำได้เป็นจำนวนมากทำให้เหลือน้ำเหลือลื่นในคอนกรีตเหลวอยู่น้อย โมเลกุลของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ตะช่วยให้ประจุเป็นกลางหรือทำให้ประจุบนผิวอนุภาคต่างๆกลายเป็นประจุชนิดเดียวกันจึงเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกันทำแยกตัวกันในเนื้อซีเมนต์เพสต์ น้ำที่ผสมไปส่วนใหญ่จึงสามารถถูกใช้ลดความหนืดของซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ
(The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารลดปริมาณน้ำ

2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

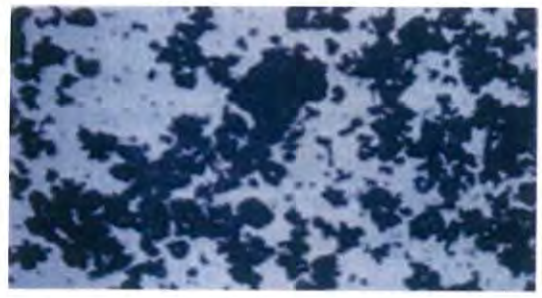
3) ชนิดของมวลรวมและส่วนคละ

4) สัดส่วนผสม

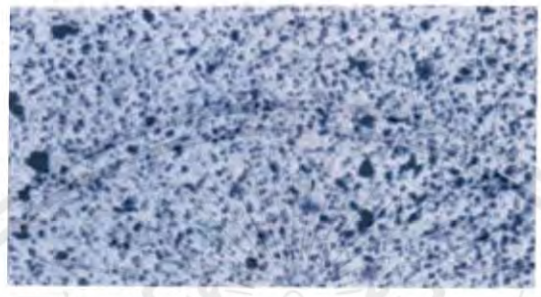
5) อุณหภูมิ

ถ้าใช้สารลดปริมาณน้ำในปริมาณปกติ ปริมาณน้ำที่ลดลงจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5 - 10 อย่างไรก็ตามควรทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เพื่อหาชนิดและปริมารของสารผสมเพื่อจะได้คุณสมบัติที่เหมาะสม โดยลักษณะของอนุภาคของซีเมนต์เมื่อใช้สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a)



b)

รูปที่ 2.9 a) อนุภาคของซีเมนต์จะจับอยู่เป็นกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ
b) การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ
(The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

- ผลต่อคอนกรีตสด

1) สารลดปริมาณน้ำนี้จะเพิ่มความสามารถในการเทได้ ถ้าไม่มีการปรับส่วนผสมอื่นๆ โดยปกติจะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 25 - 50 มิลลิเมตร

2) สารลดปริมาณน้ำที่มีสารประกอบของ Hydroxycarboxylic acid จะสามารถลดปริมาณน้ำได้มากกว่าสารประกอบของ Lignosulphonate

3) ค่าอัตราการสูญเสียการยุบตัว (Slump loss) ในช่วงแรกของคอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะมากกว่าคอนกรีตตทั่วไป

4) สารลดปริมาณน้ำที่มาจากเกลือของ Hydroxycarboxylic acid มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการเยิ้มน้ำ (Bleeding) ดังนั้นควรใช้ด้วยความระมัดระวังโดยเฉพาะกับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวมาก

5) สารลดปริมาณน้ำที่มาจาก Lignosulphonate จะลดการเยิ้มเนื่องจากสารประกอบพวกนี้จะก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นเล็กน้อย คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 1 - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) โดยทั่วไปสารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อเวลาการก่อตัวคือจะหน่วงเวลาการก่อตัวเล็กน้อย

7) ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต สารลดปริมาณน้ำจะไม่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาของคอนกรีต (Heat of hydration)

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1) ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะให้ค่ากำลังสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อยเนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

2) เนื่องจากสารลดปริมาณน้ำส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง นั้นคือกำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงขึ้น ผลทางอ้อมคือ กำลังอัดช่วงต้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

3) การหดตัว (Drying shrinkage) และ Creep จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความสามารถเทได้และกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากัน

4) ผลของการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ทำให้ความทนทานลากรกันซึมสูงขึ้นเพราะคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

ข) ประเภท B สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding) เป็นสารเคมีที่หน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งส่งผลให้หน่วงการก่อตัวของคอนกรีตด้วย สารผสมเพิ่มชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในงานคอนกรีตในเขตร้อน เพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดเร็วมาก เวลาการก่อตัวของซีเมนต์จะลดลง นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานคอนกรีตประเภทอื่นๆเช่น งานโครงสร้างขนาดใหญ่โดยยืดเวลาการก่อตัวเพื่อป้องกันการเกิด Cold Joint งานเขื่อนโดยลดความร้อนในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว งานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ซึ่งบางเวลาต้องยืดเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตออกไป 6 - 8 ชั่วโมง

- วัตถุดิบ สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามส่วนประกอบทางเคมีดังนี้

1) กรด Lignosulphonate และเกลือของมัน

2) กรด Hydroxycarboxylic และเกลือของมัน

3) น้ำตาลและสารประกอบของน้ำตาล

4) เกลืออนินทรีย์

สารเคมีหลายๆตัวเหมือนกับสารลดปริมาณน้ำแต่ใช้ปริมาณที่มากกว่า

- ลักษณะการทำงาน มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายการทำงานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ แต่ทฤษฎีที่สำคัญที่สามารถอธิบายเรื่องนี้ได้ดี คือ สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวและคลุมบนผิวของอนุภาคซีเมนต์ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง นั่นคือการหน่วงเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารยืดเวลาการก่อตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ

3) เวลาที่เติมสารยืดเวลาการก่อตัว

4) อุณหภูมิ

สารยืดเวลาการก่อตัวจะขยายเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตทั้งเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ส่วนผลด้านการยืดเวลาพบว่าคอนกรีตใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูง

ความสามารถในการยืดเวลาการก่อตัวของสารผสมเพิ่มนี้จะดีขึ้นหากเติมน้ำยาประเภทนี้ 2-3 นาที หลังจากนั้นใส่น้ำผสมและจะให้เต็มที่เมื่อเติม 10 นาที หลังผสม ถ้าเติมหลัง 2 - 4 ชั่วโมง สารผสมเพิ่มจะไม่ก่อให้เกิดผลด้านการยืดเวลาการก่อตัว ปริมาณการใช้สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

- ผลต่อคอนกรีตสด

1) ผลโดยตรงคือ หน่วงเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทนาน รวมทั้งมีค่าการสูญเสียค่ายุบตัวน้อยลง

2) หน่วงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ปริมาณความร้อนทั้งหมดยังคงเดิม

3) การยืดเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มจะเพิ่มการหดตัว (Plastic shrinkage) เพราะว่าคอนกรีตจะเหลวอยู่นานกว่าปกติ ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมสารยืดเวลาการก่อตัวจึงจำเป็นที่จะต้องบ่มอยู่อย่างถูกต้องและเพียงพอเพื่อป้องกันการแตกร้าว (Plastic cracking) ซึ่งจะเกิดขึ้นถ้าปล่อนให้คอนกรีตแห้งก่อนที่คอนกรีตจะมีกำลังอัดเพียงพอ

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัว

1) กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการยืดเวลาการก่อตัว แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 - 3 วัน กำลังอัดจะใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่วๆไป

2) อันตราการเกิด Drying shrinkage และ Creep เพิ่มขึ้น แต่ควรจะไม่เปลี่ยนแปลง

ค) ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating) เป็นสารที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลเร่งการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นโดยทั่วไปใช้สำหรับงานดังนี้ งานก่อสร้างเร่งด่วน งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตในโรงงานเพื่อให้การหมุนเวียนแบบหล่อทำได้อย่างรวดเร็ว งานคอนกรีตในฤดูหนาว สำหรับประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นมาก

สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะแตกต่างจากสารที่ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างกระทันหัน (Set accelerating admixture) ซึ่งจะก่อตัวภายใน 2 - 3 นาที และเหมาะในงาน Shotcrete สำหรับอุดรูรั่วภายใต้ความดันของน้ำ หรือการซ่อมแซมอย่างกะทันหัน

- วัตถุดิบ สารเร่งเวลาการก่อตัวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารเคมีดังนี้

1) Calcium chloride

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Calcium formate

Calcium Chlorideเป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้เร่งการก่อตัวของคอนกรีต ด้วยเหตุที่สำคัญ 2 ประการคือ ราคาไม่แพง และหาได้ง่าย แต่ในปัจจุบันได้พบว่า Calcium chloride จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต ดังนั้นจึงหันมาสนใจสารเคมีชนิดอื่นที่ไม่มีเกลือคลอไรด์ (Chloride-free) ได้แก่ Calcium formate และล่าสุดได้พัฒนาสารเร่งการก่อตัวที่มีสารหลักคือ Calcium nitrate

- ลักษณะการทำงาน สารเร่งการก่อตัวของคอนกรีตทำหน้าที่เหมือนตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในเวลาอันรวดเร็ว

-ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงาน

1) ชนิดและปริมาณการใช้สารเร่งการก่อตัว

2) ชนิดซีเมนต์และสารประกอบ

3) อุณหภูมิ

Calcium chloride เป็นสารเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ดีกว่า Calcium formate และ Calcium nitrate รวมทั้งราคาถูกอย่างมากด้วย และการเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารผสมนี้ในปฏิกิริยาที่มากขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์ สัดส่วนผสม โดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ มากกว่าส่วนผสมที่ใช้อันตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง

- ผลต่อคอนกรีตสด เวลาการก่อตัวและแข็งตัวจะลดลง แต่ทั้งนี้ได้มีข้อกำหนดควบคุมไว้ มิให้การก่อตัวเกิดเร็วมากจนไม่สามารถนำคอนกรีตนั้นๆไปใช้งานได้

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1) กำลังอัดตัวในช่วงต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กำลังอัดในระยะยาวที่อายุ 28 วัน จะต่ำกว่าคอนกรีตทั่วๆไป

2) Calcium chloride จะเพิ่มทั้ง Drying shrinkage และ Creep

3) Calciumcloride ที่ใส่ไปเร่งการก่อตัว จะมีผลทำให้ความสามารถทนทานต่อซัลเฟสของคอนกรีตลดลง รวมทั้งยังกระตุ้นให้เกิด Alkali aggregate reaction สำหรับในกรณีที่มวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์

4) คอนกรีตจะมีความสามารถทนต่อ Erosion และ Abrasion ทุกช่วงอายุมากกว่าคอนกรีตทั่วๆไป

5) Calcium chloride จะเร่งการสึกกร่อนของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต จึงจำเป็นต้องใช้อย่างระมัดระวัง

ง) ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water reducing and retarding) เป็นสารผสมที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยเฉพาะงานคอนกรีตผสมเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ) ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว (Water reducing and accelerating)

ฉ) ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water reducing-high range) สารผสมนี้สามารถลดปริมาณน้ำได้ 15 - 30% ทั้งนี้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักดันโดยมีแรงผลักดันมากกว่าสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำทั่วๆไป ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มประเภทนี้มีบทบาทมากในโรงงานผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปเพราะการลดน้ำในปริมาณมากๆทำให้อัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงแรกสูงมาก ทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวด Pre stressed ได้รวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ ซึ่งเป็นการประหยัดใช้จ่าย

ช) ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว (Water reducing-high range and retarding) เป็นสารผสมเพิ่มที่พัฒนาล่าสุดเหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมากๆ เช่นในงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรือเสา คาน และชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มจะมีค่ายืดตัวมากกว่า 15 เซนติเมตร ทำให้สามารถไหลเข้าไปทุกซอกทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบโดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าคอนกรีตมาก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกทั่วๆไปว่า Flow concrete คุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตควรเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.7 (The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 สรุปคุณสมบัติของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่างๆ ตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน (The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd 2000)

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด						
	สารลดน้ำ	สารหน่วงการก่อตัว	สารเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว	สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว	สารลดน้ำพิเศษ	สารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว
น้ำ ร้อยละของปริมาณน้ำที่ผสมคอนกรีตควบคุม ไม่เกิน	95			95	95	88	88
ระยะเวลาการก่อตัว เทียบกับคอนกรีตควบคุม ชั่วโมง:นาที							
การก่อตัวระยะต้น อย่างน้อย	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	ช้าลง 1:00	เร็วขึ้น 1:00	-	ช้าลง 1:00
แต่ไม่เกิน		ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	ช้าลง 3:30	เร็วขึ้น 3:30	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
การก่อตัวระยะปลาย อย่างน้อย	-	-	เร็วขึ้น 1:00	-	เร็วขึ้น 1:00	-	-
แต่ไม่เกิน	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30	-	ช้าลง 3:30	-	เร็วขึ้น 1:00 หรือ ช้าลง 1:30	ช้าลง 3:30
ความต้านแรงอัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 1 วัน	-	-	-	-	-	140	125
3 วัน	110	90	125	110	125	125	125
7 วัน	110	90	100	110	110	115	115
28 วัน	110	90	100	110	110	110	110
ความต้านแรงดัด ร้อยละของคอนกรีตควบคุม ไม่น้อยกว่า							
เมื่ออายุ 3 วัน	100	90	110	100	110	110	110
7 วัน	100	90	100	100	100	100	100
28 วัน	100	90	90	100	100	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral admixture) สารผสมเพิ่มชนิดนี้มักจะเป็นผงละเอียด ซึ่งใส่รวมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวและเพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

- วัสดุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ หรือวัสดุเฉื่อย สารผสมเพิ่มชนิดนี้ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตเหลว โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ขาดอนุภาคขนาดเล็ก เช่น คอนกรีตที่ทำจากทรายหยาบ หรือมีปริมาณซีเมนต์น้อย ซึ่งคอนกรีตดังกล่าวแยกตัวได้ง่าย ไม่เหมาะสำหรับงานลำเลียงและเทลงแบบ การปรับปรุงการเกาะตัวและความเหลวของคอนกรีตนี้ด้วยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ อาจทำไม่ได้ เพราะเหตุผลด้านราคาหรือทางเทคนิค เช่น ทำให้มีคสามร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมากมรคอนกรีตเหลว วิธีการที่ทำได้คือการใส่แร่ธาตุ เช่น ผงหินปูน หินเขี้ยวหนุมาน เศษหิน ผสมในคอนกรีต ซึ่งแร่เหล่านี้ไสต่อปฏิกิริยาต่ำ ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมโยง เหมาะสำหรับปรับปรุงความสามรถในการช้านของคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงเท่านั้น

- วัสดุ Pozzolana คือ วัสดุประเภทซิลิก้า สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตัวเชื่อมประสาน หรือ Calcium silicate hydrate เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดปริมาณแคลเซียนไฮดรอกไซด์ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารเคมีสูงขึ้น เราอาจใช้ Pozzolana โดยการใส่ในสถานที่ก่อสร้าง หรือในรูปของซีเมนต์ผสม

นอกเหนือจากการเพิ่มความสารถในการใช้งานของคอนกรีตที่ขาดซีเมนต์แล้ว ยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งสามารถใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมสารผสมเพิ่มชนิดนี้แทนซีเมนต์ประเภทที่ 4 สำหรับโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ ปริมาณการใช้ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของงานและอาจสูงถึง 15 - 35% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยซิลิก้าที่ทำปฏิกิริยาดังกล่าว ได้แก่ ขี้เถ้าภูเขาไฟและหิน Tuff , Pumicite, Opaline, Chert ดินเหนียว และหิน Shale โดยปกติต้องนำมาบดละเอียดและเผา

Fly ash เป็นขี้เถ้าอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยามมากเพราะมีลักษณะผงละเอียดอยู่แล้ว

การใช้สาร Pozzolana มักจะมีผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน

- วัสดุที่มีความสามารถเป็นตัวเชื่อมประสาน

2.3.4 สารผสมเพิ่มอื่นๆ ได้แก่ สารเพิ่มอื่นๆที่ไม่จัดอยู่ใน 3 ประเภทแรกซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น เช่น

- สารป้องกันการซึม ใช้ป้องกันการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีรูพรุนมาก ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุประเภทสบู่หรือน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารกันความชื้น เป็นพวกกรดไขมันหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ทำให้น้ำไม่จับที่ผิวคอนกรีต แต่จะไม่สามารถทนน้ำที่มีแรงดันน้ำมากได้

- สารช่วยให้ปั๊มง่าย ช่วยให้คอนกรีตยึดเกาะตัวกัน เคลื่อนผ่านท่อปั๊มไปได้ถึงแม้ว่าคอนกรีตนั้นจะมีปริมาณซีเมนต์ต่ำ

- สารอุดประสานและสารกรอกฉีด ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อการอัดฉีดเข้าไปในซอกหรือบริเวณแคบๆ โดนป้องกันการแยกตัว การเยิ้มน้ำ รวมทั้งเพิ่มการยึดเกาะเพื่อให้ปั๊มได้สะดวก เหมาะที่จะนำไปใช้กับงาน Stabilize ฐานราก อุดรอยร้าวหรือรอยต่อในงานคอนกรีต อุดช่องว่างในงานคอนกรีตอัดแรงระบบ Bonding เป็นต้น

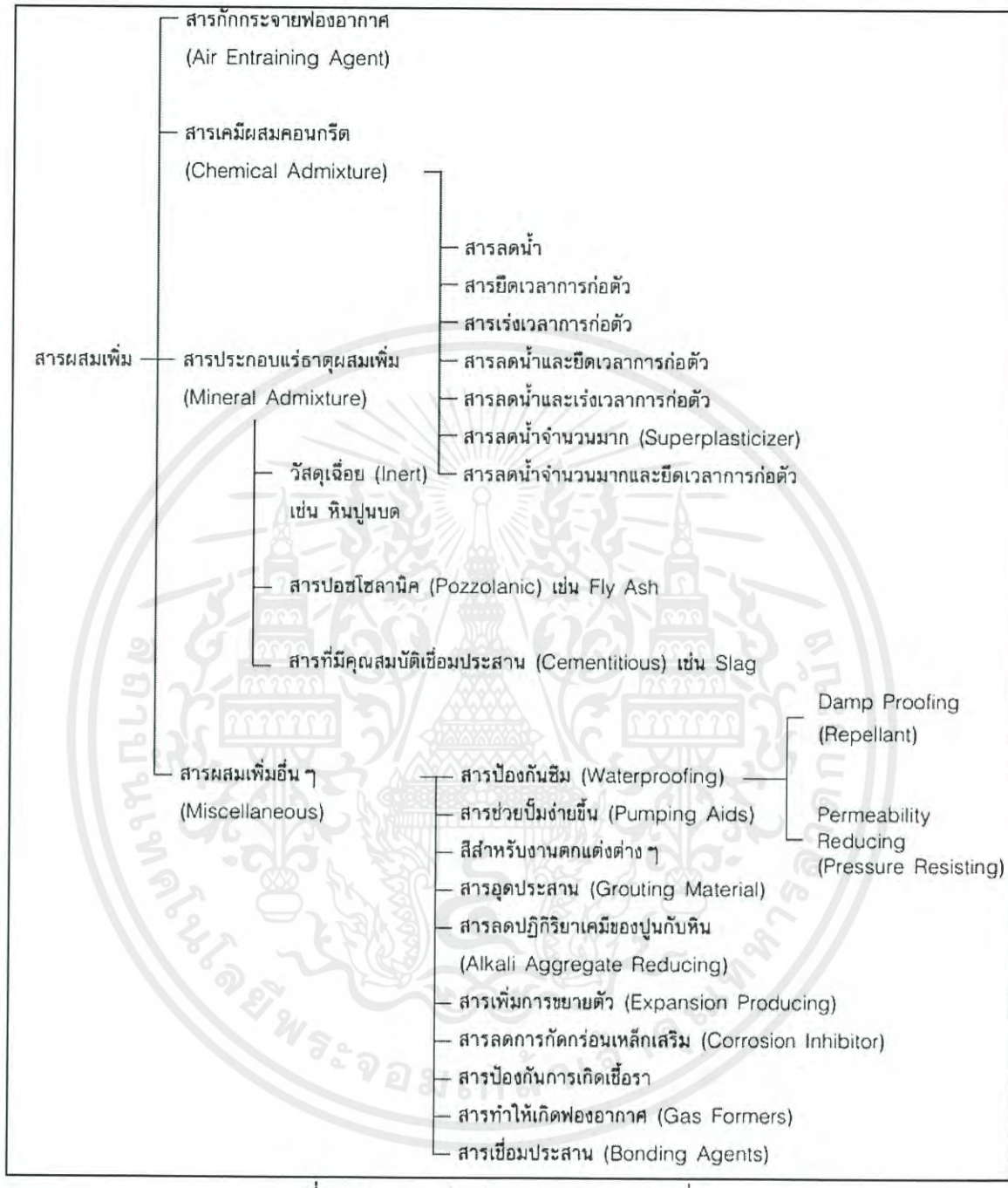
- สารเพิ่มการขยายตัว มีสารเคมีหลักคือ Calcium sulfoaluminate จะทำให้ซีเมนต์ธรรมดาเป็นซีเมนต์แบบขยายตัว เพื่อใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างทั่วๆไป

- สารลดการกักร่อนเหล็กสนิม เป็นเกลือของสารเคมีที่มีประจุที่เกิดออกไซด์ได้

- สารเชื่อมประสาน ส่วนใหญ่ทำมาจาก Polymer Latex ใช้เพื่อเสริมการยึดเกาะตัวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่หรือระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม
(The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. 2000)

รายละเอียดของการแบ่งสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต (The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd 2000)

คุณสมบัติที่ต้องการ	ประเภทของสารผสมเพิ่ม					
	สารลดน้ำ	สารเร่ง	สารหน่วง	สารลดน้ำจำนวนมาก	สารกักกระจายฟองอากาศ	อื่นๆ
การก่อตัวและแข็งตัว						
- เร่งอัตราการพัฒนากำลังอัดช่วงต้น	อ้อม			ตรง		
- เร่งการก่อตัว		ตรง				
- หน่วงการก่อตัว			ตรง			
ความสามารถในการเทได้และคุณสมบัติของคอนกรีตเหลวอื่นๆ						
- เพิ่มความสามารถในการเทได้โดยกำลังอัดไม่สูญเสียไป	ตรง			ตรง		
- ลดอุณหภูมิจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	อ้อม		อ้อม	อ้อม		
- ลดการเยิ้ม					ตรง	ตรง
- ลดการแยกตัว					ตรง	ตรง
- เพิ่มความสามารถปั้มได้				อ้อม	ตรง	ตรง
คอนกรีตแข็งตัวแล้ว						
- เพิ่มกำลังอัดโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์หรือลดความสามารถในการเทได้	ตรง			ตรง		
	อ้อม			ตรง	ตรง	
- ปรับปรุงความทนทาน	ตรง			ตรง	อ้อม	ตรง
- ปรับปรุงความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำ						ตรง
- ปรับปรุงแรงยึดระหว่างคอนกรีต						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คอนกรีตสด

คอนกรีตสด คือ คอนกรีตที่คงสภาพเหลวอยู่ชั่วขณะหนึ่งก่อนที่จะแข็งตัวในเวลาต่อมา ซึ่งคอนกรีตสดที่ดีจะต้องมีความข้นเหลวสม่ำเสมอ มีความสามารถนำไปเทเข้าแบบได้ดี ไม่มีการแยกตัวในขณะลำเลียง มีระยะเวลาการก่อตัวนานมากพอที่จะทำงานได้ และมีปริมาณฟองอากาศที่เหมาะสม ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ จะส่งผลต่อคุณภาพและการนำไปใช้งานของคอนกรีตดังนี้ (ปิติ. 2556)

2.4.1 ความสามารถเทได้ (Workability)

ความสามารถเทได้ คือ การที่คอนกรีตสดสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้อัดแน่นปราศจากรูโพรงหรือช่องว่างได้โดยง่าย และไม่เกิดการแยกตัว ซึ่งปัจจัยที่จะส่งผลต่อความสามารถได้ เช่น น้ำ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ ขนาดของมวลรวม และการคละกันของมวลรวม

2.4.2 การแยกตัว (Segregation)

การแยกตัวของวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต โดยแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างวัสดุกับปูนซีเมนต์มีค่าน้อยลง ทำให้เนื้อคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ มีผลทำให้เกิดการแยกตัวของเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งการแยกตัวออกได้เป็น 2 แบบ คือ การแยกตัวที่เกิดจากหินแยกตัวออกจากทราย กับ การแยกตัวเนื่องจากคอนกรีตมีความข้นเหลวมากเกินไป ทำให้น้ำปูนซีเมนต์แยกตัวออกจากมวลรวม ทำให้แรงยึดเหนี่ยวมีค่าน้อยลงด้วย ซึ่งการแยกตัวทั้ง 2 แบบ มีผลทำให้คอนกรีตขาดคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวและยังส่งผลต่อกำลังของคอนกรีต ปัจจัยที่จะส่งผลต่อการแยกตัว เช่น การใช้วัสดุผสมไม่เหมาะสม การผสม การเท และระยะทางในการลำเลียงคอนกรีต

2.4.3 การเยิ้มน้ำ (Bleeding)

การเยิ้มน้ำ หรือ การคายน้ำของคอนกรีต เกิดขึ้นหลังจากการเทคอนกรีตลงแบบใหม่ๆ ยังไม่ถูกกระทบกระเทือน น้ำจะถูกดันขึ้นมาด้านบนเนื่องจากมวลรวมที่มีน้ำหนักมากกว่าจะจมลงด้านล่าง ทำให้มีน้ำเยิ้มขึ้นมาบนผิวด้านบนของคอนกรีต และการเยิ้มจะหยุดลงเมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวพอที่จะหยุดการจมลงได้ มีผลทำให้คอนกรีตด้านบนมีความหนาแน่นต่ำ มีกำลังน้อยกว่าคอนกรีตด้านล่าง และทำให้ผิวของคอนกรีตไม่สวยงาม หลุดร่อนได้

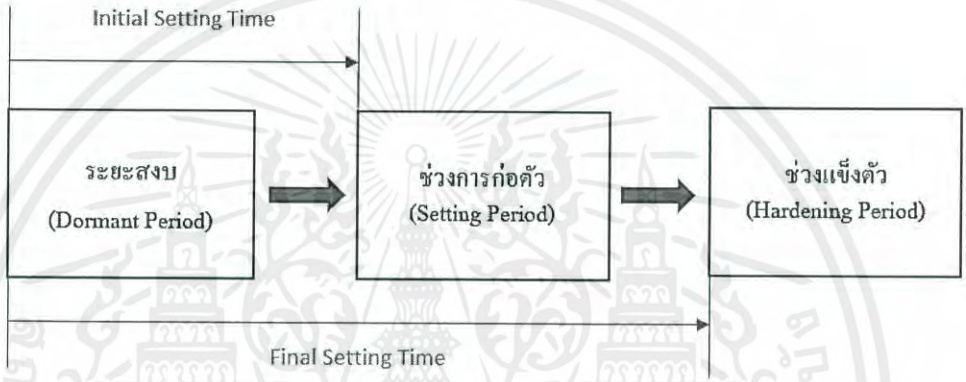
2.4.4 ปริมาณฟองอากาศ (Air Entrainment)

ฟองอากาศในคอนกรีตมีลักษณะเป็นช่องว่างกระจายอยู่ทั่วไปในคอนกรีต ซึ่งถ้ามีปริมาณฟองอากาศมากเกินไป จะทำให้กำลังและความคงทนของคอนกรีตลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีน้อยเกินไปก็ทำให้ความสามารถในการเทลดลงเช่นกัน ดังนั้นปริมาณฟองอากาศที่เหมาะสม จะช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต เพื่อช่วยให้ทำงานง่ายขึ้น ลดการเยิ้มและการแยกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 การก่อตัว (Setting)

การก่อตัว คือ การเปลี่ยนสภาพของคอนกรีตจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งเป็นสภาวะที่คอนกรีตเริ่มสูญเสียความสามารถในการทำงานได้ (workability loss) และเป็นจุดเริ่มต้นของก่อนแข็งตัว โดยการก่อตัวจะเริ่มขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้ว 2-3 ชั่วโมง ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือการก่อตัวตั้งต้น (initial set) จะเริ่มนับตั้งแต่การผสมปูนซีเมนต์กับน้ำไปจนถึงการสิ้นสุดระยะสงบ และการก่อตัวสุดท้าย (final set) จะเริ่มนับตั้งแต่การผสมปูนซีเมนต์กับน้ำไปจนเข้าสู่การเริ่มแข็งตัวของคอนกรีต โดยช่วงการก่อตัวของซีเมนต์แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ช่วงการก่อตัวของซีเมนต์ (ปิติ. 2556)

2.5 ของเสียในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

คอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้างและงานโครงสร้างต่างๆ โดยของเสียที่เกิดจากคอนกรีต มีปริมาณเป็นร้อยละ 50 ของปริมาณของเสียทั้งหมดในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ที่เกิดจากการสร้าง การรื้อถอนและ ทำลายสิ่งก่อสร้างต่างๆ เรียกว่า คอนกรีตเหลือใช้ และยังมีของเสียอื่นๆ เช่น เหล็กรูปพรรณ ไม้แบบ เป็นต้น (Aynur. 2559) ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหลักในส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมากได้แก่ วัตถุดิบ พลังงาน และเชื้อเพลิง จึงเป็นสาเหตุสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมทั้งขยะ มลพิษและของเสีย ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์ 1 กิโลกรัมจะก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 0.83 กิโลกรัม โดยคิดเป็นร้อยละ 5-7 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลกและยังมีการปล่อยสารก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์(NO_x) และสารมลพิษอื่นๆที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Martha. 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ประเภทของคอนกรีตเหลือใช้

อุตสาหกรรมก่อสร้างก่อให้เกิดคอนกรีตเหลือใช้ในปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นในทุกกระบวนการต่างๆทั้งในกระบวนการผลิตและกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Aynur. 2559)

1) คอนกรีตที่สั่งมากเกินไป (over-ordered concrete) ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ผู้ผลิตไม่สามารถที่จะควบคุมปริมาณ ส่วนผสมเฉพาะ เพื่อตอบสนองความต้องการเฉพาะให้ลูกค้าในแต่ละรายให้เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งอาจก่อให้เกิดคอนกรีตที่เหลือจากการสั่งซื้อได้

2) คอนกรีตที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้าง (leftover concrete) ในแต่ละกระบวนการก่อสร้าง อาจมีการรื้อถอนหรือคอนกรีตที่ตกหล่น และในกระบวนการก่อสร้างในแต่ละวัน จะมีการล้างทำความสะอาดถังผสมหรือปั๊มคอนกรีต ซึ่งก่อให้เกิดคอนกรีตเหลือใช้ ปริมาณคอนกรีตสดที่ใช้ในการก่อสร้างในแต่ละวันจะก่อให้เกิดขยะคอนกรีต 8 - 10 ตัน คิดเป็น 0.4 - 0.5% ของการก่อสร้าง

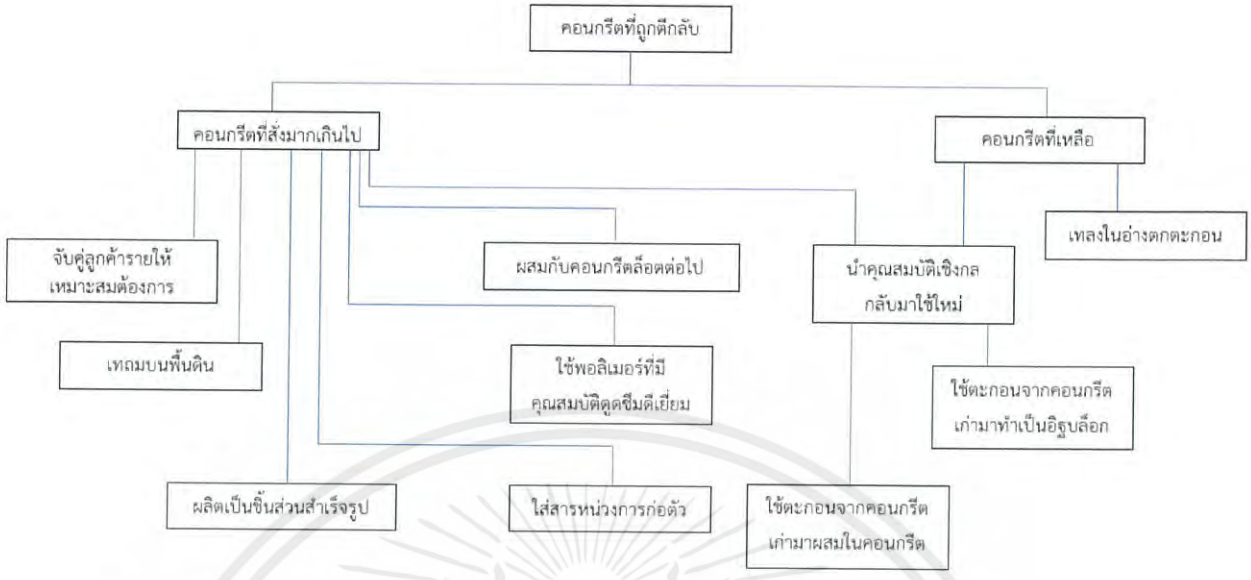
2.5.2 การจัดการคอนกรีตเหลือใช้

เนื่องจากปริมาณคอนกรีตเหลือใช้มีปริมาณมหาศาลและยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีวิธีการในการควบคุม จัดการคอนกรีตเหล่านี้ให้เหมาะสม ดังต่อไปนี้

1) จับคู่ระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อให้เหมาะผสม
2) นำไปผสมกับคอนกรีตล็อตใหม่
3) ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม
4) นำไปผลิตชิ้นสำเร็จรูป (Pre-cast concrete)
5) เทถมลงสู่พื้นดิน
6) เทลงในอ่างตกตะกอน
7) ใช้ตะกอนจากคอนกรีตเก่ามาทำเป็นอิฐบล็อก
8) ใส่พอลิเมอร์ดูดซับ

กระบวนการต่างๆในการนำคอนกรีตสดกลับมาใช้ประโยชน์ได้นั้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กระบวนการต่างๆในการนำขยะคอนกรีตกลับมาใช้ประโยชน์ (Aynur. 2559)

จากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตสดเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการก่อสร้าง จึงมีการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของคอนกรีตสด โดยมีกระบวนการแยกส่วนประกอบของคอนกรีตสดออก ให้ได้เป็นผงปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางเคมีของผงปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ในแต่ละช่วงเวลา เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติต่างๆกับปูนซีเมนต์

โดยในการศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ทแลนด์ชนิดไฮบริด เพราะในอุตสาหกรรมก่อสร้างส่วนใหญ่ของเมืองไทยนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ดังนั้นจึงนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ที่นำกลับมาใช้ใหม่เปรียบเทียบกับปูนไฮบริดที่นำกลับมาใช้ใหม่ในการศึกษาก่อนหน้านี้

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาผลกระทบจากการใส่สารผสมเพิ่มลงในซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้สารผสมเพิ่มชนิด A&D ซึ่งประเภท A เป็นสารลดปริมาณน้ำ (Water reducing) หรือที่รู้จักในชื่อ Plasticizer เป็นสารผสมเพิ่มที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ในการผสมโดยได้ความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศหรือเวลาการก่อตัวของคอนกรีต และประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water reducing and retarding) เป็นสารผสมที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยเฉพาะงานคอนกรีตผสมเสร็จ ที่ศึกษาสารสองชนิดนี้เพราะว่าเป็นสารผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันทั่วไปในการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินโครงงาน

การศึกษาการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ต้องศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนกับน้ำ จึงใช้ซีเมนต์เพสต์ในการทดลอง เพราะทรายและหินเป็นวัสดุเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีในการผสมคอนกรีต จึงใช้เพียงปูนซีเมนต์น้ำและสารผสมเพิ่มแทนในการทดลอง

3.1 การนำกลับมาใช้ใหม่ของปูนซีเมนต์

การทดลองการนำกลับมาใช้ใหม่ของปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยขั้นตอน 3 ส่วน ดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง เป็นการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มาผสมกับน้ำเพื่อที่จะทำซีเมนต์เพสต์เพื่อที่จะทำเป็นปูนซีเมนต์เหลือทิ้งไว้หลังผสมเสร็จ 1 2 3 4 และ 5 ชั่วโมงและทำแบบเดียวกันแต่ใส่สารผสมเพิ่มที่ 1, 3, และ 5 ชั่วโมง

2) กระบวนการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ เป็นกระบวนการนำซีเมนต์เพสต์จากการเตรียมตัวอย่างไปเข้าเตาอบเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพราะโดยทั่วไปคอนกรีตผสมเสร็จที่สั่งมาจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเกินเวลา 4 ชั่วโมงหลังจากนั้นคอนกรีตจะสูญเสียการยุบตัวทำให้ความสามารถในการเทแบบลดลง หลังจากอบซีเมนต์เพสต์จนแห้งแล้ว นำซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวมาบดให้ละเอียดจนสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ขนาดปกติ

3) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผงปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่กับปูนซีเมนต์ปกติ

3.1.1 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง มีการแยกประเภทตามชนิดและเวลาที่รอให้ซีเมนต์เพสต์หมดอายุ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสำหรับการนำมาใช้ในการก่อสร้างทั่วไป
- ปูนงานโครงสร้างสูตรไฮบริด ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสำหรับการนำมาใช้ในการก่อสร้างทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มที่ 2 ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ 1 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำไปเข้าเตาอบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ 2 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำไปเข้าเตาอบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ 3 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำไปเข้าเตาอบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ 4 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำไปเข้าเตาอบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลลา 4 ชั่วโมง

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ 5 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำไปเข้าเตาอบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

กลุ่มที่ 3 ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่โดยใส่สารผสมเพิ่มที่ 1 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำเข้าเอาตบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่โดยใส่สารผสมเพิ่มที่ 3 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำเข้าเอาตบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

- ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่โดยใส่สารผสมเพิ่มที่ 5 ชั่วโมง คือ หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำเข้าเอาตบหลังจากผสมเสร็จเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ใช้สารผสมเพิ่มประเภท A และ D ซึ่งเป็นสารลดน้ำและหน่วงปฏิกิริยา ใช้ปริมาณร้อยละ 0.004 ของปริมาณปูนซีเมนต์

3.1.2 การผสมซีเมนต์เพสต์ เป็นการผสมซีเมนต์เพสต์เพื่อการผลิตปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 30 เปอร์เซนต์ เพราะซีเมนต์เพสต์ที่ได้จะสามารถเทใส่ถาดได้ดี ไม่เหลวหรือแห้งจนเกินไป

วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการผสมซีเมนต์เพสต์ มีดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ปริมาณ 3,000 กรัม

2) น้ำ ปริมาตร 900 มิลลิลิตร

3) สารหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เป็นสารผสมเพิ่มประเภท A และ D ซึ่งเป็นสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (Water-reducing and retarding admixture) ใส่ในตัวอย่างปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารหน่วงการก่อตัว โดยจะใส่ในน้ำที่ตวงไว้ก่อนการผสม ปริมาณร้อยละ 0.004 ของปริมาณปูนซีเมนต์

4) เครื่องผสมปูนซีเมนต์

5) เครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.1 กรัม

6) กระบอกตวงน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) เกรียงเหล็ก ใช้ในการตกแต่งผิวหน้าปูนซีเมนต์

8) ถาดเหล็ก ใช้ใส่ปูนซีเมนต์หลังจากการผสม จำนวน 3 ถาด

9) เตาอบที่มีอุณหภูมิถึง 200 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เพสต์ มีดังนี้

1) เตรียมปูนซีเมนต์ น้ำ และเครื่องผสม

2) ใส่ปูนซีเมนต์และน้ำ ในเครื่องผสมทีละน้อย โดยเปิดเครื่องผสมเบอร์ 1 โดยจับเวลาตั้งแต่เริ่มผสม แล้วปล่อยให้เครื่องผสมทำงานไปเรื่อยๆ เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำอย่างเต็มที่

3) หลังจากครบเวลา 20 นาที ให้ปิดเครื่องผสม แล้วเทซีเมนต์เพสต์ที่ได้ลงในถาดแล้วใช้เกรียงเกลี่ยให้บาง ไม่ให้หนามาก เพื่อให้ง่ายต่อการบด

4) ตั้งทิ้งไว้รอเวลาให้ซีเมนต์เพสต์มีอายุตามเวลาที่กำหนด เป็นตัวอย่างสำหรับใช้ในกระบวนการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ต่อไป

3.2 กระบวนการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่

กระบวนการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ มีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การอบซีเมนต์เพสต์ เป็นการเร่งการระเหยของน้ำออกจากซีเมนต์เพสต์ให้เร็วที่สุด เพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยที่สุด โดยการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ได้เตรียมไว้ มาใส่ในเตาอบที่ได้อุ่นเครื่องไว้ โดยตั้งอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส อบทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ซีเมนต์เพสต์แห้งอย่างเต็มที่ เมื่อครบเวลาแล้ว จึงนำซีเมนต์เพสต์ออกจากเตาอบ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นเพื่อรอการบดละเอียดต่อไป

3.2.2 การบดซีเมนต์เพสต์ การบดซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วนั้น ต้องใช้พลังงานในการบดอัดค่อนข้างมากเพื่อให้ผงซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้

เครื่องมือที่ใช้ในการบดซีเมนต์เพสต์ มีดังนี้

- ที่บดและที่รองบดเซรามิก
- เครื่องทดสอบลอสแองเจลิส (Los angeles abrasion machine) เป็นเครื่องทดสอบความแกร่งของมวลรวมหยาบ ประกอบด้วยถังเหล็กรูปทรงกระบอกกลวงมีแกนหมุน สามารถบรรจุลูกเหล็กและมวลรวมหยาบเพื่อการทดสอบได้
- ตะแกรงเบอร์ 200

ขั้นตอนการบดซีเมนต์เพสต์ มีดังนี้

1) ทำความสะอาดเครื่องก่อนใช้งานทุกครั้ง

2) นำซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการอบแล้วใช้ที่บดเซรามิกทุบให้ซีเมนต์เพสต์มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องทดสอบลอสแองเจลิส โดยทำการปิดฝาเครื่องให้แน่น แล้วเปิดเครื่องให้ทำงานไปเป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เมื่อครบเวลา 20 นาที ปิดเครื่อง นำผงซีเมนต์ที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

4) หากมีผงซีเมนต์ส่วนที่ร่อนไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ให้ใช้ที่บดและที่รองบดเซรามิกในการบดจนกว่าจะร่อนผ่านตะแกรงได้หมด

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผงปูนซีเมนต์

ใช้การทดสอบปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้

1) การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

2) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์

3) การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

4) การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

โดยใช้ปูนซีเมนต์ที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทุกครั้งในการทดสอบ เพื่อควบคุมพื้นที่ผิวของปูนซีเมนต์ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

3.3.1 การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ (Test for consistency of cement paste)

วัตถุประสงค์ : เพื่อใช้ในการหาปริมาณน้ำที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเป็นปริมาณที่ทำให้เนื้อซีเมนต์เพสท์ที่ได้จากการผสมมีค่าความข้นเหลวคงที่ปกติ โดยที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบนี้จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบอื่นๆ ด้วย เช่น การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ เป็นต้น

มาตรฐานที่ใช้ : ASTM C187 Standard test method for normal consistency of hydraulic cement

อุปกรณ์ :

1) เครื่องชั่ง (Weight and weighting device) ที่สามารถชั่งได้ถึง 1,000 กรัม ความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2) กระบอกตวง (Glass graduate) ขนาด 200 หรือ 250 มิลลิลิตร

3) ชุดเครื่องมือไวแคท (Vicat apparatus)

4) เครื่องผสมซีเมนต์ (Mixer)

5) เกรียงเหล็ก (Trowel)

6) นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch)

7) ถุงมือยาง (Rubber glove)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus)

ขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เพสต์ :

1) ติดตั้งใบพาย (paddle) และหม้อผสม (bowl) ในสภาพแห้งให้อยู่ในตำแหน่งที่พร้อมผสมซีเมนต์เพสต์

2) เทปริมาณน้ำที่ใช้ผสมทั้งหมดลงในชามผสมและเติมปูนซีเมนต์จำนวน 650 กรัม ลงในน้ำปล่อยทิ้งไว้ 30 วินาที เพื่อให้น้ำซึมเข้าสู่เม็ดปูนอย่างทั่วถึง

3) เปิดเครื่องผสมที่ความเร็วรอบต่ำ (ประมาณ 140 ± 5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นหยุดเครื่องเป็นเวลา 15 วินาที ในช่วงเวลานี้ให้ปาดซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ข้างหม้อและใบพายลงไปรวมไว้ที่ตรงกลาง

4) เปิดเครื่องผสมอีกครั้งด้วยความเร็วรอบปานกลาง (ประมาณ 285 ± 10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที

การบรรจุตัวอย่างทดสอบใส่แบบทดสอบรูปกรวย :

1) ปั้นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมตามขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เพสต์ให้มีลักษณะเป็นก้อนกลมโดยการใช้มือที่สวมถุงมือนั้น แล้วโยนข้ามไปข้ามมาระหว่างมือทั้งสองข้างที่ห่างกันประมาณ 15 ซม. จำนวน 6 ครั้ง

2) นำซีเมนต์เพสต์ที่ปั้นแล้ววางไว้บนฝ่ามือข้างหนึ่งไปกดลงในแบบกรวยทางด้านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างกว่าจนซีเมนต์เพสต์เต็มแบบ แล้วปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินของกรวยด้านกว้างด้วยฝ่ามือหนึ่งครั้ง

3) นำแบบกรวยปลายเปิดด้านกว้างวางลงบนแผ่นกระจกใส ขยับให้ขอบแบบกรวยแนบสนิทกับแผ่นกระจกแล้วปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินทางด้านบนของกรวย (ด้านเล็ก) หนึ่งครั้งโดยใช้เกรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กเผยอทำมุมเล็กน้อยกับขอบแบบกรวย แล้วอาจแต่งผิวให้เรียบโดยใช้ปลายเกรียงแต่งเบาๆ โดยที่ห้ามออกแรงกดบนผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์

วิธีการทดสอบ :

1) เขียนกราฟของเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำ (Percentage of water) ในแกนตั้งและระยะจมตัวของเข็มไวแคท (Penetretion of Vicat Rod) ในแกนนอน เพื่อที่คำนวณหาค่าความข้นเหลวปกติที่ถูกต้อง

2) เปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่ใช้ให้ระบุโดยมีความละเอียดถึงร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์แห้ง

3) ค่าความข้นเหลวปกติให้ระบุโดยมีความละเอียดถึงร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักของปูนซีเมนต์แห้ง

3.3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ (Test Method of Setting Time of Cement)

วัตถุประสงค์ : เพื่อทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์

มาตรฐานที่ใช้ : ASTM C191-01a Standard Test Method for time of Setting of Hydraulic Cement By Vicat Needle

อุปกรณ์ :

1) เครื่องชั่ง (Weight and Weighting Device) ที่สามารถชั่งได้ถึง 1,000 กรัม ความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2) กระบอกตวง (Glass Graduate) ขนาด 200 หรือ 250 มิลลิลิตร

3) ชุดเครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus)

4) เครื่องผสมซีเมนต์ (Mixer)

5) เกรียงเหล็ก (Trowel)

6) นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch)

7) ถุงมือยาง (Rubber Glove)

การเตรียมตัวอย่าง :

1) ติดตั้งใบพาย (paddle) และหม้อผสม (bowl) ในสภาพแห้งให้อยู่ในตำแหน่งที่พร้อมผสมซีเมนต์เพสต์

2) เทปริมาณน้ำที่ก่อให้เกิดความข้นเหลวปกติของซีเมนต์ทั้งหมดลงในชามผสม และเติมปูนซีเมนต์จำนวน 500 กรัม ลงในน้ำ ปล่อยทิ้งไว้ 30 วินาที เพื่อให้น้ำซึมเข้าสู่เม็ดปูนอย่างทั่วถึง

3) เปิดเครื่องผสมที่ความเร็วรอบต่ำ (ประมาณ 140 ± 5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นหยุดเครื่องเป็นเวลา 15 วินาที ในช่วงเวลานี้ให้ปาดซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ข้างหม้อและใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พายลงไปรวมไว้ที่ตรงกลางเปิดเครื่องผสมอีกครั้งด้วยความเร็วรอบปานกลาง (ประมาณ 285 ± 10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที

4) ปั้นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมตามขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เพสต์ให้มีลักษณะเป็นก้อนกลมโดยการใช้มือที่สวมถุงมือนั้น แล้วโยนข้ามไปข้ามมาระหว่างมือทั้งสองข้างที่ห่างกันประมาณ 15 ซั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง

5) นำซีเมนต์เพสต์ที่ปั้นแล้ววางไว้บนฝ่ามือข้างหนึ่งไปกดลงในแบบกรวยทางด้านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างกว่าจนซีเมนต์เพสต์เต็มแบบ แล้วปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินของกรวยด้านกว้างด้วยฝ่ามือหนึ่งครั้งนำแบบกรวยปลายเปิดด้านกว้างวางลงบนแผ่นกระจกใส ขยับให้ขอบแบบกรวยแนบสนิทกับแผ่นกระจกแล้วปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินทางด้านบนของกรวย (ด้านเล็ก) หนึ่งครั้งโดยใช้เกรียงเหล็กเผยอทำมุมเล็กน้อยกับขอบแบบกรวย แล้วอาจแต่งผิวให้เรียบโดยใช้ปลายเกรียงแต่งเบาๆ โดยที่ห้ามออกแรงกดบนผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์

วิธีการทดสอบ :

การคำนวณระยะเวลาเริ่มก่อตัว (Initial Setting Time)

1) วางแบบกรวยทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาทีหลังจากบรรจุซีเมนต์เพสต์ลงในแบบโดยปราศจากการรบกวน ต่อจากนั้นนำเข็มทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร แตะกับผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์แล้วล็อกเข็มไว้

2) ปรับตัวบอกระยะจมบนแผ่นสเกลให้ชี้ที่เลขศูนย์(ด้านบน) แล้วปล่อยให้เข็มทดสอบทันที

3) บันทึกระยะเวลาหลังการผสม (Elapsed Time) ตั้งแต่น้ำผสมกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่หลังจากปล่อยเข็มไปแล้วเป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นทำซ้ำโดยปล่อยเข็มทดสอบทุกๆ 15 นาที (10 นาทีสำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3) จนกระทั่งระยะจมเท่ากับ 25 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่าจุดที่ทดสอบต้องห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 9.5 มม. (3/8 นิ้ว)

หมายเหตุ : ระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้ทดสอบการจมตัวต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 6.4 มิลลิเมตร (1/4 นิ้ว)

4) บันทึกผลระยะการจมตัวทุกครั้งและคำนวณเวลาที่ก่อให้เกิดระยะจม 25 มิลลิเมตร โดยวิธีเขียนกราฟ

การคำนวณระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) :

วิธีการทดสอบเหมือนกับวิธีการคำนวณระยะเวลาเริ่มก่อตัว โดยเปลี่ยนเข็มทดสอบเป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบการก่อตัวสุดท้าย

จุดก่อตัวสุดท้าย คือ จุดที่เข็มทดสอบมาตรฐานไม่สามารถจมตัวลงในซีเมนต์ เพียงแต่ปรากฏเป็นรอยของขอบกลมเท่านั้น บันทึกเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มผสมน้ำกับปูนซีเมนต์จนถึงจุดก่อตัวสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Test for consistency of cement mortar)

วัตถุประสงค์ : เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์

มาตรฐานที่ใช้ : ASTM : C230-61T

อุปกรณ์ :

1) ปูนซีเมนต์ ใช้ครั้งละ 150 กรัม

2) ทราย ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100

3) โต๊ะควบคุมการไหล (Flow table)

4) เครื่องชั่งละเอียด 0.1 กรัม

5) เวอร์เนียคาลิเปอร์

6) นาฬิกาจับเวลา

7) เกรียงเหล็ก

8) ถุงมือยาง

9) เหล็กกระทุ้ง

รูปที่ 3.2 โต๊ะการไหล (Flow table)

การเตรียมมอร์ตาร์ :

1) เทน้ำทั้งหมดที่ใช้ผสมลงในชามผสม เติมปูนซีเมนต์และผสมที่ความเร็วรอบต่ำ (140 ± 5 รอบต่อนาที) ผสมเป็นเวลา 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เติมทรายลงในหม้อผสมทีละน้อยจนหมดภายในช่วงเวลา 30 วินาที โดยที่เครื่องผสมหมุนอยู่ที่ความเร็วรอบต่ำ

3) ปิดเครื่องผสม และเปลี่ยนความเร็วที่ใช้ผสมเป็นความเร็วรอบปานกลาง (285 ± 5 รอบต่อนาที) ผสมเป็นเวลา 30 วินาที

4) ปิดเครื่องผสมให้หยุดนิ่งเป็นเวลา 90 วินาที โดยที่ในช่วง 15 วินาทีแรกให้ขูดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ติดอยู่ข้างๆ หม้อผสมและที่พายให้มารวมกันอยู่ตรงกลาง แล้วนำภาชนะมาปิดหม้อผสมจนครบเวลาตามกำหนด

5) เปิดเครื่องผสมที่ความเร็วรอบปานกลาง ผสมเป็นเวลา 60 วินาที เป็นอันสิ้นสุดการผสม ทันทีที่ผสมเสร็จ รีบนำมอร์ตาร์ที่ได้ไปหล่อลงในแบบหล่อ

การคำนวณการไหลตามมาตรฐาน ASTM C 1437 (Standard test method for flow of hydraulic cement mortar) :

1) ทำความสะอาดโต๊ะการไหล (Flow table) และแบบหล่อรูปกรวย (Flow mold) แล้ววางแบบหล่อรูปกรวยไว้ตรงกลางของโต๊ะการไหล

2) ใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อรูปกรวยชั้นแรกหนา 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งจำนวน 20 ครั้ง ให้ซีเมนต์มอร์ตาร์แผ่เต็มแบบ ต่อจากนั้นใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์อีกชั้นหนึ่งจนล้นกระทุ้งอีก 20 ครั้ง แล้วปาดหน้าให้เรียบเสมอขอบบนของแบบหล่อรูปกรวยด้วยเกรียงเหล็ก

3) ทำความสะอาดโต๊ะการไหลให้สะอาดโดยรอบตัวอย่างระหว่างการรอเพื่อทำการทดสอบขั้นถัดไป โดยเมื่อครบเวลา 1 นาที ให้ยกแบบหล่อรูปกรวยขึ้นตรงๆ

4) หมุนให้แท่นของโต๊ะการไหล ยกตัวสูงขึ้น 13 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) จำนวน 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที

5) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไหลแผ่อยู่บนแท่นจำนวน 4 ค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\text{เปอร์เซ็นต์การไหลแผ่ (\%Flow)} = \frac{(D1-D0)}{D0} \times 100$$

โดย

D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย

D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่เฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจายบนโต๊ะการไหล

3.3.4 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ (Test Method of Compressive Strength of Mortar)

วัตถุประสงค์ : เพื่อคำนวณกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้แบบหล่อทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)

มาตรฐานที่ใช้ : ASTM C109/C109M-02 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or (50-mm) cube specimens)

อุปกรณ์ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เครื่องชั่ง (Balance) ที่สามารถชั่งได้อย่างน้อย 2 กิโลกรัม และอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

2) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Testing Machine)

3) แบบหล่อก้อนทดสอบ (Cube Mold) ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)

4) เหล็กกระทุ้ง (Tamper) ทำจากวัสดุที่ไม่ดูดน้ำไม่สึกหรอเมื่อถูกเสียดสี และไม่เปราะหักง่าย เช่น ทำด้วยยางแข็ง ขนาดประมาณ 1/2" x 1"

5) กระบอกตวง (Glass Graduate)

6) เกรียงเหล็ก (Trowel)

7) ตะแกรง (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM เบอร์ 16, 30, 40, 50 และ 100

รูปที่ 3.3 แบบหล่อก้อนทดสอบ (Cube mold) ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 มม.(2 นิ้ว)

การเตรียมมอร์ตาร์ :

1) เตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์ จากปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทราย 2.75 ส่วน ใช้ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100โดยใช้ปริมาณน้ำที่ได้จากการทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์

2) ผสมปูนซีเมนต์กับทราย กองเป็นแอ่งตรงกลาง เติมน้ำลงในแอ่ง ใช้มือที่สวมถุงมือยางผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ให้เข้ากันภายในเวลา 90 วินาที

วิธีการทดสอบ :

การหล่อก้อนทดสอบ

1) เทซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อก้อนทดสอบ 2 ชั้น ชั้นแรก หนาประมาณ 25 มิลลิเมตร (1นิ้ว) หรือครึ่งหนึ่งของความลึกของแบบและกระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง (รอบละ 8 ครั้ง จำนวน 4 รอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในเวลา 10 วินาที ซึ่งแต่ละครั้งในการกระทุ้งจะเวียนขวา น้ำหนักของการกระทุ้งให้แรงพอที่จะให้มอร์ตาร์แผ่กระจายทั่วแบบ เมื่อกระทุ้งครบ 4 รอบแล้วจึงกระทุ้งช่องต่อไป

2) เทซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เหลือลงในแบบหล่อ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับขั้นแรก โดยเมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ซีเมนต์มอร์ตาร์อยู่สูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย

3) ใช้เกรียงเหล็กปาดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ล้นติดจอบแบบลงมาในแบบแล้วปาดผิวหน้าให้เรียบครึ่งหนึ่งโดยเผยอเกรียงด้านนำเล็กน้อยตั้งฉากกับด้านยาวของแบบหล่อ

4) ถ้าต้องการให้ผิวหน้าของแบบหล่อเรียบมากขึ้นให้ใช้เกรียงปาดเบาๆ ตลอดความยาวของแบบหล่อหนึ่งครั้งหลังจากนั้นตัดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบโดยใช้ขอบด้านตรงของเกรียงวางเกือบตั้งฉากกับแบบหล่อ ขยับเกรียงไป-มา ตลอดความยาวแบบหล่อ

การเก็บรักษาตัวอย่าง :

หลังจากหล่อก้อนตัวอย่างเรียบร้อย รีบเก็บแบบหล่อไว้ในห้องบ่มชื้นเป็นเวลา 20-72 ชั่วโมง ป้องกันไม่ให้น้ำหยดโดนผิวของก้อนตัวอย่าง หากต้องการถอดแบบหล่อก่อน 24 ชั่วโมง ให้เก็บก้อนตัวอย่างไว้ห้องบ่มชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปแช่น้ำ ยกเว้นก้อนตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 24 ชั่วโมง

การทดสอบกำลังอัด :

1) ทดสอบกำลังอัดของก้อนทดสอบทันทีที่นำออกจากห้องบ่มชื้น (ในกรณีก้อนตัวอย่างอายุ 1 วัน)หรือจากถังน้ำบ่ม(ในกรณีอายุของก้อนตัวอย่างมากกว่า 1 วัน)

2) เช็ดผิวของก้อนทดสอบให้อยู่ในสภาพแห้ง (Surface – Dry Condition) ปัดเอาเม็ดทรายหรือสะเก็ดที่ผิวหน้าออกถ้าผิวไม่เรียบให้ฝนให้เรียบและผิวบน-ล่าง ต้องขนานกัน

3) วัดขนาดความกว้างของก้อนทดสอบและชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ

4) นำก้อนทดสอบเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด วางก้อนทดสอบให้อยู่ในแนวศูนย์กลางและสัมผัสกับแป้นกดเดินเครื่องด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ จนกระทั่งก้อนทดสอบแตกใช้เวลาประมาณ 20-80 วินาที ต่อหนึ่งตัวอย่าง

การคำนวณ :

บันทึกค่ากำลังอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบและคำนวณค่ากำลังอัด ดังนี้

โดยที่ $f_m = \frac{P}{A}$

f_m คือ กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ (กก./ตร.ซม.)

P คือ แรงอัดสูงสุด (กก.)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตร.ซม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ขนาดคละ Fineness Modulus 2.75 (Test Method of Compressive Strength of Mortar)

วัตถุประสงค์ : เพื่อคำนวณกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้แบบหล่อทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)

มาตรฐานที่ใช้ : ASTM C109/C109M-02 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or (50-mm) cube specimens)

อุปกรณ์ :

1) เครื่องชั่ง (Balance) ที่สามารถชั่งได้อย่างน้อย 2 กิโลกรัม ความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression testing machine)

3) แบบหล่อก้อนทดสอบ (Cube mold) ทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)

4) เหล็กกระทุ้ง (Tamper) ทำจากวัสดุที่ไม่ดูดน้ำไม่สึกหรอเมื่อถูกเสียดสี และไม่เปราะหักง่าย เช่น ทำด้วยยางแข็ง ขนาดประมาณ 1/2" x 1"

5) กระบอกตวง (Glass graduate)

6) เกรียงเหล็ก (Trowel)

7) ตะแกรง (Sieve) ตามมารตฐาน ASTM เบอร์ 16, 30, 40, 50 และ 100

การเตรียมมอร์ตาร์ :

1) เตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์ จากปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทราย 2.75 ส่วน ใช้ทรายที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ได้จากการทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์

2) ผสมปูนซีเมนต์กับทราย กองเป็นแอ่งตรงกลาง เติมน้ำลงในแอ่ง ใช้มือที่สวมถุงมือยางผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ให้เข้ากันภายในเวลา 90 วินาที

วิธีการทดสอบ :

การหล่อก้อนทดสอบ

1) เทซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อก้อนทดสอบ 2 ชั้น ชั้นแรก หนาประมาณ 25 มิลลิเมตร (1นิ้ว) หรือครึ่งหนึ่งของความลึกของแบบและกระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง (รอบละ 8 ครั้ง จำนวน 4 รอบ) ภายในเวลา 10 วินาที ซึ่งแต่ละครั้งในการกระทุ้งจะเวียนขวา น้ำหนักของการกระทุ้งให้แรงพอที่จะให้มอร์ตาร์แผ่กระจายทั่วแบบ เมื่อกระทุ้งครบ 4 รอบแล้วจึงกระทุ้งช่องต่อไป

2) เทซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เหลือลงในแบบหล่อ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับขั้นแรก โดยเมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ซีเมนต์มอร์ตาร์อยู่สูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย

3) ใช้เกรียงเหล็กปาดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ล้นติดจอบแบบลงมาในแบบแล้วปาดผิวหน้าให้เรียบครึ่งหนึ่งโดยเผยอเกรียงด้านนำเล็กน้อยตั้งฉากกับด้านยาวของแบบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ถ้าต้องการให้ผิวหน้าของแบบหล่อเรียบมากขึ้นให้ใช้เกรียงปาดเบาๆ ตลอดความยาวของแบบหล่อหนึ่งครั้งหลังจากนั้นตัดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบโดยใช้ขอบด้านตรงของเกรียงวางเกือบตั้งฉากกับแบบหล่อ ขยับเกรียงไป-มา ตลอดความยาวแบบหล่อ

การเก็บรักษาตัวอย่าง :

หลังจากหล่อก้อนตัวอย่างเรียบร้อย รีบเก็บแบบหล่อไว้ในห้องบ่มชื้นเป็นเวลา 20-72 ชั่วโมง ป้องกันไม่ให้น้ำหยดโดนผิวของก้อนตัวอย่าง หากต้องการถอดแบบหล่อก่อน 24 ชั่วโมง ให้เก็บก้อนตัวอย่างไว้ห้องบ่มชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปแช่น้ำ ยกเว้นก้อนตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 24 ชั่วโมง

การทดสอบกำลังอัด :

1) ทดสอบกำลังอัดของก้อนทดสอบทันทีที่นำออกจากห้องบ่มชื้น (ในกรณีก้อนตัวอย่างอายุ 1 วัน) หรือจากถังน้ำบ่ม (ในกรณีอายุของก้อนตัวอย่างมากกว่า 1 วัน)

2) เช็ดผิวของก้อนทดสอบให้อยู่ในสภาพแห้ง (Surface – Dry Condition) ปัดเอาเม็ดทรายหรือสะเก็ดที่ผิวหน้าออกถ้าผิวไม่เรียบให้ฝนให้เรียบและผิวบน-ล่าง ต้องขนานกัน

3) วัดขนาดความกว้างของก้อนทดสอบและชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ

4) นำก้อนทดสอบเข้าเครื่องทดสอบกำลังอัด วางก้อนทดสอบให้อยู่ในแนวศูนย์กลางและสัมผัสกับแป้นกดเดินเครื่องด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ จนกระทั่งก้อนทดสอบแตกใช้เวลาประมาณ 20-80 วินาที ต่อหนึ่งตัวอย่าง

การคำนวณ :

บันทึกค่ากำลังอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบและคำนวณค่ากำลังอัด ดังนี้

โดยที่ $f_m = \frac{P}{A}$

f_m คือ กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ (กก./ตร.ซม.)

P คือ แรงอัดสูงสุด (กก.)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตร.ซม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการดำเนินโครงงาน

การศึกษากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของคอนกรีตสด ใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของคอนกรีตแทน โดยมีการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ปูนซีเมนต์สูตรไฮบริด และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ 10 ชนิดคือ

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง (0-hour recycled portland cement type 1)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง (1-hour recycled portland cement type 1)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง (2-hour recycled portland cement type 1)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง (3-hour recycled portland cement type 1)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง (4-hour recycled portland cement type 1)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง (5-hour recycled portland cement type 1)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D อายุ 1 ชั่วโมง (1-hour recycled portland cement type 1 with admixture A and D)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D อายุ 3 ชั่วโมง (3-hour recycled portland cement type 1 with admixture A and D)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D อายุ 5 ชั่วโมง (5-hour recycled portland cement type 1 with admixture A and D)
- ปูนซีเมนต์สูตรไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง (0-hour recycled hybrid cement)

โดยใช้การทดสอบปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยีตามมาตรฐาน ASTM ประกอบด้วย ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ (consistency of cement paste) ระยะเวลาก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ (setting time of cement paste) ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ (consistency of cement mortar) และกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ (compressive strength of cement mortar) มีผลการทดสอบดังแสดงในบทนี้

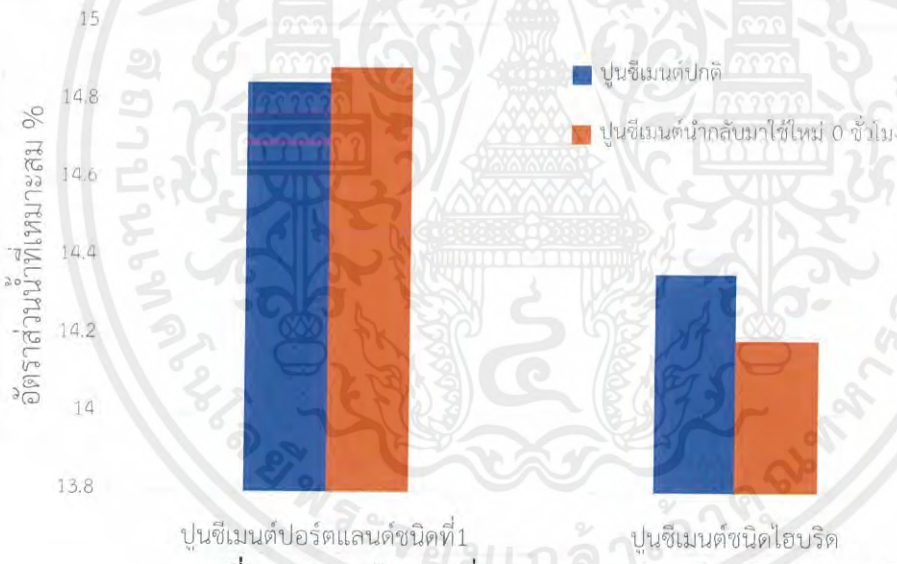
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ชนิดปูนซีเมนต์

4.1.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Consistency of cement mortar)

ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์คือ ความเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมด้วยอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสม มีลักษณะไม่แห้งและไม่เหลวมากเกินไป ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้มีประสิทธิภาพดี เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้ โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่ออัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ในการผสมเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ และนำค่าอัตราส่วนน้ำที่ได้ไปใช้ในการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป ค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์คือ ค่าความข้นเหลวที่ทำให้อัตราการกระจายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์อยู่ระหว่างร้อยละ 5 - 15

จากการทดลองหาค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ต้าของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด ในการผสมเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ มีค่าความข้นเหลวดังแสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิด

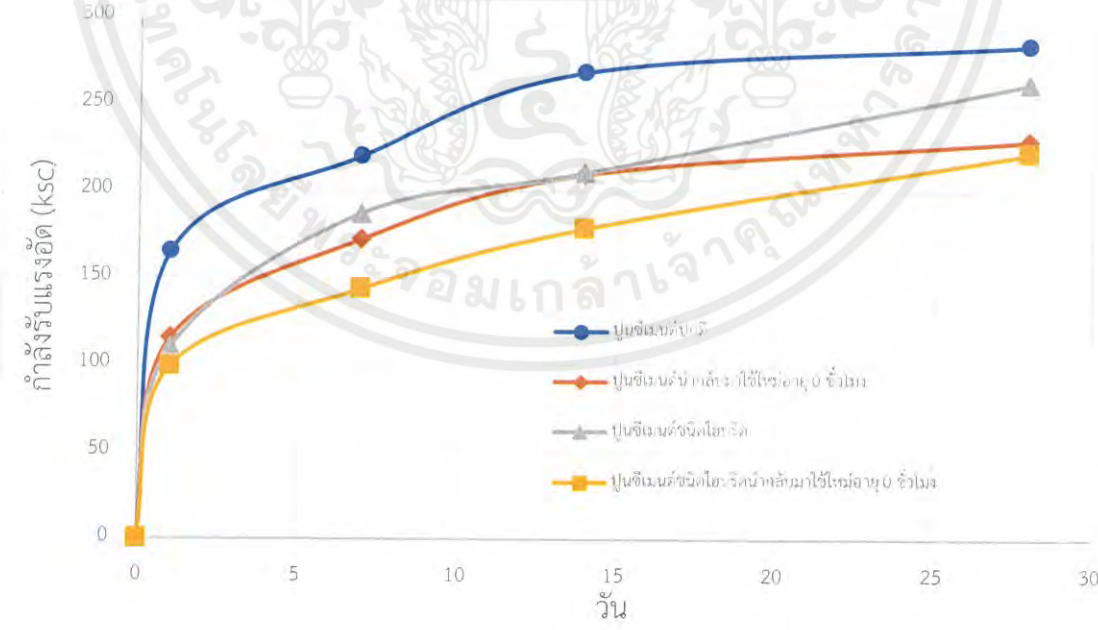
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อัตราส่วนน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปกติ	14.85
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	14.89
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด	14.36
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	14.19

จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ มีค่าอัตราส่วนน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 14 – 15 โดยปูนซีเมนต์ปกติใช้อัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด

4.1.2 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Compressive strength of cement mortar) กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ คือความสามารถในการรับน้ำหนักในรูปแบบของแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ดีควรมีกำลังรับแรงอัดสูง มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน จากการทดลองหากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด มีกำลังรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อายุการบ่ม (วัน)			
	1	7	14	28
ปูนซีเมนต์ปกติ	164.88	220.20	268.58	284.02
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	115.32	172.32	209.70	229.30
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด	110.00	199.73	186.99	262.11
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	99.20	143.94	178.71	222.21

หมายเหตุ หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

จากตารางที่ 4.2 มอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์จตาร์สูงกว่าปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริดทั้งแบบปกติ และหลังนำกลับมาใช้ใหม่

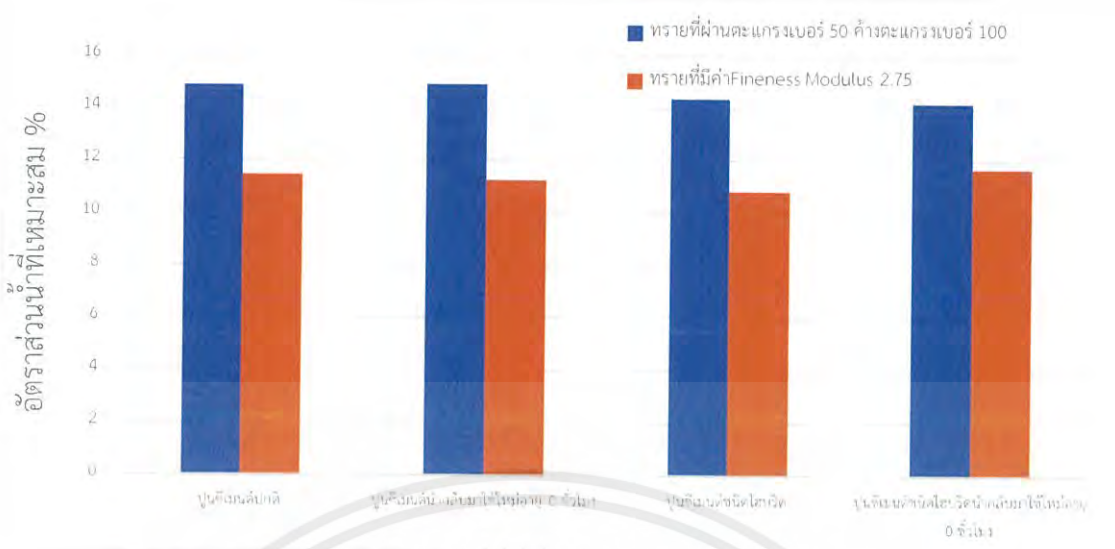
4.2 ขนาดคละ

4.2.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกัน

ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกันคือ ความเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมด้วยอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสม มีลักษณะไม่แห้งและไม่เหลวมากเกินไป ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้มีประสิทธิภาพดี เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้ โดยเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 กับมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่มีค่า Fineness Modulus เท่ากับ 2.75 ว่ามีความข้นเหลวแตกต่างกันอย่างไร

จากการทดลองหาค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 กับมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่มีค่า Fineness Modulus เท่ากับ 2.75 มีค่าความข้นเหลวดังแสดงในรูปที่ 4.3 และในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละแตกต่างกันที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	ขนาดคละของมอร์ตาร์	
	ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100	ทรายที่มีค่า Fineness Modulus 2.75
ปูนซีเมนต์ปกติ	14.85	11.44
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	14.89	11.25
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด	14.36	10.83
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	14.19	11.7

หมายเหตุ หน่วยร้อยละ (%)

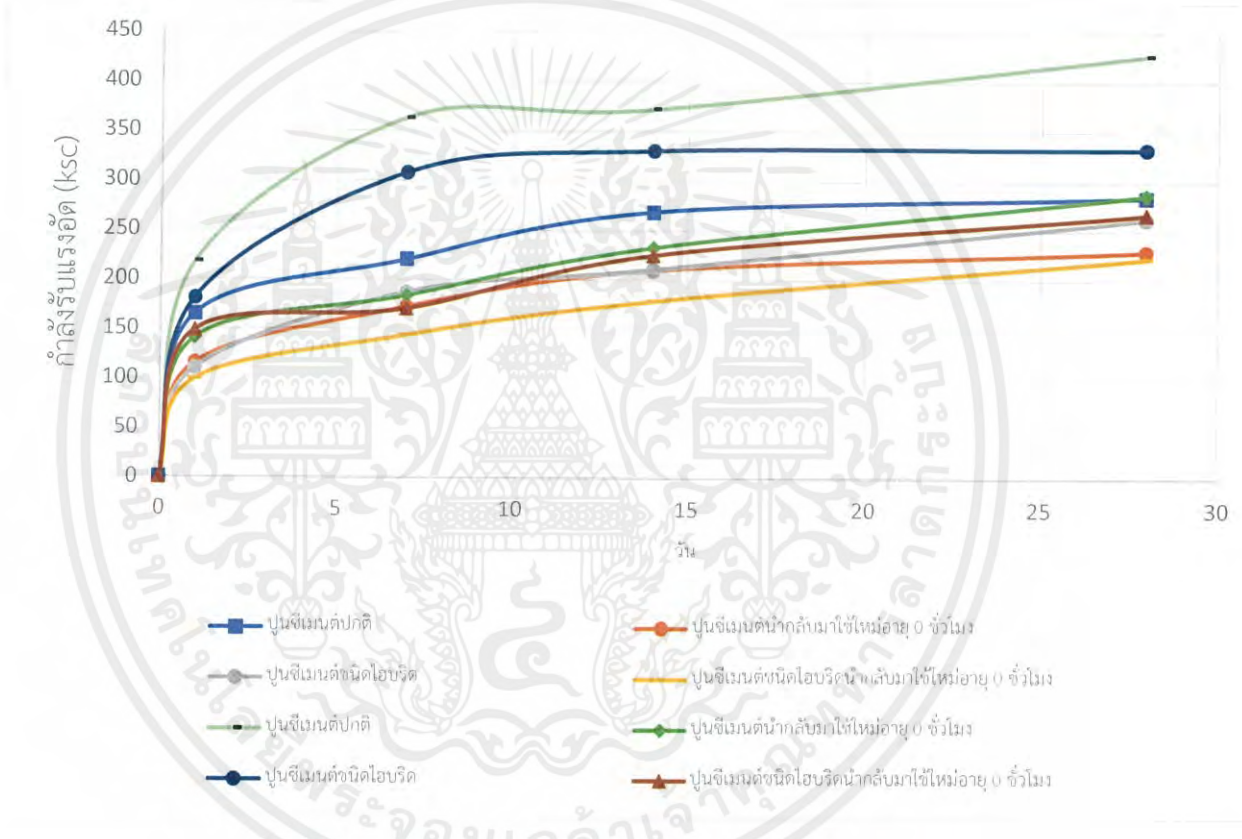
จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ขนาดคละเป็นทรายผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 มีค่าอัตราส่วนน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 14 – 15 ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ขนาดคละเป็นทรายที่มีค่า Fineness Modulus 2.75 มีค่าอัตราส่วนน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 12 ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 ใช้ปริมาณน้ำมากกว่าทรายที่มีค่า Fineness Modulus 2.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 กำลังอัดของมอร์ต้าแบบขนาดคละที่แตกต่างกัน

กำลังอัดของมอร์ต้าแบบขนาดคละที่แตกต่างกันคือ ความสามารถในการรับน้ำหนักในรูปแบบของแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 กับมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่มีค่า Fineness Modulus เท่ากับ 2.75 ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร

จากการทดลองหากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 กับมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่มีค่า Fineness Modulus เท่ากับ 2.75 มีกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละขนาดคละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละขนาดคละที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อายุการบ่ม (วัน)			
	1	7	14	28
- ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100				
ปูนซีเมนต์ปกติ	164.88	220.2	268.58	284.02
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	115.32	172.32	209.70	229.30
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด	110.00	186.99	210.73	262.11
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	99.20	143.94	178.71	222.21
- Fineness Modulus เท่ากับ 2.75				
ปูนซีเมนต์ปกติ	217.48	363.11	372.27	426.78
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	140.82	183.89	232.52	286.17
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริด	181.12	307.90	330.55	332.45
ปูนซีเมนต์ชนิดไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	148.70	170.56	224.81	266.74

หมายเหตุ หน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.4 มอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 และมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายที่มีค่า Fineness Modulus เท่ากับ 2.75 มีค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมอร์ตาร์ที่มีขนาดคละเป็นทรายผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมด้วยทรายที่มีค่า Fineness Modulus เท่ากับ 2.75 อย่างชัดเจน

4.3 เวลาที่เกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่น

4.3.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ (Consistency of cement paste)

ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ คือความเหลวของซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม มีลักษณะไม่แห้งและไม่เหลวมากเกินไป ทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้มีประสิทธิภาพดี โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองหาค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ ในการผสมเป็นซีเมนต์เพสต์ มีค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปกติ	31.10
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	34.37
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	41.33
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง	41.25
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	39.54
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง	39.32
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	44.34

จากตารางที่ 4.5 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์แต่ละชนิดมีค่าระหว่างร้อยละ 30 - 45 โดยปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ ชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงปูนปกติมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าอายุของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่มีผลต่ออัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ เพราะปูนซีเมนต์ที่มีอายุมากกว่าจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากกว่าปูนซีเมนต์ที่มีอายุน้อย ทำให้ต้องใช้อัตราส่วนน้ำน้ำที่มากขึ้นในการนำกลับมาใช้ใหม่

4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ (Setting time of cement paste)

ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมซีเมนต์เพสต์จนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัว หาได้จากระยะเวลาที่เข็ม needle จมลงไปในซีเมนต์เพสต์ 25±2 มิลลิเมตร ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 45 นาที แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ที่ผสมแล้วในการใช้งานจริง ไม่แข็งตัวช้าหรือเร็วเกินไป โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่อระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

จากการทดลองหาระยะเวลาในการก่อตัวขั้นต้นของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ มีระยะเวลาในการก่อตัวขั้นต้นดังแสดงในตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	ระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น (ชั่วโมง)
ปูนซีเมนต์ปกติ	2.12
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	2.13
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	2.15
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง	2.38
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	2.15
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง	2.23
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	3.57

จากตารางที่ 4.6 ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดโดยทั่วไปมีระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นอยู่ระหว่าง 2 – 2.6 ชั่วโมง โดยปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุตั้งแต่ 0 ถึง 4 ชั่วโมง มีช่วงเวลาการก่อตัวใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติ แต่ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง ใช้ระยะเวลาก่อตัวขั้นต้นมากกว่าปูนซีเมนต์ปกติมาก แสดงว่าการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่จะมีสูญเสียความสามารถในการก่อตัวทำให้ใช้เวลามากกว่าปกติ และปูนซีเมนต์ที่มีอายุมากจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไปแล้วมากกว่าปูนซีเมนต์ที่มีอายุน้อยทำให้ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีอายุมากมีระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นมากกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีอายุน้อย

4.3.3 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Consistency of cement mortar)

ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์คือ ความเหลวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมด้วยอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสม มีลักษณะไม่แห้งและไม่เหลวมากเกินไป ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้มีประสิทธิภาพดี เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้ โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่ออัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ในการผสมเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ และนำค่าอัตราส่วนน้ำที่ได้ไปใช้ในการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป ค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์คือ ค่าความข้นเหลวที่ทำให้อัตราการกระจายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์อยู่ระหว่างร้อยละ 5 - 15

จากการทดลองหาค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ ในการผสมเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ มีค่าความข้นเหลวดังแสดงในตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อัตราส่วนน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปกติ	14.85
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	14.89
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	16.14
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง	17.84
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	16.82
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง	17.05
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	17.81

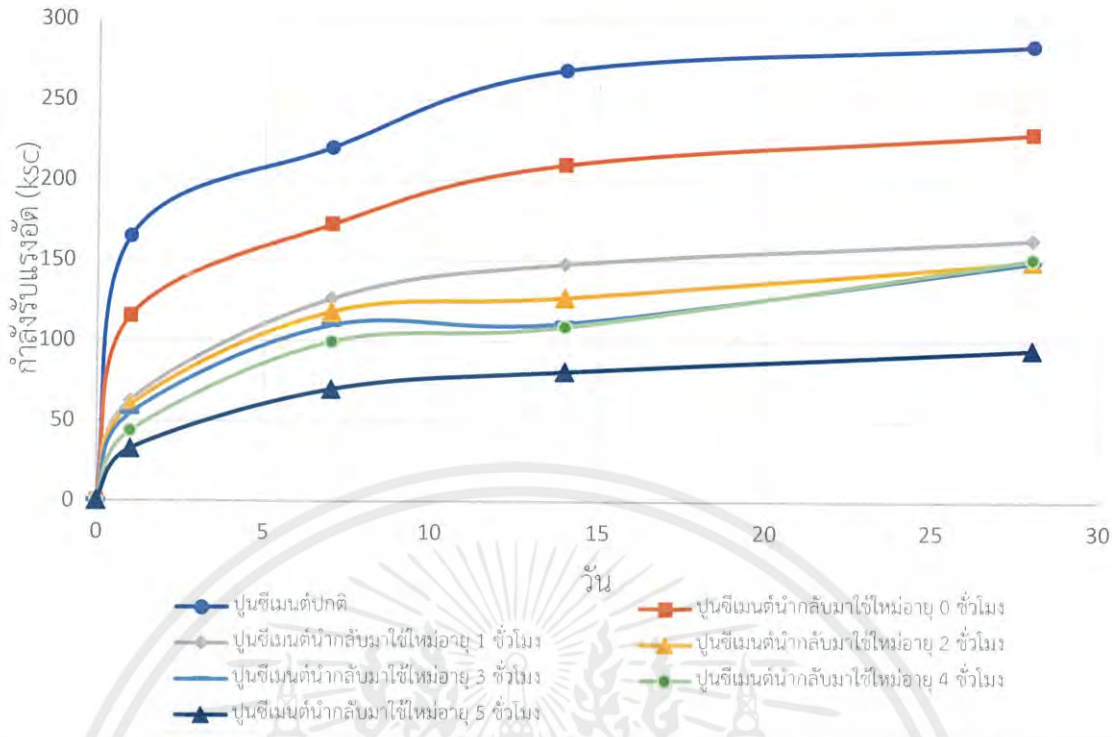
จากตารางที่ 4.7 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ มีค่าอัตราส่วนน้ำอยู่ระหว่างร้อนละ 14 – 18 ปูนซีเมนต์ที่มีอายุมากจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากกว่าปูนซีเมนต์ที่มีอายุน้อย ทำให้ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีอายุมากใช้อัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีอายุน้อย

4.3.4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Compressive strength of cement mortar)

กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ คือความสามารถในการรับน้ำหนักในรูปแบบของแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ดีควรมีกำลังรับแรงอัดสูง มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

จากการทดลองหากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ มีกำลังรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มและกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อายุการบ่ม (วัน)			
	1	7	14	28
ปูนซีเมนต์ปกติ	164.88	220.20	268.58	284.02
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	115.32	172.32	209.70	229.30
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	62.17	125.95	147.67	163.28
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง	59.29	117.96	126.96	150.00
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	54.23	109.6	111.12	149.42
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง	43.48	99.39	108.91	151.31
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	32.38	69.76	80.75	94.90

หมายเหตุ หน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.8 ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 0 ชั่วโมง จะมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าอายุของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ได้ โดยปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีอายุน้อยจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่า ทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่มีอายุมาก

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดในปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แต่ละชนิดเทียบกับปูนซีเมนต์ปกติ จึงมีการแสดงค่าความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติดังแสดงในตารางที่ 4.9 และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ค่าความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติ

ชนิดของปูนซีเมนต์	**อายุการบ่ม (วัน)**			
	1	7	14	28
ปูนซีเมนต์ปกติ	0	0	0	0
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	-49.56	-47.88	-58.88	-54.72
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	-102.71	-94.25	-120.91	-120.74
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง	-105.59	-102.24	-141.62	-134.02
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	-110.65	-110.60	-157.46	-134.60
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง	-121.40	-120.81	-159.67	-132.71
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	-132.50	-150.44	-187.83	-189.12

หมายเหตุ หน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติ

ชนิดของปูนซีเมนต์	อายุการบ่ม (วัน)			
	1	7	14	28
ปูนซีเมนต์ปกติ	0	0	0	0
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง	-30.06	-21.74	-21.92	-19.06
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	-62.29	-42.80	-45.02	-42.07
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง	-64.04	-46.43	-52.73	-46.69
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	-67.11	-50.23	-58.63	-46.90
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง	-73.63	-54.86	-59.45	-46.24
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	-80.36	-68.32	-69.93	-65.89

หมายเหตุ หน่วยร้อยละ (%)

จากตารางที่ 4.9 ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ทำการทดสอบมีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปกติ ทั้งนี้เป็นผลมาจากเวลา ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 0 ชั่วโมง มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติมากที่สุด โดยพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในตารางที่ 4.10 เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ 5 ชั่วโมงให้กำลังรับแรงอัดลดลง 65.89% เมื่อพิจารณาที่การบ่ม 28 วัน โดยร้อยละความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่เทียบกับกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปกติพบว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 0 ชั่วโมงมีร้อยละความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดลดลงน้อยที่สุดจากทุกชนิดของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปกติ พบว่าเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงยิ่งขึ้น

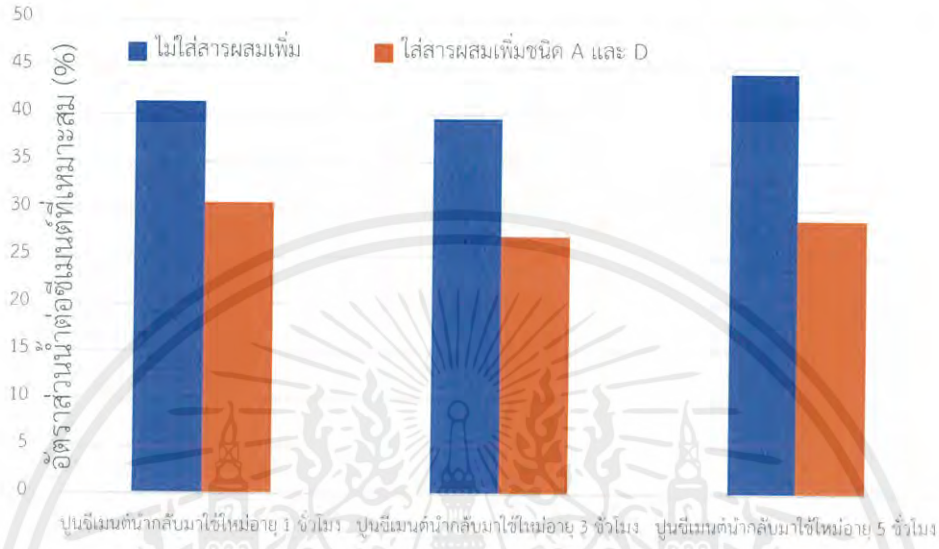
4.4 สารผสมเพิ่ม

4.4.1 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ (Consistency of cement paste)

ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ คือความเหลวของซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม มีลักษณะไม่แห้งและไม่เหลวมากเกินไป ทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้มีประสิทธิภาพดี โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองหาค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มมีค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.6 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.11 ความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดปูนซีเมนต์	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม (ร้อยละ)	
	ไม่ใส่สารผสมเพิ่ม	ใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	41.33	30.67
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	39.54	27.19
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	44.34	28.94

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.11 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์แต่ละชนิดมีค่าระหว่างร้อยละ 27 - 45 โดยจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่กับปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D ที่ อายุ 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง พบว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มมีค่าความข้นเหลวที่เหมาะสมน้อยกว่า

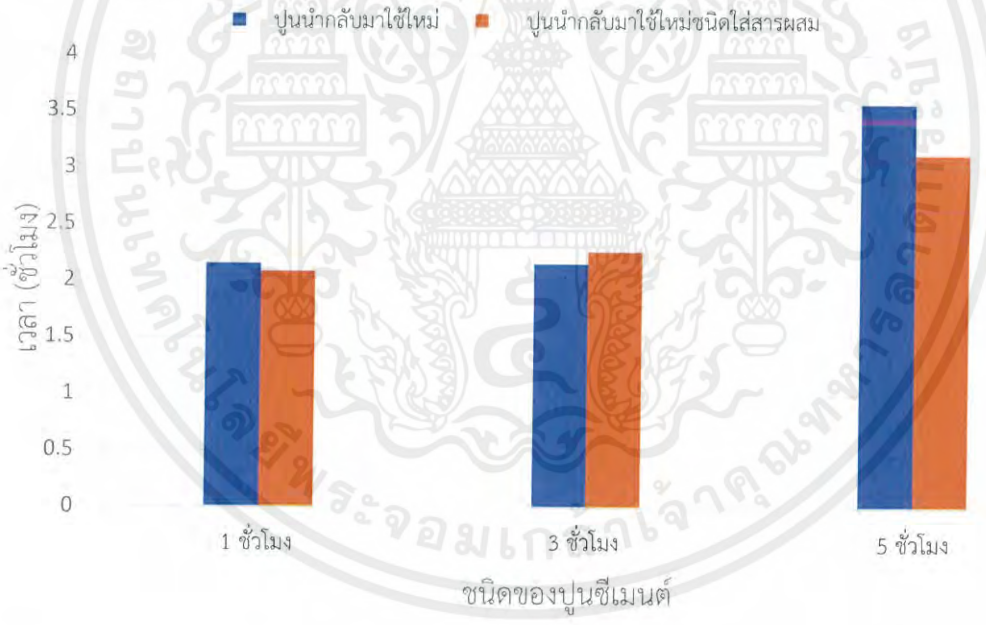
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบไม่ใส่สารผสมเพิ่มและมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติ แสดงให้เห็นว่าการใส่สารผสมเพิ่มสามารถรักษาปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ไว้ได้

4.4.2 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ไม่ใส่สารผสมเพิ่มและใส่สารผสมเพิ่ม

ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสไม่ใส่สารผสมเพิ่มและใส่สารผสมเพิ่มต์ คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมซีเมนต์เพสต์จนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัว หาได้จากระยะเวลาที่เข็ม needle จมลงไปในซีเมนต์เพสต์ 25±2 มิลลิเมตร ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 45 นาที แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ที่ผสมแล้วในการใช้งานจริง ไม่แข็งตัวช้าหรือเร็วเกินไป โดยเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นของระหว่างซีเมนต์เพสต์ไม่ใส่สารผสมเพิ่มและใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D

จากการทดลองหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ไม่ใส่สารผสมเพิ่มและใส่สารผสมเพิ่มมีระยะเวลาในการก่อตัวขั้นต้นดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.7 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	ระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น (ชั่วโมง)	
	ไม่ใส่สารผสมเพิ่ม	ใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	2.15	2.08
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	2.15	2.26
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	3.57	3.12

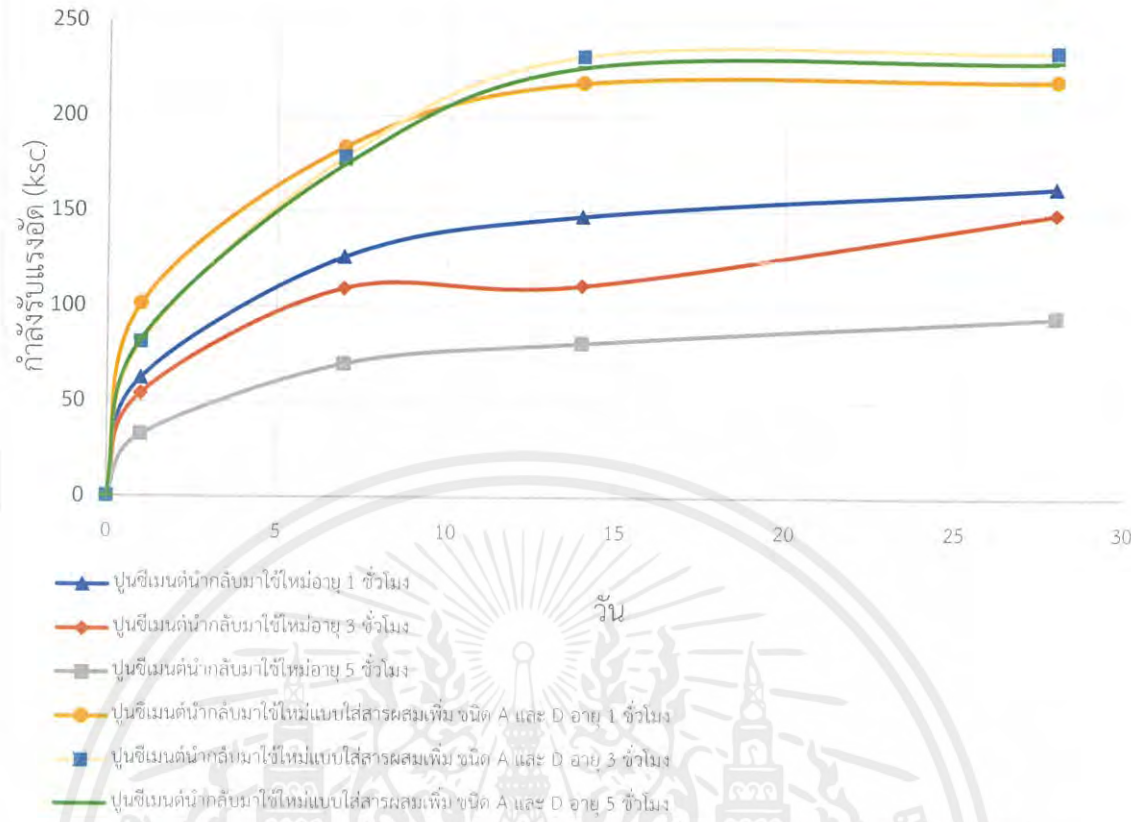
จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.12 ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ,3 และ 5 ชั่วโมง มีระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น 2.15 , 2.15 และ 3.57 ชั่วโมง ตามลำดับส่วนปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D อายุ 1 ,3 และ 5 ชั่วโมง มีระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น 2.08 ,2.26 และ 3.12 ชั่วโมงตามลำดับ แสดงว่าสารผสมเพิ่มชนิด A และ D ส่งผลต่อระยะการก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่เพียงเล็กน้อย เนื่องจากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ทั้งไม่ใส่สารผสมเพิ่มและใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D มีค่าใกล้เคียงกันมาก

4.4.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Compressive strength of cement mortar)

กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ คือความสามารถในการรับน้ำหนักในรูปแบบของแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ดีควรมีกำลังรับแรงอัดสูง มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน โครงงานนี้ทดสอบเพื่อศึกษาว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีผลอย่างไรต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

จากการทดลองหากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ มีกำลังรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มและกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

ตารางที่ 4.13 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง

ชนิดของปูนซีเมนต์	อายุการบ่ม (วัน)			
	1	7	14	28
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง	62.17	125.95	147.67	163.28
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง	54.23	109.60	111.12	149.42
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง	32.38	69.76	80.75	94.90
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่ม ชนิด A และ D อายุ 1 ชั่วโมง	101.22	183.85	217.70	219.38
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่ม ชนิด A และ D อายุ 3 ชั่วโมง	81.17	178.51	231.76	234.63
ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่ม ชนิด A และ D อายุ 5 ชั่วโมง	82.49	174.56	225.93	229.26

หมายเหตุ หน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่กับปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D ที่ อายุ 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง พบว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบไม่สารผสมเพิ่มอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใส่สารผสมเพิ่มมีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อย ทำให้สามารถรักษาความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ไม่ใส่สารผสมเพิ่ม

4.5 ค่าใช้จ่าย

ในขั้นตอนการทำการทดลองกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ มีขั้นตอนและกระบวนการแตกต่างกันในบางขั้นตอนซึ่งในบางขั้นตอนมีการใช้ทรัพยากรและค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน

จากการทดลองหากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำมอร์ตาร์ 1 ก้อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ซึ่งเป็นขนาดปกติที่ใช้ในการทดสอบของมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายที่ใช้จ่ายในกระบวนการทำมอร์ตาร์ 1 ก้อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่

ค่าใช้จ่าย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (บาท)	ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ (บาท)
1.ปูน	0.17	0
2.ทราย	2.57	2.57
3.ค่าไฟฟ้า	0	1.00
รวม	2.74	3.57

จากตารางที่ 4.14 ทำให้เราทราบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 กับปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ การนำกลับมาใช้ใหม่นั้นใช้ค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น 30% เนื่องจากการที่อุปกรณ์ยังไม่เอื้ออำนวยสำหรับการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่ ในอนาคตคาดว่าจะมีเครื่องที่เอื้ออำนวยต่อการนำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาและทดลองหาคุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่พบว่า คุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีคุณสมบัติในด้านของความข้นเหลวที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดซึ่งใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์แบบปกติซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของปูนได้ชัดเจนเมื่อนำไปใช้งานจริง พบว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยมีการผสมกับสารผสมเพิ่มนั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์แบบปกติมากกว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่แต่ไม่ได้ใส่สารผสมเพิ่มโดยค่าคุณสมบัติที่เห็นได้ชัดเจนนั้นเป็นในส่วนของความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์โดยมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติ ในส่วนของกำลังรับแรงอัดซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานจริงนั้นพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์กับการแบ่งประเภทของปูนซีเมนต์โดยในส่วนของปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งไม่ได้ใส่สารผสมเพิ่มและพบว่าการใส่สารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้งานใหม่นั้นส่งผลให้มีค่ากำลังรับน้อยกว่าปูนซีเมนต์แบบปกติอยู่ประมาณร้อยละ 20 เมื่อแยกพิจารณาปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่แบบใส่สารผสมเพิ่มในด้านอายุของปูนซีเมนต์นั้นพบว่าที่อายุ 1 และ 3 ชั่วโมงนั้นให้ค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติ โดยค่าคุณสมบัติที่เห็นได้ชัดเจนนั้นคือค่าของความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนเพสต์ และกำลังรับแรงอัดประลัยและเมื่อพิจารณาปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่แบบใช้ขนาดคละที่ต่างกันพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ขนาดคละที่มีค่า Fineness Modulus 2.75 มีค่ากำลังอัดมากกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 สรุปได้ว่าจากตัวอย่างที่นำมาศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยใส่สารผสมเพิ่มและมีอายุ 1 และ 3 ชั่วโมงจะให้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปกติมากที่สุดและที่ปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมงแบบใช้ขนาดคละที่ต่างกันพบว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ขนาดคละ Fineness Modulus 2.75 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่ที่ใช้ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์50และค้างตะแกรงเบอร์ 100 และพบว่าปูนปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ชนิดที่ 1 มีกำลังรับแรงอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์มากกว่าปูนซีเมนต์สูตรไฮบริด

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

ขั้นตอนการทำปูนซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่โดยการทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการอบแล้วมาบดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผงและนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆพบว่าขั้นตอนนี้ใช้เวลานานและเป็นปัญหาสำคัญในการทดลองหาค่าคุณสมบัติ

- การชำรุดของอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆของซีเมนต์ เช่น ตะแกรงเบอร์ 200 เครื่องผสมปูนขนาดเล็ก เตาอบ เป็นต้น

- สภาพอากาศและเวลาในการนำตัวอย่างไปทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดนั้นจำเป็นต้องนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำก่อนทดสอบเป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวแห้งพร้อมที่จะทดสอบซึ่งพบว่าหากฝนตกหรืออากาศมีความชื้นสูงจะส่งผลต่อตัวอย่างที่นำไปทดสอบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

- หากต้องการศึกษาคุณสมบัติการนำไปใช้งานจริงในแต่ละด้านควรมีการนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM ในส่วนของซีเมนต์เพสต์เพื่อการเลือกใช้งานแต่ละด้านได้อย่างเหมาะสม

- อาจมีการเพิ่มการทดสอบคุณสมบัติที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้คุณสมบัติของซีเมนต์ที่เหมาะจะนำไปใช้งานในแต่ละด้านให้มากที่สุด

- อาจมีการค้นคว้าวิธีการนำเสนอใหม่ๆเพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถมองเห็นภาพรวมของโครงงานได้ชัดเจนมากขึ้น

- ในปัจจุบันมีเครื่องจักรที่สามารถคัดแยกหินและทรายออกจากคอนกรีตสด เพื่อนำหินและทรายกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง แต่น้ำปูนที่เหลือจากกระบวนการคัดแยกดังกล่าว ยังคงเป็นของเสียในอุตสาหกรรมที่ต้องทิ้ง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำน้ำปูนที่เป็นของเสียเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

Angel Salesa " Mechanical properties of multi – recycled concrete from construction industry" 2560

Aynur Kazaz. "Current Metrod for the Utilization of Fresh Concrete Waste Returned to Batching Plants" 2559

Martha Georgiopoulou "Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study" 2560

Viviana Letelier "Mechanical Properties of Concretes with Recycled Aggregates"2560

คมสัน มาลีสี. 2557 Concrete Testing Laboratory. พิมพ์ครั้งที่4 กรุงเทพ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2548 Cement and Applications. พิมพ์ครั้งที่2 กรุงเทพ : บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548 ของเสียจากอุตสาหกรรมการก่อสร้าง กรุงเทพ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย" 2548

ปริญญา จินดาประเสริญ . 2556 ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต พิมพ์ครั้งที่7 กรุงเทพ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ปิติ สุคนธสุขกุล. 2556 คอนกรีต พิมพ์ครั้งที่2 กรุงเทพ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วินิต ช่อวิเชียร. 2539 คอนกรีตเทคโนโลยี กรุงเทพ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.1 การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ ผ.1.1 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปกติ

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	cc	
1	300	30	90	5.5
2	300	34	102	21.9
3	300	36	108	30.1

ตารางที่ ผ.1.2 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	cc	
1	300	30	30	2
2	300	35	105	14
3	300	40	120	16.8

ตารางที่ ผ.1.3 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	40	120	8
2	300	43	129	12.5
3	300	46	138	17

ตารางที่ ผ.1.4 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	40	120	6
2	300	45	135	22
3	300	48	144	31.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.1.5 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	39	117	8.5
2	300	40	120	11.3

ตารางที่ ผ.1.6 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	37	111	4
2	300	40	120	10.8
3	300	43	129	21

ตารางที่ ผ.1.7 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	40	120	0.2
2	300	45	135	9.3
3	300	50	150	25.5

ตารางที่ ผ.1.8 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมงแบบใส่สารหน่วงการก่อตัว

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	30	90	8
2	300	31	93	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.1.9 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมงแบบใส่สารหน่วงการก่อตัว

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	25	75	3
2	300	28	84	12.6
3	300	30	90	19

ตารางที่ ผ.1.10 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมงแบบใส่สารหน่วงการก่อตัว

Trial No.	Weight of cement (g)	Water		Penetration in 30 s (second)
		%	Cc	
1	300	28	84	5
2	300	31	93	21
3	300	34	102	37

ตารางที่ ผ.1.11 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ทุกประเภท

Type of sample	Water content (%)	Penetration (mm)
Ordinary cement	31.1	10
0-hr recycled cement	34.37	10
1-hr recycled cement	41.33	10
2-hr recycled cement	41.25	10
3-hr recycled cement	39.54	10
4-hr recycled cement	39.32	10
5-hr recycled cement	44.34	10
1-hr recycled cement with admixture	30.67	10
3-hr recycled cement with admixture	27.19	10
5-hr recycled cement with admixture	28.94	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ ผ.2.1 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
16.54	17.24	30	41
	17.39	45	41
	17.54	60	41
	18.09	75	41
	18.24	90	41
	18.39	105	37
	18.54	120	28
	19.09	135	4
		Setting time =	127

ตารางที่ ผ.2.2 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
16.39	17.09	30	41
	17.24	45	41
	17.39	60	41
	17.54	75	41
	18.09	90	35
	18.24	105	34
	18.39	120	26
	18.54	135	8
		Setting time =	128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2.3 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
20.50	21.20	30	41
	21.35	45	41
	21.50	60	41
	22.20	75	41
	22.35	90	41
	22.50	105	34
	23.05	120	5
		Setting time =	129

ตารางที่ ผ.2.4 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
20.55	21.25	30	41
	21.40	45	41
	21.55	60	41
	22.10	75	41
	22.25	90	41
	22.40	105	14
	22.55	120	39
	23.10	135	25
	23.25	150	9
		Setting time =	143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2.5 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
21.05	21.35	30	41
	21.50	45	41
	22.05	60	41
	22.20	75	41
	22.35	90	41
	22.50	105	41
	23.05	120	35
	23.20	135	5
		Setting time =	129

ตารางที่ ผ.2.6 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
17.02	17.32	30	41
	17.47	45	41
	18.02	60	41
	18.17	75	41
	18.32	90	41
	18.47	105	41
	19.02	120	24
	19.17	135	14
		Setting time =	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2.7 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
17.50	18.20	30	41
	18.35	45	41
	18.50	60	41
	19.05	75	41
	19.20	90	41
	19.35	105	41
	19.50	120	41
	20.05	135	41
	20.20	150	41
	20.35	165	36
	20.50	180	32
	21.05	195	18
	21.20	210	11
	21.35	225	4
		Setting time =	214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2.8 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
23.30	24.00	30	41
	24.15	45	41
	24.45	60	41
	1.00	75	41
	1.15	90	38
	1.30	105	36
	1.45	120	20
	2.00	135	8
		Setting time =	125

ตารางที่ ผ.2.9 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
22.53	23.23	30	41
	23.38	45	41
	23.53	60	38
	24.08	75	38
	24.23	90	36
	24.38	105	34
	24.53	120	34
	01.08	135	18
	01.23	150	14
		Setting time =	135.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2.10 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์จากปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่มชนิด A และ D

Mixing time	Time at testing	Total time after mixing (min)	Penetration in 30 s (mm)
22.42	23.12	30	41
	23.27	45	41
	23.42	60	41
	23.57	75	41
	24.12	90	41
	24.27	105	39
	24.42	120	38
	24.57	135	37
	01.12	150	35
	01.27	165	35
	01.42	180	23
	01.57	195	8
		Setting time =	187

ตารางที่ ผ.2.11 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นของซีเมนต์เพสต์ทุกประเภท

Type of sample	Setting time (min)	Setting time (hour)
Ordinary cement	127	2.12
0-hr recycled cement	128	2.13
1-hr recycled cement	129	2.15
2-hr recycled cement	143	2.38
3-hr recycled cement	129	2.15
4-hr recycled cement	134	2.23
5-hr recycled cement	214	3.57
1-hr recycled cement with admixture	125	2.08
3-hr recycled cement with admixture	135.5	2.26
5-hr recycled cement with admixture	187	3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.3 การทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

ตารางที่ ผ.3.1 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	15	84	10.0	11.01	10.1
2	150	412.5	14	79	10.0	10.45	4.5

ตารางที่ ผ.3.2 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 0 ชั่วโมง

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	13	73	10.0	11.12	11.2
2	150	412.5	14	79	10.0	10.44	4.4
3	150	412.5	15	84	10.0	10.16	1.6

ตารางที่ ผ.3.3 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	15.5	87	10.0	12.13	21.3
2	150	412.5	17	96	10.0	10.15	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.4 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	20	113	10.0	13.41	34.1
2	150	412.5	17	96	10.0	10.06	0.6

ตารางที่ ผ.3.5 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมง

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	18	101	10.0	12.22	22.2
2	150	412.5	16.5	93	10.0	10.66	6.6

ตารางที่ ผ.3.6 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	20	113	10.0	12.59	25.9
2	150	412.5	17	96	10.0	10.72	7.2
3	150	412.5	15	84	10.0	10.13	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3.7 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	20	113	10.0	12.55	25.5
2	150	412.5	17	96	10.0	10.43	4.3

ตารางที่ ผ.3.8 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมงแบบใส่สารหน่วงการก่อตัว

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	16	90	10.0	11.46	14.6
2	150	412.5	15.75	89	10.0	11.37	13.7
3	150	412.5	15.5	87	10.0	10.5	5

ตารางที่ ผ.3.9 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมงแบบใส่สารหน่วงการก่อตัว

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	18	101	10.0	13.65	36.5
2	150	412.5	16	90	10.0	10.92	9.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

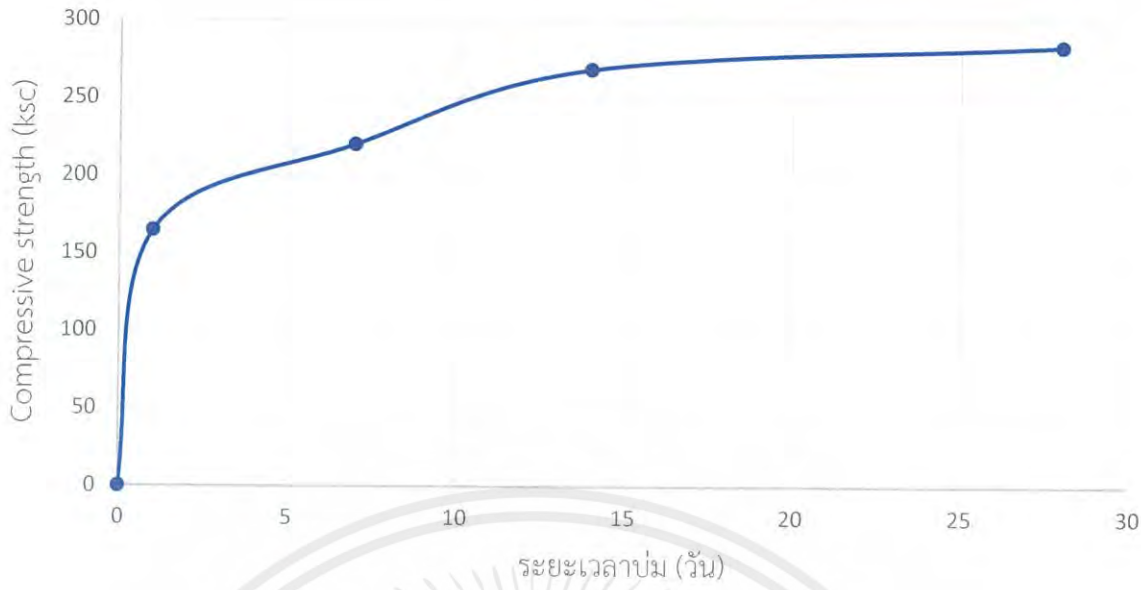
ตารางที่ ผ.3.10 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมงแบบใส่สารหน่วงการก่อตัว

Sample No.	Weight of cement (g)	Weight of sand (g)	Water content (%)	Volume of water (cc)	D_0 (cm)	D_1 (cm)	Flow percentage (%)
1	150	412.5	15.9	89	10.0	12.08	20.8
2	150	412.5	15.5	87	10.0	10.86	8.6

ตารางที่ ผ.3.11 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ทุกประเภท

Type of sample	Water content (%)
Ordinary Portland cement type 1	14.85
0-hr recycled Portland cement type 1	14.89
1-hr recycled Portland cement type 1	16.14
2-hr recycled Portland cement type 1	17.84
3-hr recycled Portland cement type 1	16.82
4-hr recycled Portland cement type 1	17.05
5-hr recycled Portland cement type 1	17.81
1-hr recycled Portland cement type 1 cement with admixture	15.69
3-hr recycled Portland cement type 1 cement with admixture	16.06
5-hr recycled Portland cement type 1 cement with admixture	15.55
Ordinary Portland cement type 1 (F.M.=2.75)	11.44
0-hr recycled Portland cement type 1 (F.M.=2.75)	11.25
Ordinary hybrid cement (F.M.=2.75)	10.83
Ordinary hybrid cement	14.36
0-hr recycled hybrid cement (F.M.=2.75)	11.70
0-hr recycled hybrid cement	14.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



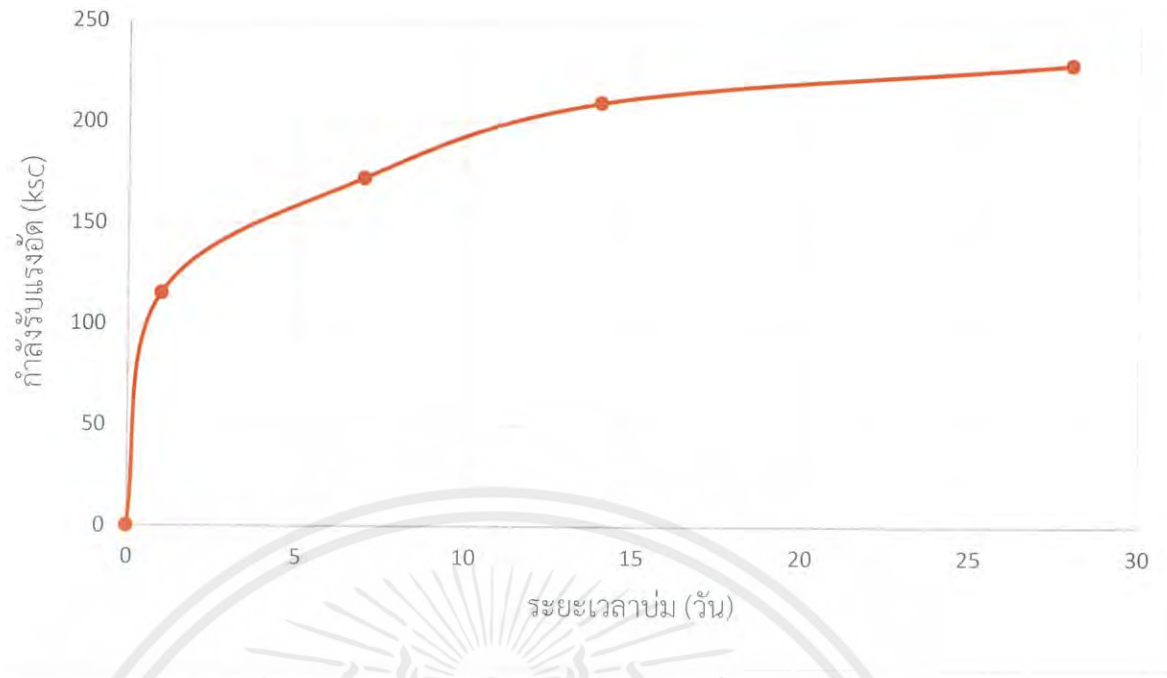
รูปที่ ผ.4.1 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ

ผ.4 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

ตารางที่ ผ.4.1 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.264	1	39.21	3997.5	159.90	164.8
2	25	0.264	1	40.56	4135	165.40	
3	25	0.267	1	41.47	4227.5	169.10	
4	25	0.272	7	52.87	5390	215.60	220.2
5	25	0.266	7	55.13	5620	224.80	
6	25	0.267	7	54.07	5512.5	220.50	
7	25	0.263	14	67.56	6687.5	267.50	268.58
8	25	0.261	14	66.10	6738.5	269.54	
9	25	0.262	14	65.90	6717.5	268.70	
10	25	0.261	28	69.28	7062.5	282.65	284.02
11	25	0.261	28	69.65	7100.25	284.01	
12	25	0.265	28	69.99	7135	285.40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

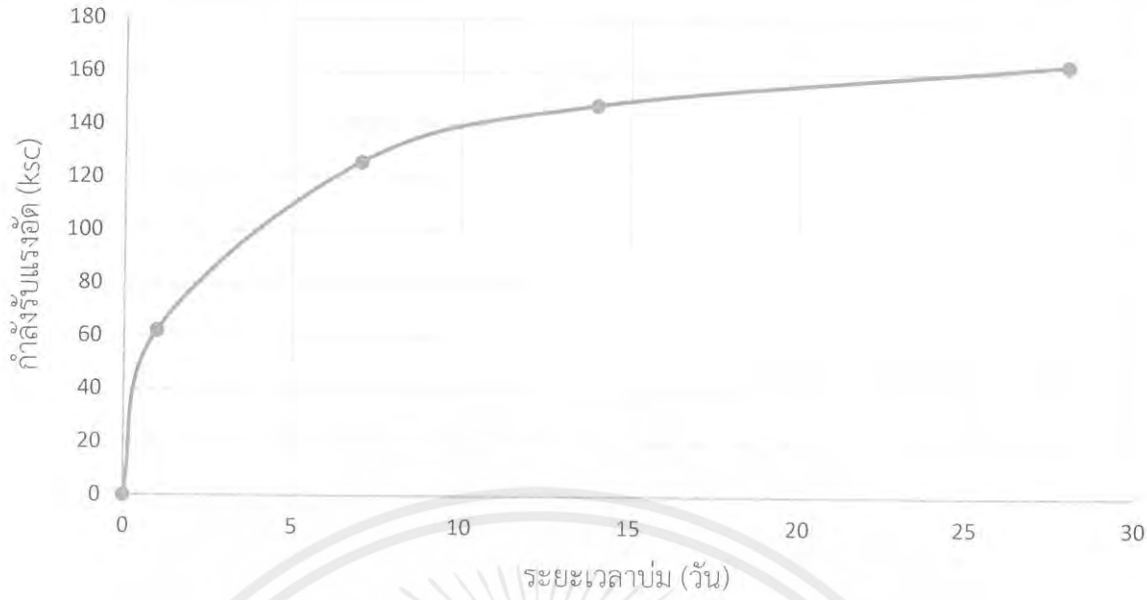


รูปที่ ผ.4.2 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 0 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.2 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 0 ชั่วโมง

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.262	1	29.01	2957.25	118.29	
2	25	0.264	1	27.06	2758.75	110.35	115.32
3	25	0.264	1	28.77	2933.00	117.32	
4	25	0.270	7	41.50	4231.25	169.25	
5	25	0.268	7	41.78	4259.00	170.36	172.32
6	25	0.267	7	43.49	4433.75	177.35	
7	25	0.263	14	51.72	5275.25	211.01	
8	25	0.261	14	50.72	5171.00	206.84	209.7
9	25	0.262	14	51.80	5281.25	211.25	
10	25	0.261	28	56.42	5752.00	230.08	
11	25	0.261	28	55.78	5686.5.0	227.46	229.3
12	25	0.265	28	56.49	5759.00	230.36	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

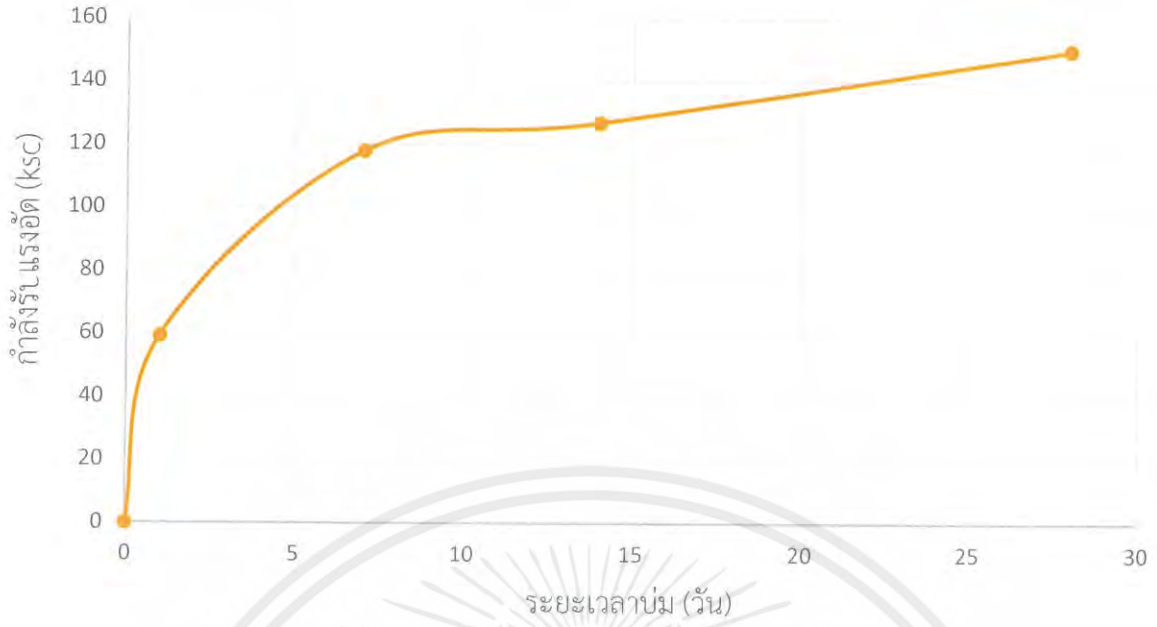


รูปที่ ผ.4.3 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.3 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมง

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.263	1	14.84	1513.00	60.52	62.17
2	25	0.265	1	15.88	1618.50	64.74	
3	25	0.266	1	15.02	1531.25	61.25	
4	25	0.270	7	30.01	3058.75	122.35	125.95
5	25	0.267	7	31.99	3261.00	130.44	
6	25	0.267	7	30.67	3126.50	125.06	
7	25	0.263	14	36.13	3682.50	147.30	147.67
8	25	0.265	14	36.31	3701.50	148.06	
9	25	0.262	14	36.21	3691.25	147.65	
10	25	0.260	28	40.27	4104.75	164.19	163.28
11	25	0.261	28	39.79	4056.25	162.25	
12	25	0.265	28	40.07	4085.00	163.40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

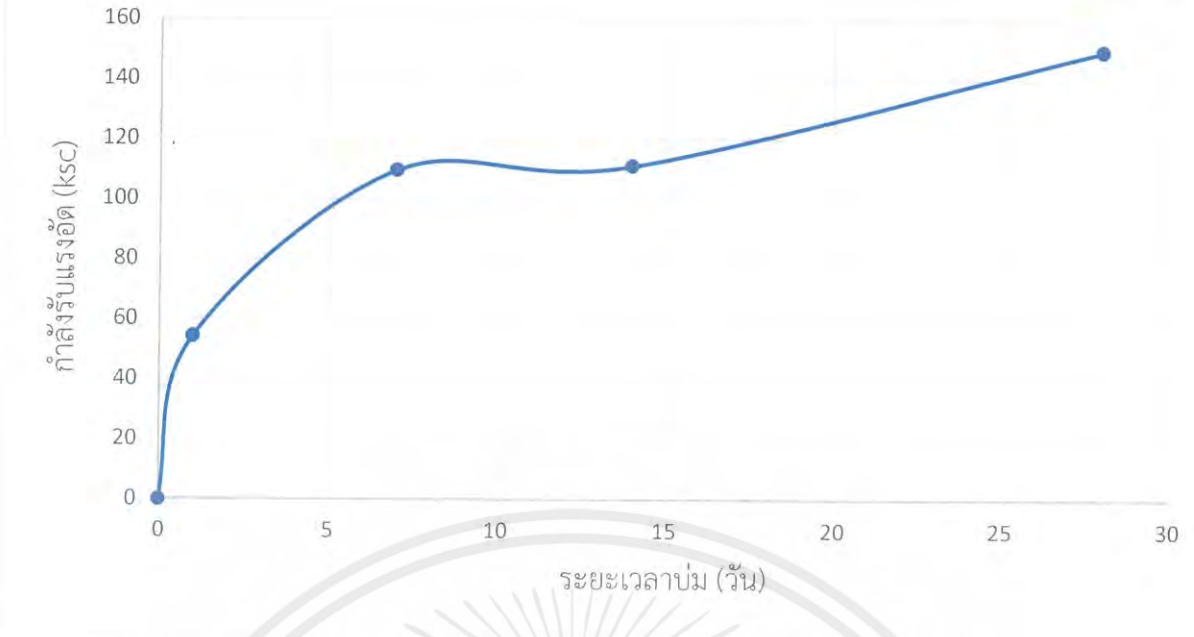


รูปที่ ผ.4.4 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 2 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.4 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 2 ชั่วโมง

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.262	1	14.29	1456.25	58.25	59.29
2	25	0.264	1	14.54	1482.50	59.30	
3	25	0.265	1	14.79	1508.00	60.32	
4	25	0.272	7	28.51	2906.25	116.25	117.96
5	25	0.268	7	29.44	3000.75	120.03	
6	25	0.267	7	28.84	2940.00	117.60	
7	25	0.263	14	30.72	3131.50	125.26	126.96
8	25	0.260	14	31.24	3184.00	127.36	
9	25	0.262	14	31.46	3206.50	128.26	
10	25	0.261	28	35.98	3667.50	146.70	150
11	25	0.261	28	37.35	3807.50	152.30	
12	25	0.264	28	37.03	3775.00	151.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

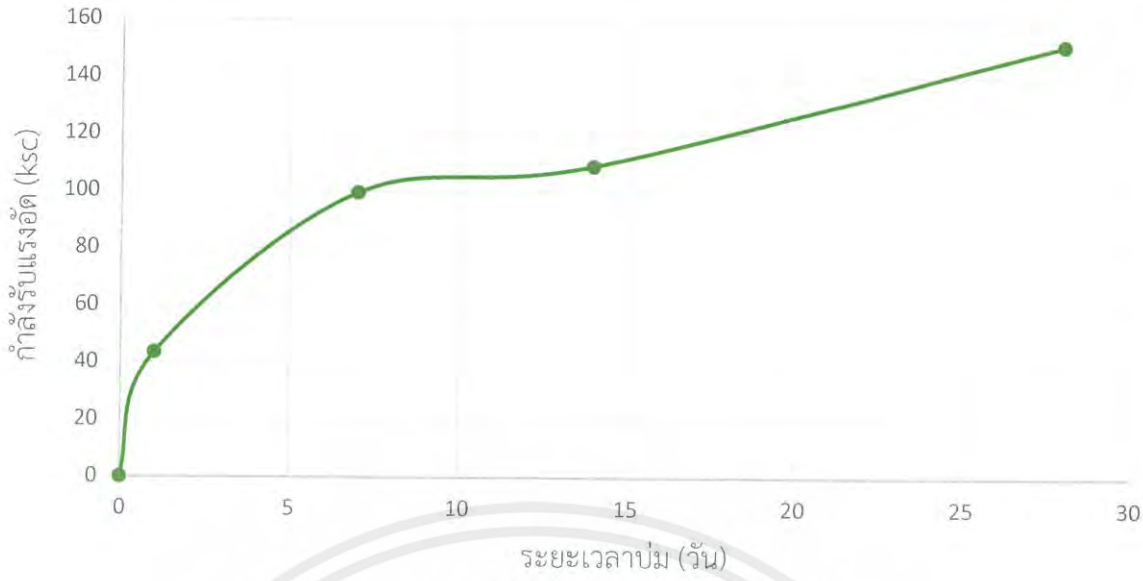


รูปที่ ผ.4.5 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.5 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 3 ชั่วโมง

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.263	1	13.83	1409.75	56.39	54.23
2	25	0.264	1	12.83	1307.50	52.30	
3	25	0.260	1	13.24	1350.00	54.00	
4	25	0.272	7	27.98	2851.75	114.07	109.6
5	25	0.266	7	26.61	2712.50	108.50	
6	25	0.265	7	26.05	2655.75	106.23	
7	25	0.263	14	27.09	2761.25	110.45	111.12
8	25	0.261	14	27.04	2756.50	110.26	
9	25	0.260	14	27.63	2816.25	112.65	
10	25	0.261	28	35.91	3660.25	146.41	149.42
11	25	0.263	28	36.65	3735.50	149.42	
12	25	0.265	28	37.33	3805.00	152.20	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

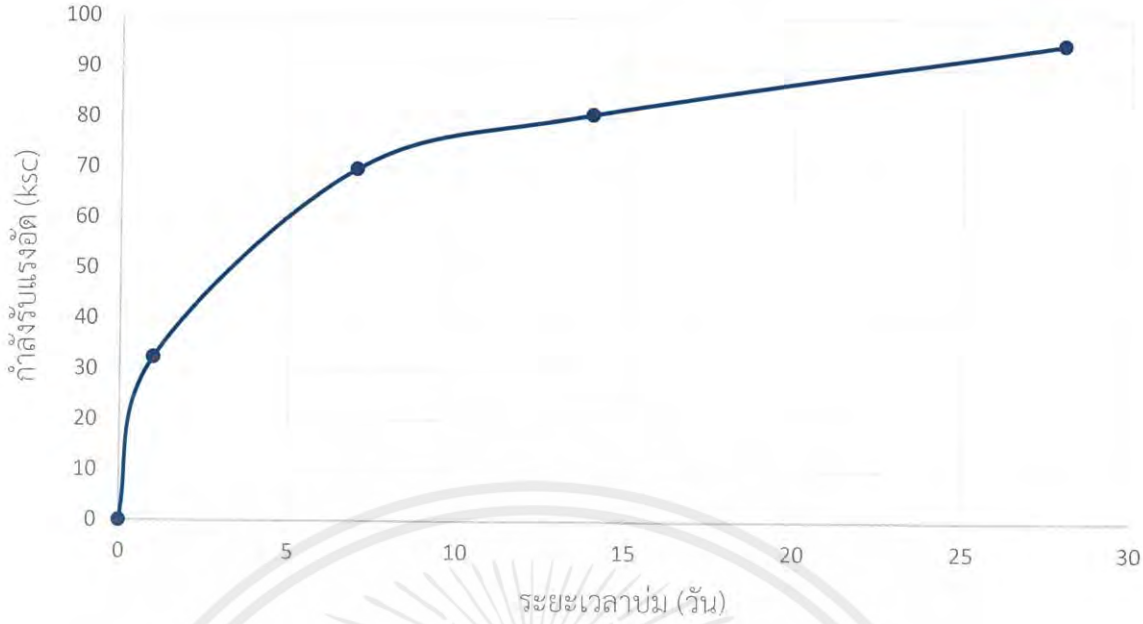


รูปที่ ผ.4.6 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 4 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.6 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 4 ชั่วโมง

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.262	1	10.60	1080.75	43.23	43.48
2	25	0.263	1	10.44	1064.00	42.56	
3	25	0.267	1	10.95	1116.25	44.65	
4	25	0.270	7	24.59	2506.25	100.25	99.39
5	25	0.265	7	24.44	2491.75	99.67	
6	25	0.267	7	24.10	2456.25	98.25	
7	25	0.262	14	26.94	2745.75	109.83	108.91
8	25	0.261	14	26.30	2681.25	107.25	
9	25	0.262	14	26.89	2741.25	109.65	
10	25	0.260	28	36.09	3679.00	147.16	151.31
11	25	0.261	28	36.84	3755.75	150.23	
12	25	0.265	28	38.39	3913.50	156.54	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

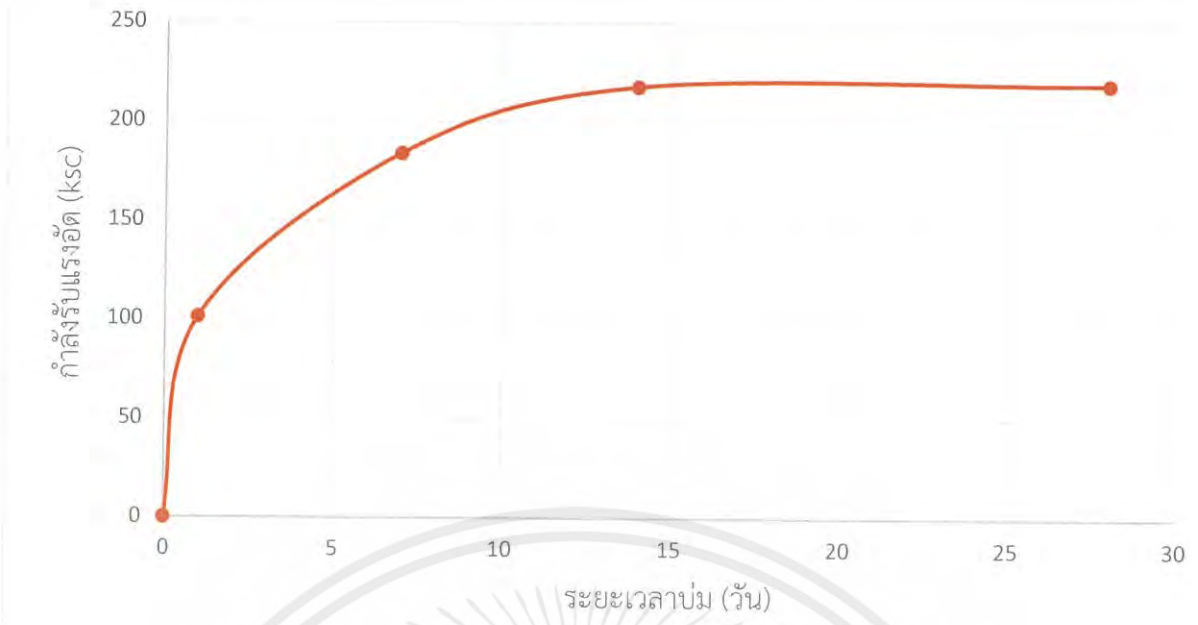


รูปที่ ผ.4.7 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 5 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.7 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมง

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.266	1	7.49	764.00	30.56	32.38
2	25	0.264	1	7.68	783.00	31.32	
3	25	0.266	1	8.65	881.50	35.26	
4	25	0.272	7	18.09	1844.25	73.77	69.76
5	25	0.265	7	16.74	1706.25	68.25	
6	25	0.267	7	16.50	1681.50	67.26	
7	25	0.267	14	20.29	2068.25	82.73	80.75
8	25	0.261	14	19.93	2031.50	81.26	
9	25	0.260	14	19.19	1956.50	78.26	
10	25	0.261	28	22.40	2283.50	91.34	94.9
11	25	0.261	28	23.61	2406.50	96.26	
12	25	0.265	28	23.81	2427.50	97.10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

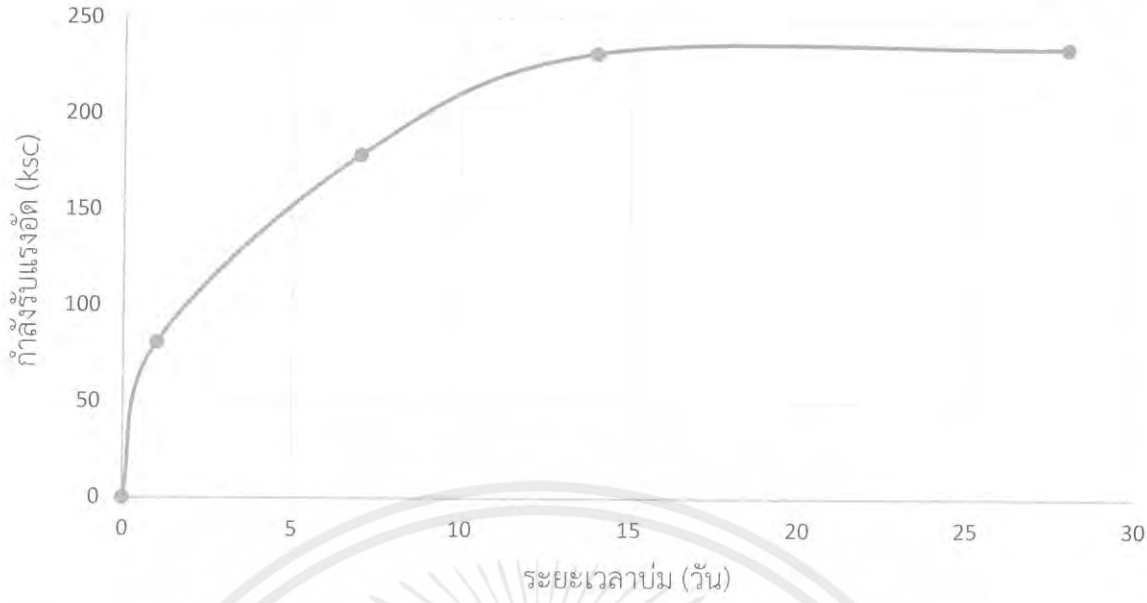


รูปที่ ผ.4.8 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 1 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่ม

ตารางที่ ผ.4.8 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 1 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่ม

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.266	1	24.77	2524.75	100.99	101.22
2	25	0.268	1	24.60	2508.00	100.32	
3	25	0.268	1	25.10	2558.75	102.35	
4	25	0.271	7	45.44	4631.50	185.26	183.85
5	25	0.269	7	44.65	4551.50	182.06	
6	25	0.272	7	45.18	4605.75	184.23	
7	25	0.279	14	53.10	5413.00	216.52	217.7
8	25	0.276	14	53.21	5424.00	216.96	
9	25	0.274	14	53.86	5490.50	219.62	
10	25	0.277	28	53.76	5480.00	219.20	219.38
11	25	0.270	28	53.62	5465.50	218.62	
12	25	0.274	28	54.03	5508.00	220.32	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

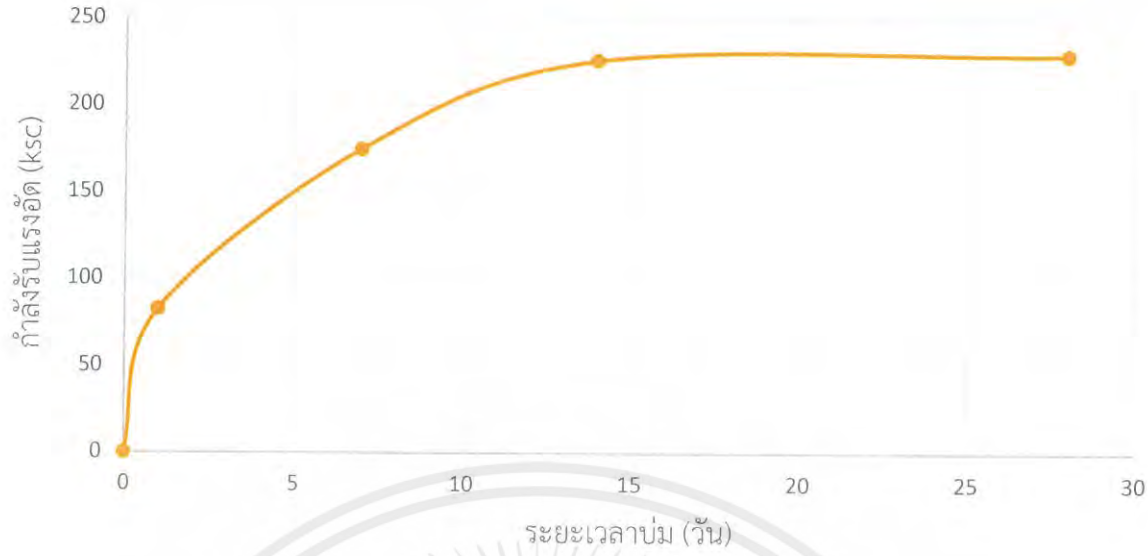


รูปที่ ผ.4.9 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 3 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่ม

ตารางที่ ผ.4.9 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 3 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่ม

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.255	1	19.77	2015.75	80.63	81.17
2	25	0.257	1	19.68	2006.50	80.26	
3	25	0.256	1	20.26	2065.50	82.62	
4	25	0.268	7	43.56	4440.75	177.63	178.51
5	25	0.267	7	44.07	4492.50	179.70	
6	25	0.267	7	43.70	4455.00	178.20	
7	25	0.272	14	57.86	5898.00	235.92	231.76
8	25	0.270	14	56.06	5715.00	228.60	
9	25	0.268	14	56.59	5769.00	230.76	
10	25	0.271	28	57.60	5872.00	234.88	234.63
11	25	0.273	28	58.04	5916.25	236.65	
12	25	0.270	28	56.99	5809.00	232.36	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

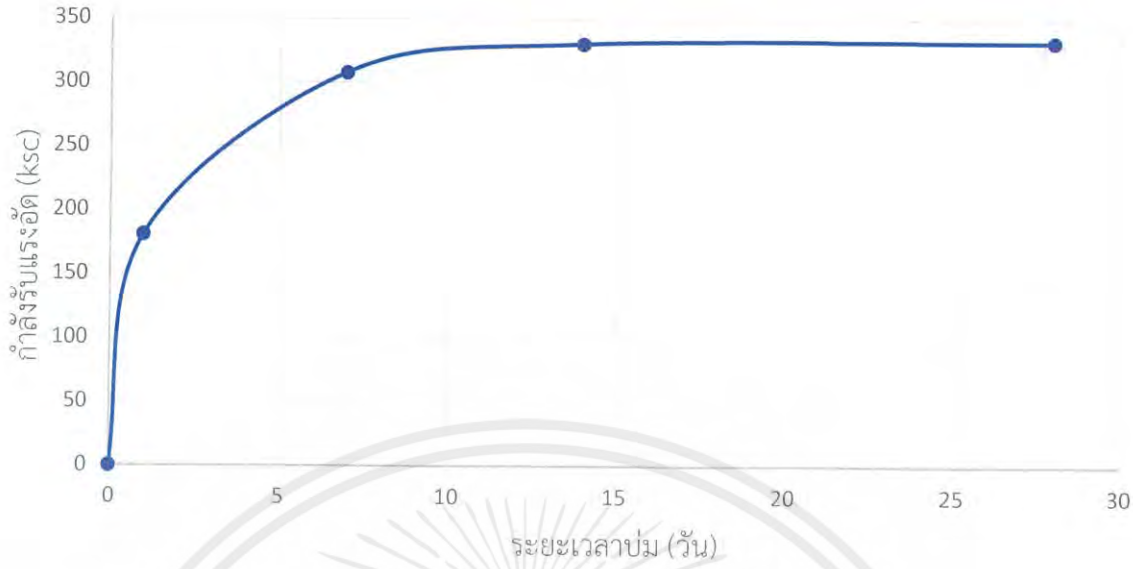


รูปที่ ผ.4.10 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่ที่อายุ 5 ชั่วโมง

ตารางที่ ผ.4.10 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่อายุ 5 ชั่วโมงแบบใส่สารผสมเพิ่ม

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.262	1	19.68	2006.00	80.24	82.49
2	25	0.264	1	20.01	2040.00	81.60	
3	25	0.265	1	21.00	2140.75	85.63	
4	25	0.272	7	43.07	4390.50	175.62	174.56
5	25	0.268	7	42.85	4368.50	174.74	
6	25	0.267	7	42.51	4333.00	173.32	
7	25	0.263	14	55.06	5613.00	224.52	225.93
8	25	0.260	14	55.09	5615.50	224.62	
9	25	0.262	14	56.08	5716.25	228.65	
10	25	0.261	28	57.82	5894.25	235.77	229.26
11	25	0.261	28	55.83	5691.25	227.65	
12	25	0.264	28	55.02	5609.00	224.36	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

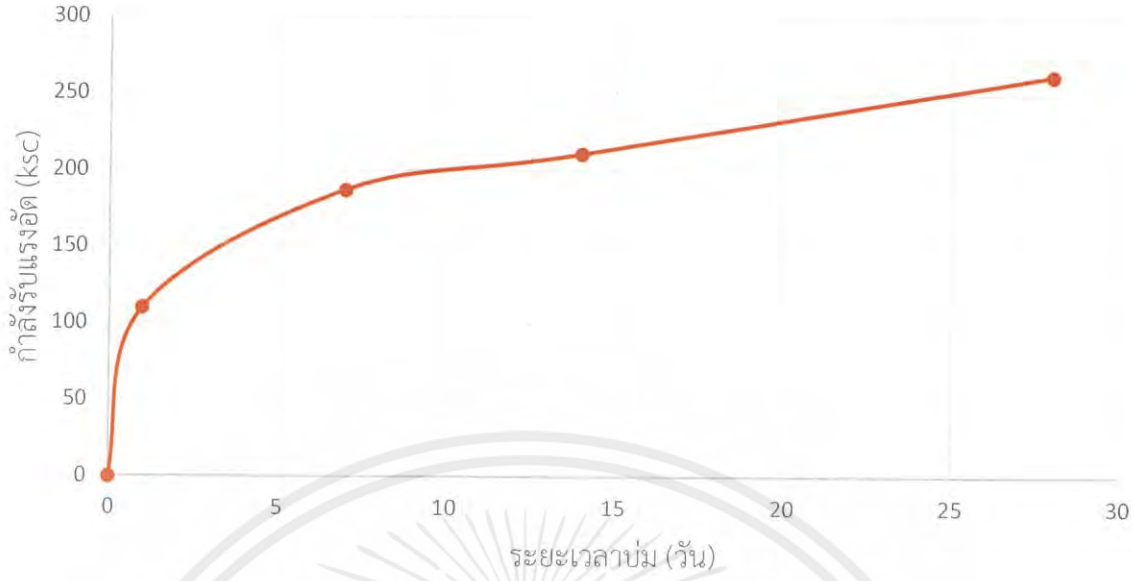


รูปที่ ผ.4.11 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริด โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

ตารางที่ ผ.4.11 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริด โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.266	1	43.77	4462.00	178.48	181.12
2	25	0.268	1	44.30	4515.50	180.62	
3	25	0.268	1	45.19	4606.50	184.26	
4	25	0.271	7	76.23	7770.50	310.82	307.9
5	25	0.269	7	75.45	7691.25	307.65	
6	25	0.272	7	74.86	7630.75	305.23	
7	25	0.279	14	81.65	8323.50	332.94	330.55
8	25	0.276	14	81.09	8266.25	330.65	
9	25	0.274	14	80.46	8201.50	328.06	
10	25	0.277	28	81.12	8269.00	330.76	332.45
11	25	0.270	28	81.51	8308.50	332.34	
12	25	0.274	28	81.97	8356.25	334.25	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

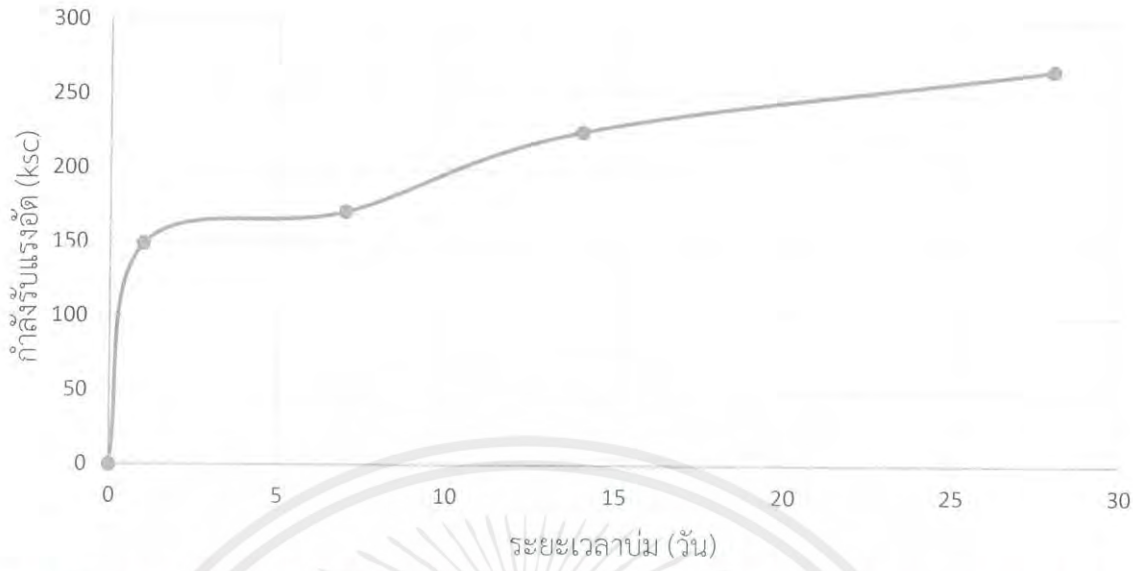


รูปที่ ผ.4.12 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริด โดยใช้ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100

ตารางที่ ผ.4.12 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริด โดยใช้ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.255	1	26.01	2651.25	106.05	110
2	25	0.257	1	27.55	2808.00	112.32	
3	25	0.256	1	27.38	2790.75	111.63	
4	25	0.268	7	45.54	4642.50	185.70	186.99
5	25	0.267	7	45.78	4666.25	186.65	
6	25	0.267	7	46.26	4715.50	188.62	
7	25	0.272	14	50.84	5182.75	207.31	210.73
8	25	0.270	14	51.90	5290.50	211.62	
9	25	0.268	14	52.30	5331.50	213.26	
10	25	0.271	28	65.58	6684.75	267.39	262.11
11	25	0.273	28	63.84	6508.00	260.32	
12	25	0.270	28	63.43	6465.50	258.62	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

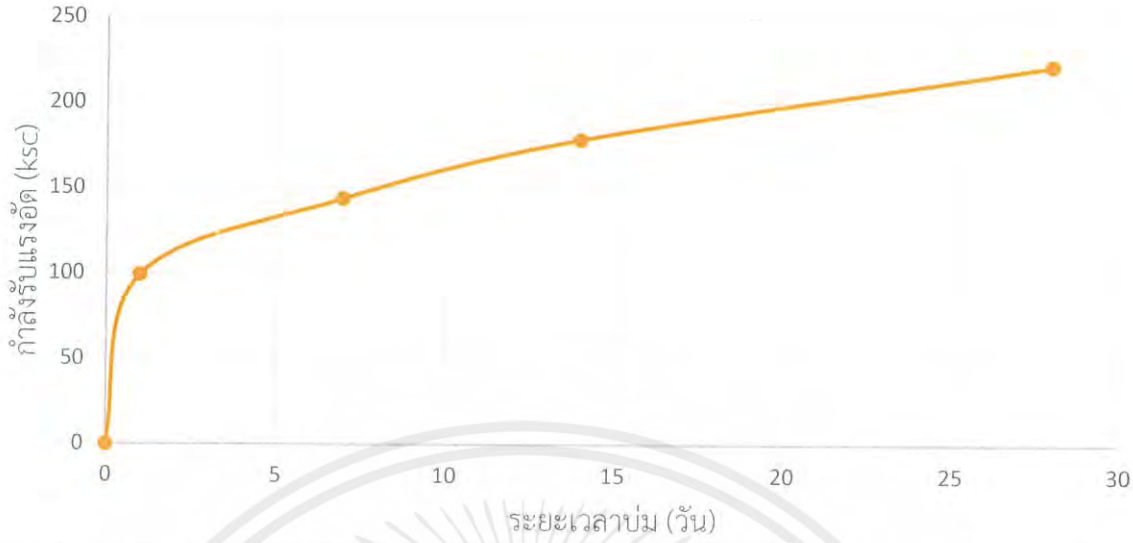


รูปที่ ผ.4.13 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

ตารางที่ ผ.4.13 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.262	1	37.80	3853.25	154.13	148.7
2	25	0.264	1	35.15	3583.00	143.32	
3	25	0.265	1	36.46	3716.25	148.65	
4	25	0.272	7	42.61	4344.00	173.76	170.56
5	25	0.268	7	41.28	4208.00	168.32	
6	25	0.267	7	41.59	4240.00	169.60	
7	25	0.263	14	55.75	5682.75	227.31	224.81
8	25	0.260	14	55.48	5655.75	226.23	
9	25	0.262	14	54.17	5522.25	220.89	
10	25	0.261	28	63.93	6516.75	260.67	266.74
11	25	0.261	28	67.37	6867.75	274.71	
12	25	0.264	28	64.95	6621.00	264.84	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

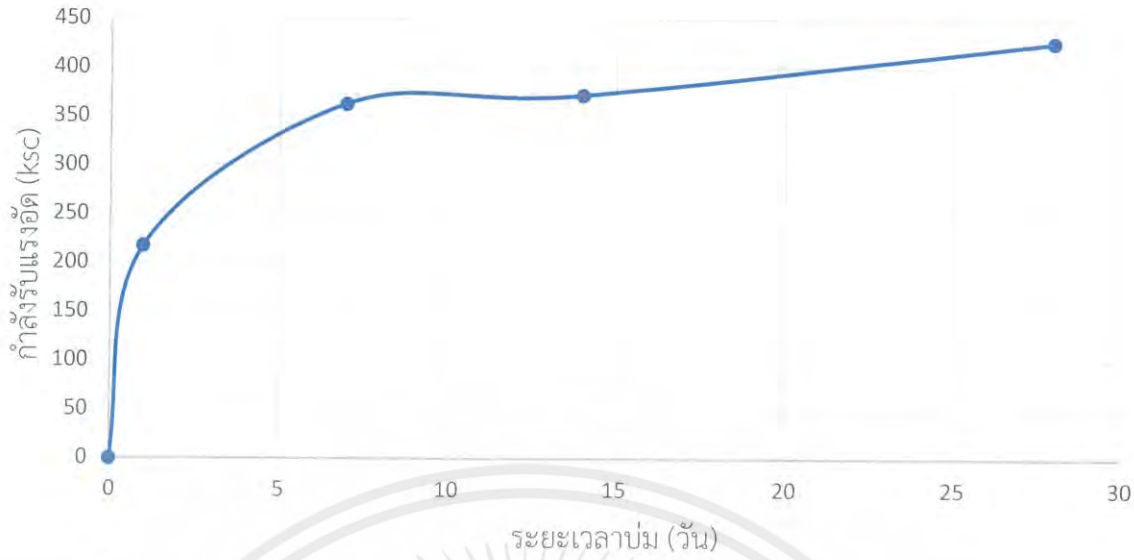


รูปที่ ผ.4.14 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100

ตารางที่ ผ.4.14 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮบริดนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ขนาดคละที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.263	1	23.30	2375.50	95.02	99.2
2	25	0.264	1	25.09	2558.00	102.32	
3	25	0.260	1	24.59	2506.50	100.26	
4	25	0.272	7	34.77	3544.25	141.77	143.94
5	25	0.266	7	34.87	3555.00	142.20	
6	25	0.265	7	36.26	3696.25	147.85	
7	25	0.263	14	44.43	4529.00	181.16	178.71
8	25	0.261	14	43.00	4383.00	175.32	
9	25	0.260	14	44.06	4491.25	179.65	
10	25	0.261	28	53.92	5496.00	219.84	222.21
11	25	0.263	28	54.03	5508.00	220.32	
12	25	0.265	28	55.54	5661.75	226.47	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.4.15 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

ตารางที่ ผ.4.15 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.262	1	54.24	5529.25	221.17	217.48
2	25	0.263	1	53.05	5408.00	216.32	
3	25	0.267	1	52.72	5373.75	214.95	
4	25	0.270	7	89.10	9082.50	363.30	363.11
5	25	0.265	7	89.57	9130.00	365.20	
6	25	0.267	7	88.49	9020.75	360.83	
7	25	0.262	14	91.46	9323.50	372.94	372.27
8	25	0.261	14	92.13	9391.00	375.64	
9	25	0.262	14	90.31	9205.75	368.23	
10	25	0.260	28	106.86	10893.00	435.72	426.78
11	25	0.261	28	103.91	10591.75	423.67	
12	25	0.265	28	103.24	10523.75	420.95	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ผ.4.16 กราฟแสดงกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

ตารางที่ ผ.4.16 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ขนาดคละที่ Fineness Modulus 2.75

Sample No.	Section area (cm^2)	Weight (kg)	Age (days)	Ultimate load (kN)	Ultimate load (kg)	Compressive strength (ksc)	Average
1	25	0.266	1	34.49	3516.00	140.64	140.82
2	25	0.264	1	33.26	3390.50	135.62	
3	25	0.266	1	35.86	3655.00	146.20	
4	25	0.272	7	44.58	4544.00	181.76	183.89
5	25	0.265	7	44.24	4509.25	180.37	
6	25	0.267	7	46.48	4738.50	189.54	
7	25	0.267	14	56.72	5781.75	231.27	232.52
8	25	0.261	14	56.07	5716.00	228.64	
9	25	0.260	14	58.28	5941.25	237.65	
10	25	0.261	28	69.75	7110.00	284.40	286.17
11	25	0.261	28	69.74	7109.00	284.36	
12	25	0.265	28	71.06	7243.75	289.75	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4.17 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ทุกประเภท

Type of sample	Age (day)			
	1	7	14	28
Ordinary Portland cement	164.88	220.20	268.58	284.02
0-hr recycled Portland cement	115.32	172.32	209.70	229.30
1-hr recycled Portland cement	62.17	125.95	147.67	163.28
2-hr recycled Portland cement	59.29	117.96	126.96	150.00
3-hr recycled Portland cement	54.23	109.60	111.12	149.42
4-hr recycled Portland cement	43.48	99.39	108.91	151.31
5-hr recycled Portland cement	32.38	69.76	80.75	94.90
1-hr recycled Portland cement with admixture	101.22	183.85	217.70	219.38
3-hr recycled Portland cement with admixture	81.17	178.51	231.76	234.63
5-hr recycled Portland cement with admixture	82.49	174.56	225.93	229.26
Ordinary hybrid cement with Fineness modulus 2.75	181.12	307.90	330.55	332.45
Ordinary hybrid cement with sand passing though sieve No.50 but remaining on sieve No.100	110.00	186.99	210.73	262.11
0-hr recycled Hybrid cement with Fineness modulus 2.75	148.70	170.56	224.81	266.74
0-hr recycled Hybrid cement with sand passing though Sieve No.50 but remaining on sieve No.100	99.20	143.94	178.71	222.21
Ordinary Portland cement with Fineness Modulus 2.75	217.48	363.11	372.27	426.78
0-hr recycled Portland cement with Fineness Modulus 2.75	140.82	183.89	232.52	286.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายธนพนธ์ เลิศวิภาภัทร
วัน เดือน ปีเกิด	4 กันยายน 2539
ที่อยู่	260/163 ถนนฉัตรไชย ต.สบตุ๋ย อ.เมืองลำปาง จ.ลำปาง 52100
โทร	087-789-6955
Email	l_thanapon@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนลำปางกัลยาณี
ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายวิภู กรอบบาง
วัน เดือน ปีเกิด	28 กันยายน 2539
ที่อยู่	79/231 ต.บางพลับ อ.บางเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
โทร	086-409-6505
Email	tletle.12@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี
ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล	นายสันต์ภพ รักทองสุข
วัน เดือน ปีเกิด	10 มีนาคม 2540
ที่อยู่	15/20 หมู่4 ต.สุรศักดิ์ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทร	088-617-7177
Email	pecasso_buzz@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญศรีราชา
ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ชั้นปีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้